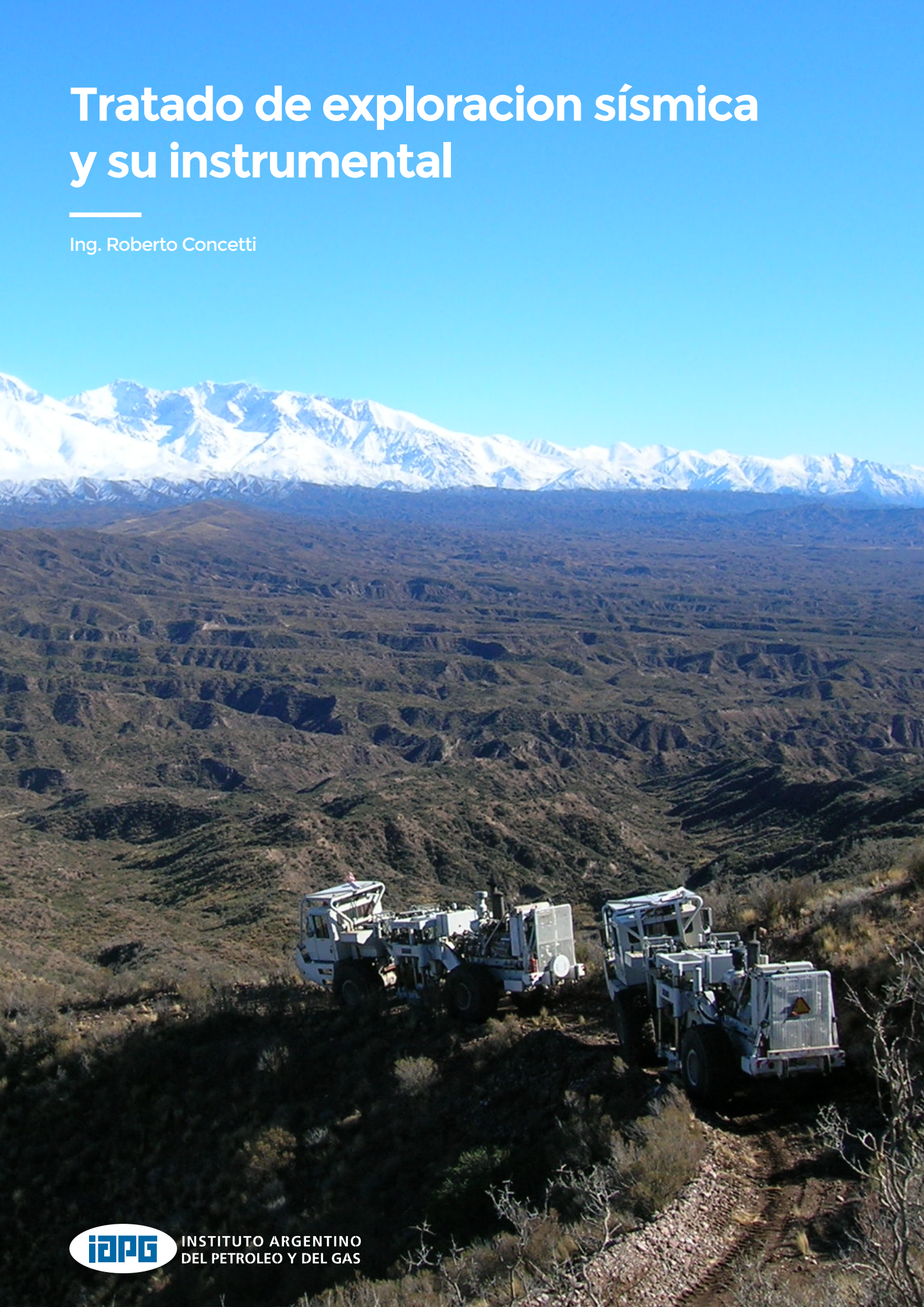
Tratado de exploracion sísmica y su instrumental

Ing. Roberto Concetti



INSTITUTO ARGENTINO
DEL PETROLEO Y DEL GAS

Concetti, Pacífico Roberto
Tratado de exploración sísmica y su instrumental / Pacífico Roberto Concetti. - 1a ed - Ciudad Autónoma de Buenos Aires : Instituto Argentino del Petróleo y del Gas, 2024.
Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga
ISBN 978-987-48865-2-1

1. Geología. I. Título.
CDD 551.22

Autor: Pacífico Roberto Concetti
© Instituto Argentino del Petróleo y del Gas
Queda hecho el depósito que establece la Ley 11.723
Reservados todos los derechos

Los contenidos de los trabajos técnicos incluidos en esta obra expresan exclusivamente la opinón de sus autores quienes han consentido al Editor y al Instituto Argentino del Petróleo y del Gas (IAPG) su incorporación en la misma por lo que se encuentran sujetos a los correspondientes derechos de propiedad intelectual e industrial.
La reproducción, distribución, explotación, transformación, puesta a disposición y/o comunicación pública, ya sea a título oneroso o gratuito, no autorizadas de tales contenidos constituye una infracción de los derechos de propiedad intelectual y/o industrial de sus titulares y podrá dar ejecución de las acciones judiciales o extrajudiciales que pudieran corresponder en el ejercicio de sus derechos.



Tratado de Exploracion Sísmica y su Instrumental

Autor

Por: Pacífico Roberto Concetti*

*Ing., en Telecomunicaciones, Universidad Nacional de La Plata, Ing., en Petróleo especialidad: Geofísica, Universidad Nacional de Buenos Aires

Nota del autor

Este tratado contiene muchos artículos que he escrito durante 48 años de trabajo en la actividad sísmica en el país y en el exterior, y la "pandemia" con su encierro, me permitió ensamblarlos y relacionar diferentes temas para transitarlos sin demasiada dificultad. También he tenido que actualizarme sobre el instrumental que hoy está siendo empleado y que, seguramente, cuando se edite este tratado, ya estará desactualizado. Lo verdaderamente importante es que: los conceptos geofísicos que aquí se intentan justificar, no han variado prácticamente con los años y la evolución técnica en la electrónica y telecomunicaciones en particular, está haciendo posible ponerlos en operación. En otras palabras, la tecnología permite hoy utilizar instrumental y métodos que fueron previstos en teoría hace mucho tiempo, pero que no pudieron ser implementados por falta de un mayor grado de integración, especialmente en las Telecomunicaciones.

Finalmente he podido juntar mucha información que no suele encontrarse reunida para poder comprender un tema geofísico, sin necesidad de recurrir a consultas en bibliografías de otras ciencias, que interrumpen la continuidad del entrenamiento.

Bastantes veces he dictado cursos de capacitación técnica en Compañías de Servicios Símicos y Petroleras y me he encontrado con una gran variedad de niveles técnicos entre los participantes. Por esa razón este manual debería ser leído como si fuera el libro "Rayuela" de Julio Cortázar, a criterio del lector, podría pasar de un capítulo a otro no consecutivo, si los temas tratados ya son conocidos. Por ejemplo: un geólogo o un geofísico interesado en el instrumental sísmico, no necesitaría leer el resumen de "Introducción a la Geología y/o Geofísica" ya que seguramente bien conoce lo que he escrito, pero a los que no han tenido a esta ciencia en sus carreras, esos capítulos justifican donde y porque exploramos hidrocarburos.

Muchas gracias a quien se anime a leer estos apuntes.

Pacífico Roberto Concetti

Índice Temario

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN A LA GEOLOGÍA…….....12
¿Qué estudia la geología?
El Planeta Tierra y su composición.
- Corteza Terrestre
- Corteza Oceánica
- El Manto Superior
- Manto Medio o Zona de Transición
- Manto Inferior
- Discontinuidad de Gutenberg
- Núcleo Externo
- Núcleo Interno

Tectónica de Placas
Rocas de la Corteza Terrestre
- Rocas Sedimentarias
- Rocas Magmáticas
- Rocas Metamórficas

Cuencas Sedimentarias
- Trampas Estructurales
- Trampas Estratigráficas
- Trampas Combinadas

CAPITULO 2

INTRODUCCIÓN A LA GEOFISICA – Geodesia y Topografía…….....….29
¿Qué estudia la geofísica?
Geodesia y Topografía
Antecedentes
La superficie del Planeta Tierra
El Geoide
El Elipsoide
Datum
Coordenadas Geográficas
Coordenadas Geocéntricas
Coordenadas Astronómicas
Altitud sobre el Geoide y el Elipsoide
Proyecciones Planas de la Superficie de la Tierra
- UTM: Universal Transversa Mercator

Proyecciones en la Argentina
Posicionamiento Satelital
- El G.P.S
  - Principio de las medidas
  - C/A Code
  - Orbita Satelital
  - Acción de la Ionósfera
  - Dilución de la Precisión
  - Selección de Precisión
  - Resumen de errores de medida
  - P Code

RTK y RTX
Fast Static

CAPITULO 3
INTRODUCCION A LA ADQUISICIÓN SÍSMICA- 1…….....55
Introducción
La Adquisición Sísmica
El Método Sísmico
La Energía Sísmica
Nociones de Elasticidad
Elasticidad de Forma
Elasticidad de Volumen
Ondas Sísmicas P
Ondas Sísmicas S
Velocidad de las Ondas Sísmicas
Impedancia Acústica
Perfil Sónico
Nociones de Óptica- Leyes de Snell
Reflexiones y Refracciones
Tiempos de arribos al Receptor
Sísmica de Refracción
Ondas Periódicas
Ondas sinusoidales
La Función Sync
Series de Fourier
Transformadas de Fourier
Convolusión
Historia de los métodos sísmicos
Apilamiento (stacking)
Cálculo de cobertura 2D
Correcciones dinámicas
Capas buzantes
Migración 2D
Zona de Fresnel
Sísmica 3D
Superficie imagen (bin)
Definiciones y términos en sísmica 3D
Mapa de cobertura
Fuentes de distorsión de la señal sísmica
Deconvolución

CAPÍTULO 4
INTRODUCCION A LA ADQUISICIÓN SÍSMICA- 2…….....…107
Señales y ruidos en sísmica
Muestreo Espacial
Velocidades Aparentes
Perturbaciones
Arreglos de Recepción
Gráficos F-K
Arreglo de Receptores en Sísmica 3D

Recepción Puntual
Ventajas de la Emisión y Recepción Puntual
Sísmica 3C
Introducción
Corrección NMO en Sísmica 3C
Aportes Geológicos-Geofísicos de la Sísmica 3C
Mejor Definición de Interfaces
Mejor Resolución Vertical
Mejor conocimiento litológico
Detección de Fluidos en Sedimentos
Detección de la Orientación de Fracturas.
Calibración de Ondas P y S.

CAPITULO 5
ESTACIÓN RECEPTORA…….....145
Introducción
Movimiento Armónico Simple
El Receptor Sísmico
Geófonos
Elementos de un geófono
Geófono real
Especificaciones del fabricante
Circuito Eléctrico Equivalente
Ristras de Geófonos
Ristras Balanceadas y Desbalanceadas
Rango Dinámico del Geófono
Cables de Registración Sísmica
Mantenimiento de Geófonos y Cables
Geófono de Tres Componentes (3C)
Acelerómetros: MEMS y GASs
Polaridades SEG para Geófonos 3C
Medida de la inclinación de un Sensor (Tilt)
Sercel DSU Tilt Correction

CAPITUO 6
EL INSTRUMENTAL DE ADQUISICIÓN NO TELEMÉTRICO…….....181
Introducción
Historia reciente del instrumental sísmico
Sismógrafo analógico sin grabación de datos
Sismógrafo analógico con grabación magnética analógica
Reproducción magnética analógica
Borrado magnético analógico
Telemetría aplicada a la sísmica
Conversión AD Sigma Delta
Internet aplicado a la sísmica
Sistemas Nodales
El Preamplificador Diferencial
Filtrado analógico
Filtros ideales
Filtros reales

Filtros activos
Conclusión sobre filtrado analógico
Sismógrafo no-Telemétrico. El MDS-10
Multiplexeo de canales sísmicos
Amplificador I.F.P.
Muestreo vs Anti-Alias Filter
Conversor A/D
Cuantificación
Grabación magnética
Códigos de Grabación
Formato SEG D 2.5 Bytes

CAPITULO 7
EL INSTRUMENTAL DE ADQUISICIÓN TELEMÉTRICO Y NODAL.....224
Introducción a la Telemetría
El Conversor A/D Sigma Delta
Ruido de conversión
Funcionamiento del Conversor A/D
El Modulador Sigma Delta
Filtrado Digital
El Sistema Telemétrico I/O System 2
Proceso de "wake up"
Proceso der adquisición
Memoria Mapa
Reformateo a IEEE
Grabación en formato SEG D 4 Bytes
El Sistema Telemétrico con Protocolos de Red. El Sercel 428
Central electrónica
Unidades Remotas
Cables Telemétricos
Red Sísmica Areal
Sistemas Nodales
Generalidades
Clasificación de los sistemas Nodales
Comparación de costos entre Sistemas
Estación receptora Nodal
Sistema Nodal Autónomo: SmartSolo
Unidad Remota IGU-16
Modelo en Bloques del IGU-16
El Geófono DT-SOLO
El Preamplificador del IGU-16
El conversor A/D del IGU-16
Memoria Flash del IGU-16
El GPS del IGU-16
Batería de Li-ion del IGU-16
Regado de Nodos
Lectura de Nodos
Procesado de la lectura de Nodos
Sistema Nodal Autónomo c/QC: Sercel Unite System
Adquisición y grabación de un registro

Recolección de datos
Sistema Nodal con Adquisición en Tiempo Real: RT-2

CAPITULO 8
FUENTES DE ENERGIA SÍSMICA IMPULSIVAS…….....…….....…281
Introducción.
Fase Mínima de La Ondícula Impulsiva.
La Ondícula Impulsiva
El Explosivo
Historia del Explosivo
Operando con Explosivos
Reflexiones Fantasmas
El Detonador
El Detonador Eléctrico Sísmico
Resistencia Eléctrica
Protección antiestática
Carga Pirotécnica
Carga Primaria
Carga Secundaria
Clasificación de los Detonadores
Voltajes y corrientes vagabundas
Efecto antena
Ensayos de Antiestaticidad
Ensayos de Hermeticidad
Ensayo de Impacto
Ensayo de Fuerza
El Detonador Electrónico
Diagrama en Bloques del Detonador
Módulo analógico
Módulo Digital
Módulo de Disparo
Características de Seguridad
Prueba de Explosivos
Explosivos a Comparar
DBX
Cut to Fit
Pentolita I-1000
Adquisición Sísmica comparativa
Evaluación de Resultados
El Blaster
Fuente de Energía de Disparo
Ejemplos
El Sistema SGD de Sercel
El conexionado SGD-S – Sercel 408
Interpretación de las señales
Golpeadores
Introducción
El Digipulse
Fuentes Electromagnéticas
Principio de funcionamiento GeoTon- OnSeis

Componentes del GeoTon
Fuente Eléctrica
Performance GeoTon
Performance OnSeis
Sistema de Disparo SGDS-SP
Sincronismo y Control
El Cañón de Aire Comprimido
Introducción
Llenado del Cañón
Disparo del Cañón
Descarga del Cañón
Despresurización del Cañón
Respuesta Acústica de un solo Cañón
Arreglo de Cañones
Respuesta Acústica del Arreglo
Anclaje de los Cañones.
Referencias

CAPITULO 9
FUENTE DE ENERGÍA SÍSMICA VIBRACIONAL. EL VIBRADOR FÍSICO…..…351
Introducción
Cronología del Vibrador Sísmico
Energía Impulsiva vs Vibracional
El Vibrador Sísmico
Símil eléctrico del circuito Hidráulico
Modelo Hidráulico simplificado
Hold Down Weight
Barridos de Frecuencia
Control de Amplitud del Barrido
Gráfico de Fuerzas
Concepto de "Ground Force" y "Weighted Sum"
Acelerómetros de Plancha y de Masa
Circuito Hidráulico
Nociones de Hidráulica
Generalidades sobre hidráulica y fluidos
El Vibro AHV-IV como referencia
Circuito hidráulico elemental
Circuito actuador activado
La Servoválvula
Motor de Torque (Torque Motor)
Válvula Piloto (Pilot Valve)
Válvula Principal (Main Valve)
Manifold DR
Sensores L.V.D.T.
Acumuladores de Presión (Bladders)
Bomba de Engranajes
Bombas de Pistones Axiales
Válvulas Hidráulicas
Válvulas de distribución
Válvulas de Bloqueo

Válvulas Reguladoras de Presión
Válvulas Reguladoras de Caudal
Ineficiencias del Vibrador Sísmico
Introducción
Diferencia entre "Suma Pesada" (WS) y "Ground forcé" (FG)
Limitaciones de la Servoválvula
Distorsión por Cruce por Cero
Las características del Terreno
Caudal Hidráulico (Q)
Compresibilidad y Pérdidas del Aceite Hidráulico
Dimensiones de la Plancha (BP)
El efecto Plancha – Terreno
Los "Air Bags" de Plancha
Resumen Final
Bibliografía

CAPÍTULO 10
EL CONTROL ELECTRÓNICO DE LOS VIBRADORES……..…. 411
Introducción
Diagrama en bloques del Control Electrónico
Los Controles Electrónicos Pelton y Sercel
Diagrama en Bloques de la Interface Electrónica-Mecánica
Sensores de desplazamiento (L.V.D.T.)
Generador del Barrido de Frecuencia
Sweep and Drive References
Corrección de Fase
Control automático de Amplitud (A.G.C.)
Reporte Radiales Pelton
Interpretación de los PSS de Pelton
VibQC de Pelton
Determinación del Tiempo 0 (T/0)
Conexionado del Encoder Pelton y el Sercel 428
El Control Electrónico Sercel 432 y 464
El Sistema Servo-Mecánico Autoadaptativo
State Loop Control
Servo Control Input
Servo Control Excitation Parameters
El Sistema Sercel Ve 464 y el Sercel 428
Basic Type Set Up
Acquisition Type Set Up
Radio Management
QC Limits
Radio Function, T/0 Management
Menu Bar
Códigos de Estado

CAPITULO 11
EL PROCESO SÍSMICO CON VIBRADORES…….....449
Introducción
Planteo Matemático

Barrido de Frecuencias
Propagación en el subsuelo del Barrido
Instrumental de Correlación
Fase Mínima y Fase Cero
Espectros de Amplitud y Fase
Tipos de Barrido
    Lineales
    Logarítmicos
    Exponenciales
    Barridos "Custom"
Auto correlación Gráfica
Características de la Ondícula de Klauder
Frecuencias Armónicas
    Correlación de Frecuencias Armónicas
TECNICAS DE BARRIDOS SÍSMICOS
    Flip-Flop
    High Fidelity Vibrator System (H.F.V.S.)
    Barridos Simultaneos
    Slip Sweeps

CAPÍTULO 12
POLARIDAD S.E.G. DEL INSTRUMENTAL SÍSMICO…….....….490
Introducción
1. Polaridad del Monitor de medida
2. Convención de Polaridad para Fuentes de Energía Impulsiva
3. Convención de Polaridad para Fuentes de Energía Vibracional
    a. Polaridad de la señal "Weighted Sum"
    b. Polaridad del Operador de Correlación
    c. Determinación de Polaridad con el DSS
    d. Chequeo adicional con el "Pulse Test"

CAPÍTULO 13
COMPARACIÓN DE FUENTES DE ENERGÍA SÍSMICA…….....498
Introducción
Explosivo vs Vibros Pesados vs MiniVibros
Explosivo vs Vibros Pesados vs Golpeador
Minivibros vs Golpeador OnSeis
Explosivo vs Vibradores Pesados vs OnSeis
Conclusiones
    Penetración
    Ancho de Banda
    Relación Señal/Ruido
    Posibilidades y Costos
    Seguridad y Medio Ambiente

CAPITULO 14
MOVIMIENTO DE PARTÍCULAS POR VIBRACIONES SÍSMICAS…….....515
Introducción
Clasificación de las Estructuras
El Instrumento de Medida

Nivel de Presión de Aire
Criterios de Prevención
Estándar Alemán DIN 4150
Estándar Español UNE 22381
Experiencia realizada en Maracaibo, Venezuela
Resumen de Experiencias
Medidas en un Yacimiento en Producción
Distancias de Seguridad adoptadas por algunas Petroleras
Medidas Adicionales a las Vibracionales.

CAPÍTULO 15
LA ESTIMULACIÓN HIDRÁULICA Y LA MICROSÍSMICA.…….....…534
MICROSÍSMICA
Introducción a la Microsísmica
Fundamentos de la Microsísmica
Microsísmica con Geófonos en Pozos
Microsísmica con Geófonos en Superficie
ESTIMULACIÓN HIDRÁULICA
La Formación Vaca Muerta
Perforación Direccional de Pozos
Entubado de Pozos
Operaciones durante la Estimulación Hidráulica
Punzado con Explosivos
Cargas Explosivas Moldeadas
Fracturación Hidráulica
Taponamiento de las Etapas de Fractura
Temores por la Sismicidad generada durante la Estimulación Hidráulica
Bibliografía

ANEXO A
CONCEPTOS BÁSICOS Y UNIDADES……..……559
Masa
Leyes de Newton
Definición de Peso
Hidráulica Básica
Presión Hidrostática
Densidad y Peso específico
Principio de Pascal
Principio de Arquímedes
Ecuación de continuidad de Fluidos en Movimiento
Teorema de Bernoulli
Unidades de Medida
Concepto de Señal y de Sistema Lineal
La Sinusoide
Espectros

ANEXO B

BROCHURES Y ESPECIFICACIONES DEL INSTRUMENTAL MENCIONADO…567
GEÓFONO SMT-24ST
SISTEMA SERCEL 428
SISTEMA NODAL SMARTSOLO
VIBROSEIS INOVA AHV-IV
VIBROSEIS SERCEL NOMAD

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN A LA GEOLOGÍA

¿Qué estudia la Geología?

Geología es la ciencia que estudia la formación de la Tierra, su naturaleza y las transformaciones que llevaron a su actual estado.



Figura 1, la Tierra vista desde el Apollo 17 [8]

Composición Geológica de la Tierra

Nuestro Planeta Tierra, se comenzó a formar hace aproximadamente: 6000 Millones de Años, pero se calcula que hace 4600 Millones de Años, logró finalmente concentrar los gases y el material interestelar que gravitatoriamente se influenciaban, a la forma que actualmente conocemos (su volumen disminuyó diez veces de ayer hasta hoy).
La evolución de la Tierra a través del tiempo se divide en: Eras Geológicas, Períodos y Sub-periodos en función de las importantes transformaciones que se presupone han ocurrido.

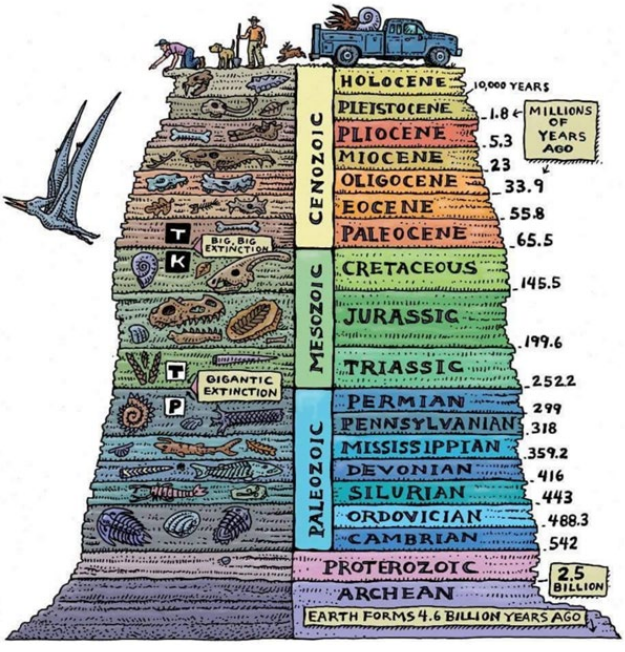


Figura 2, Eras y Periodos geológicos [9]

La forma actual de la Tierra es de un "Geoide" pero puede aproximarse para su desarrollo superficial a un: "Elipsoide de Revolución", en donde el radio menor corresponde a los Polos Norte y Sur y el radio mayor es el que corresponde al Ecuador geográfico.

La composición de la Tierra se muestra en la siguiente figura en donde también se incluyen, en función de la profundidad, el incremento de: Presión (medida en Kilo- Bares), Densidad (medida en Kilogramos / Metro Cúbico) y Temperatura (medida en Grados Centígrados):

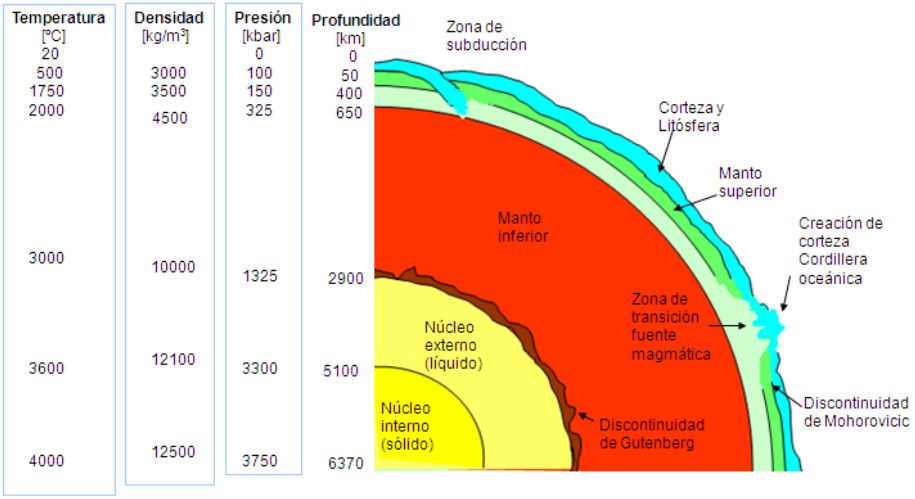


Figura 3, composición de la Tierra [8]

En general se posee conocimiento directo de la formación de la tierra solamente de los primeros 15 km de espesor (corteza terrestre) y se tiene una idea indirecta del resto gracias al comportamiento de las ondas sísmicas, o de anomalías gravitatorias (distribución de densidades), análisis de cuerpos celestes y a simulaciones de laboratorio.

Corteza Terrestre (0 a 50 kilómetros) – Litosfera (litos: frío)

La Corteza constituye la superficie de la Tierra y es la parte más fría de nuestro planeta. Debido a que las rocas frías se deforman lentamente, a esta rígida cáscara externa se la suele llamar: "Litosfera" y también comprende a gran parte del Manto Superior (hasta unos 150 kilómetros).
Debido a importantes diferencias estructurales, la Corteza Terrestre se divide en: Corteza Continental y en Corteza Oceánica.

La corteza continental solo representa la tercera parte de la corteza terrestre y su composición global puede cambiar considerablemente, incluso en cortas distancias. En general la corteza continental superior, se encuentra constituida por rocas cristalinas como el Cuarzo (SiO2) y Feldespatos (silicatos pobres en metal), que flotan sobre la superficie debido a su baja densidad.
A una profundidad entre los 15 y 25 km, presenta una superficie algo imprecisa denominada Discontinuidad de Conrad, que separa la corteza continental superior de la inferior.

La capa inferior de la corteza continental limita con la Discontinuidad de Mohorovicic y contiene rocas muy densas (magmatitas intermedias) que solo se parecen a las rocas de la corteza superior, por su composición química pero que sufrieron gran metamorfosis debido a elevadas presiones.

Corteza Oceánica

La corteza oceánica es distinta a la continental tanto estructuralmente, composición, edad y génesis. Posee un grosor medio inferior a los 10 kilómetros. Investigaciones sísmicas han localizado 4 estratos diferentes en la corteza oceánica. El estrato superior está compuesto por un depósito de arcillas abismales, cuyos finísimos sedimentos procedentes de la erosión continental poseen un espesor de 500 m. Las tres capas inferiores tienen origen plutónico, es decir que son basaltos de diferentes tipos, formados durante la erupción magmática de las dorsales medio-oceánicas. El segundo estrato tiene un espesor de 1,7 Km y sus caprichosas formas se deben al rápido enfriamiento de las lavas basálticas (pillows) magma al tomar contacto con el agua. En el límite que separa la segunda con la tercera capa, aparece un nivel de lava estratificada, repletos de conductos verticales que corresponden a los primitivos canales de aducción de las pillows y que también seria parte de la Discontinuidad de Mohorovicic. El tercer estrato, con 3 km de espesor, está compuesto por gabros estratificados de grano grueso, cuyo lento enfriamiento durante su formación permitió el crecimiento de cristales. La capa inferior o cuarto estrato, está compuesto por peridotitas estratificadas, que paulatinamente van transformándose en las viscosas rocas del manto.

Existe una cadena volcánica o "dorsal oceánica" de 40.000 kilómetros de extensión y que sigue creando corteza a razón de 17 kilómetros cúbicos por año.

La Corteza representa el 1,45% de la masa terrestre.

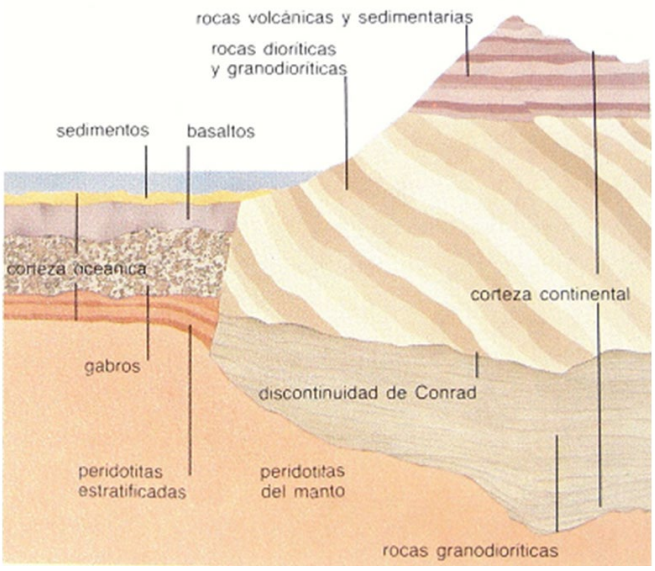


Figura 4, la Corteza Continental y Oceánica [7]

El Manto Superior (50 a 450 kilómetros) – Astenósfera (gr. astenos: débil sin vigor)

El Manto Superior está constituido por diferentes minerales y silicatos. Entre ellos predominan los Olivinos, de color verde, que son refractarios y cristalinos a altas temperaturas. También existen los piroxenos (de color negro) y los silicatos ferrosos, cálcicos y de aluminio. Todos estos elementos conforman la roca del manto denominada: peridoto.
Como consecuencia del rápido incremento de temperatura entre los 100 y 200 km de profundidad, el peridoto llega a su punto de fusión detectado por la baja velocidad de las ondas sísmicas cuando atraviesan dichas capas. De esta capa (denominada Low Velocity Layer) proviene la mayoría de los materiales basalitos fundidos de los volcanes oceánicos. A los olivinos se los puede ver expuesto en superficie cuando formaron parte de cordilleras montañosas erosionadas o debido a erupciones volcánicas, debido a que al ser cristalinos, a altas temperaturas estos no se funden en el magma y se desprenden de él pasando a formar parte de la corteza.
A mayor profundidad aumenta más el punto de fusión de las rocas que la temperatura pero igualmente estos materiales son poco rígidos y fácilmente deformables, de allí lo de astenósfera. El Manto Superior representa el 10,3% de la masa terrestre.

Zona de Transición (450 a 700 kilómetros)

La Zona de Transición, también llamada Manto Medio o Mesosfera, es la fuente de los magmas basálticos. Contiene Calcio, Aluminio y Granate (silicato complejo de aluminio). Esta capa es densa cuando se encuentra fría (debido al granate) pero se torna fluida con la temperatura ya que se funde fácilmente para formar el magma basáltico que puede alcanzar hasta la superficie de la Corteza Terrestre.

La Zona de Transición representa el 7,5% de la masa terrestre.

Manto Inferior (700 a 2700 kilómetros)

El manto inferior contendría principalmente: Silicio, Magnesio y Oxígeno y en menor medida: Hierro, Calcio y Aluminio. Estas deducciones se basan en considerar que se deben encontrar los mismos materiales cósmicos en abundancia tanto en el Sol como en los meteoritos encontrados.
Representa el 49,2% de la masa terrestre.

Discontinuidad de Gutenberg (2700 a 2890 kilómetros)

Es una capa de aproximadamente 200 kilómetros de espesor. Se la diferencia del Núcleo y del Manto Inferior, pues estudios Sísmicos muestran una constitución química diferente a la de estos dos.
Representa el 3% de la masa terrestre.

Núcleo Externo (2890 a 5150 kilómetros)

El Núcleo Externo es un líquido caliente y conductor de la electricidad. Al moverse este líquido conductor como producto de la rotación terrestre, genera que la tierra se convierta en una especie de Dínamo con Polos Magnéticos Norte y Sur que mantienen un sistema electro-magnético terrestre. Según algunos científicos, este líquido contiene 10% de Oxígeno y Azufre disueltos en el Hierro puro fundido que completa su contenido. Este Núcleo es el responsable de las sutiles alteraciones de la rotación de la tierra.
Representa el 30,8% de la masa terrestre.

Núcleo Interno (5150 – 6370 kilómetros)

El Núcleo Interno es sólido y se cree que se ha solidificado como resultado del congelamiento por presión.
Representa el 1,7% de la masa terrestre.

TECTÓNICA DE PLACAS

Nuestro interés sísmico se basará en estudiar los primeros kilómetros de la corteza terrestre.
La actual conformación de la superficie terrestre es muy distinta a la primitiva. En principio existía un solo continente, denominado "Pangea" rodeado por un único mar y que debido al vulcanismo en la "dorsal oceánica", el continente se resquebrajó y los fragmentos (placas) comenzaron a moverse hasta el estado actual, que nos muestra a cinco continentes separados por diferentes mares.

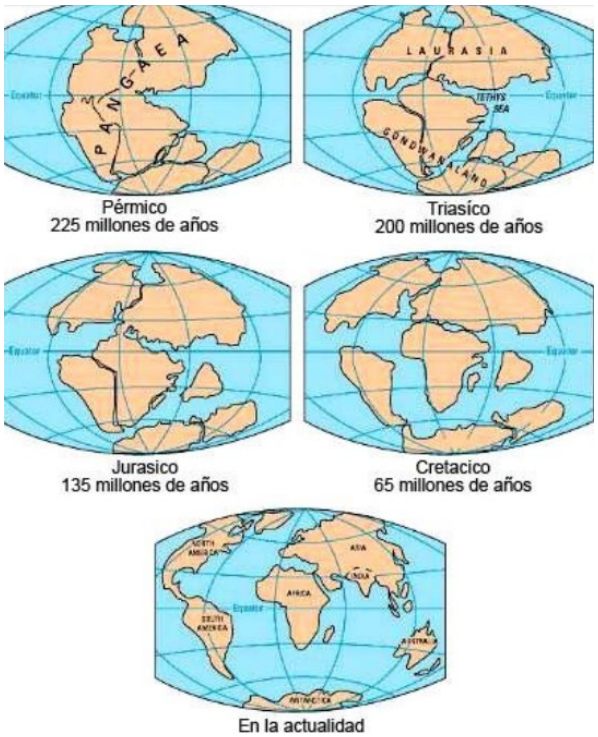


Figura 5, movimiento de los continentes en diferentes Períodos Geológicos [8]

Las Placas tectónicas se vinculan a la creación y hundimiento de corteza por deslizamiento de la "Litosfera" sobre el Manto en forma continua, es decir la litosfera se comporta como un reodo o fluido (Reodicidad: "todo cuerpo sometido a presión durante mucho tiempo se comporta como un fluido"), que fluye emergiendo desde la "dorsal oceánica" y aumenta de espesor hasta que su densidad sobrepasa a la del Manto lo que hace que se sumerja abruptamente hacia el interior de la tierra enfriando el manto que se encuentra por debajo de los 100 Km. (en las costas del Pacífico para nuestro continente).
Estas placas contienen a los continentes los cuales son sometidos a una "deriva continental".
África fue el centro del Supercontinente "Pangea" (África, América del Sur, Australia Antártida e India se encontraban unida y formaban el "Gondwana") que luego se fracturó. Actualmente existen ocho grandes placas y otras dos docenas más pequeñas que se mueven a la deriva sobre el manto a una velocidad de 5 a 10 cm por año (Grandes Placas: Africana, Antártica, Euroasiática, Indo-australiana, Nazca, Norteamericana, Pacífica y Sudamericana, Pequeñas Placas: Anatolia, Arábiga, Caribeña, Cocos, Filipina, Somalí).



Figura 6, placas tectónicas [8]

ROCAS DE LA CORTEZA TERRESTRE

Para generalizar la composición del subsuelo que compone la Corteza Terrestre, la geología define que en el subsuelo se pueden diferenciar tres clases de rocas:

1. Rocas Sedimentarias.
2. Rocas Magmáticas.

3. Rocas Metamórficas.

Rocas Sedimentarias:

Constituyen solo el 5% de la totalidad de la litósfera. Aparecen en muchos casos ordenadas en capas o estratos paralelos c/u de los cuales fue configurándose a lo largo de frecuentes sedimentaciones. Se suelen clasificar como:

- Rocas Sedimentarias Detríticas:

  Con el transcurso del tiempo los paquetes de estratos van empastándose por la presión ejercida por el peso de las capas superiores y los granos van comprimiéndose de tal forma que llegan a encajar perfectamente uno con otros (como las areniscas).



Figura 7, rocas detríticas [7]

- Rocas Sedimentarias de Precipitación

  La acción química del agua subterránea que transporta calcita, puede cimentar (rellenar) los intersticios entre granos de la roca, formando una roca sedimentaria calcárea.



Figura 8, rocas de precipitación [7]

- Roca Sedimentaria de Origen Orgánico.
  La acción biogenética transforma organismos animal-vegetal depositados en el fondo del mar transformándolos, por ejemplo en calizas.



Figura 9, rocas de origen orgánico [7]

La variedades más frecuentes de roca sedimentarias son: pelitas (65%), areniscas (20%) y calizas o carbonaticos (10%)

Las rocas sedimentarias son las creadoras de los Hidrocarburos, pues cubrieron a restos orgánicos que se conservaron en ausencia de oxígeno, al haber sido sometidos a grandes presiones a través de gran cantidad de millones de años. Los restos orgánicos fueron cubiertos por sedimentos minerales proporcionados por: erosión eólica, avance de glaciares, introducción de mares, lavas volcánicas, etc. en sucesivas Eras Geológicas.

Rocas Magmáticas:

Originadas por el magma que atravesando fracturas y dislocaciones de la corteza terrestre pueden llegar, aún, hasta su superficie. El proceso de solidificación del magma (diferenciación) conduce a la formación de diferentes clases de rocas magmáticas:

• Rocas Plutónicas o intrusivas, en el cual el magma se ha solidificado lentamente y los granos no son gruesos (ejemplo: granito).



Figura 10, rocas plutónicas [7]

• Rocas Volcánicas o Magmatitas, en el cual el magma se ha solidificado violentamente originando granos muy finos (ejemplo: basalto).



Figura 11, rocas volcánicas [7]

Rocas Metamórficas:

Son originadas por la transformación litológica de una roca por efectos orogénicos (efecto ocasionado por elevadas presiones y/o temperaturas). Los distintos tipos de metamorfosis conocidas son:

• Metamorfismo Regional, ejercido por alta presión y temperatura, típico de rocas profundas (ejemplo: arcillas convertidas en pizarras y micas).

• Metamorfismo de Contacto, generalmente producido por las intrusiones del magma (alta temperatura y baja presión) que modifican la litología de las rocas directamente en contacto con dicha intrusión (ejemplo: el mármol es una transformación de calizas).



Figura 12, rocas metamórficas [7]

CUENCAS SEDIMENTARIAS (Sediment Basins)

Las cuencas Sedimentarias son áreas de la corteza terrestre en la que se produce la acumulación de un espesor considerable de sedimentos y que pueden persistir por largos periodos de tiempo geológico. Se considera que las cuencas sedimentarias más viejas fueron iniciadas en el precámbrico.
Los Hidrocarburos se encuentran dentro de Cuencas Sedimentarias, es decir: en un subsuelo compuesto por rocas sedimentarias.
Las cuencas se originan por el relativo movimiento de las placas tectónicas que ocasionan esfuerzos mecánicos hacia el interior de dichas placas.
Se denomina "Basamento" al suelo que forma la Cuenca y que contiene a los Sedimentos.

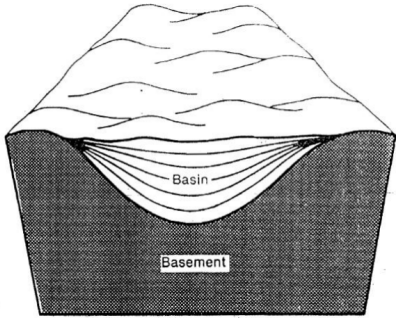


Figura 13, Modelo de Cuenca Sedimentaria

En particular, en la República Argentina, la superficie que cubren las cuencas productivas alcanza los 545.000 kilómetros cuadrados, en tanto que la superficie de las aún no productivas supera los 2.500.000 kilómetros cuadrados.

Los Hidrocarburos se encuentran dentro de Cuencas Sedimentarias, es decir en un subsuelo compuesto por rocas sedimentarias.

Los sedimentos son acarreados a una cuenca por diferentes motivos: vulcanismos, deposición de ríos, invasión de mares o retiro de mares, erosión, glaciación, etc. Los restos orgánicos de animales y/o vegetales, que por alguna razón o cataclismo se depositaron en masa, fueron posteriormente cubiertos por sedimentos que lo protegieron de la oxidación. Las distintas capas de sedimentos posteriores en tiempo proporcionaron presión y temperatura adecuadas.

A la roca sedimentaria que contuvo en sus orígenes a los restos orgánicos, que luego se transformaron en Petróleo y Gas, se la denomina: "Roca Madre" y a la que actualmente contiene al Hidrocarburo se la denomina: "Roca Reservorio".

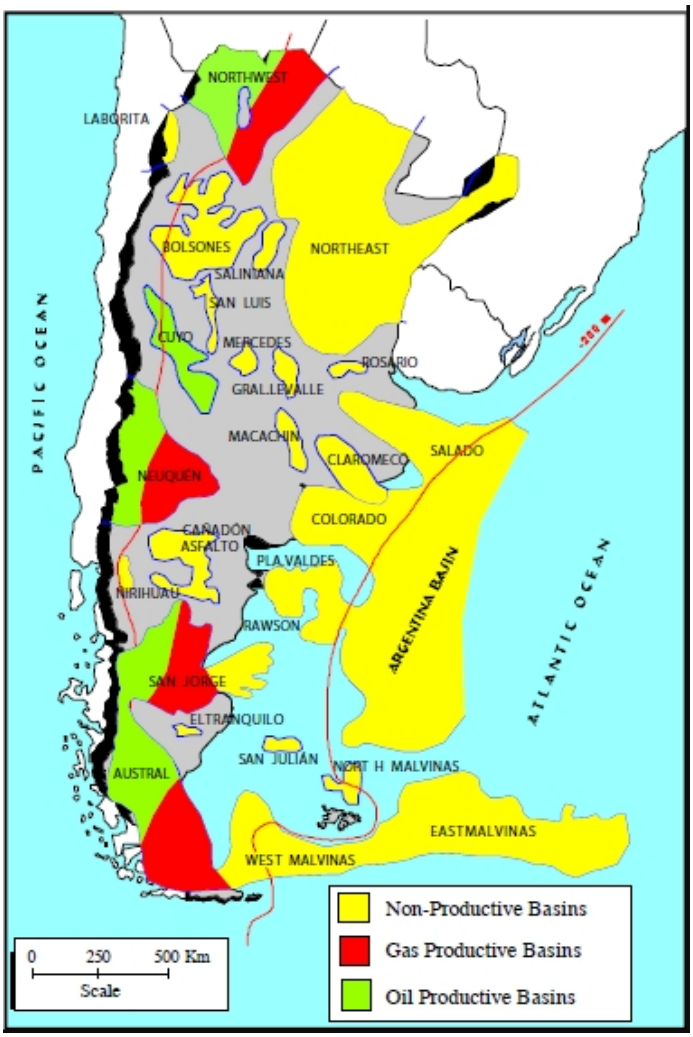


Figura 14, Cuencas Sedimentarias de la República argentina [5]

Los restos orgánicos sometidos a alta presión y temperatura, en ausencia de oxígeno y a través de los años se transforman en un fluido o gas denominado:

"Hidrocarburo". Este fluido/gas, por diferencia de presión, tiende a subir hacia la superficie terrestre, utilizando los poros de las rocas permeables que los cubre (o las quebraduras de rocas impermeables si lo hubiese), hasta encontrarse con un sedimento impermeable que le hace de sello y que no le permite desplazarse más. Se dice entonces que el petróleo se encuentra contenido en una "Trampa".

También existen rocas porosas pero no permeables (los poros no se comunican entre sí) donde el Petróleo y Gas quedan retenidos; a este hidrocarburo se lo denomina "No Convencional".

Existen dos clases de trampas bien diferenciadas, las denominadas: Trampas Estructurales y Trampas Estratigráficas.

"Trampas Estructurales"

Son producto de una deformación tectónica. La roca sello es de características impermeables y el petróleo no tiene otro remedio que depositarse bajo ella. Son las más fáciles de detectar sísmicamente debido al contraste de impedancias acústicas entre la roca reservorio y la roca sello. Casi todos los esfuerzos de exploración anteriores se basaron en la búsqueda de dichas estructuras.
Algunos tipos de trampas estructurales son las siguientes:

- Trampas Estructurales Dominadas por Pliegues

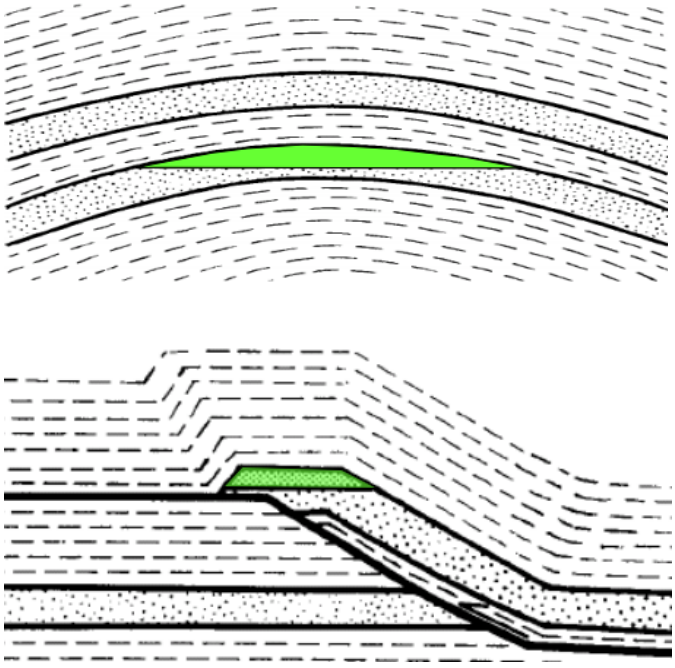
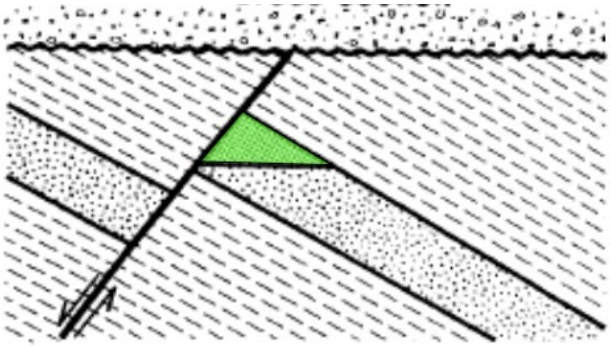


Figura 15, trampas estructurales dominadas por pliegues [6]

- Trampas Estructurales Dominadas por Fallas

Falla Normal *(intersección de fallas)*



Fallas Complejas

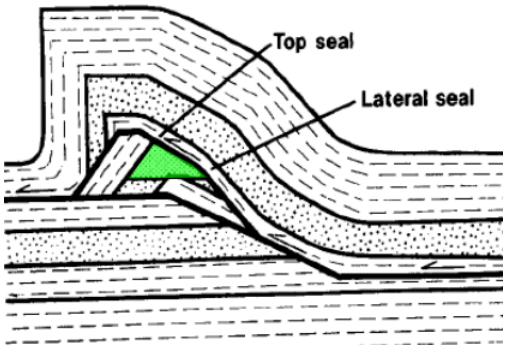


Figura 16, trampas estructurales dominadas por fallas [6]

"Trampas Estratigráficas":

Producto de cambios laterales en la litología o en la calidad del almacén (ejemplo cambio de porosidad en la roca por metamorfosis generadas por presiones y temperaturas locales). El petróleo avanzó por el interior de esta roca hasta que los poros no se intercomunicaron más entre ellos (impermeabilidad) y no existen diferencias de presiones para desviar el camino. Son más difíciles de detectar ya que se trata de una misma roca con poco contraste de impedancias acústicas entre la roca sin y con metamorfosis.
Algunos ejemplos de trampas estratigráficas son:

- Trampas Estratigráficas por Depósito de Sedimentos

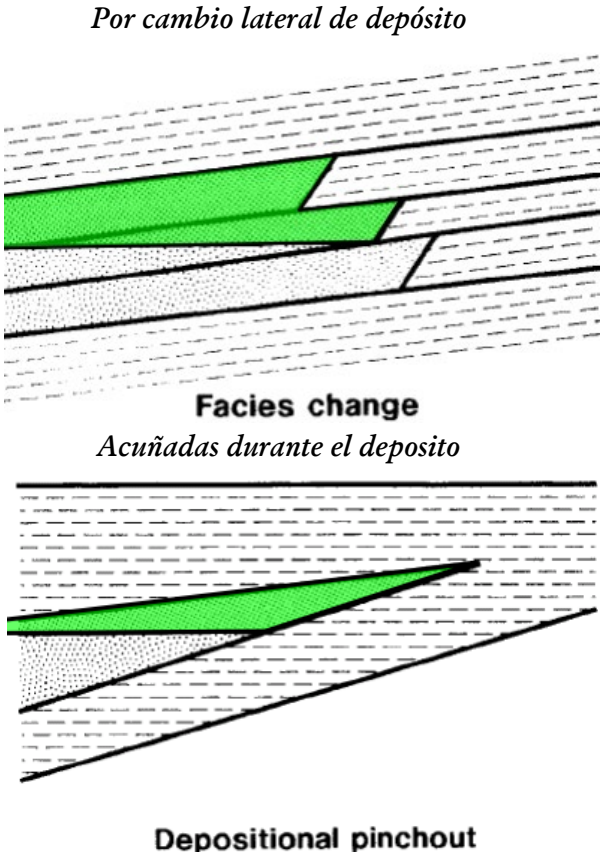


Figura 17, trampas estratigráficas por deposición [6]

- Trampas Estratigráficas por Erosión
- Trampas Estratigráficas por Cambios Diagenéticos (conversión físico química de la roca)

"Trampas Combinadas":

Realmente, la mayoría de las trampas no corresponden a rasgos simples sino que combinan elementos estratigráficos y estructurales.

Existen combinaciones inimaginables de este tipo de trampas pero se les considera combinadas cuando, ni los elementos estructurales ni los estratigráficos por si mismos forman la trampa, por lo que ambos elementos son esenciales.

Algunos ejemplos de trampas combinadas son los siguientes:

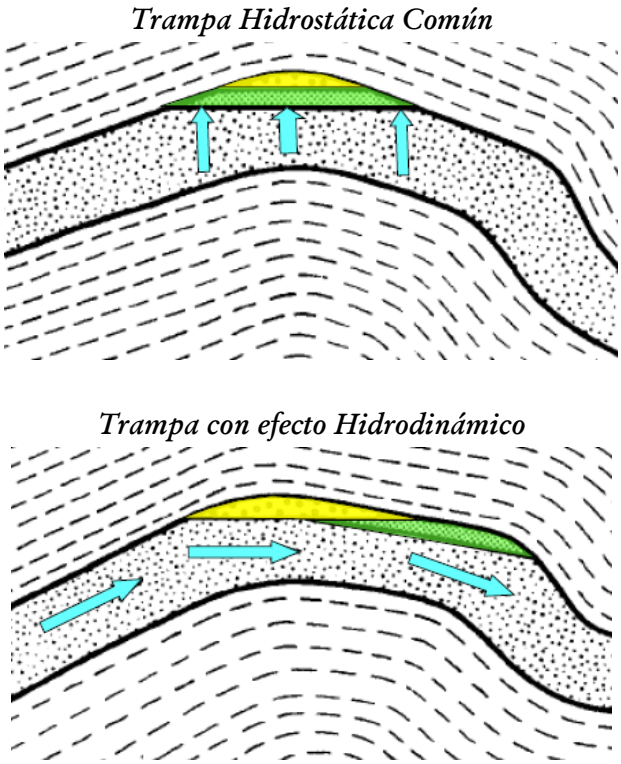


Figura 18, ejemplo de trampa combinada [6]

Nota: En general, reconocer una trampa de cualquier tipo no garantiza que contendrá hidrocarburos, pero el entendimiento de las complicaciones geológicas asociadas a los diferentes tipos de trampas, puede ayudar a evitar sorpresas durante la exploración.

El gran contraste de la Impedancia Acústica entre el "Basamento" de la Cuenca y los "Sedimentos", permitió fácilmente descubrir (mediante estudios de Refracción) las Cuencas Sedimentarias Mundiales.
En el capítulo dedicado al "Resumen de la Introducción a la Geofísica, Adquisición Sísmica", explicaremos como se obtienen las imágenes del subsuelo por contrastes de impedancias acústicas.

Bibliografía consultada:

1. *Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics- Roberto E. Sheriff (SEG 1999)*
2. *Geología General – R. Zunino - Universidad Nacional de Buenos Aires IPEP-1973*
3. *Geodinámica de las Cuencas Sedimentarias- Silvia P. Barredo y Luis P. Stinco.*
4. *Curso de Sedimentología 2006 – Dr. Luis A. Spalleti – Facultad de Ciencias Naturales y Museo - (U.N.L.P.)*
5. *https://geologiadeexplotacion.files.wordpress.com/20y Museo12/.../5-cuencas-sedimentarias.pdf*
6. *Trampas Geológicas – UNAM – Clase 15*
7. *Ciencia de la Tierra, una introducción a la geología física –Edward J.Tarbuck, Frederick K. Lutgen (www.librosite.net/tarbuck).*
8. *Wikipedia.*
9. *Brainly, https://brainly.lat/1013627*

CAPITULO 2: INTRODUCCION A LA GEOFÍSICA

Introducción

La Geofísica es una ciencia que aplica principios físico-matemáticos para estudiar la estructura y la litología de la Tierra, compartiendo con la Geología un importante campo de conocimientos.

El instrumental utilizado en los estudios geofísicos, es altamente sofisticado tanto en tierra como en alta mar, para tratar de ofrecer imágenes precisas del subsuelo profundo de la tierra. Estas imágenes se utilizan para ayudar a determinar la presencia de recursos naturales, como petróleo, gas y otros minerales en áreas de cuencas sedimentarias.

La Geofísica emplea numerosa y diferentes disciplinas cuando se interesa por la exploración de hidrocarburos, las más utilizadas son:

1. Geodesia. Estudia la verdadera forma y dimensión de la superficie de la Tierra y su Campo Gravitatorio.

2. Topografía. Se ocupa de medir lineal y angularmente una porción limitada de la superficie terrestre que luego puede ser representada por un mapa plano.

3. Prospección Sísmica del Petróleo; Estudia por intermedio de la emisión de Ondas Acústicas las diferentes capas del subsuelo de una Cuenca Sedimentaria.

4. Prospección Gravimétrica: permite detectar variaciones en la densidad de materiales bajo la superficie, midiendo la gravedad e interpretando los valores registrados.

5. Prospección Magnetométrica: Se basa en evaluar la alteración de la distribución de fuerzas magnéticas dentro de la corteza terrestre provocada por sedimentos en la corteza terrestre.

Solamente nos referiremos a las tres primeras disciplinas (Geodesia - Topografía y Sísmica) ya que la Prospección Sísmica de Hidrocarburos las involucra en sus proyectos.

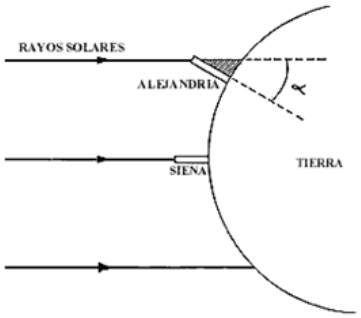
Geodesia y Topografía suelen ser consideradas juntas ya que contienen elementos y contenidos comunes a ambas ciencias.

GEODESIA Y TOPOGRAFIA

Antecedentes:

Se cree que Pitágoras (siglo V a.C.), en la antigua Grecia, fue el primero que se interesó por el tamaño y forma de la Tierra, considerándola a esta una superficie esférica, pero se reconoce a Aristarco de Samos como el primer hombre en la historia que propuso el sistema heliocéntrico, quien vivió en Alejandría en el siglo III a.C. Desgraciadamente, no se conserva ningún documento escrito originalmente de Aristarco y todo lo que se conoce de él es por referencias en escritos de otros filósofos. No sabemos en qué se basó para elaborar una teoría que se anticipó a la de Copérnico en más de diecisiete siglos.

Eratóstenes, quien vivió en Alejandría en el siglo II a.C., logró medir con éxito el radio de la circunferencia terrestre. Notó que en el día del solsticio, las sombras caían verticalmente en Siena, mientras que en Alejandría —más al norte—, formaban un ángulo con la vertical que nunca llegaba a ser nulo. Midiendo el ángulo mínimo (aproximadamente 7º) y la distancia entre Alejandría y Siena (aproximadamente 800 kilómetros), Eratóstenes encontró que la Tierra tenía una circunferencia de 252.000 estadios, o en unidades modernas y tomando el valor más probable del estadio: 41.142,9 kilómetros, ¡el resultado fue apenas de 400 kilómetros menor del valor correcto!



$$\alpha = 7^{\circ}$$

$$\frac{7^{\circ}}{360^{\circ}} = \frac{800\ \text{Km}}{P}$$

$$P = 360 * 800 / 7 =$$

$$P = 41.142{,}9\ \text{Km}$$

$$P = 2\pi R$$

$$R = 6.551{,}4\ \text{Km}$$

Conociendo el ángulo α y la distancia entre Alejandría y Siena (actual Assuán), Eratóstenes midió el radio de la tierra.

Figura 1, medida del Perímetro de la a circunferencia de la Tierra por Eratóstenes [9]

El último astrónomo griego de la Antigüedad fue Tolomeo, quien vivió en Alejandría en el siglo II a.C., y sus ideas influyeron notablemente en la Europa de la Edad Media. Tolomeo aceptó la idea de que la Tierra es el centro del Universo y que los cuerpos celestes giran alrededor de ella.

En el siglo IV de nuestra era, el cristianismo, después de largas luchas se impuso en Roma y consideró como "pagana" la cultura greco-romana (la cultura de sus antiguos opresores) y lo que no estaba escrito en la Biblia no era de la incumbencia humana. Entonces la Tierra volvió a ser plana y Tomás

de Aquino (siglo XIII de nuestra era), rescató la "doctrina aristotélica", que se volvió dogma de fe y posición oficial de la Iglesia.

Un cambio científico importante ocurrió cuando Copérnico, poco antes de su muerte en 1543, mandó a la imprenta su famoso libro "*De Revolutionibus"*, en el que afirmaba que la Tierra y los planetas giran alrededor del Sol. Sin embargo su teoría "heliocéntrica" carecía de algunas precisiones que no la diferenciaba de las especulaciones de Tolomeo.

Recién en el siglo XVII, el astrónomo Kepler escribió sus famosas tres leyes y se comenzó con la idea de que las órbitas de los planetas eran elipsoidales, eliminando la idea del desplazamiento de los planetas en epiciclos que ni Copérnico pudo librarse, para dar cabida a la simplicidad de las elipses.

Contemporáneo de Kepler, Galileo Galilei pudo comprobar con sus telescopios, las especulaciones de Copérnico de un sistema planetario heliocéntrico, enfrentándose con la Iglesia Católica defensora aristotélica del sistema geocéntrico.

La superficie de la Tierra

La concepción de la superficie de la tierra como un elipsoide de revolución, con su eje mayor ubicado sobre el Ecuador y el menor sobre los Polos, también nació con Kepler.
La superficie de la tierra es más o menos uniforme sobre los océanos pero no así sobre las masas continentales donde la topografía modifica verticalmente la uniformidad mediante montañas y valles.

Si pudiéramos despreciar a la topografía continental, prolongando el nivel de los océanos dentro de los continentes, entonces todos los puntos estarían sobre una misma superficie de igual nivel. Si nos ubicamos sobre dicha superficie en un punto de observación: "A", y establecemos una altura de observación: "H", la línea de nivel de nuestra observación visual sería la línea recta que une iguales alturas "H".

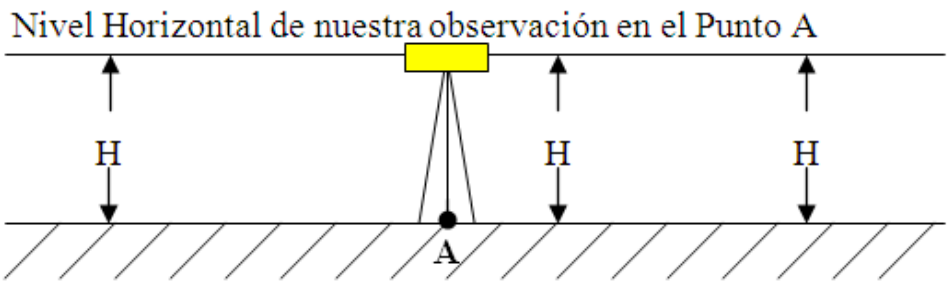


Figura 2, Nivel Horizontal, aproximado para cortas distancias (Topografía) [9]

Lo anterior solamente es aproximado para distancias muy cortas ya que nuestra observación visual está influida por la "Curvatura de la Tierra", por lo tanto nuestra observación horizontal yo no barrerá iguales alturas con respecto a la superficie de la tierra.

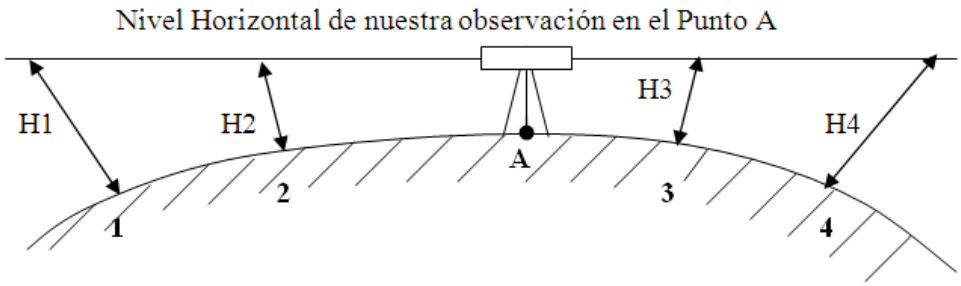


Figura 3, Nivel Horizontal, para distancias largas (Geodesia) [9]

Como vemos las alturas que pasan por nuestro nivel de visualización horizontal desde el Punto "A" son diferentes. En cada punto de la superficie (1, 2, 3, 4) estamos midiendo diferentes alturas (H1, H2, H3, H4) y estas corresponden al segmento de recta que va desde la superficie del punto hasta nuestra Línea de Nivel y cuya dirección es la línea de fuerza gravitatoria para cada punto.

El Geoide

Si ahora trazamos por cada punto de la superficie terrestre su propio plano de Nivel Horizontal de Observación Visual, estaríamos dibujando líneas rectas perpendiculares a la dirección de la fuerza gravitatoria para dicho punto.

Si extendemos los puntos tomados sobre la superficie de la tierra a un valor infinito, el Nivel Horizontal de Observación Visual se convertirá en una superficie cerrada equipotencial, que corresponderá a la extensión de la Superficie Media del Mar (mean sea level). Estos infinitos puntos, componen una Superficie o Curva Cerrada denominada "**GEOIDE"** (que significa: forma de la tierra), donde cada punto posee el mismo valor de Gravedad Terrestre ($g = 9{,}8\ m/seg^2$: Valor de la gravedad al nivel medio del mar), y de aquí que a esta superficie se la denomina: "equipotencial".

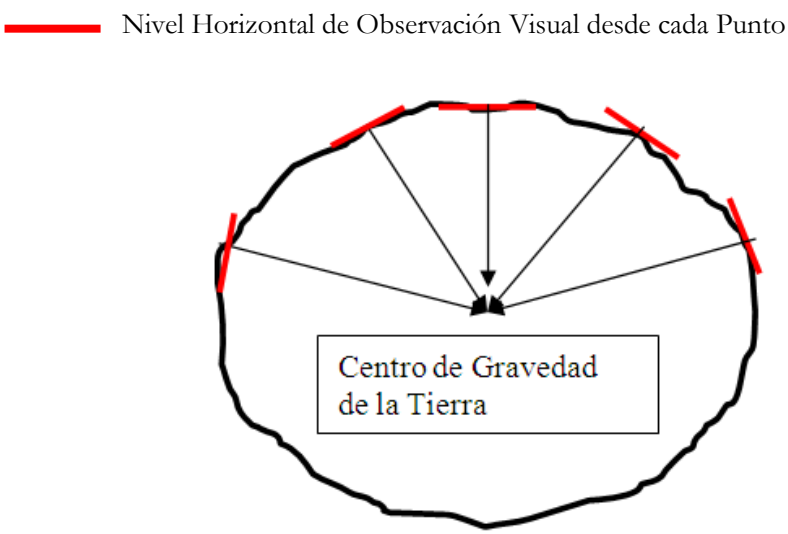


Figura 4, el Geoide (forma de la Tierra) [9]

Si la densidad de la tierra fuera homogénea, el Geoide sería un "Elipsoide de Revolución" con lo que nuestros cálculos, para obtener una posición en la superficie de la Tierra, se simplificarían enormemente, pero al no ser así, el Geoide será una superficie curva que diferirá ligeramente de la superficie del Elipsoide (de acuerdo a la precisión de la medida considerada).

Podemos obtener una aproximación a una posición terrestre a medir, considerando que se encuentra en la superficie de un elipsoide de revolución determinado (ejemplo: WGS 84, elipsoide sobre el que mide el GPS) y luego corregirlo de acuerdo a las desviaciones locales del Geoide con este teórico Elipsoide de Revolución, tomado como referencia.

Podemos decir que las mayores diferencias entre el Geoide y el Elipsoide se encontrarían dentro de +/- 100 metros.

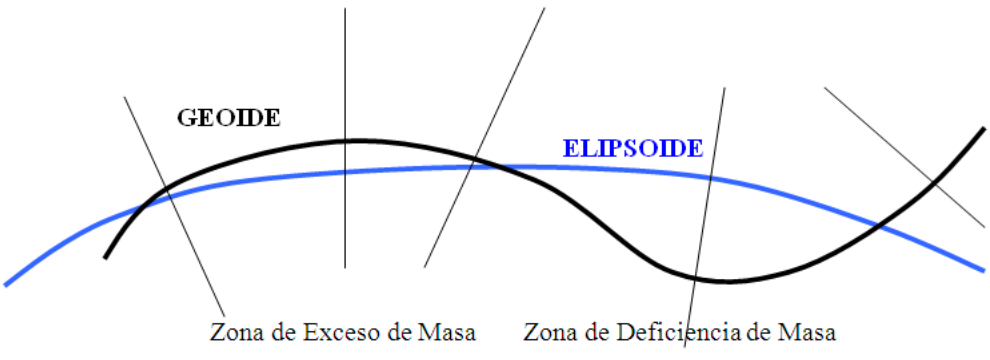


Figura 5, Diferencia de Niveles entre Geoide y Elipsoide [9]

En la Figura 5, podemos apreciar los cambios locales de la vertical a la superficie terrestre respecto a la dirección del Centro de Gravedad de la Tierra, debido a las Anomalías Locales de Masa Terrestre.

Como la superficie del Geoide no es fácil de representar (no es un modelo matemático), se debió modelar la superficie de la tierra en grillas (longitud y latitud), cuando más denso sea el engrillado mayor es la precisión del modelo obtenido de la superficie del geoide. Obtenido el modelo, se puede determinar la distancia entre cada punto del Geoide y el Elipsoide. El último y más preciso modelo de Geoide construido es el EGM 96 (Earth General Model).

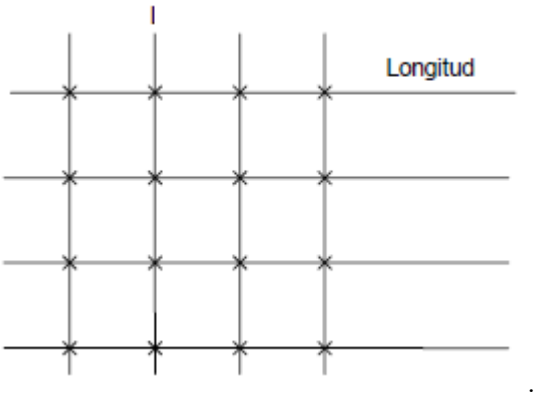


Figura 6: Grilla utilizada para construir el modelo de Geoide [9]

En la Figura 7, agregamos al Geoide, la topografía local y ahora deberemos diferenciar entre el Nivel del Punto P con referencia al Geoide y al Elipsoide. La distancia "vertical" del Geoide al punto P (h: altura al punto P) es el Nivel de P con respecto al Geoide, que coincide con la dirección que ejerce la Fuerza de Gravedad Terrestre sobre dicho Punto.
La distancia "normal" al Elipsoide desde este al Punto P (h': altura al elipsoide) permite medir el Nivel de P con respecto al elipsoide tomado de referencia y que generalmente no coincide con el del Geoide, formando un ángulo "φ" de desviación con respecto a la vertical gravitatoria.

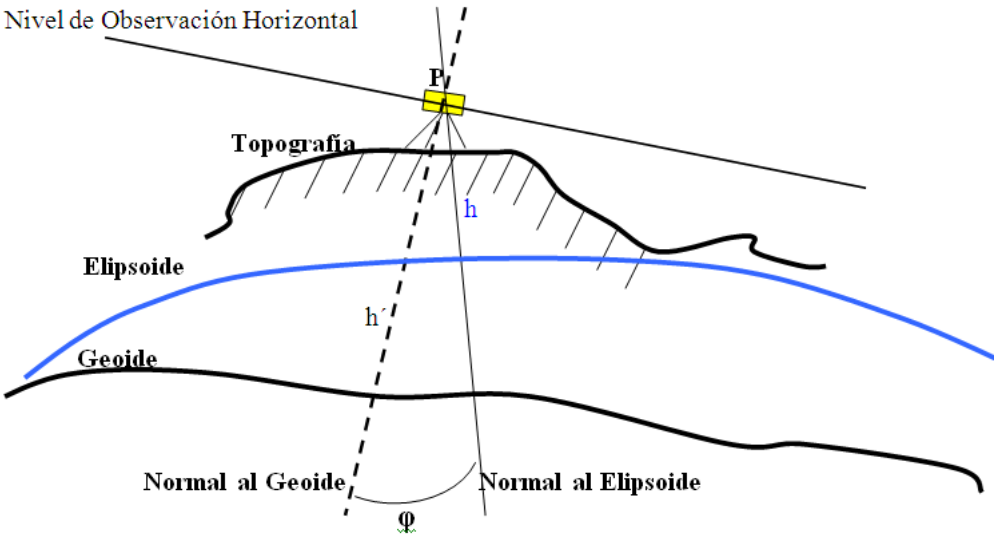


Figura 7, Nivel Topográfico, diferencia al Geoide y al Elipsoide [9]

Generalmente, si trabajamos para obtener una posición con instrumentos inerciales (Teodolitos, Distanciómetros, etc.), estas medidas se encuentran referidas al Geoide, ya que el nivel (bulbo de burbuja de agua) es determinado por la perpendicular a la dirección de la fuerza gravitatoria local.
En cambio si utilizamos GPS, estas medidas se encuentran referidas al Elipsoide (generalmente se trata del denominado: WGS 84). Estas referencias deberán tenerse en cuenta para realizar las conversiones que correspondan.
La medida de un punto (coordenadas) diferirá si es que nos referimos al Geoide o al Elipsoide, pero las diferencias pueden ser pequeñas, si es que se elige un Elipsoide que se ajuste convenientemente al Geoide para el área donde se encuentra el punto a medir.

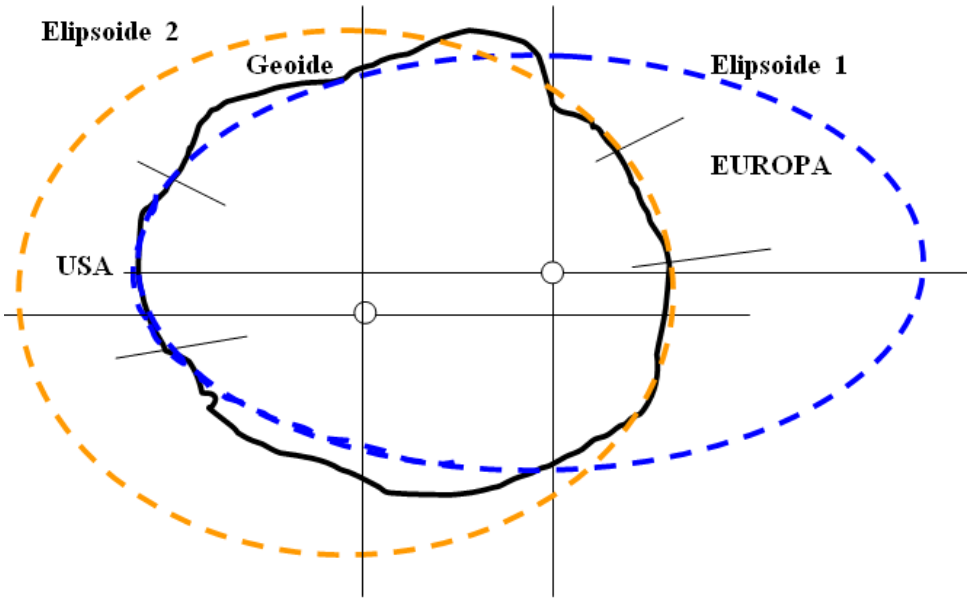


Figura 8, Dos diferentes Elipsoides (exagerados) aplicados al Geoide [9]

En la Figura 8, vemos cual podría ser un Elipsoide adecuado para trabajar en USA (Elipsoide 1) y otro diferente para adecuarse a Europa (Elipsoide 2). Resulta evidente que se deberá adoptar el elipsoide más conveniente para la porción del geoide que corresponda.

El Elipsoide de Revolución

El Elipsoide como cuerpo geométrico, resulta de girar 360 grados una elipse sobre su eje menor. En nuestro caso la elipse básica gira sobre un eje que corresponde a un meridiano. El meridiano utilizado como referencia y origen del giro (ángulo de 0º), pasa por el Observatorio Astronómico de la ciudad inglesa de Greenwich (Greenwich Observatory).

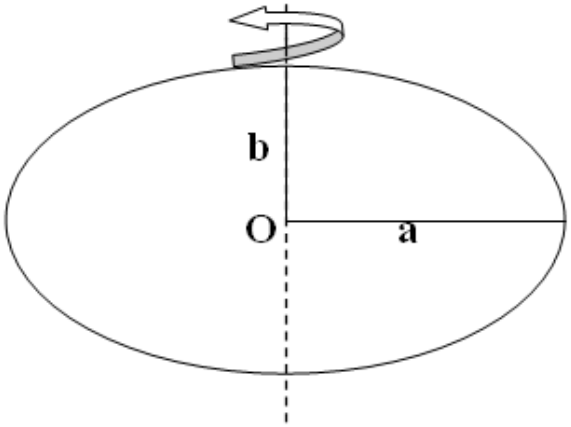


Figura 9, Elipse girando alrededor de un eje [9]

Geométricamente un "Elipsoide" es definido por intermedio de la elipse que lo genera y esta, a su vez, queda definida por el valor de la magnitud de sus "semi-ejes":

a: Semi-eje mayor de la tierra para el WGS84 es: 6378,13700 Kilómetros).

b: Semi-eje menor de la tierra para el WGS84 es: 6356,75231 Kilómetros)

Se define el valor de Aplastamiento (flattening) como: $\mathbf{f = a - b / a}$
Para el Planeta Tierra: f = 1 / 298,2572356
Este valor nos indica cuan "aplastada" resulta la elipse. Si a = b entonces se estaría en presencia de una circunferencia y entonces "f = 0" (no existiría chatura).

También se define como: "Excentricidad" (excentricity):

$$\mathbf{e = \sqrt{1 - b^2 / a^2} = \sqrt{2f - f^2} = 0{,}8199188}$$

NOTA: Como hemos mencionado, el sistema GPS utiliza como Elipsoide el denominado WGS84 (World Geodesic System), que originalmente fue el elipsoide GRS 80 y que posee su centro "O" ubicado en el centro de la tierra, coincidiendo en este punto con el Geoide (Punto Fundamental).

Datum (Sistema de Referencia Geodésico)

Se denomina DATUM al Sistema de Referencia Geodésico, que se establece al adoptar:

- Un elipsoide de referencia (ejemplo: WGS84).
- Un punto de referencia que vincule al elipsoide y al geoide (ejemplo: el centro de la Tierra).

Al ser el Elipsoide una superficie desarrollable, se puede establecer una posición única para cada punto perteneciente a esta superficie, es decir: un Sistema de Coordenadas.

Coordenadas

Existen 3 tipos diferentes de definir un punto sobre la superficie terrestre en un sistema geodésico:

- Coordenadas Geográficas.
- Coordenadas Geocéntricas.
- Coordenadas Geográficas Astronómicas.

Coordenadas Geográficas (Latitud y Longitud expresada en ángulos sexagesimales):

Este Sistema de Coordenadas permite ubicar unívocamente un Punto perteneciente al elipsoide por medio de Paralelos y Meridianos.

La Latitud es la medida del arco entre dos planos Paralelos entre sí y perpendiculares al eje de rotación del elipsoide, siendo uno de esos planos el que contiene al máximo círculo de intersección con el elipsoide denominado: "Paralelo de 0º o Ecuador".
Los puntos de las circunferencias perimetrales a esos paralelos poseen igual Latitud.
Los grados angulares aumentan hacia cada lado del Ecuador hasta llegar a su valor máximo en cada Polo: 90º Norte y 90º Sur.

La Longitud de un punto es la medida del arco que forma el Meridiano de Greenwich o "Meridiano de 0º" con otro Meridiano que contiene al punto y que resulta de girar la elipse generadora hasta pasar por dicho punto.
Los grados angulares aumentan hacia ambos lados de Greenwich diferenciando su dirección Este u Oeste.

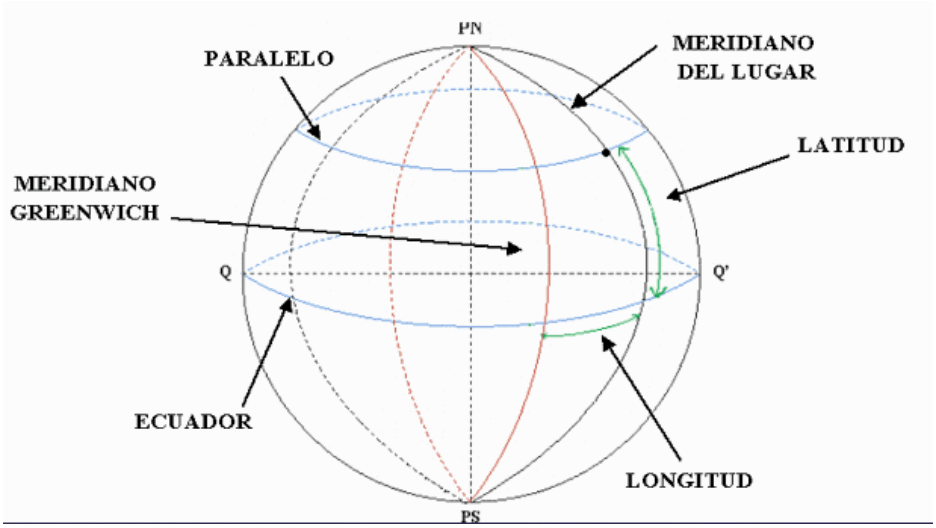


Figura 10, Paralelos y Meridianos del Elipsoide [9]

Un punto A' perteneciente al Elipsoide queda definido por el ángulo λ (ejemplo: Longitud: λ = 60º Este de Greenwich) formado entre el plano del Meridiano de Greenwich y el Meridiano que contiene a A' y por el ángulo Φ (ejemplo: Latitud: 70º Norte del Ecuador) formado por la normal al Elipsoide en el punto "A" en su intersección con el plano del Paralelo del Ecuador.

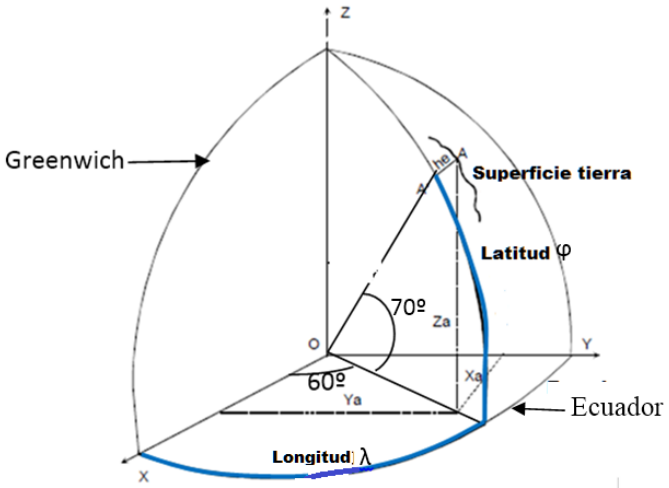


Figura 11, Coordenadas Geográficas (por Latitud y Longitud) [3]

El punto A de la Figura 11 posee las siguientes coordenadas geográficas sobre el elipsoide y se diferencia del A' en que posee una Altura con respecto al elipsoide (ídem geoide):

Latitud:	70º Norte del Ecuador
Longitud:	60º Este de Greenwich

Coordenadas Geocéntricas

Es una manera práctica de obtener la posición de un punto "M" perteneciente a un Elipsoide y cuyo origen es el centro del Elipsoide (centro de la tierra). WGS84 utiliza este sistema de coordenadas.

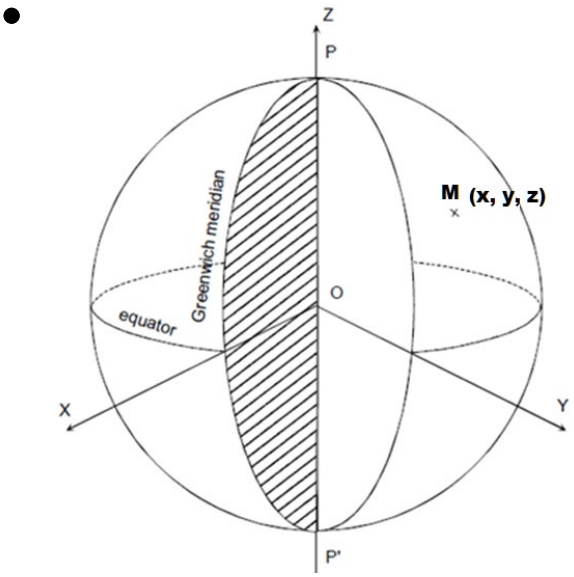


Figura 12, Coordenadas Geocéntricas (Planas o Gauss Kruger) [3]

Los ejes coordenados ortogonales: X, Y y Z, definen el sistema. Los ejes X y Y se encuentran en el plano del Paralelo del Ecuador y el eje Z coincide con el eje de rotación de la tierra (elipsoide). El plano formado por los ejes X-Z contiene al Meridiano de Greenwich.

Existe una correspondencia entre coordenadas ortogonales y angulares, las cuales se vinculan mediante las siguientes fórmulas:

$\lambda, \varphi, h \Rightarrow X, Y, Z$	$X, Y, Z \Rightarrow \lambda, \varphi, h$
$X_A = (N + He)\cos\varphi\cos\lambda$ $Y_A = (N + He)\cos\varphi\sin\lambda$ $Z_A = \left[N\left(1 - e^2\right) + He\right]\sin\varphi$ $N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2\sin^2\varphi}}$	$p = \sqrt{X^2 + Y^2}$ $\lambda = \arctan\frac{X}{Y} = 2\arctan\frac{Y}{X + p}$ $\varphi_0 = \arctan\left(\frac{Z}{p}\right)$ $w = \sqrt{1 - e^2\sin^2\varphi_0}$ $N = \frac{a}{w}$ $h = p\cos\varphi_0 + Z\sin\varphi_0 - aw$ $\varphi = \arctan\left[\left(1 - \frac{Ne^2}{N + h}\right)^{-1}\right]$ $\lvert\varphi - \varphi_0\rvert < \varepsilon$ → No: $\varphi_0 \leftarrow \varphi$; Yes: $\rightarrow \varphi$

Figura 13, equivalencias de coordenadas geocéntricas y geográficas [3]

Coordenadas Geográficas Astronómicas.

En las coordenadas geográficas astronómicas, se considera la Esfera Celeste que tiene un radio infinito en cuyo centro se encuentra La Tierra (el observador). Si prolongamos infinitamente el eje de rotación de la Tierra, con sus extremos interceptamos la esfera celeste en los "polo celestes norte" y polo celeste sur".
La denominada "ascensión recta" es similar a la Longitud geográfica, ahora medida sobre el "ecuador celeste", y la "declinación", similar a la medida de la Latitud geográfica.

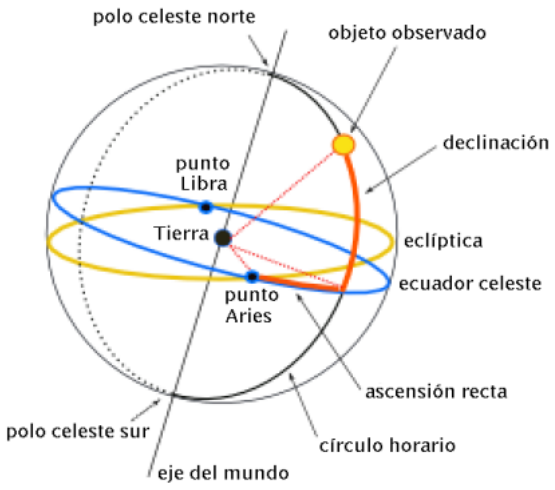


Figura 14, coordenadas geográficas astronómicas [7]

Altitud

Idealmente la altitud se mide con respecto al Geoide (0 metro = nivel medio del mar), aunque el GPS lo mide con respecto al elipsoide, si no se ha referido al geoide con el modelo STAGANAT grabado en la memoria del GPS (en este caso también la altitud se refiere al geoide).

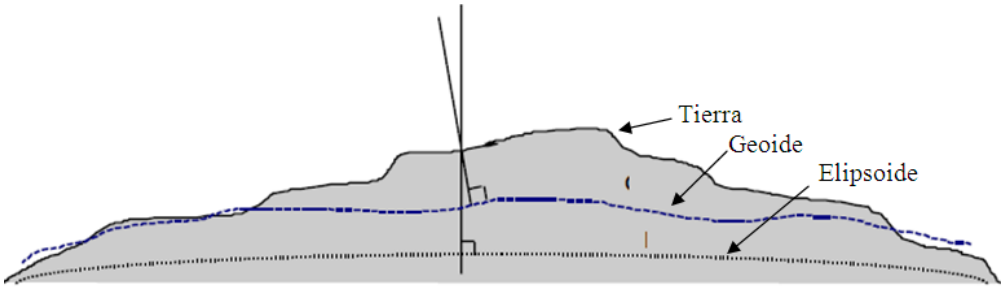


Figura 15, diferentes medidas de altitud respecto a un punto [6]

Mapas o Proyecciones Planas de la Tierra

Pese a todo lo anterior, proyectar una figura esférica para que sea representada en un mapa plano sin deformaciones, es prácticamente imposible. Lo que lo hace posible es la representación plana de la tierra con cierto grado de distorsión, eligiendo la proyección más conveniente de acuerdo a nuestra necesidad y precisión deseada siempre que se trate de representar áreas pequeñas.

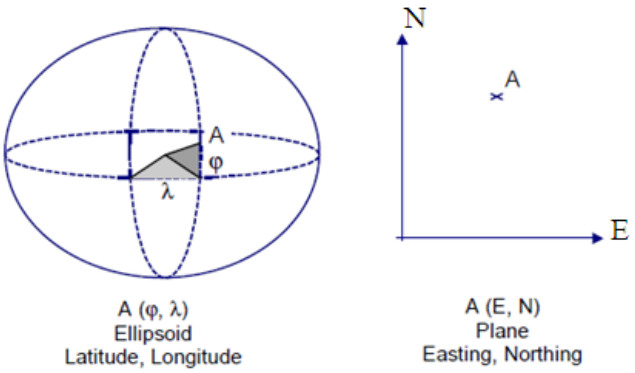


Figura 16, Proyección de un punto del elipsoide a un plano [6]

Los diferentes tipos de proyecciones que podemos utilizar, se basan en la característica que queremos preservar libre de distorsión:

- Proyección de igualdad de áreas (la relación entre diferentes áreas en el elipsoide se mantiene en el mapa)
- Proyección de igualdad de distancias (la relación de distancias en el elipsoide es mantenida en el mapa)
- Proyección de igualdad de formas (las formas de las figuras en el elipsoide son idénticas a la del mapa aunque no se

mantengan las relaciones de áreas y distancias entre las mismas)

La proyección de igualdad de formas es la que se utiliza en nuestra topografía, ya que para pequeñas distancias en el elipsoide, los ángulos proyectados en el mapa son iguales.
Las coordenadas de un mapa plano estarán marcadas por grillas rectangulares que permitirán una operación de medida mucho más sencilla que trabajar con la superficie de un elipsoide, finalmente los resultados obtenidos serán referidos matemáticamente al elipsoide para obtener su correcta posición.

Los tres tipos de proyecciones mencionadas, se obtienen de proyectar el elipsoide sobre las siguientes superficies:

- Superficie Cónica (permitirá una proyección de igualdad de formas).
- Superficie Cilíndrica (permitirá una proyección de igualdad de formas).
- Superficie Plana.

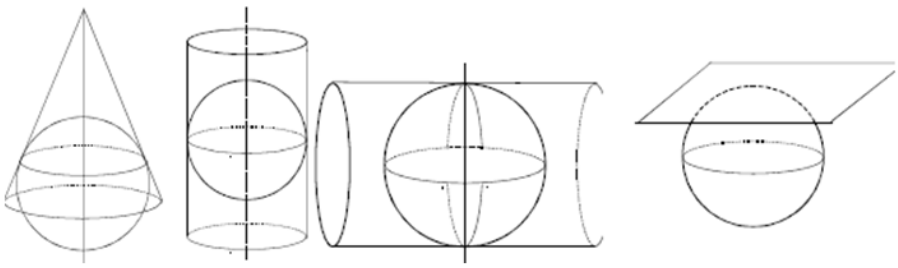


Figura 17, Diferentes Proyecciones del Elipsoide [6]

Las dos primeras tratan superficies de proyección no planas, pero que pueden desarrollarse sobre un plano sin distorsión de forma, si se las corta convenientemente.
En todas ellas se aprecia que cuanto más cerca de la superficie de proyección se encuentren los puntos del Elipsoide, menores serán las distorsiones contempladas.
Las proyecciones generalmente utilizadas en Topografía son las "conformes" (que conservan la forma) manteniéndose la misma relación angular entre la superficie original y la proyectada (válido para limitadas extensiones).

UTM: "Universal Transverse Mercator" ó Gauss – Kruger Projection

Es una proyección conforme cilíndrica pero con el cilindro transversal, que se adapta más eficazmente al alargado desarrollo del continente americano, es decir que los Polos del Elipsoide son parte de la superficie cilíndrica (o se encuentran muy próximos). Como es una proyección conforme, las formas son mantenidas pero las distancias se encuentran distorsionadas.

Para obtener un mapa-grilla donde referenciar las distancias y compensar las distorsiones, se elige un cilindro de diámetro ligeramente menor al radio mayor del Elipsoide de tal manera que los lados de una pequeña faja de la superficie elipsoidal queda establecida como intersección del cilindro con el elipsoide.

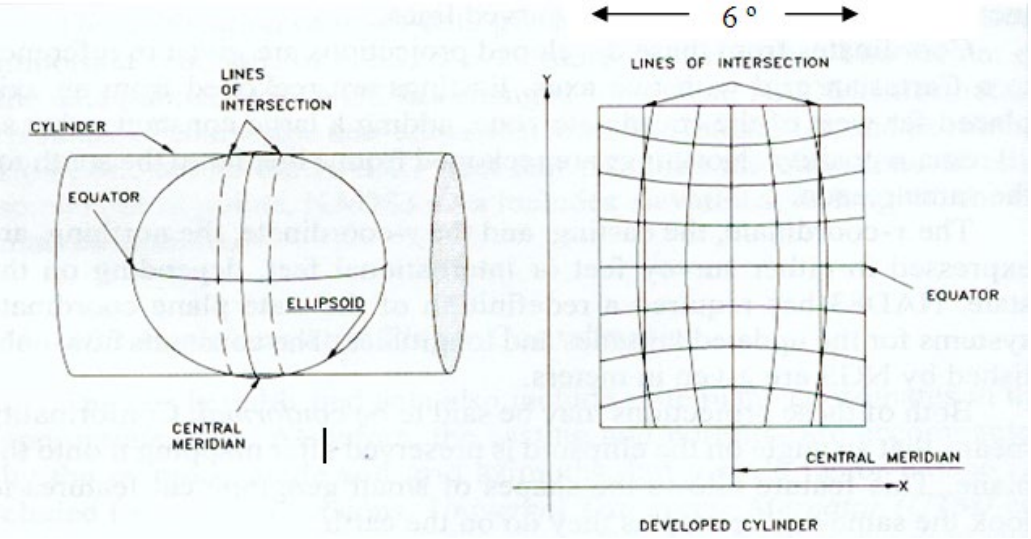


Figura 18, Proyección Transversa Mercato (UTM) [6]

Como se ve en la Figura 18, el eje central de la faja corresponde a un Meridiano pero como sus puntos no pertenecen al elipsoide, poseen cierta distorsión en sus medidas de distancias. En cambio, sobre los puntos de las Líneas Laterales, por ser puntos comunes al elipsoide y al cilindro, las medidas son reales.

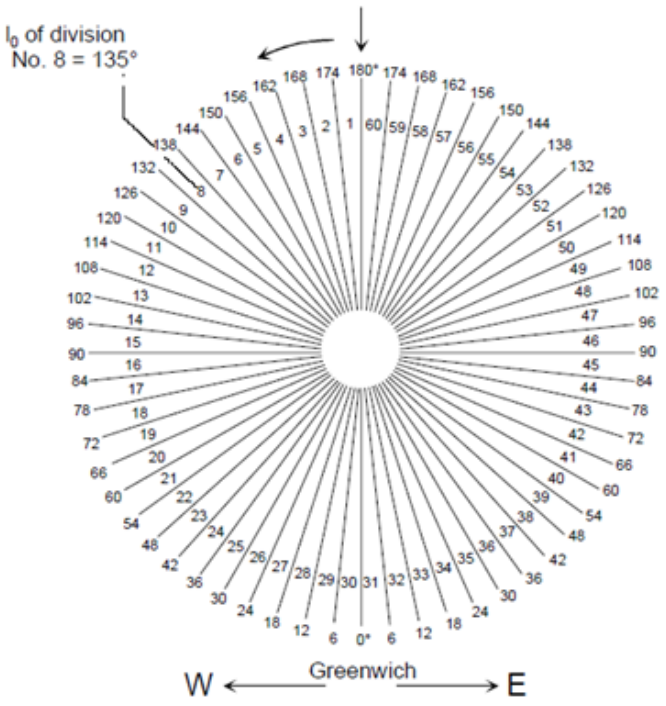


Figura 19, *División cada 6 º de la Proyección UTM [6]*

Eligiendo adecuadamente el radio del cilindro podremos disminuir las distorsiones internas a la faja y esto se obtiene con fajas que comprendan 6 º en Latitud para que la precisión de medida se mantenga acotada en ± 1/2500 metros (0,0004 m). De esta manera el Elipsoide queda dividido en 60 fajas o "Zonas" idénticas, donde el punto definido por la intersección del Meridiano Central de cada faja con el Ecuador, es el centro de medidas de coordenadas ortogonales pertenecientes a dicha Zona.

La Longitudes se consideran negativas al Oeste del meridiano de Greenwich

Proyecciones en la Argentina

En 1925 la Argentina adoptó como superficie de referencia el elipsoide de Hayford (de 1909), cuyos parámetros son:

Semieje mayor: 6378,388000000 Km
Semieje menor: 6356,911946127950 Km
Aplastamiento: 1/297

El país fue dividido en 7 fajas meridianas (con dirección Sur-Norte) de un ancho de 3º de longitud en c/faja en una proyección cilíndrica conforme: Gauss-Krüger (UTM), favorecida por las características de Argentina de tener gran desarrollo en latitud más que en longitud.

Los meridianos centrales de c/faja son:

Faja 1: 72ºW, Faja 2: 69ºW,
Faja 3: 66ºW, Faja 4: 63ºW,
Faja 5: 60ºW, Faja 6: 57ºW
Faja 7: 54ºW

Posicionamiento Satelital

Con el primer satélite ruso lanzado al espacio exterior: el SPUTNIK en 1957, comenzó el desafío de lograr un posicionamiento en la superficie de la tierra mucho más expeditivo y preciso. La población civil tardó en utilizar esta tecnología concebida para fines militares como lo fue originalmente el GPS, desarrollado por la "U.S. Department of Defense" de U.S.A. a comienzos de 1970.
En 1982 Rusia lanzó su propio sistema satelital de alcance mundial: GLONASS que posee actualmente 24 satélites en orbitas especialmente enfocados en altas latitudes (norte y sur).
En diciembre de 2016 se puso en marcha media constelación del Sistema Galileo, desarrollado por la Unión Europea (UE) conjuntamente con la Agencia Espacial Europea. Este programa dota a la Unión Europea de una tecnología independiente del GPS estadounidense y el GLONASS ruso. Al contrario de estos dos, será de uso civil.

Actualmente, el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) y el Sistema Orbital Mundial de Navegación por Satélite (GLONASS), forman parte del concepto GNSS (Global Navegation Satellite System), pero también están estudiando la posibilidad de sumar a sistemas como Galileo, Beidou y QZSS entre los más importantes. GNSS brinda una mayor disponibilidad de constelación de satélites, lo cual permite tener una precisión con un error mínimo la mayor parte del tiempo.

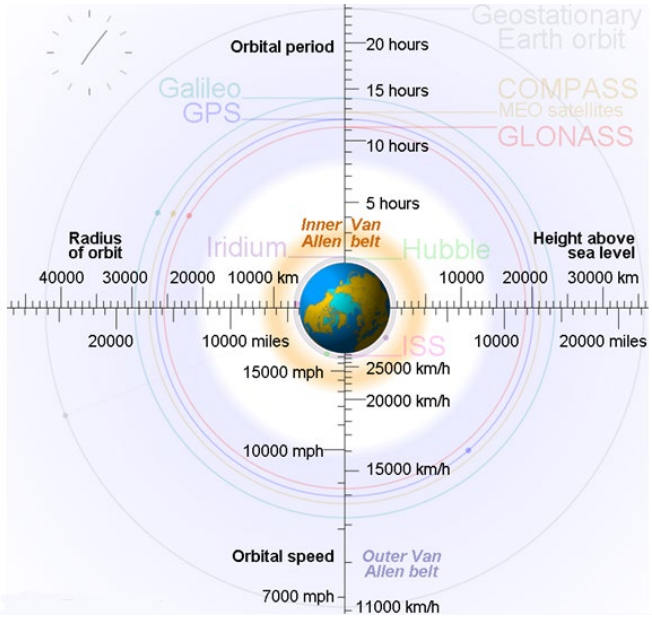


Figura 20, alturas orbitales y velocidades de los distintos sistemas satelitales [6]

GPS (Global Positioning System)

Se basa en una constelación de 27 satélites NAVSTAR (Navigation System with Timing and Ranging: SVs), orbitando a gran altitud (20.000 Km aprox.) Los satélites son agrupados en seis órbitas, c/u inclinada a 55 º del Ecuador.

El principio consiste en medir el tiempo que tarda la señal enviada por el satélite en llegar hasta el receptor, que es el punto cuyas coordenadas se quieren determinar.

La distancia al satélite resulta de multiplicar el tiempo medido por la velocidad de la luz:

$$d = c_x \Delta T$$

Para obtener las coordenadas X, Y y Z (y el tiempo ΔT; total 4 incógnitas), hacen falta, como mínimo, la lectura de 4 satélites.

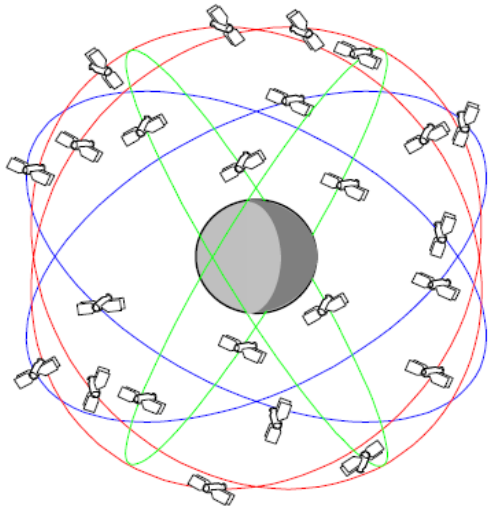


Figura 21: Constelación de Satélites NAVSTAR [6]

Principio de la medida de distancia de un Punto P a los satélites

El principio que permite obtener la exacta posición de un Punto en la Tierra, es el siguiente:

- La lectura de un satélite nos indica que estamos sobre algún lugar de la superficie terrestre.

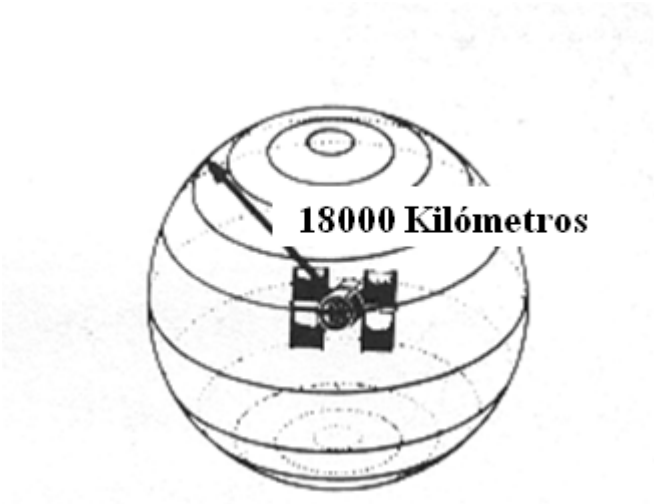
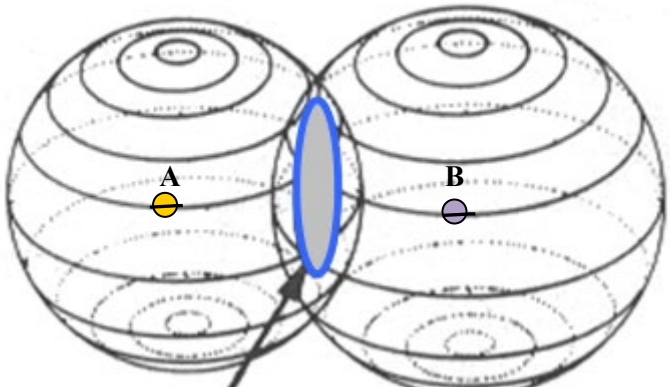


Figura 23: Lectura de la señal de 1 satélite [1]

En la Figura 23, vemos que con la información de un solo satélite (satélite "A"), solamente podemos asegurar que la distancia al satélite es "x" (aquí tomada como ejemplo, x = 18.000 Km), que puede ser cualquier punto perteneciente a la superficie de una esfera, centrada sobre el satélite "A", cuyo radio es igual a la distancia "x".

- 2 satélites nos indican que estamos en algún lugar de la circunferencia que resulta de la intersección de las dos esferas generadas por los satélites "A" y "B".



Circunferencia por la intersección de 2 esferas

Figura 24: Lectura de la señal de 2 satélites [1]

En la Figura 24, se muestra como un segundo satélite: "B", ubicado a una distancia "y =19.308 Km" de nuestro punto a medir, ya genera una superficie donde debe encontrarse dicho punto a medir "P", por ser los únicos puntos que pueden estar simultáneamente a "x" distancia del satélite "A" y a "y" distancia de "B", los cuales pertenecen a la intersección de las dos esferas (circunferencia "azul").

- Con 3 satélites ya podemos determinar que estamos en alguno de los dos puntos de la circunferencia, pertenecientes a la intersección de las tres esferas.

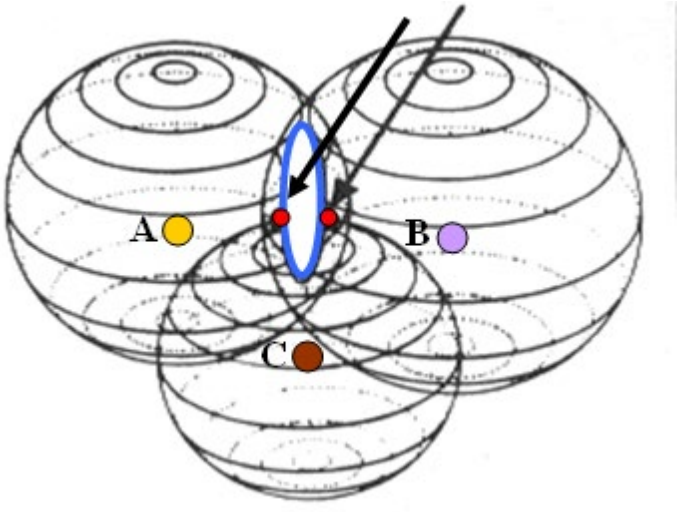


Figura 25: Lectura de la señal de 3 satélites [1]

En la Figura 25, ahora se presentan tres satélites simultáneamente, el tercero (C) ubicado a "z = 20.917 Km" de distancia de nuestro punto. Los únicos puntos posibles de encontrarse a: "x" de "A", "y" de "B", "z" de "C", son los dos puntos de la circunferencia "azul".

No es muy difícil determinar cuál de estos dos puntos es la correcta ubicación de nuestro punto "P", ya que uno de ellos puede ser eliminado fácilmente por corresponder a una solución ridícula, o sea que podemos determinar con mucha precisión con 3 satélites las coordenadas de cualquier punto de la superficie de la tierra, aunque la geometría nos indica que hace falta: 4 satélites. Finalmente, pero por otras razones técnicas, que veremos más adelante, hacen falta 4 satélites.

La velocidad de la Luz (la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas), es conocida con precisión: 299.792 Km/seg, por lo tanto conociendo con cierta precisión el tiempo "ΔT" que se demora en llegar una Señal Codificada del Satélite al Receptor, podemos determinar coordenadas precisas para el punto "P".

C/A Code (Coarse Acquisition Code: Código de adquisición grueso)

Para lograr medir este "ΔT", el Satélite y el Receptor se encuentran con sus relojes sincronizados y transmitiendo un mismo "pattern" de señal codificada (pseudo-random codes), permitiendo en forma permanente conocer la diferencia de tiempo como comparación de la señal generada en el Receptor con la del Satélite (Figura 24).
Cada uno de los 27 satélites emite su propio "Pseudo Code" y nuestro Receptor posee memorizado el mismo "Pseudo-Code" para comparar contra el del satélite.
Lo anterior es válido si se considera que la sincronización entre el reloj del Satélite y el de nuestro Receptor es perfecta. Por ejemplo si nuestro sincronismo posee un error de ± 1 milisegundo (0,001 segundos) la precisión en la distancia calculada será de:

(299792 Km/seg) x 0,001 seg = ± 300 Km

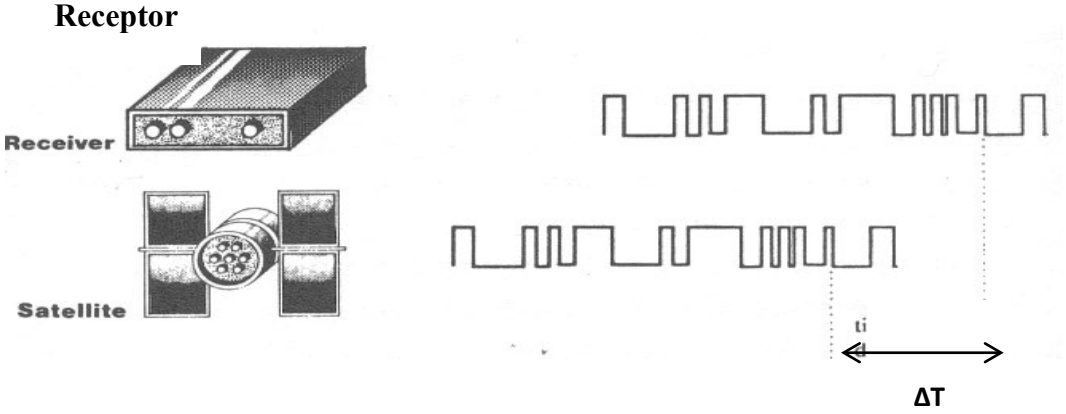


Figura 26, Pseudo-random Code (C/A: Coarse Acqusition Code) [6]

El Reloj de c/Satélite tiene precisión atómica y es considerada referencia, pero los relojes de nuestros Receptores poseen una precisión garantizada por un cristal de Cuarzo. No se justifica que los receptores posean un reloj más preciso (mayor costo, condiciones extremas de operación, mayor volumen) ya

que como veremos la recepción simultánea de varios satélites corrige la diferencia de tiempo de sincronismo con el reloj de nuestro Receptor.

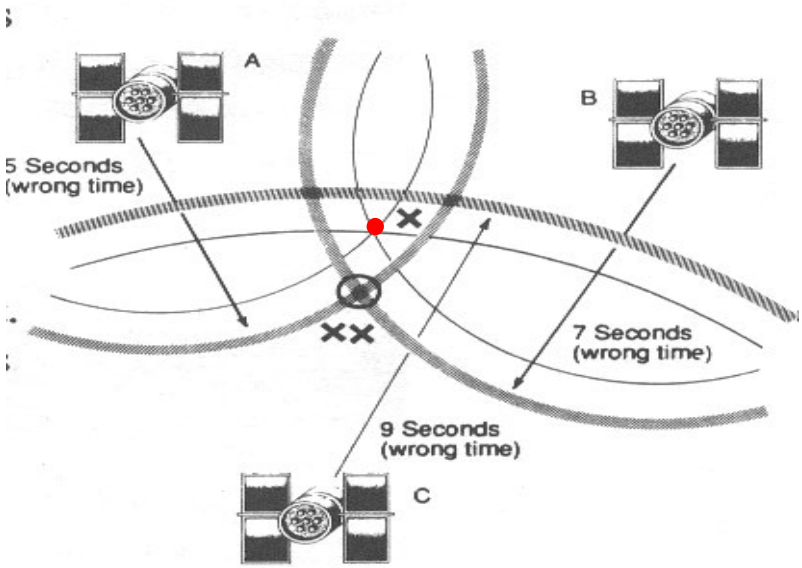


Figura 27: Corrección del error en el Reloj del Receptor [1]

En la Figura 27, se ha exagerado el error de nuestro Receptor y consideramos que este atrasa al reloj del Satélite en 1 segundo. Aquí en lugar de medir distancias, directamente medimos "ΔT" por ser esta medida directamente proporcional a la anterior.
Con un solo satélite, "A", cuyo "ΔT" real es de 4 segundos, nuestro Receptor indicará: 5 segundos. Con este error no se podrá determinar corrección alguna.
Sumando al Satélite "B" (ΔT real = 6 seg), el frente de ondas (debido al error es de 7 seg), corta al del "A" en el punto ubicado en "XX" y no como debiera hacerlo en "**X**" (Punto real).
Ahora sumando al satélite "C" (ΔT real = 8 seg) el Punto Real "**X**" queda encerrado y simétricamente acotado. Procesos de sustracción automática en el microprocesador de nuestro Receptor logra determinar con exactitud los tiempos reales y por lo tanto las distancias.
También aquí adelantamos que con 4 Satélites o más, los beneficios técnicos resultan significativos.

Orbita Satelital

Las órbitas de los satélites del Sistema GPS, son muy altas y fueron programadas rigurosamente, por lo tanto tales órbitas son muy precisas y por lo tanto resulta perfectamente predecible el lugar que ocupa c/satélite dentro de su órbita en cada instante de tiempo. Nuestro Receptor tienen cargado en sus memorias, con suficiente anticipación, almanaques con la información de los 27 satélites, conociéndose donde se encuentran en cada momento.

Para hacer el sistema más preciso, el Departamento de Defensa de U.S. (**DoD**) corrige las novedades de la órbita de c/satélite 2 veces por día (cada satélite da una vuelta a la Tierra cada 12 horas). Dos veces al día es corregido el "Error de Efemérides" (ephemeris error) que consiste en medir e indicar cualquier variación en la altitud, posición y velocidad de c/satélite (las mareas lunares y solares influyen en la órbita satelital).
Entonces no solo transmite c/satélite un pseudo-código como señal electromagnética, sino que también transmite un "Mensaje" (data message) que indica sus datos orbitales y la "salud" o precisión de estos.

Acción de la Ionosfera

La Ionosfera es una capa de la atmósfera ubicada entre 130 y 200 Km por encima de la Tierra (por debajo de la órbita satelital GPS) caracterizada por una actividad eléctrica importante (partículas cargadas eléctricamente), que modifican la propagación de las Ondas electromagnéticas entrantes y salientes de la Tierra. Dicha actividad es variable y depende especialmente de las explosiones solares.
La Ionosfera retarda la propagación de las ondas electromagnéticas, inversamente proporcional al cuadrado de su frecuencia. Al no ser la velocidad constante, tampoco los tiempos medidos serán precisos.
Los satélites emiten sus códigos y mensajes utilizando dos frecuencias distintas:
L1 = 1575,42 MHz; transmite 2 pseudo códigos: C/A (coarse code) y P (precise code).
L2 = 1227,70 MHz; transmite solo el "P code".
Nuestro Receptor, compara los retardos de una misma señal-mensaje recibido con dos frecuencias distintas (dual-frequency GPS Receivers) y corrige en forma dinámica el retardo producido en la Ionosfera.
Dilución de la Precisión (Geometric Dilution of Precision: GDOP)

No todos los satélites aportan de igual manera a la precisión de la medida, la geometría que se forma entre ellos y nuestro Punto de medida al momento de su obtención, afectan a la precisión del sistema.
Si especulamos con la posición de los satélites de la Figura 27, podemos apreciar que la imprecisión en la ubicación temporal del punto "X" se incrementa, si la posición de los satélites entre si se reduce.
Se puede afirmar entonces que "cuanto mayor ángulo formen nuestros satélites con respecto al punto de medida, mayor será la precisión de la medida de dicho punto".
Nuestro Receptor, al conocer la posición de c/satélite con respecto a nuestro punto de medida, elige siempre a los 4 mejores satélites para reducir al mínimo el GDOP.

Selección de precisión (Selectivity Availability: S/A)

Antiguamente el "C/A Code" era considerado un "pseudo" código de menor precisión que el "P Code", en principio la frecuencia portadora "L1" fue aproximadamente 10 veces menor que la frecuencia de la portadora "L2". Actualmente con un buen Receptor, no existen diferencias de precisión entre las medidas obtenidas con C/A o P.
Aparte de los problemas técnicos considerados, existe uno caprichoso y principal que es manejado por el Departamento de Defensa de USA y que permite reducir la precisión de medida en función de las necesidades militares tácticas u otros fines estratégicos considerados así por USA. Por ejemplo, no permitirían utilizar a hipotéticas fuerzas hostiles el Sistema GPS para localizar sus "blancos". Generalmente el S/A se aplica sobre la C/A, lo que permite, de algún modo, seguir generando desconfianza en su precisión.

Resumen de los Errores Cometidos

Basándose en las posibilidades de los errores mencionados en la medida GPS de un punto de la superficie terrestre (medida sin corrección diferencial), resumimos la contribución de los mismos:

- A - Error por precisión del Reloj. 0,6 m
- B - Error de Efemérides : 0,6 m
- C - Error del Receptor: 1,3 m
- D - Error por la atmósfera/ionosfera: 4,0 m
- E - Error por "S/A" (si es aplicado): 8,0 m

El error de medida total se calcula mediante la raíz cuadrada de la suma de los errores al cuadrado:

$$\text{Error Total} = \sqrt{A^2 + B^2 + C^2 + D^2 + E^2} = 4{,}2 \text{ metros o } 9 \text{ metros (aplicado S/A)}$$

El valor anterior dependerá del valor de PDOP (Position Dilution of Precision) que generalmente es usado en un rango comprendido entre 4 y 6.

Originalmente la precisión de las medidas era:

- Con un muy buen Receptor: 20 – 33 m
- Con un mal Receptor: 66 m
- Con "S/A" aplicado: 115 m

La precisión de la medida ha mejorado radicalmente con: la mayor exactitud de los receptores, la utilización conjunta del sistema GPS con otros sistemas satelitales: como el "Glonnas" de Rusia y "Galileo" de la Unión Europea, y con métodos y software que integran las diferentes medidas de un mismo punto.

Diferencial GPS

Esta técnica permite una rápida medida de las coordenadas de un punto siendo esta de gran precisión.
Consiste en tomar un Receptor como referencia para los demás (Estación de Referencia o "Reference Receiver") el cual es colocado sobre un punto de coordenadas conocidas y calculadas con precisión (generalmente con "Fast Static"). Este Receptor captará los mismos satélites que los Receptores colocados sobre unidades móviles (Rover Receivers) y como la distancia que separa a los receptores móviles del fijo es despreciable con respecto a la distancia a los satélites, los errores de coordenadas que la Estación de Referencia determine con respecto a la medida del Punto Referencia (por simple diferencia entre el valor considerado verdadero y el determinado por c/satélite), son utilizados como correcciones a las medidas de esos mismos satélites en los Receptores Móviles.
Para transmitir las correcciones desde la Estación Referencia hasta las Estaciones Móviles, se utilizan Radios FM en las bandas de VHF o UHF.

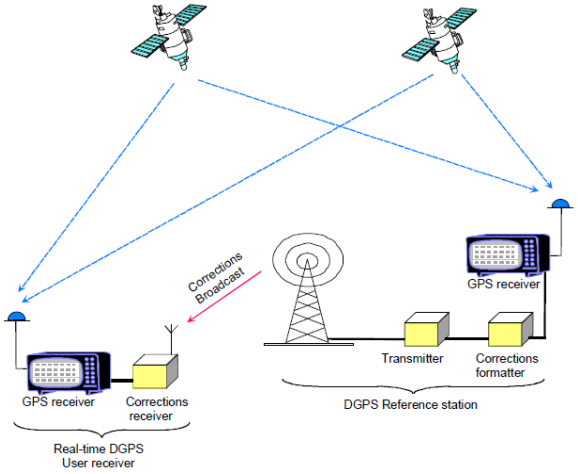


Figura 28, Estación de Referencia y Estaciones Móviles [6]

Con este técnica, trabajando con Posición Diferencial RTCM, los Receptores Móviles pueden llegar a tener la precisión de ±1 metro, y trabajando en RTK ± 0.01 metro.

RTCM: Radio Technical Commission for Maritime Services.
RTK: Real Time Kinematics

P Code (Precise Code)

Trabajando en modo diferencial, muchos receptores utilizan la diferencia de fase entre sus portadoras L1 y L2 para medir la distancia satélite-receptor, es decir utiliza el "P Code" en lugar del "C/A Code".

Las longitudes de onda de las frecuencias portadoras son:

- λ1 = 19,0 cm (L1 : 1575.42 MHz)
- λ2 = 24,4 cm (L2 : 1227,70 MHz)

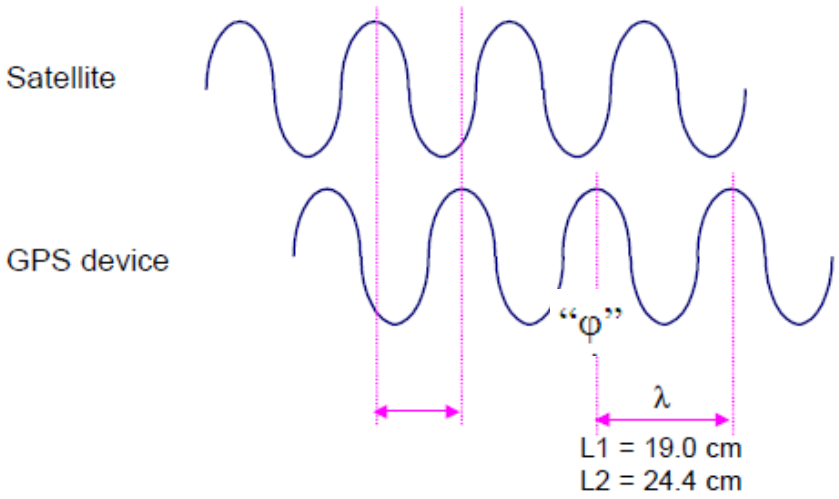


Figura 29, Diferencia de fase "φ" entre la señal emitida y la recibida [6]

"φ" es la diferencia de fase que mide el receptor entre la señal (L1 o L2) proveniente del satélite y la generada en el mismo.

La distancia "D" entre el satélite y el receptor es determinada con la fórmula:

$$D = \lambda (\varphi + N)$$

N: "Phase Integer"
"N" es la cantidad de ciclos que se produjeron desde la emisión hasta la recepción de la señal.
Como el valor de "N" depende de la altura y ubicación de los distintos satélites y de la movilidad también del receptor, se debe determinar durante una Inicialización del receptor, un valor común de ciclos para todos los satélites denominado: "N1", para que luego el receptor mida la variación de fase y ciclos con respecto "N1".

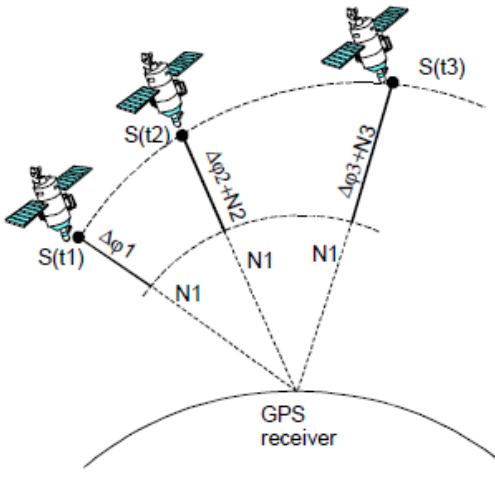


Figura 30, Distintos satélites y movilidad del receptor– distintas distancias al receptor [6]

Las medidas mencionadas se realizan para L1 y L2 con lo cual aumenta la precisión de la posición calculada, por que determina el valor de N más rápidamente y por corrección del error ocasionado por la propagación en la ionosfera.

RTK (Real Time Kinematic)

Este método utiliza la medida de la diferencia de fase entre portadoras y se basa en "kinematic" (Stop and Go: paro y sigo), donde es necesario una "Inicialización" del receptor (para el cálculo de N1, como se vio en el ítem anterior), previo a la medida de un Punto incógnita. La Inicialización consiste en ubicar el receptor en modo diferencial (DGPS) sobre una estación durante varios minutos. La Estación de Referencia deberá también encontrarse en un radio máximo de 20 Km con respecto a la Estación del receptor y además de transmitir correcciones diferenciales, también debe transmitirle al receptor móvil, valores actualizados de "N1" (Phase Integer).

La inicialización también puede realizarse desde un móvil sin detenerse en un punto fijo, siempre y cuando existan 5 o más satélites comunicados con el Receptor y este tenga instalada y habilitada la opción "On-The-Fly" (OTF).
Las precisiones obtenidas con RTK son del orden de: ± 2,5 centímetros.

RTX

Últimamente se han incorporado satélites geoestacionarios y que si poseemos receptores que operen con GNSS que, como ya vimos, integra la red GPS y la rusa GLONASS y nos suscribimos al sistema, podemos obtener muchísimas más correcciones sin necesidad de usar una estación base en tierra.
Las precisiones obtenidas con RTX son del orden de: ± 3-4 centímetros.

FastStatic

"FastStatic" es un método utilizado por los Topógrafos para obtener muy alta precisión:
± 5 milímetros.
La precisión depende de la cantidad de tiempo destinada a tomar las señales satelitales (8 a 30 minutos), donde se obtienen gran cantidad de medidas sobre el mismo punto y que luego son procesadas en computadoras para obtener la posición más probable.

Nota:

- *RTCM: es el formato que utiliza la Estación de Referencia para enviar las Correcciones de Coordenadas a las Estaciones Móviles vía modulación en FM de una Portadora de VHF (o UHF) en forma convencional. Otros formatos como RTCM, RTK y CMR (Compact Measurement Record), son utilizados para transmitir Correcciones en "Real Time Kinematic".*
- *NMA-183 (Nacional Marine Electronics Association): protocolo de transmisión utilizado para transmitir los mensajes de los satélites NAVSTART.*

Bibliografía consultada:

1. *Satellite Surveying by Gregory J. Hoar (1982) - Magnavox*
2. *GPS a Guide to the Next Utility – by Jeff Hurn - Trimble Navigation*
3. *Introduction to Geodesy by James R. Smith*
4. *Geodesy for the Layman by Richard K. Bursars (1959) – NOAA*
5. *Trimble survey Controller Reference Manual – Trimble (January 2001)*
6. *Real Time Positioning - Sercel 408UL Trainee Course 2004.*
7. *Astronomía - Shahen Hacyan Saleryan –U*
8. *El posicionamiento satelital y sus sistemas de corrección. Villarroel1; F. Scaramuzza1; A. Méndez1; J. Vélez, Red Agricultura de Precisión - INTA EEA Manfredi.*
9. *Introducción a Geodesia y Topografía, P.R.Concetti para WesternGeco 2002.*
10. *Geodetic Datum Overview by Peter H. Dana, University of Texas at Austin 1995.*

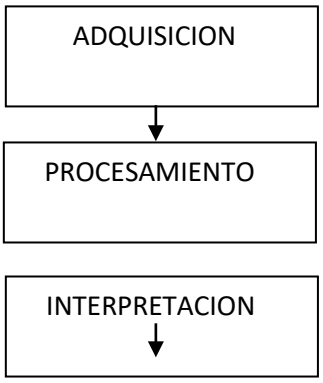
CAPITULO 3 – INTRODUCCION AL MÉTODO SÍSMICO- 1

Introducción

Los hidrocarburos se originan y se encuentran en Cuencas Sedimentarias (ver Introducción a la Geología).
Si queremos tener imágenes de las distintas capas de rocas sedimentarias que rellenan la cuenca (también denominados: "estratos"), podemos emplear la Exploración Sísmica y obtenerlas y con ellas podríamos reconocer cuales podrían contener hidrocarburos y donde podríamos perforar para hallarlo al haber observado posibilidades de entrampamiento.

Nociones de Geodesia y Topografía en el Capítulo 2, permitirán entender cómo se puede ubicar unívocamente un punto sobre la superficie de la Tierra.

La exploración sísmica puede ser dividida en 3 etapas diferentes:



Registro de datos sísmicos sobre la superficie del área donde se quiere conocer la imagen del subsuelo.

Rescata de la información adquirida, los datos sísmicos, en base a complejos desarrollos matemáticos y en modelos teóricos.

Construye mapas geológicos a partir de la señal sísmica

La primera etapa: la Adquisición Sísmica, es la más importante ya que de ella depende la calidad del producto final: la imagen del subsuelo.
Aunque la etapa de procesamiento pueda con sus técnicas predecir y mejorar la información de la señal, por ejemplo: por "remoción de ruidos", un mayor esfuerzo en este campo no logrará compensar datos deficientemente adquiridos.

Sin prescindir de algunos conceptos sobre procesamiento e interpretación, este capítulo intentará centrarse sobre la adquisición del dato sísmico para luego mejor entender el instrumental empleado en esta etapa.

La Adquisición Sísmica

Sísmica**:** del griego "seísmos" que significa: temblor de la tierra o pequeño terremoto.

Los terremotos se propagan mediante ondas mecánicas (ondas sísmicas) por medio de cuerpos elásticos: sólidos, gaseosos y líquidos, es decir que responde a la definición física de **"sonido".**

La física del sonido es estudiada por la **acústica**, que trata tanto de la propagación de las ondas sonoras (ondas sísmicas) en los diferentes tipos de medios continuos, como la interacción de estas ondas sonoras con los cuerpos físicos.
La propagación del sonido involucra el transporte de energía sin transporte de materia ya que genera una perturbación mecánica en los cuerpos que hace vibrar elásticamente a sus partículas. Este tipo de movimiento en el cual no es el medio en sí mismo sino alguna perturbación lo que se desplaza, se denomina **"onda"**.

Existen muchos tipos de ondas, tales como: las ondas de radio, la luz, la radiación del calor, las ondas sobre la superficie de un lago, los tsunamis, etc. Cuando la onda resulta audible, se llama onda sonora.

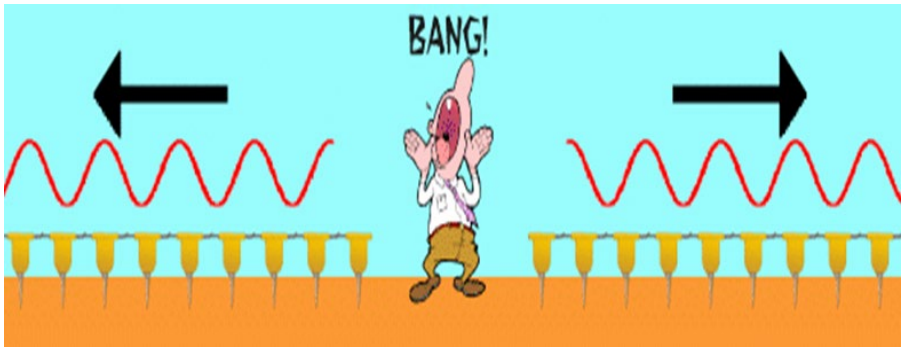


Figura 1, onda sonora captada por geófonos [4].

La velocidad de desplazamiento de la onda depende del medio donde se propaga, de las condiciones ambientales de este medio y de la forma con que esta onda vibra. Por ejemplo la velocidad del sonido en el aire a temperatura ambiente (25 ºC) es de: Vs = 345 m/s

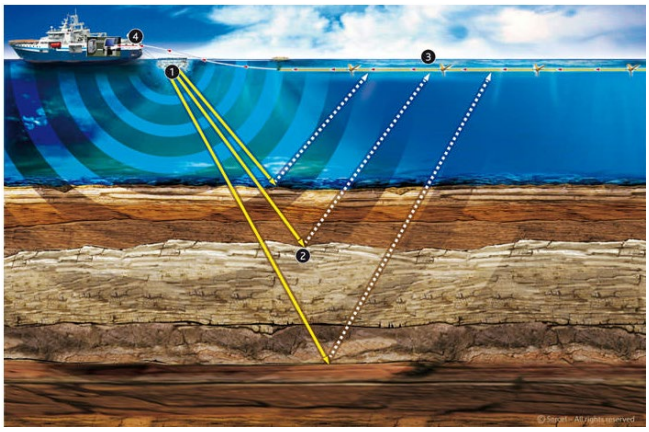
El Método Sísmico

El método sísmico consiste en generar un "micro-sismo", mediante: la detonación de una carga explosiva, o por la caída acelerada de un peso (Thumper), o por camiones que vibran (Vibroseis), o mediante cañones de aire comprimido, etc. El microsismo genera ondas que se propagan debido a las propiedades elásticas de las rocas o de los fluidos (agua, aire, gas), a las velocidades que caracterizan a estos elementos. Estas ondas elásticas se reflejan parcialmente en cada interface (o contraste de impedancias acústicas),

para regresar hacia la superficie, y también se refractan para seguir su viaje hacia capas más profundas y continuar reflejándose.

La Cuenca Sedimentaria es una depresión de terreno que se rellenó de sedimentos durante muchos millones de años, arrastrando restos orgánicos que se transformaron en hidrocarburos. Al suelo de la Cuenca se lo denomina Basamento Cristalino y lo caracteriza una velocidad de propagación de ondas elásticas mucho mayor que la de los sedimentos que lo rellenaron.
En general las capas del subsuelo poseen velocidades de transmisión de ondas elásticas, mayor cuanto mayor es su profundidad, aunque suelen existir capas sedimentarias intermedias constituidas por rocas de menor velocidad que la precedente.

a)



b)

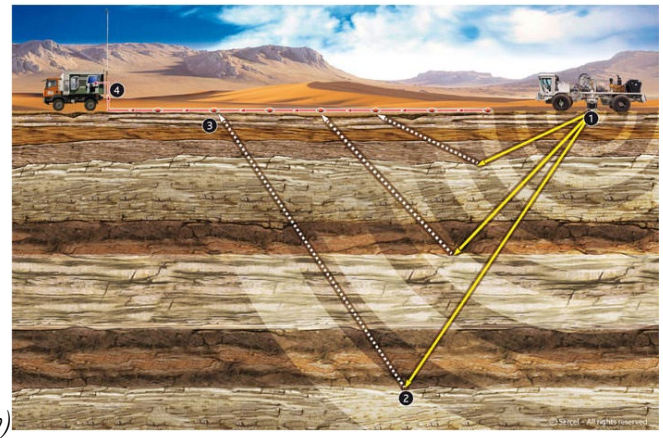


Figura 2, Exploración Sísmica: (a) en el mar; (b) en tierra; 1): Emisor; 2) Reflector; 3) Receptor [Ingenieros geofísicos SA]

En sísmica marina se utilizan "cañones de aire comprimido" como fuente de energía, para no afectar a la fauna marina. La velocidad de propagación del sonido en un medio líquido es cuatro veces superior al del aire (aproximadamente: 1300 m/s), pero los líquidos no pueden propagar ondas de corte.
Como veremos más adelante, existen diferentes tipos de ondas de acuerdo a la dirección en las cuales vibran las partículas del medio con respecto a su dirección de propagación.

La onda que llega a la superficie de la Cuenca, luego de haber sufrido refracciones y reflexiones en las distintas capas de sedimentos, es detectada por un receptor (o sensor) que transduce el movimiento del terreno, al cual se encuentra acoplado, en un voltaje eléctrico análogo.

Esta onda o sonido ha tenido que viajar una vez hacia cada capa del subsuelo y otra vez hacia la superficie donde será registrada, por lo tanto el tiempo que registramos los eventos (reflexiones y refracciones) son **"tiempos dobles"**.

Tiempo de arribo = 2 Profundidad / Velocidad de Propagación

La energía sísmica se propaga a través de la tierra en forma de ondas (waves).

Las partículas del terreno se desplazan sinusoidalmente alrededor de su posición de reposo (undisturbed location) debido a las propiedades elásticas de ese material, dentro de sus límites elásticos.

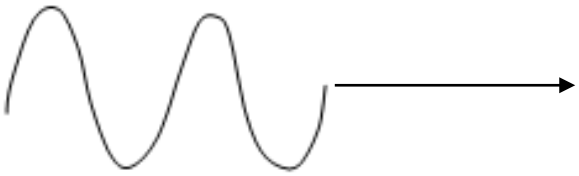


Figura 3, onda sinusoidal propagándose a través de un medio

Varios tipos de ondas pueden provocar tales disturbios en las partículas de la tierra:

- Ondas longitudinales o Compresionales (Ondas P).
- Ondas transversales o de Corte (Ondas S o Shear).
- Ondas Complejas o Ground Roll, que se propagan elípticamente, como las: Ondas de Rayleigh y las de Love cercanas a la superficie del terreno.

Como veremos, las Ondas S no se pueden propagar a través del agua (de los fluidos en general). Generalmente las Ondas P son las más utilizadas por la sísmica convencional. Ambas Ondas P y S se denominan: Ondas de Cuerpo ya que se propagan por el interior de la Tierra, en cambio el "Ground Roll" viaja por la superficie de la Tierra, se atenúa rápidamente con la profundidad y generalmente son de baja velocidad y frecuencia.

Las Ondas de Cuerpo se propagan esféricamente desde el centro emisor (Fuente). A los puntos de la superficie esférica se los denomina: Frente de Onda.

La amplitud de la onda sinusoidal, decae inversamente con la distancia de alejamiento de su fuente.

Amplitud del Frente de Onda ~ k / r

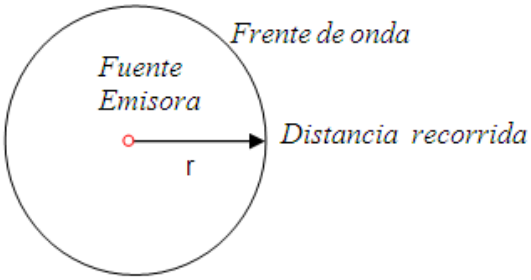


Figura 4, Frente de onda a una distancia "r" del centro emisor

Generalmente la energía sísmica emitida se descompone en los siguientes porcentajes de Ondas:

- Ondas de Rayleigh y Love (Ground Roll): 68 %
- Ondas de Corte (Shear o S): 26 %
- Ondas Compresionales (P): 6 %

La velocidad de propagación de estas ondas depende también de las propiedades elásticas del medio, siendo importantes las características de porosidad y del fluido que ocupe dichos poros:

- Ondas P: 150 – 6000 m/s
- Ondas S: 75 – 3000 m/s
- Rayleigh: aproximadamente el 90 % de las Ondas S.

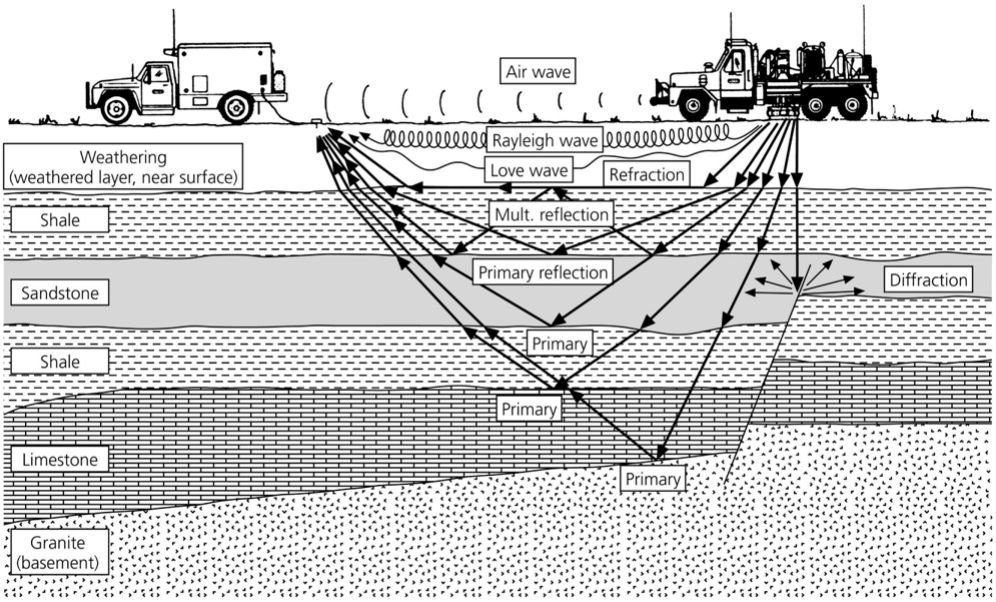


Diagrama que muestra los tipos de ondas sísmicas generadas en diferentes interfaces y estructuras geológicas

Figura 5, diferentes tipos de ondas y caminos que estas recorren [4]

Principio de Huygens:

Alrededor de 1860 el físico danés Huygens, propuso un mecanismo simple para trazar la propagación de ondas.

Huygens visualizó un método para pasar de un frente de onda a otro. Cuando el movimiento ondulatorio alcanza los puntos que componen un frente de onda, cada partícula del frente se convierte en una fuente secundaria de ondas, que emite ondas secundarias (indicadas por semicircunferencias) que alcanzan la próxima capa de partículas del medio. Entonces estas partículas se ponen en movimiento, formando el subsiguiente frente de onda con la envolvente de estas semicircunferencias. El proceso se repite, resultando la propagación de la onda a través del medio.
Esta representación de la propagación es muy razonable cuando la onda resulta de las vibraciones mecánicas de las partículas del medio, es decir una onda elástica, pero no tendría significado físico en las ondas electromagnéticas donde no hay partículas que vibren.

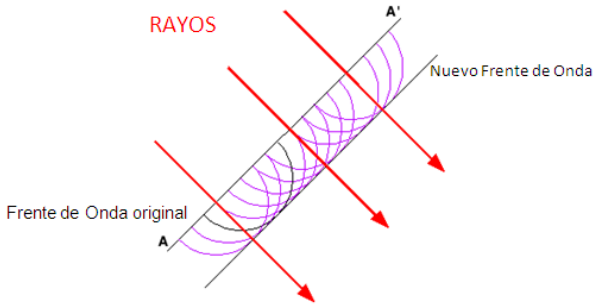


Figura 6, Principio de Huygens [5]

Un frente de onda, es una superficie que pasa por todos los puntos del medio alcanzado por el movimiento ondulatorio en el mismo instante. La perturbación en todos esos puntos tiene la misma fase, entonces podemos trazar una serie de líneas perpendiculares a los sucesivos frentes de onda. Estas líneas se denominan **rayos** y corresponden a las líneas de propagación de la onda. La relación entre rayos y frente de ondas es similar a la de líneas de fuerza y superficies equipotenciales. El tiempo que separa puntos correspondientes de dos superficies de onda es el mismo para todos los pares de puntos correspondientes (teorema de Malus).

Nociones de Elasticidad

Elasticidad es la_propiedad que tienen los cuerpos de recuperar su forma original, después de haber sufrido una deformación por acción de fuerzas exteriores y al dejar de aplicarse tales fuerzas.

En la Figura 7, observamos una gráfica de Esfuerzo (Presión) vs. Deformación, que podría corresponder al ensayo de una barra de acero que es estirada por la acción de una Prensa Hidráulica (ejemplo: Prensa Hamsler de 50 Toneladas).

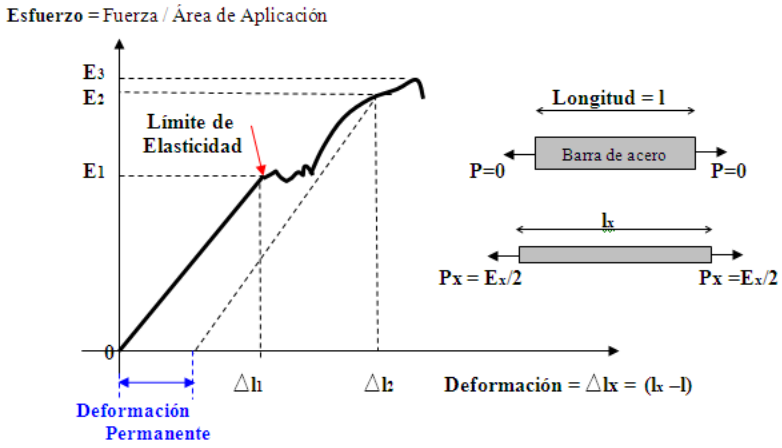


Figura 7: Curva Esfuerzo vs. Deformación unitaria [11]

- La curva permanece en "0"cuando no existe esfuerzo "E" aplicado, por lo tanto la barra conserva su longitud "l" original y la deformación o estiramiento es: $\Delta l_o = l - l = 0$.

- Cuando el esfuerzo adquiere el valor E_1, la barra se ha estirado una longitud l_1 y la deformación será: $\Delta l_1 = l_1 - l$. Cuando el esfuerzo es retirado (E=0), la barra vuelve a su longitud original "l", pues el esfuerzo no ha superado el límite elástico del cuerpo. Entre 0 y E1 la gráfica muestra una línea recta pues la Deformación es directamente proporcional al Esfuerzo aplicado (recta de Hooke).

- Si ahora aplicamos un Esfuerzo E2, la barra se estira una longitud Δl_2 ($\Delta l_2 = l_2 - l$). Cuando el esfuerzo es retirado la barra no vuelve a su longitud original "l" quedando estirada debido a la "deformación plástica" generada por haberse superado el Límite de Elasticidad del cuerpo. Más allá del Límite Elástico, el cuerpo sufre un reacomodamiento de partículas para pasar a una zona de Fluencia (el sólido se comporta como un fluido), la curva se hace parabólica y para un Esfuerzo "E3", la barra se corta dividiéndose en dos.

La relación entre Esfuerzo y Deformación Unitaria es constante siempre que no se supere el "límite de elasticidad" correspondiente. A dicha constante se la denomina: **"**Módulo de Elasticidad" o simplemente módulo elástico. Esta relación se conoce con el nombre: Ley de Hooke.

Modulo Elástico = Esfuerzo / Deformación Unitaria = cte.

Esta ley es válida para todos los modos de aplicación del esfuerzo sobre un cuerpo, e introduce la deformación unitaria que no es nada más que la relación entre la Deformación del cuerpo (estiramiento en el ejemplo anterior) y la Dimensión Original del mismo (longitud **l,** en nuestro anterior ejemplo).

$$\text{Deformación Unitaria} = \frac{\text{Dimensión Original – Dimensión Deformada}}{\text{Dimensión Original}}$$

Si los esfuerzos sobre un cuerpo se aplican por tracción longitudinal, como se aprecia en la figura 6, estamos en un caso particular de Elasticidad de Forma, pues aquí también el esfuerzo modifica la forma del cuerpo pero no así su volumen. En este caso el Módulo de Elasticidad se denomina: Módulo de Young (E).

$$Y = \text{Módulo de Young} = \text{Esfuerzo Longitudinal} / \text{Deformación Unitaria longitudinal}$$

$$Y = \frac{\text{Esfuerzo}}{\Delta l / l} = \frac{\text{Fuerza} / \text{Área de aplicación}}{\Delta l / l} = \frac{[\text{Newton} / m^2]}{[m / m]}$$

A su vez debemos agregar que, las propiedades elásticas de un cuerpo, dependen del modo de aplicación del esfuerzo **E,** en el ejemplo anterior se trata de un esfuerzo longitudinal de tracción: dentro de los límites elásticos, la barra cambia de forma pero en todo momento conserva el volumen.

Elasticidad de Forma – Módulo de Rigidez – Módulo de Corte

Cuando la forma de un cuerpo se varía y no así su volumen, debido a esfuerzos tangenciales o de corte, el Módulo de Elasticidad de denomina: "Módulo de Rigidez" (μ) y se calcula de la siguiente manera.

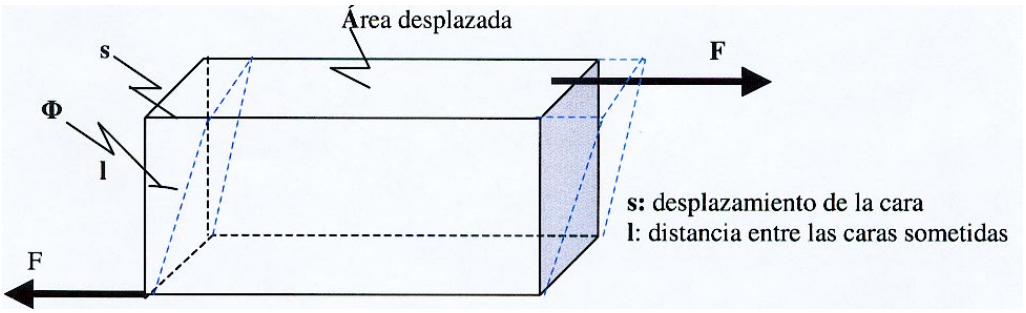


Figura 8: Esfuerzo de Corte o Cizalla aplicado a la cara de superficie "A" [11]

Al aplicar la Fuerza F sobre las caras opuestas del cuerpo de la figura 8, estas caras se desplazan una distancia **"s"** una en relación con la otra y las otras dos caras laterales se deforman de rectángulos en paralelogramos siendo **"Φ"** el ángulo formado entre la cara original y la deformada.

μ = Módulo de Corte = Esfuerzo de Corte / Deformación Cortante

$$\text{Esfuerzo Cortante} = \frac{\text{Fuerza Tangencial}}{\text{Área Cara Desplazada}} = \frac{F}{A}$$

$$\text{Deformación Cortante} = \frac{\text{Corrimiento Cara deslizante}}{\text{Distancia Caras deslizantes}} = \frac{s}{l} \approx \Phi$$

Para ángulos pequeños: $s / l = \text{sen } \Phi = \Phi$

Por lo tanto: μ = Módulo de Rigidez o de Corte = $F / A.\Phi$

La Figura 9, muestra la acción de un esfuerzo de corte, típico de las Ondas S u "Ondas de Corte" (Shear Waves), sobre los poros de una roca de arenisca (sandstone), el volumen de los poros no varía, solamente la forma de ellos.

Si los poros se encontrasen con algún tipo de fluido en su interior (agua, gas, petróleo) al no modificarse el volumen de estos en la deformación, no ejercerían trabajo sobre dicho esfuerzo, no afectando a la transmisión del mismo.

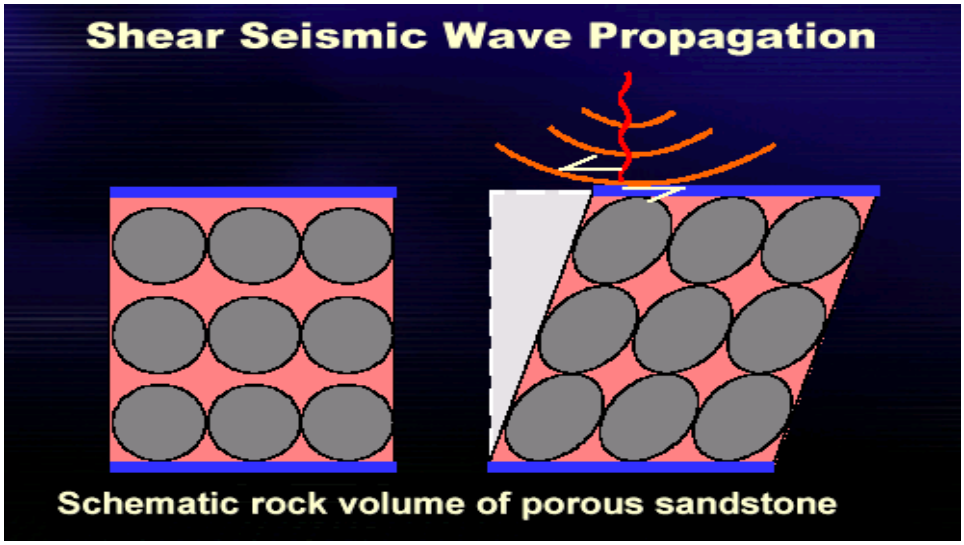


Figura 9: Elasticidad de Forma producida por Ondas de Corte [12]

Elasticidad de Volumen - Módulo de Bulk o de Incompresibilidad:

Si los esfuerzos son ejercidos por presión (hidrostática o equivalente) sobre un cuerpo (sumergido en un fluido o equivalente), cada porción de superficie soporta la misma fuerza **F** y esta se aplica normal a dicha superficie. La forma del cuerpo no cambia pero el volumen del cuerpo disminuye:
Como el cuerpo disminuye de volumen comprimiéndose, al Módulo de Elasticidad se lo denomina: "Módulo de compresibilidad".

$$B = \text{Módulo de Compresibilidad} = \frac{\text{Presión ejercida}}{\text{Deformación Unitaria de Volumen}} = \frac{\text{Presión}}{\Delta V/V}$$

Es más útil trabajar con el "Coeficiente de Incompresibilidad o Módulo de Bulk", que es el valor recíproco de "B":

$$k = 1 / B = \text{Módulo de Bulk o de Incompresibilidad}$$

En las figura 10 y 11, vemos que la Presión **P** ejercida sobre la superficie **A** del cuerpo (P = F/A) disminuye el volumen de ese cuerpo sin alterar la forma del mismo y que la deformación unitaria puede ser calculada midiendo la altura del cuerpo antes y durante la aplicación de la fuerza **F**.
También observamos la acción de un Esfuerzo de Compresión Hidrostática (la fuerza se ejerce en una única dirección con un ángulo de 90º con respecto al plano de la superficie de aplicación). Una Onda Sísmica P (Compressional Wave), siempre tiene una componente vertical que actúa de la misma manera, ejerciendo compresión sobre los poros de una roca (arenosa como en el ejemplo de la Figura 7), reduciendo su volumen. Bajo esta situación si los poros poseyeran fluido en su interior, estos no podrían comprimirse con facilidad (dependiendo del tipo de fluido: gas, agua, petróleo) ejerciendo un esfuerzo antagónico que modificaría la transmisión elástica original (veremos luego que el fluido dentro de los poros de una roca, modifica la velocidad de propagación de la Onda P dentro de dicha roca).

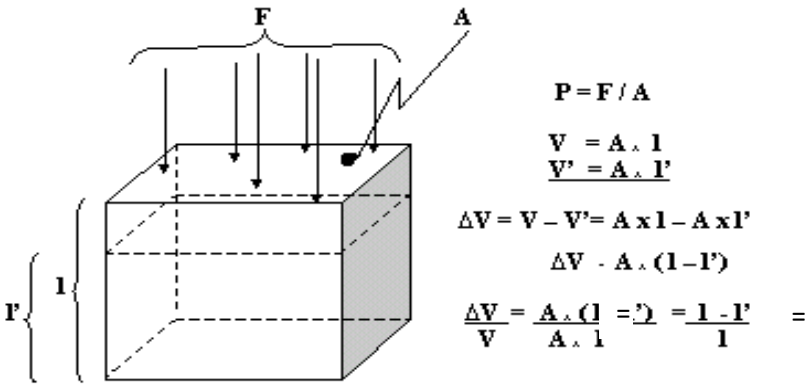


Figura 10: Ejemplo de Elasticidad de Volumen o Deformación por Compresión [11]

La Onda Elástica de Compresión (Compressional Wave: P) se vería afectada en su transmisión por la presencia de fluido en el interior de la roca.

Cuando la compresión no es homogénea y la Fuerza de Aplicación posee un cierto ángulo con respecto a la cara del cuerpo donde se aplica, se deberá descomponer la Fuerza en sus componentes verticales y horizontales, considerando a la Componente Vertical como Fuerza Compresional y la Componente Horizontal como Fuerza de Corte.

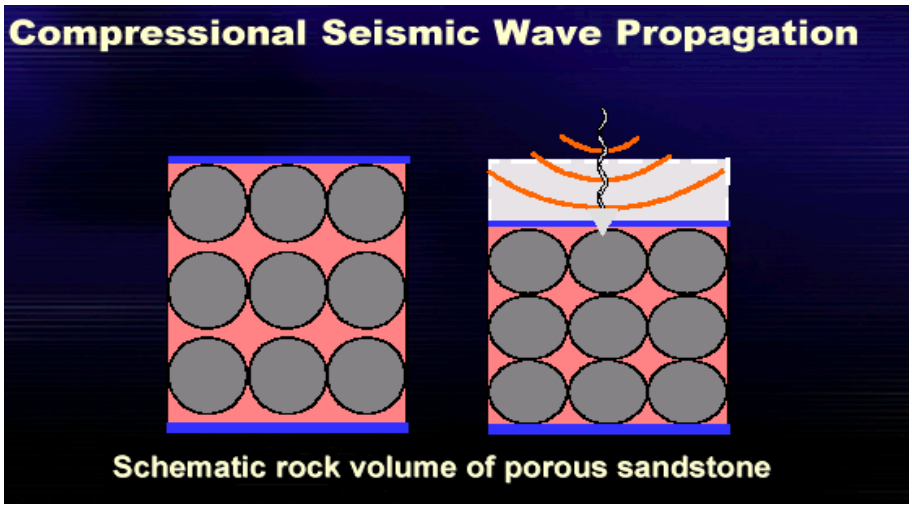


Figura 11: Deformación de los poros de una roca sometida a un esfuerzo Compresionales puro [12]

El cuerpo donde se aplica este esfuerzo sufre una Deformación de Volumen y de Forma dependiendo de la magnitud de la fuerza aplicada y de los Módulos Elásticos del cuerpo correspondientes a sus dos diferentes modos de aplicación del esfuerzo (ver Esfuerzo de Corte o "Shear").

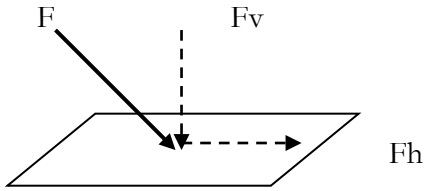


Figura 12: Descomposición de una Fuerza no perpendicular a la Cara de un Cuerpo [11]

Las Ondas Sísmicas poseen exactamente estas características y vemos que, para su entendimiento deberemos considerar estos dos modos diferentes de aplicación de esfuerzos (Compressional y de Corte) superponiéndose ellos y obteniendo un Módulo de Elasticidad como combinación del Módulo de Rigidez **"μ"** y de Incompresibilidad o de Bulk **"k"**. Las Ondas Sísmicas P, causan Deformación de Forma y de Volumen sobre las partículas de la roca por cual se desplazan.

Ondas Sísmicas Compresionales (Compressional Waves: P)

Se denominan Ondas Sísmicas Compresionales (P Waves), a aquellas que producen un movimiento de partículas en el cuerpo elástico por el que se propagan, en la misma dirección que su propio desplazamiento.

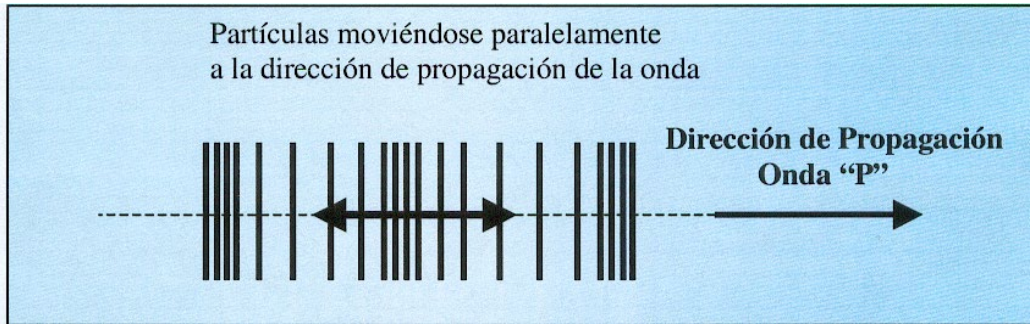


Figura 13: Modo de Propagación de una Onda Compresional "P" [11]

Ondas Sísmicas de Corte (Shear Waves: S)

Se denominan Ondas Sísmicas de Corte o de Cizalla (Shear Waves) a aquellas que producen un movimiento de partículas en el cuerpo elástico por el que se propagan, perpendicular a la dirección de su desplazamiento.

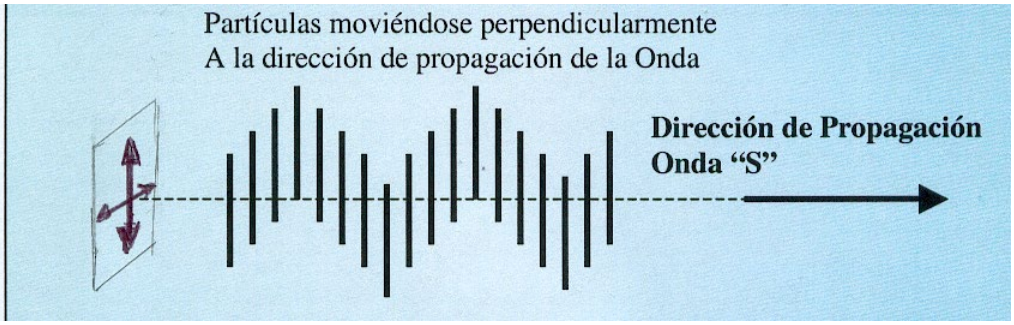


Figura 14: Modo de Propagación de una Onda de Corte "S" [11]

Velocidad de Propagación de una Onda Elástica

La velocidad de propagación de una Onda Elástica, expresada en metros/ segundos, depende de:

1. Modo de Propagación de la Onda (Ondas P o S)
2. Módulo Elástico del Cuerpo para el tipo de esfuerzo a la que es sometido
3. Densidad de dicho cuerpo.

Como vimos las "Shear Waves" u "Ondas S", al ser de aplicación más definida, cuando excitan elásticamente a un determinado cuerpo, este responde con una "deformación de forma", proporcional al Módulo de Rigidez. La velocidad de propagación o desplazamiento de la Onda S por las partículas de dicho cuerpo se calcula de la siguiente manera:

Vs = Velocidad Ondas "S" en un Sólido = $\sqrt{\mu / \varrho}$

μ: Módulo de Rigidez
ϱ: Densidad del Cuerpo

Cuanto mayor es la rigidez del cuerpo (mayor "**μ**"), mayor será la velocidad de propagación de las Ondas S por dicho cuerpo

Velocidad de Propagación de las Ondas "P"

Las Ondas "P" superponen respuestas elásticas de dos esfuerzos diferentes y que quedan expresados en la fórmula que caracteriza a su desplazamiento por las partículas de dicho cuerpo:

$$Vp = \text{Velocidad de Ondas "P" en un Sólido} = \sqrt{(k + \frac{4\,\mu}{3}) / \varrho}$$

k: Módulo de Bulk
μ: Módulo de Rigidez
ϱ: Densidad del Cuerpo

Relación de Velocidades: Vp/Vs

Una relación muy útil, se obtiene operando las relaciones anteriores:

$$\frac{Vp}{Vs} = \sqrt{\frac{k}{\mu} + \frac{4}{3}}$$

Módulo de Poisson

El Módulo de Poisson, es otro parámetro muy útil para describir la elasticidad de las rocas. Resulta de una relación entre la contracción lateral y el estiramiento longitudinal que sufre un cuerpo ante un esfuerzo:

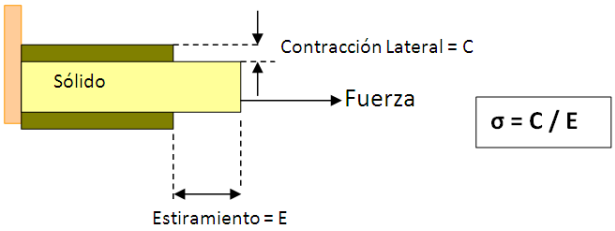


Figura 15, Módulo de Poisson [11]

El Módulo de Poisson tiende a ser bajo para cuerpos duros y alto para cuerpos blandos.
El Módulo de Poisson se relaciona con las velocidades de propagación elástica de las Ondas Sísmicas mediante las siguientes ecuaciones:

$$\sigma = 0{,}5(Vp/\,Vs)^2 - 1\ /\ (Vp/Vs)^2 - 1$$

$$Vp/Vs = \sqrt{1 - \sigma\ /\ 0{,}5 - \sigma}$$

Impedancia acústica de un estrato

Se denomina Impedancia acústica al grado de oposición de un medio elástico a la propagación de las ondas. Esta impedancia se puede comparar con la impedancia eléctrica, es decir una forma de disipación de energía de las ondas que se desplazan en un medio.
Siendo:

- V: velocidad de propagación de las ondas sísmicas (P y S) en un determinado material.
- ϱ: densidad del material.

Al producto de la velocidad de propagación del sonido por la densidad de dicho material, se denomina "Impedancia Acústica".

Impedancia Acústica: $I = V_x \varrho$

Un cambio de sedimentos en el subsuelo se caracteriza por un cambio de valor en la impedancia acústica, parte de la energía sísmica que incide sobre esta "interface de sedimentos" se refleja hacia la superficie y parte se refracta hacia sedimentos más profundos.

El porcentaje de la energía incidente que es reflejada en dicha interface, puede ser calculado conociendo las impedancias acústicas de los dos medios y se denomina: "**Coeficiente de Reflexión":**

Coeficiente de Reflexión: $$R = \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1} = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1} \sim \frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}$$

En la figura 16 se ejemplifica el concepto de Impedancia Acústica de cada capa (velocidad de propagación del sonido en dicha capa) y los Coeficientes de Reflexión en cada interface.

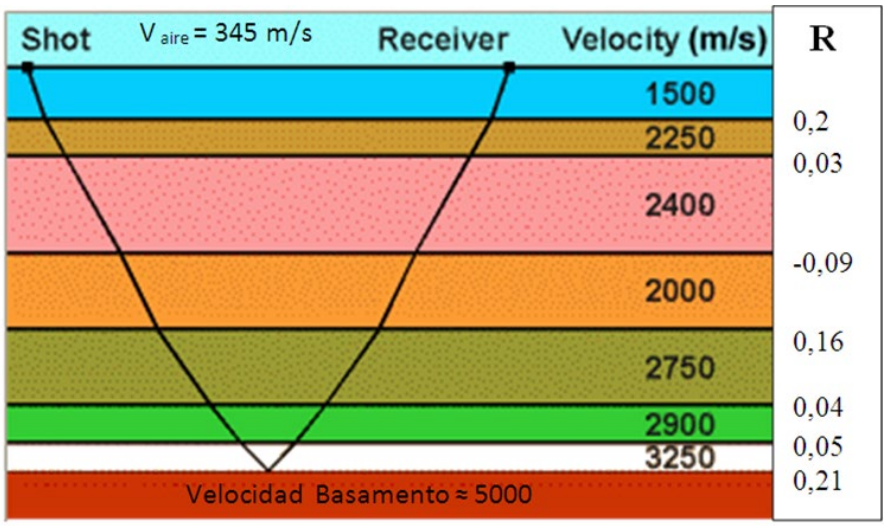


Figura 16, distintos sustratos y los índices de reflexión entre ellos [11]

- En la interface mar-estrato, el coeficiente de 0,2 indica que: el 20% de la energía del rayo que incide sobre esta interface se refleja hacia la superficie sin cambiar de fase. El 80% de la energía sísmica incidente se refracta hacia horizontes más profundos.
- En la interface siguiente, el contraste de impedancias no es tan grande (v_2=2400; v_1=2250), entonces la energía reflejada es solo del 3% de la energía incidente y el 97% se refractará.
- La siguiente interface presenta una v_2=2000 m/s < v_1=2400, por lo tanto el coeficiente es negativo (-0,09) indicando que se reflejará el 9% de la energía incidente y que la onda invertirá su polaridad.
- El mayor coeficiente de reflexión se produce en el regreso de las ondas, en el contraste "agua-aire": -0,99. El tema es que el aire es 800 veces menos denso que el agua y por lo tanto debemos incorporar las densidades de los medios en el cálculo del Coeficiente de Reflexión:

$$\mathbf{R} = \frac{(1/800)V2 - V1}{(1/800)V2 + V1} = \frac{-1499,6}{1500,4} = -0,999 \sim -1$$

Toda la energía incidente en la interface agua-aire se refleja y se propaga nuevamente hacia el fondo del mar con fase inversa a la onda incidente (de allí el signo negativo). El entretenimiento de la onda entre la superficie y el lecho del mar, se denomina "ringing" y es un importante ruido a atenuar en procesamiento.

Como vemos, el conocimiento de los Coeficientes de Reflexión, proporciona una información muy importante sobre las características del subsuelo. La sísmica de pozo, puede obtener una completa información de estos coeficientes y la profundidad a la cual se encuentran las interfaces, pero esta información es puntual y la forma de obtener el cuadro total del área es a través de la Sísmica Horizontal.

Perfil Sónico

El perfil de los coeficientes de reflexión es denominado "Respuesta Impulsiva de la Tierra".

Para realizar el Sónico (como habitualmente se lo menciona), se utiliza una herramienta (buzo o sonda) de "wireline", que se introduce en el Pozo Exploratorio y se baja a diferentes y programadas profundidades.

Esta herramienta consiste de un transmisor T (que emite una señal acústica) y de varios receptores colocados a distancias ΔXs perfectamente definidas del transmisor, que permiten medir la velocidad del sedimento o roca circundante a donde se transmite la señal acústica, por simple medida del tiempo ΔTs transcurrido entre la transmisión y recepción de la señal.

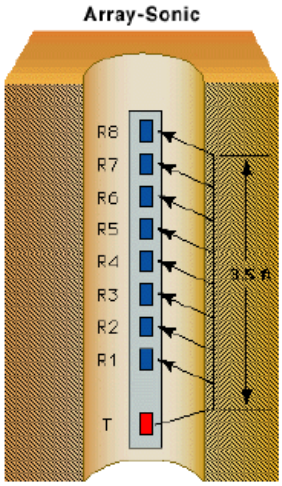


Figura 17: Herramienta utilizada para adquirir el Sónico

Distancia entre Receptores de la Onda (fijo): $\underline{\Delta X} =$ Velocidad de la Roca
Diferencia de tiempos de arribo del sonido: ΔT

La Figura 18 muestra el resultado del Sónico, donde la profundidad es medida en "pies" y la velocidad interválica es expresada en "pies/segundos".

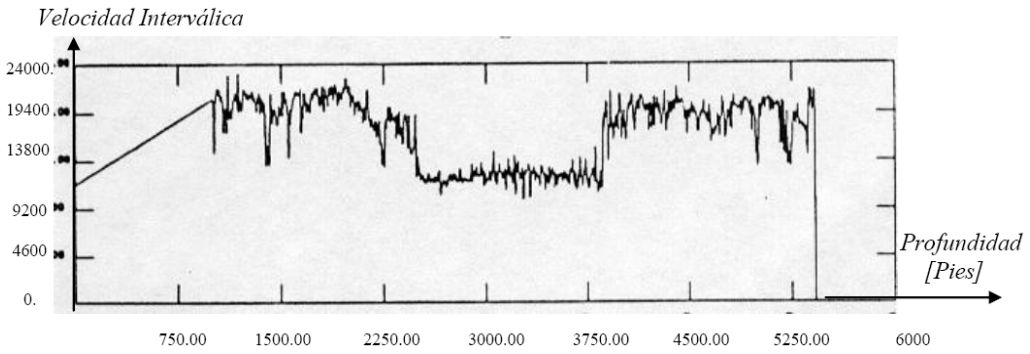


Figura 18, Perfil Sónico [1]

Conocidas las velocidades interválicas, se calculan los "Coeficientes de Reflexión" en función de la profundidad.

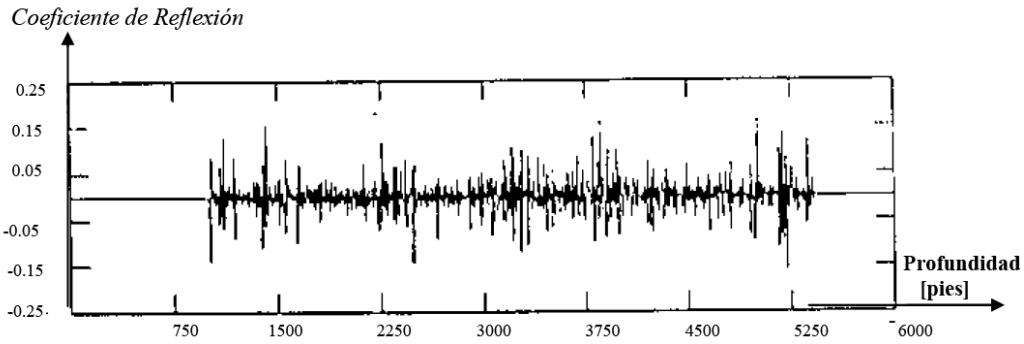


Figura 19, Coeficientes de Reflexión en función de la Profundidad [1]

Necesitamos expresar estos mismos coeficientes en "función del tiempo", pues nuestros perfiles sísmicos horizontales (con los cuales queremos compararlos), vienen expresados en función del tiempo. Para ello utilizaremos "los tiempos integrados en función de la profundidad" que se encuentran incluidos en el mismo perfil sónico.

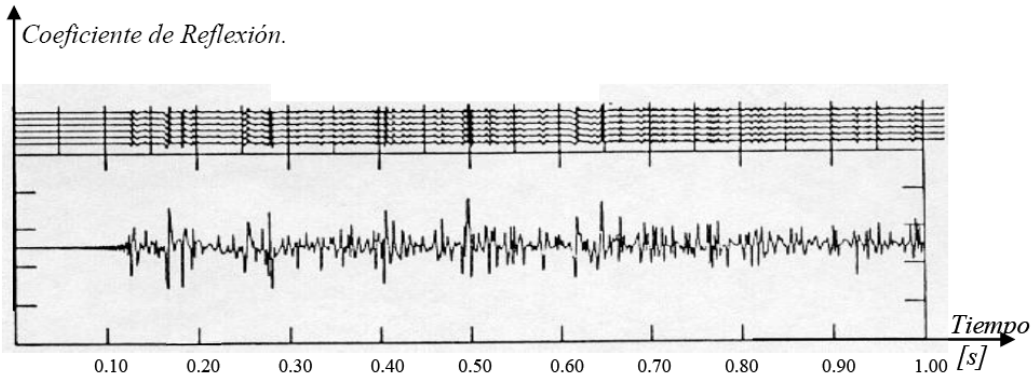


Figura 20, Coeficientes de Reflexión en función del Tiempo o "Respuesta Impulsiva del Terreno" [1]

La Figura 20 es la "Respuesta Impulsiva del Terreno", es la que debería coincidir con nuestro perfil sísmico para esa determinada posición del terreno, si hubiésemos empleado una Fuente de Energía Impulsiva (Dinamita como ejemplo).

Como no podemos hacer infinitos pozos para conocer las rocas que componen el subsuelo de una cuenca sedimentaria, interpolamos los resultados de estratégicos pozos verticales con la sísmica horizontal obteniendo una imagen continua del subsuelo.

Óptica - Leyes de Snell

Para interpretar como se propaga la onda sísmica a través del subsuelo, hemos hablado de: tipos de Ondas, velocidades interválicas, coeficiente de reflexión y hemos encontrado que el frente de onda se puede representar por **Rayos** perpendiculares a los frentes de ondas (ver principio de Huygens, figura 6).
Considerando que los medios de propagación de las ondas elásticas son homogéneos (que realmente no lo son lo suficiente) podemos considerar que los rayos representativos de la onda sísmica, siguen las leyes proporcionadas para la óptica del matemático holandés Willebrord Snel van Royen (1580-1626). La denominaron "Leyes de Snell", debido a su apellido, pero le pusieron dos "l" por su nombre Willebrord.

Primera ley de Snell

El ángulo de incidencia del rayo de luz que forma con la vertical a una interface de dos medios de diferentes índices de refracción, es igual al ángulo que forma el rayo reflejado con respecto a la misma vertical a la superficie, es decir:

$$\theta 1 = \theta 1'$$

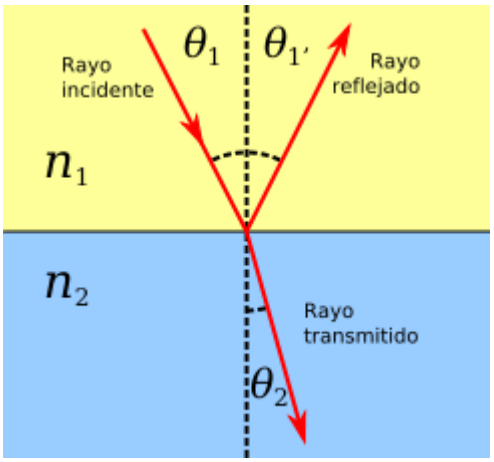


Figura 21, Rayo incidente, rayo reflejado y rayo refractado [12]

Segunda ley de Snell

Si un rayo de luz incide con un ángulo θ_1, con respecto a la vertical a la superficie de una interface de distintos índices de refracción, el rayo se propaga en el segundo medio con un ángulo θ_2 de refracción, con respecto a la perpendicular a dicha superficie dada por la siguiente relación:

$$n_1 \text{ sen } \theta_1 = n_2 \text{ sen } \theta_2$$

El índice de refracción se define como la relación de la velocidad de la luz en el vacío (c) con la velocidad en los distintos medios donde se propaga:

$$n = c / v$$

Reemplazando: $(c/v_{1)} \text{ sen } \theta_1 = (c/v_2) \text{ sen } \theta_2$

$$v_2 \text{ sen } \theta_1 = v_1 \text{ sen } \theta_2$$

1. Si $\theta_1 = 0^o$ entonces $\theta_2 = 0^o$ cualesquiera sean las velocidades de las capas.

2. Las trayectorias de los rayos son reversibles. Es decir, si un rayo incide sobre la superficie de la interfaz con un ángulo θ_1, se refracta sobre el medio con un ángulo de refracción θ_2, entonces si un rayo incide en la dirección opuesta desde el medio 2 con un ángulo de incidencia θ_2 se refractará sobre el medio 1 con un ángulo θ_1.

3. Si $v_2 > v_1$, necesariamente sen $\theta_1 <$ sen θ_2 y por lo tanto $\theta_2 > \theta_1$
Pero θ_2 no puede ser mayor que 90º, ángulo donde el rayo de refracción seria coincidente con la superficie de la interfaz. Si este fuese el caso, habría un ángulo θ_1 crítico donde el rayo refractado seguiría a la superficie de la interfaz:

$$\text{sen } \theta_c = (v_1 / v_2) \text{ sen } 90^o = v_1/v_2$$
$$\theta_c = \text{arcsen } (v_1/v_2)$$

Ejemplo: Si V1=1000 m/s y V2= 2000 m/s el ángulo critico seria:

$$\theta_c = \text{arcsen } (1000/2000) = 30^o$$

- Si el ángulo de incidencia (θ_1) fuese mayor que el ángulo crítico (θ_c), so se produciría reflexión del rayo y no habría refracción.

- Si $V_2 < V_1$ sucede una situación interesante, el rayo refractado se acerca a la normal a la interfaz (θ_2 0º) y no habría ángulo crítico, con lo cual dicha interfaz no puede ser detectada.

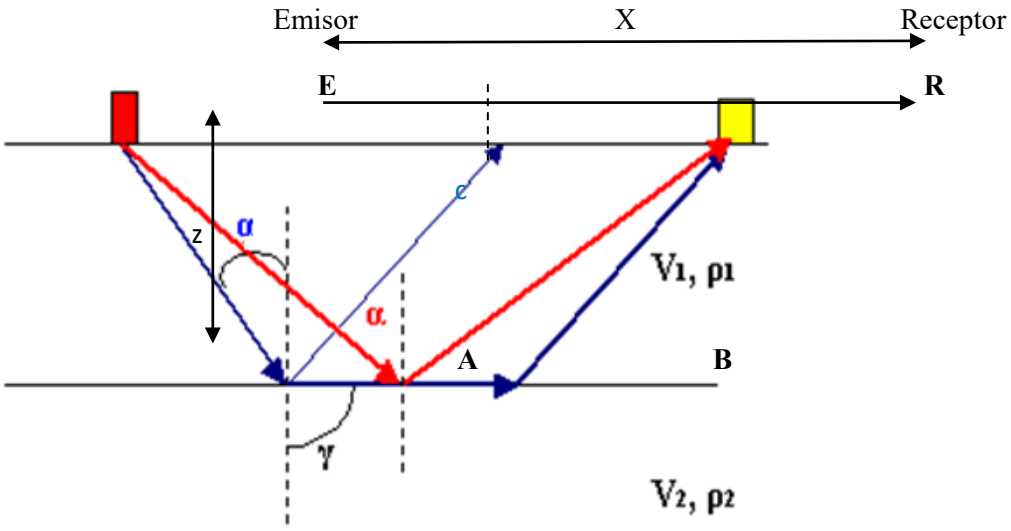


Figura 22, rayo sísmico incidiendo con un ángulo igual y mayor al crítico θc [11]

En la figura 22 uno de los rayos sísmico incide con un ángulo crítico θ_c, produciendo un rayo refractado que se desplaza por la interfaz entre dos capas a la velocidad V2 de la segunda capa. Como cada partícula de la superficie de la interfaz se convierte en emisora secundaria, si V2 > V1, habrá un rayo que alcance al receptor R antes que un rayo reflejado arribe a este receptor (aunque recorra mayor camino).

Tiempos de arribo de la onda sísmica

En base a la figura 22, veremos en qué tiempo llegan los distintos rayos emitidos por el Emisor al Receptor.

a) Rayo Directo: es la onda que se propaga por la superficie y que recorrerá la distancia "X", que separa al emisor "E" del receptor "R", en un tiempo:

$$\boxed{t_d = X / V_1}$$

b) Rayo reflejado: analizando el camino del rayo reflejado (en rojo) y aplicando Pitágoras:

$$\text{Espacio recorrido} = 2\sqrt{(X/2)^2 + h^2} = \sqrt{X^2 + (2h)^2}$$

$$\boxed{tr = \text{Espacio} / V_1 = \sqrt{(X/V_1)^2 + (2h/V_1)^2}}$$

c) Rayo Refractado: analizamos el tiempo que emplea el rayo refractado (en azul):

$$\text{Espacio recorrido} = EA + AB + BR =$$

$$\text{Tiempo de Viaje} = \frac{EA}{V_1} + \frac{AB}{V_2} + \frac{BR}{V_1}$$

$$\textbf{Trefract} = \frac{z}{V_1 \cos\theta_c} + \frac{x - 2z\tan\theta_c}{V_2} + \frac{z}{V_1 \cos\theta_c}$$

$$= \frac{2z}{V_1 \cos\theta_c} + \frac{x}{V_2} - \frac{2z\tan\theta_c}{V_2}$$

Como:

$$\begin{cases} \operatorname{sen}\theta_c = V_1/V_2 \\ \cos\theta_c = (1 - \operatorname{sen}^2\theta_c)^{1/2} = (1 - V_1^2/V_2^2)^{1/2} \\ \tan\theta_c = \dfrac{\operatorname{sen}\theta_c}{\cos\theta_c} = \dfrac{V_1/V_2}{(1-(V_1/V_2)^2)^{1/2}} \end{cases}$$

Reemplazando

$$\boxed{\textbf{Trefract} = \frac{x}{V_2} + \frac{2z\,(V_2^2 - V_1^2)^{1/2}}{V_2 V_1}}$$

Si graficamos los tiempos de arribos de los rayos: directo, reflejado y refractado en función de la distancia, llegamos al grafico de la figura 23 donde se observa que:

- El rayo directo llega primero al receptor hasta una distancia "$x = x_{cruce}$" (crossover distance), para $x > x_{cruce}$ el rayo refractado arriba primero al receptor.

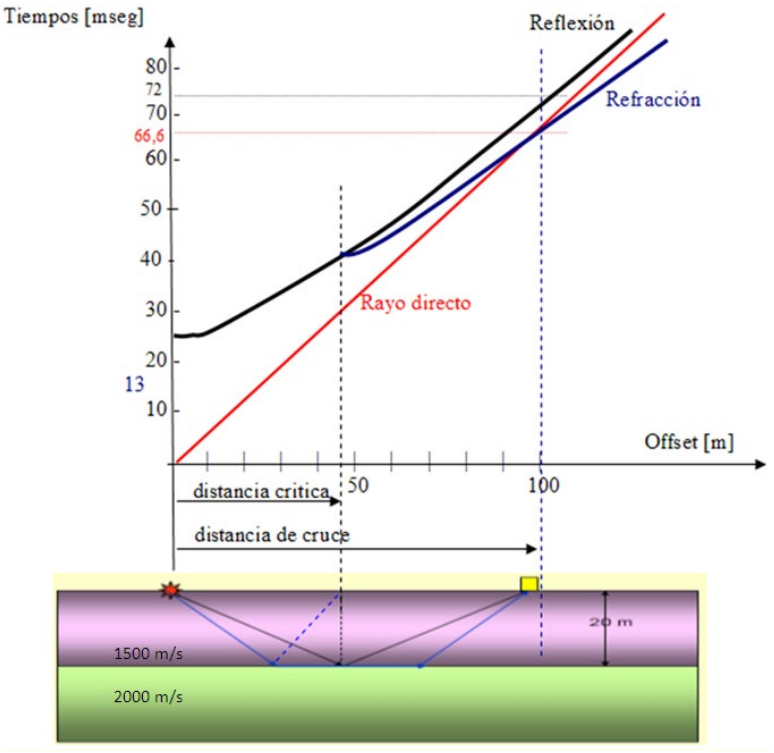


Figura 23, diagrama tiempo vs distancia de los rayos: directo, reflejado y refractados [12]

- El rayo reflejado adelanta al rayo refractado hasta coincidir en tiempo a la "distancia crítica" (critical distance), donde el rayo incidente lo hace con el ángulo crítico. Antes de este tiempo no existe refracción emergente. El rayo reflejado se aproxima asintóticamente a la pendiente del rayo directo con el aumento de la distancia de arribo, ya que posee la misma pendiente (pendiente = 1/V1).

Método de Refracción Sísmica

Se comenzó a emplear con los descubrimientos de las discontinuidades de Corteza-Manto y de Manto-Núcleo, es decir las de Mohorovicic y de Gutemberg y se aplicó exitosamente para la prospección de petróleo desde los inicios de la década de 1920 descubriendo las Cuencas Sedimentarias en el mundo entero.

Habitualmente utilizamos esta técnica para calcular las Correcciones Estáticas que deberemos aplicar a los tiempos de arribo de nuestros canales de datos, para referirlos a un mismo Plano de Referencia, independizando estos tiempos de la topografía y de la no homogénea composición de la capa superficial de la cuenca (weathering).
Como vemos las refracciones nos proporcionan tiempos y velocidades que nos permitirán obtener los espesores de las capas más superficiales del terreno

Observando la figura 23, vemos que podemos conocer el espesor de la capa de velocidad V1 (z):

- Midiendo el tiempo "ti" (intercept time) y despejando h de la ecuación.

$$h = \frac{ti\ V_2\ V_1}{2(V_2^2 - V_1^2)^{1/2}}$$

El "intercept time" se define como la diferencia de tiempo de arribo entre un hipotético rayo directo que viajase a la velocidad V_2 (velocidad de la capa refractora), y el tiempo de viaje real del rayo refractado desde el emisor al Punto de Cruce (Crossover distance).

- Igualando los tiempos del rayo directo y del refractado en el punto de cruce X_{cruce}.

$$h = \frac{Xcruce}{2\left[(V_2+V_1)/(V_2-V_1)\right]^{1/2}}$$

Ejemplo: Basado en la figura 23, hallar los distintos tiempos de arribo al receptor.

- Distancia Crítica: 2 (Z. Tan ang crit) = 2.20.Tan 49º = 46 m

- Tiempo rayo directo: $X/V_1 = 100 / 1500 = 66{,}6$ ms

- Tiempo rayo reflejado: $2.[(X/2)^2 + Z^2]^{1/2} = 2.(50^2 + 20^2)^{1/2} = 72$ ms
- Tiempo rayo refractado: (Tiempo a distancia crítica + (X- distancia crítica) El rayo reflejado adelanta al rayo refractado hasta coincidir en tiempo a la "distancia crítica" (critical distance), donde el rayo incidente lo hace con el ángulo crítico. Antes de este tiempo no existe refracción emergente. El rayo reflejado se aproxima asintóticamente a la pendiente del rayo directo con el aumento de la distancia de arribo, ya que posee la misma pendiente (pendiente = 1/V1).

$$\frac{2.[(Xc/2)^2 + Z^2]^{1/2}}{V_1} + \frac{(X - 2Z.\text{Ten ang crit})}{V_2} =$$

$$\frac{2.[23^2 + 20^2]^{1/2}}{1500} + \frac{(100 - 46)}{2000} \quad 40{,}6 + 27 = 67{,}6 \text{ ms}$$

Este método se extiende para más de dos capas y para planos inclinados donde deberemos utilizar técnicas de reciprocidad que consiste en realizar un perfil y un contra-perfil, es decir que si emitimos en A y recibimos en B, deberíamos también emitir en B y recibir en A y comparar los resultados.

Ondas periódicas:

Si bien una onda es el resultado de variadas y sucesivas perturbaciones del medio, podemos identificar como ondas periódicas, a aquellas que se repiten a intervalos regulares y poseen la misma forma. La cantidad de perturbaciones por segundo de las ondas periódicas se denomina: frecuencia de la onda y se mide en "hertzios" (Hz).

Las ondas sinusoidales son las ondas periódicas básicas ya que cualquier tipo de onda, periódica (o aperiódica), es la resultante de una suma finita de ondas sinusoidales puras, tal como lo demuestra el Teorema de Fourier.

La onda sinusoidal, o simplemente: onda seno, es generada por la siguiente expresión trigonométrica:

$$Ai = A \text{ sen } (\omega.ti + \varphi)$$

Donde:

Ai: Valor de la onda seno para el tiempo ti

A: Amplitud pico de la onda (en la figura A=1)

$\omega = 2\pi f$: velocidad angular

$f = 1 / T$: frecuencia de la sinusoide; T: periodo de la sinusoide.

φ: fase inicial (en la figura $\varphi=0$)

Si bien en la figura 24 el eje de las abscisas se expresa en radianes, las equivalencias con el tiempo son directas:

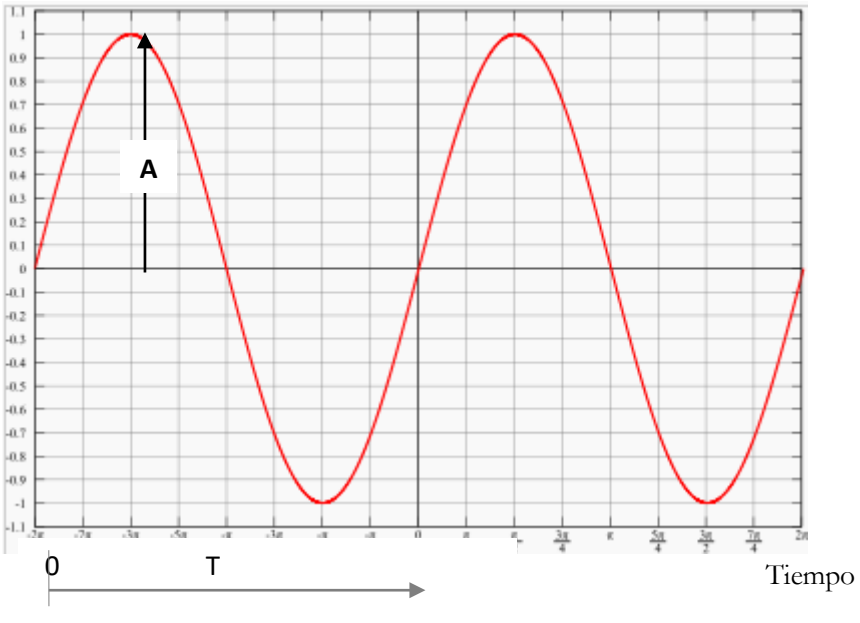


Figura 24: Onda periódica sinusoidal [11]

En la figura 25 se representa una circunferencia de radio "R", que emplearemos como radio-vector para generar la onda periódica sinusoidal de la figura 24. El perímetro de dicha circunferencia coincide con el arco descripto por el radio-vector luego de realizar una vuelta completa (360º o 1 ciclo), girando a una velocidad uniforme "ω".

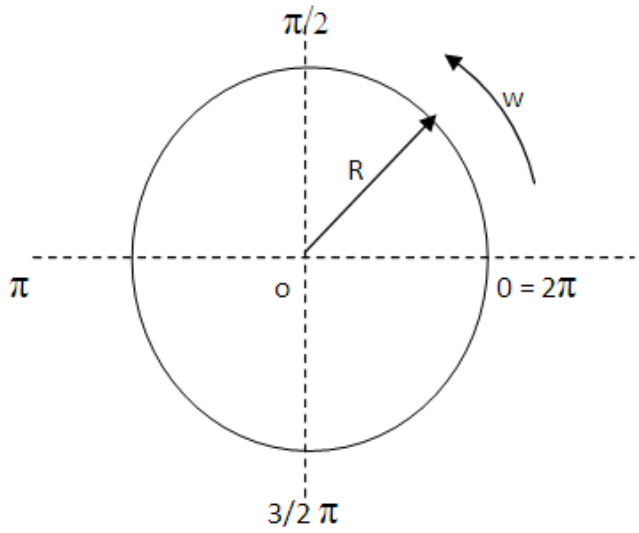


Figura 25: Circunferencia de radio R y perímetro P [11]

Perímetro de la circunferencia: π D = 2 π R (pues Diámetro = 2R)

El tiempo en el que el radio vector da una vuelta completa se denomina: T (Período).

Entonces en un Período de tiempo "T" el radio vector recorrió un espacio equivalente al perímetro de la circunferencia:

$$\omega T = 2\pi R$$

Si hacemos que el radio "R" valga la unidad (R= 1), la equivalencia entre ángulos medidos en grados y en arcos en radianes queda:

ωT = 2π radianes, equivalentes a un ángulo de 360 º.

Por lo tanto, en radianes:

π/2: equivale a 90º; π: equivale a 180º; 3/2π: equivale a 270º y 2π a 360º.

Se define como frecuencia "f", a la cantidad de Periodos "T" o "ciclos" que la onda seno realizó en 1 segundo:

Si en un tiempo "T" la onda realizó 1 ciclo, ¿cuántos ciclos realizará en 1 segundo?

T------- 1 ciclo

1------- 1 / T ciclos por segundo

Por esto que definimos la frecuencia

$$f = \frac{1 \text{ [ciclos]}}{T \text{ [segundos]}} = \frac{1}{T} \text{ [Hz]}$$

Como vemos la cantidad de ciclos que una onda periódica describe por segundo, se expresa en Hertz y la unidad de medida es la inversa del tiempo en segundos.

La función Sincronismo (Sync): y = sen (x) /x

Como veremos en el transcurso de los capítulos, esta función es muy importante en la sísmica, ya que muchas ondículas (forma de la onda sísmica) responden a esta función matemática:

$$y = \text{sen } x / x$$

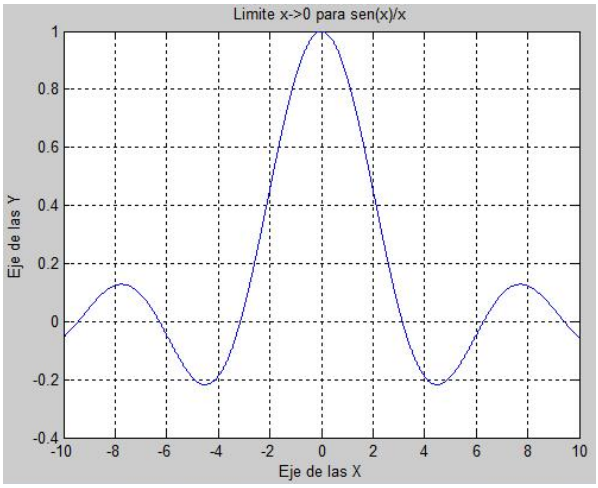


Figura 26, función "sen x/x" [7]

Como vemos en la figura, "y = 1" para "x = 0" y resulta muy importante demostrarlo ya que sabemos que la división por "0" esta inhibida en matemática y: "sen x = 0" (para x = 0º). A simple vista el resultado sería una incongruencia (0 / 0).

Consideremos solamente el primer cuadrante de una circunferencia de radio "r = 1" y un rayo vector que forma un ángulo de "x" (en grados) (Ver figura 27).
Observamos en la figura que quedan conformados: dos triángulos rectángulos y un sector circular:

- Triangulo rectángulos ABD, cuya superficie es: $\frac{\cos x * \text{sen } x}{2}$ (base * altura /2).
- Sector circular ABE, cuya superficie es: $\frac{x * r^2}{2} = \frac{x}{2}$ (pues r = 1)

- Triangulo rectángulo ACE, cuya superficie es: $\frac{1 * \tan x}{2}$

Se aprecia en la figura que estas superficies son: ABD < ABE < ACE

cos x * sen x < x < tan x (eliminamos la división por 2 por ser común a los tres miembros)

$$\cos x * \operatorname{sen} x < x < \frac{\operatorname{sen} x}{\cos x} \quad \text{(reemplazando tan x = sen x/cos x)}$$

$$\cos x < \frac{x}{\operatorname{sen} x} < \frac{1}{\cos x} \quad \text{(dividiendo todos los términos por sen x)}$$

$$\frac{1}{\cos x} > \frac{\operatorname{sen} x}{x} > \cos x \quad \text{(invirtiendo los términos se invierte la comparación)}$$

Ley del Sándwich: "Si una función se encuentra encerrada entre dos funciones que en sus límites poseen el mismo valor, debe tomar el mismo valor para el mismo límite".

$\lim_{x \to 0}$ $\qquad 1 > \frac{\operatorname{sen} x}{x} > 1$

Por lo tanto $\qquad \lim_{x \to 0} \frac{\operatorname{sen} x}{x} = 1$

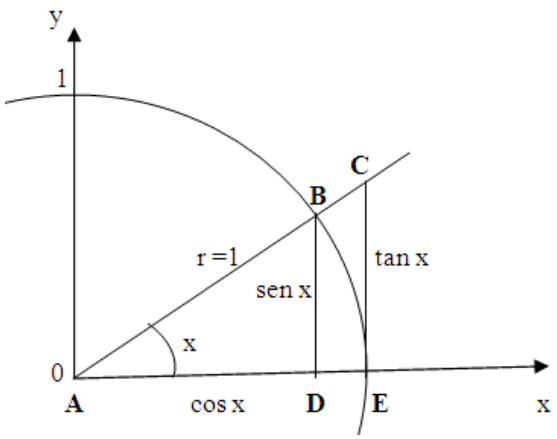


Figura 27, demostración grafica del límite sen x /x cuando x tiende a cero [11]

Series de Fourier

La base teórica de la transmisión de datos se encuentra fundamentada en el Análisis de Fourier.

"Toda señal periódica se puede representar como una suma de funciones sinusoidales"

Series de Fourier: $$x(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [An \operatorname{sen}(2\pi n f_0 t) + Bn \cos(2\pi n f_0 t)]$$

La función periódica, de periodo T, de acuerdo a la Serie de Fourier, estará compuesta por una frecuencia fundamental "f_0" más múltiplos enteros de dicha frecuencia.
"n" multiplica a f_0 generando frecuencias armónicas:

- $1f_0 = f_0$ para n = 1; a la frecuencia fundamental también se la denomina: "1er.Armónica".
- $2f_0$ para n = 2, se la denomina "2da. Armónica".
- $3f_0$ para n = 3, se la denomina 3er. Armónica"; y así sucesivamente.

El coeficiente "A_0" representa a la componente de frecuencia = 0, es decir, continua o DC.

Los coeficientes de la Serie de Fourier se calculan:

$$A_0 = \frac{2}{T}\int_0^T x(t)\,dt$$

$$A_n = \frac{2}{T}\int_0^T x(t)\cos(2\pi n f_0 t)\,dt$$

$$B_n = \frac{2}{T}\int_0^T x(t)\operatorname{sen}(2\pi n f_0 t)\,dt$$

En el siguiente ejemplo, una señal periódica (a) está compuesta por la suma de: b + c + d = a

- "b", es la señal fundamental, o primera armónica, cuya frecuencia es de 20 Hz (f_0 = 20 Hz).

- "c", es la segunda armónica, cuya frecuencia es de 40 Hz (n = 2) y su amplitud es del 70% con respecto a la fundamental.

- "d", es la tercera armónica, cuya frecuencia es de 60 Hz (n = 3) y su amplitud es del 50% con respecto a la fundamental.

- "e", se denomina: "espectro de amplitud de la señal periódica "a".

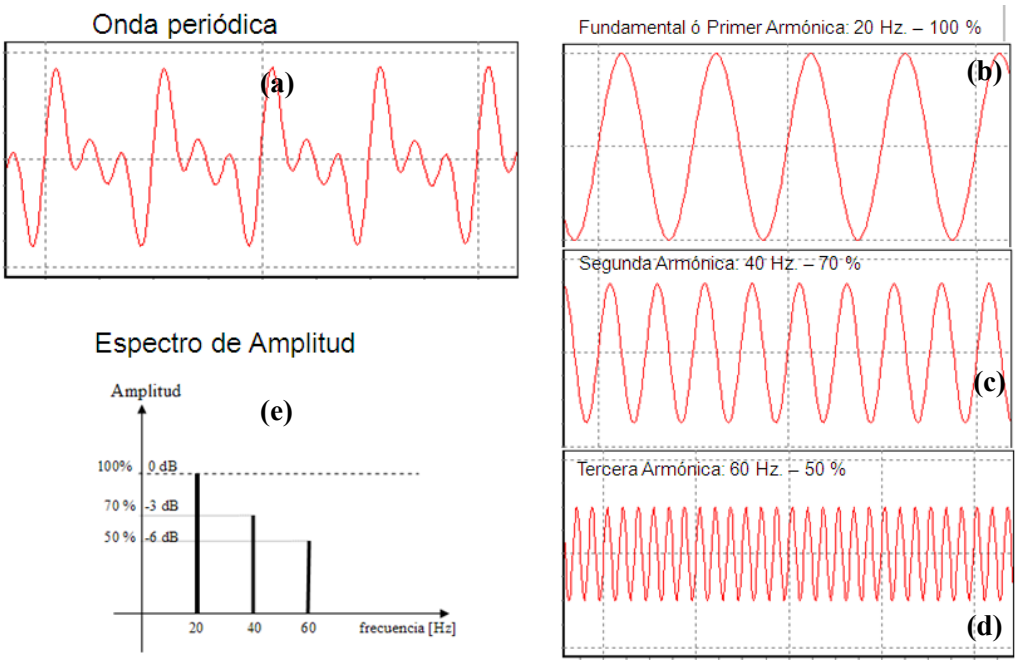


Figura 28, suma de 3 señales periódicas (b+c+d), generan la señal periódica "a" [11]

También existe un "Espectro de Fase" no dibujado, porque todas las componentes tienen 0º de fase entre sí.

Transformada de Fourier

Una función no-periódica se puede representar por una suma infinita de señales sinusoidales puras. La Integral de Fourier, o Transformada de Fourier, nos permite que cualquier señal pueda ser descompuesta en sumas de sinusoides.

Como vimos en la figura anterior, las distintas sinusoides se pueden representar por sus "Espectros": de Amplitud y de Fase. En el caso de las funciones no-periódicas, los Espectros de Amplitud son una sucesión continua de frecuencias, expresadas en la siguiente integral:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{j2\pi ft}\, df$$

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft}\, dt$$

Denominamos a la integral: **"Transformada de Fourier"**, porque pasamos de una función x(t) en el dominio del tiempo, a otra función equivalente en el dominio de la frecuencia X(f).

Ejemplo: La función pulso es una función aperiódica definida como:

$$x(t) = \begin{cases} A_\tau, \text{ para: } -\tau/2 < t < +\tau/2 \\ 0, \text{ para: } -\tau/2 > t > +\tau/2 \end{cases}$$

Su Transformada es:

$$X(f) = A_\tau \frac{\text{sen } \pi/\tau}{\pi/\tau}$$

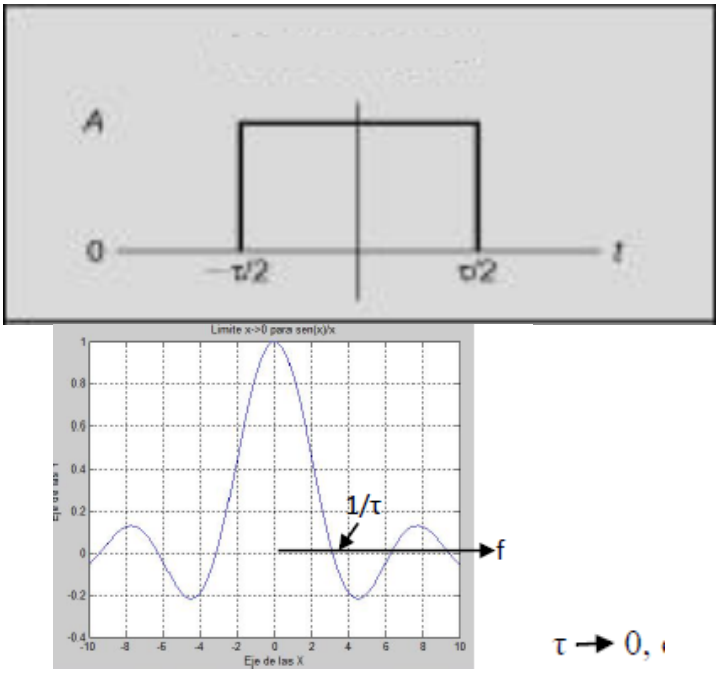


Figura 29, función Pulso Rectangular [7]

La transformada de la función pulso es matemáticamente idéntica a la tratada: "sen x / x", la cual se vuelve a dibujar. Por tratarse de un "espectro de amplitud, el eje de abscisas corresponde a la frecuencia, donde vemos que el primer cruce por cero ocurre a una frecuencia igual a: 1/ τ.
Cuanto más pequeño sea el tiempo "τ" más se estirará el ancho del lóbulo central del espectro.

En el límite cuando: $\tau \rightarrow 0$, estaremos definiendo la función teórica: "Impulso Unitario" o "Delta de Dirac", donde la amplitud temporal tendrá un valor determinado pero se desarrollará en un tiempo "0", siendo su espectro de amplitud una línea recta indicando que tiene todas las componentes de frecuencia posibles.

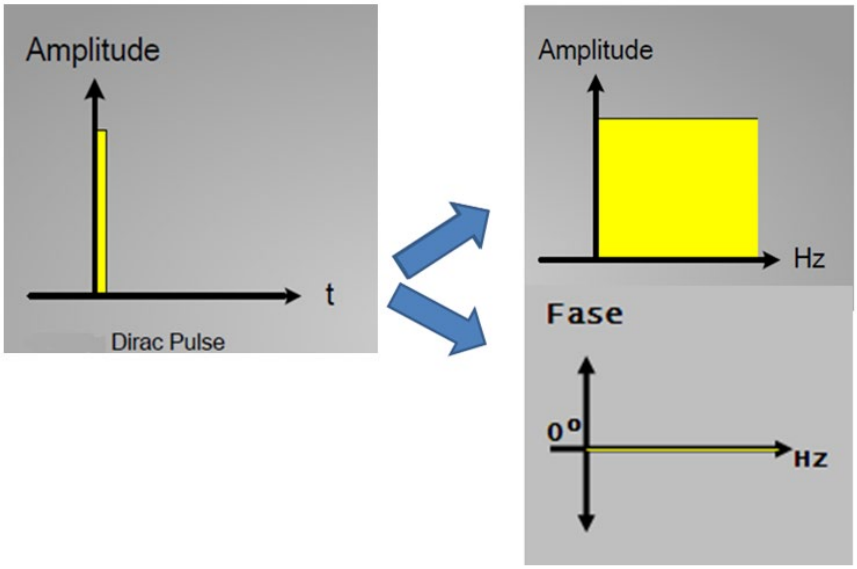


Figura 30, Función Impulso y su Espectro de Amplitud y de Fase [7]

Convolución

Hemos empleado indistintamente las palabras: onda y señal sísmica. Matemáticamente decimos que: "una señal es la descripción de como un parámetro varía en función de otro parámetro".
Hemos considerado como una amplitud varía en función del tiempo.

Si un "Sistema" es cualquier proceso que, ante una señal de entrada produce una señal de salida, podríamos considerar que la adquisición sísmica es un sistema y que, por simplificación, es un Sistema Lineal.

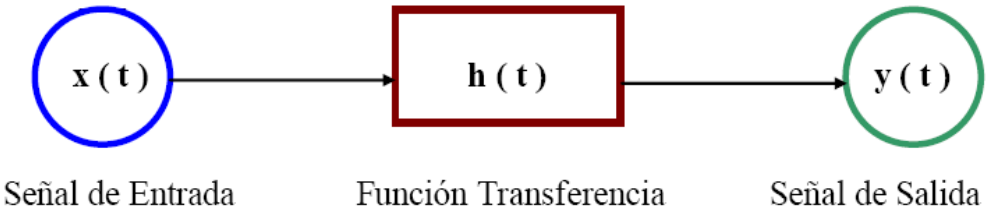


Figura 31, modelo matemático temporal [7]

En la adquisición sísmica la señal de entrada al sistema: "x(t)", corresponde a la: "Fuente de Energía", la cual origina el micro-sismo y la consecuente onda elástica.

La onda elástica se propaga por el subsuelo, el cual representa matemáticamente a la función: "h(t)", que se denomina: "Función transferencia".

La señal de salida y(t) corresponde al instrumental de adquisición sísmica, cuyo primer paso en la cadena de procesamiento, lo constituye la "Estación Receptora".

Todo Sistema Lineal permite conocer una de las funciones si es que se conocen las otras dos y la fórmula matemática que lo resuelve se denomina: "Convolución":

$$y(t) = x(t) * h(t)$$

Convolución

La Convolución h de la señal de entrada y la función transferencia nos proporciona la señal de salida del sistema.
Pero nuestra incógnita es el subsuelo h(t), del cual queremos obtener imágenes y determinar los índices de reflexión de los diferentes estratos.
Tenemos modelos que nos llevan a presumir cual es la función x(t) y a su vez hemos adquirido, grabado y procesado muchos canales receptores de la onda sísmica, por lo tanto también podemos estimar y(t) y entonces podemos obtener la imagen del subsuelo.

$$h(t) = y(t) * x(t)^{-1}$$

Deconvolución

Para simplificar el proceso matemático de la Convolucion, que implica multiplicación de matrices, se aplica la Transformada de Fourier y la Convolucion se transforma en un producto de funciones.

$Y(f) = X(f)_x H(f)$ Transformada de la Convolución

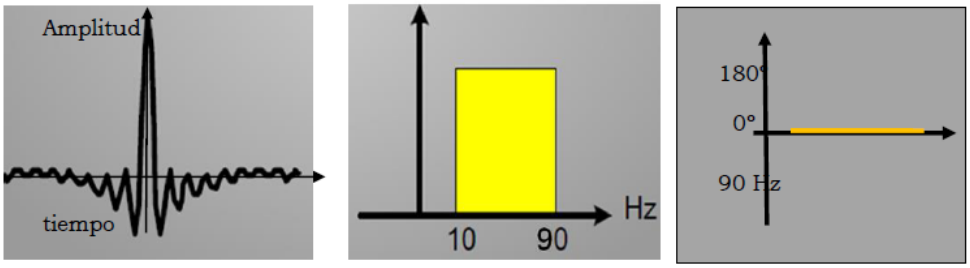
Si nuestra fuente de energía fuese impulsiva, por ejemplo: explosivos, tal como su nombre lo indica, x(t) se podría considerar como la "Función Impulso" (ver figura 30) cuya Transformada de Fourier es la unidad.

Como X(f) = 1, entonces:

$Y(f) = H(f)$ Para fuentes impulsivas

Para fuentes impulsivas, diremos que la señal de salida (los datos registrados), posee la información suficiente como para conocer el subsuelo.

En el caso de trabajar con fuentes de energía vibracionales, la señal de entrada x(t) se podría aproximar a: x(t) = sen wt / wt (la llamaremos Ondícula Sync), cuya Transformada de Fourier seria la Función Pulso Rectangular (ver figura 29).



(a) Ondícula sen (wt)/wt (b) Espectro de Amplitud (c) Espectro de Fase

Figura 32, Transformada de Fourier de la Ondícula Sync [7]

En los Capítulos dedicados a las Fuentes de Energía profundizaremos estos temas.

Historia de los métodos sísmicos

En la década del 60, los equipos de adquisición tenían una capacidad máxima de 12 canales, eran valvulares (recién se había inventado el transistor), no se había iniciado la era digital y la grabación se realizaba analógicamente sobre una ancha cinta magnética modulada en AM y los más modernos en FM.

Hemos recreado la registración 2D convencional donde todavía no se empleaba el "apilamiento" (stacking) y no se hablaba de "punto común profundo" (CDP), pues solamente había una sola traza para identificar al punto profundo, es decir: cada punto de reflexión en el subsuelo, tenía una sola traza como imagen (traza: contenido grafico del canal adquirido).

Solamente se adquirían simultáneamente 12 canales y luego se avanzaban 6 estacas y se liberaban otras 6 estacas. Tener en cuenta que las distancias en el subsuelo, son la mitad de las distancias en la superficie.

El gran desafío era atenuar ruidos aleatorios y las Reflexiones Múltiples que, debido también al poco Rango Dinámico Disponible, enmascaraban las reflexiones válidas.

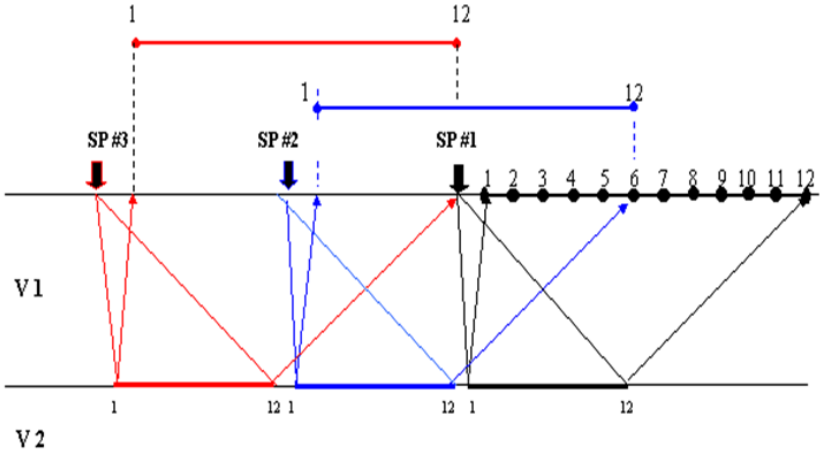


Figura 32, Registración convencional con 12 canales [11]

El método de Apilamiento (Stacking)

La invención del método de apilamiento de trazas, revolucionó la industria de la exploración., También coincidió con el comienzo de la digitalización del dato sísmico, que permitió el uso de algoritmos matemáticos durante el procesamiento que realzan la relación señal/ruido, como consecuencia las imágenes de las estructuras geológicas del subsuelo resultaron mucho más precisas.

El método consiste en aplicar el Principio de la Superposición: obtenemos muchas trazas de un Punto Común Profundo del subsuelo (CDP: Common Depth Point), las corregimos por los diferentes caminos recorridos y las sumamos. Como resultado las señales se amplifican y los ruidos aleatorios se atenúan.

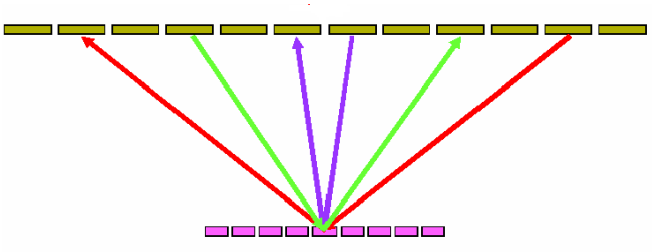


Figura 33, Punto Común Profundo (CDP) – [5]

En la figura 33, estamos apilando trazas que corresponden a pares diferentes Emisor-Receptor y a tiempos diferentes, esto permitirá que los ruidos en las distintas trazas desfasen y que al sumarlas se atenúen bruscamente. A este apilamiento de trazas de un mismo CDP se lo suele denominar: "**gather CDP".**

Uno de los más importantes logros fue la "atenuación de las reflexiones múltiples" que se muestran como reflexiones de horizontes mucho más

profundos de donde ellas realmente provienen pero poseen la pendiente del medio donde se entretienen.

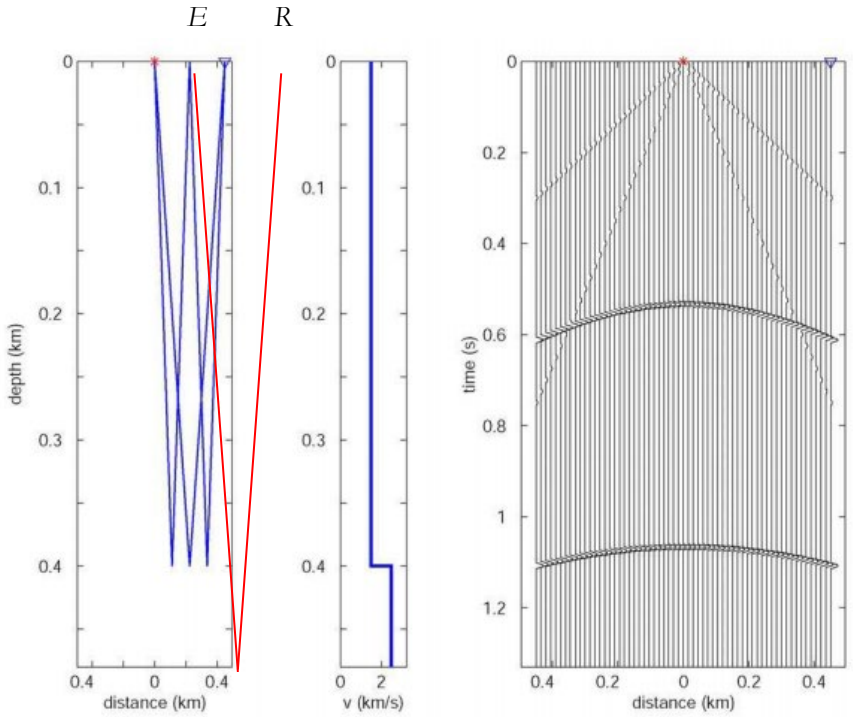


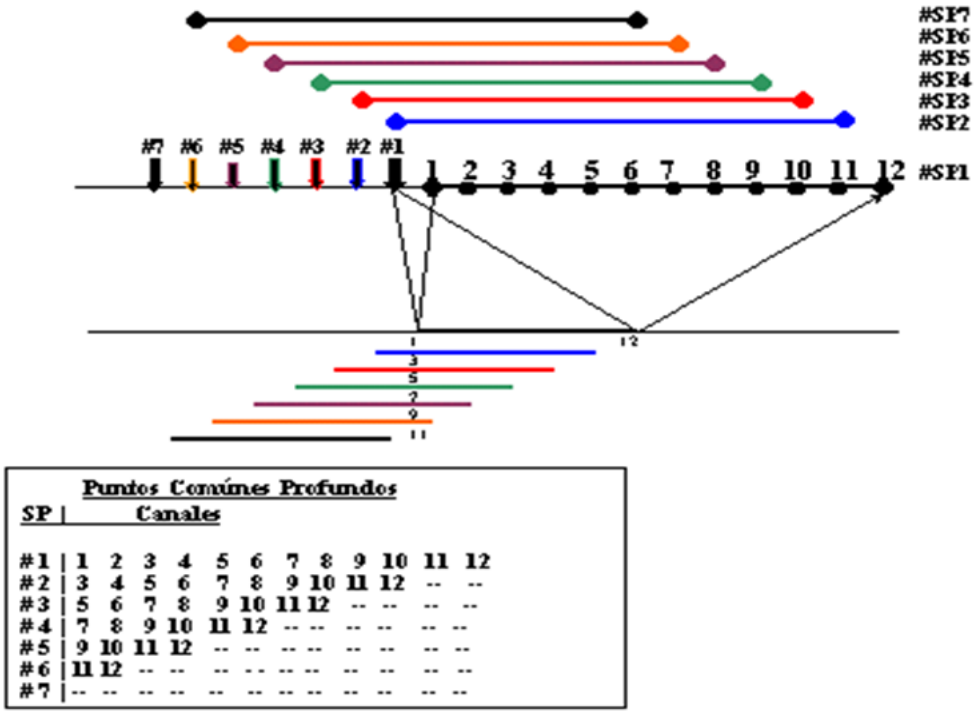
Figura 34, reflexiones múltiples [5]

En (a) se presenta un modelo donde la interface entre dos estratos se encuentra a los 400metro, y (b) la velocidad de las dos capas es: V1=1500 y V2=2500 m/s respectivamente. El rayo (azul) se refleja en la interface y vuelve a reflejarse en la superficie para luego volver a rebotar en la interface del subsuelo y luego llegar al receptor (R). En (c) se ven las trazas sísmicas, las dos reflexiones se ven como parábolas, una arribando a los 550 ms aproximadamente en sus trazas centrales y la múltiple arribando a 1100 ms como si proviniese de otra interface más profunda. La múltiple recorre casi dos veces el camino de la reflexión "roja" a la misma velocidad y por lo tanto tarda el doble de tiempo.

Otra característica importante que podemos observar en la figura 34, es la curvatura de las parábolas: esta curvatura depende de la profundidad del reflector y de la velocidad de las capas por encima de este. Estas curvaturas pueden ser predichas y se las denominan: **Normal Moveout** o directamente **NMO**.

Calculo de la cobertura nominal o "fold nominal"

La cantidad de puntos comunes que pueden ser apilados, dependen: de la cantidad de canales empleados, de la cantidad de **intervalos de grupos** que se mueve el emisor y del **Offset máximo.**



Puntos Comúnes Profundos

SP	Canales											
#1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
#2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	--	--
#3	5	6	7	8	9	10	11	12	--	--	--	--
#4	7	8	9	10	11	12	--	--	--	--	--	--
#5	9	10	11	12	--	--	--	--	--	--	--	--
#6	11	12	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
#7	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Figura 35, apilamiento de puntos comunes profundos [11]

En la figura 35 realizamos 7 disparos (**SP: shot points**) y dibujamos los puntos reflejados en el subsuelo. Por supuesto el primer disparo solamente tendremos cobertura = 1, como en el sistema convencional (imagen en negro).

En el segundo disparo (SP2 en azul), hemos corrido tanto los canales como el SP, un intervalo de grupo, es decir hemos retirado un grupo receptor en la cola del tendido y hemos agregado uno al inicio del mismo. En el subsuelo el corrimiento es de 2 Puntos de tal manera que el punto reflejado en la "traza 1" del primer disparo, ahora corresponde a la "traza 3" del segundo disparo.

Siguiendo con la rutina, vemos cómo se va incrementando la cobertura y al llegar al SP6 obtenemos la cobertura Nominal que es: 6 (6 trazas distintas, una en cada disparo, ha recibido la reflexión del mismo punto profundo del subsuelo).

Cobertura (fold) = Intervalo Estaciones Receptoras (R) x Número de Canales (N)

Intervalo Estaciones Fuentes (F) 2

Ejemplos:

- N= 240; R= 50m; F= 50m Cobertura: 120
- N= 240; R= 50m; F= 25m Cobertura: 240
- N= 240; R= 25m; F= 50m Cobertura: 60

Correcciones dinámicas

Antes de sumar las trazas o canales sísmicos apilados, tendremos que corregir los tiempos de arribo de cada una, ya que estas reciben las reflexiones del CDP recorriendo diferentes caminos, es decir que cada traza será adquirida con una combinación diferente de "offsets" emisor-receptor y los ruidos se distribuirán aleatoriamente.

Corregiremos los tiempos de cada traza (T_i en la figura 36), para trasladar la posición del par emisor-receptor (E y R) a la posición del CDP, donde el rayo tardará un tiempo T_0 para ir y volver del horizonte reflector. La ecuación representará a una curva cuya curvatura será función de la profundidad del reflector y de la velocidad de las capas superiores al mismo. A esta operación se la denomina **NMO** (Normal Moveout), para indicar que se trata de corrimientos de tiempos sobre una interface plana.

Si el reflector es plano, solo se trata de simple trigonometría ya que se forman 2 triángulos rectángulos y por Pitágoras nos queda:

$$\frac{(T_i V_0)^2}{4} = \frac{(T_0 V_0)^2}{4} + (X/2)^2$$

Operando $$T_i^2 = T_0^2 + (X/V_0)^2$$

Esta es la fórmula empleada también para el "análisis de velocidad", para determinar la velocidad de las capas mediante los datos de tiempo registrados.

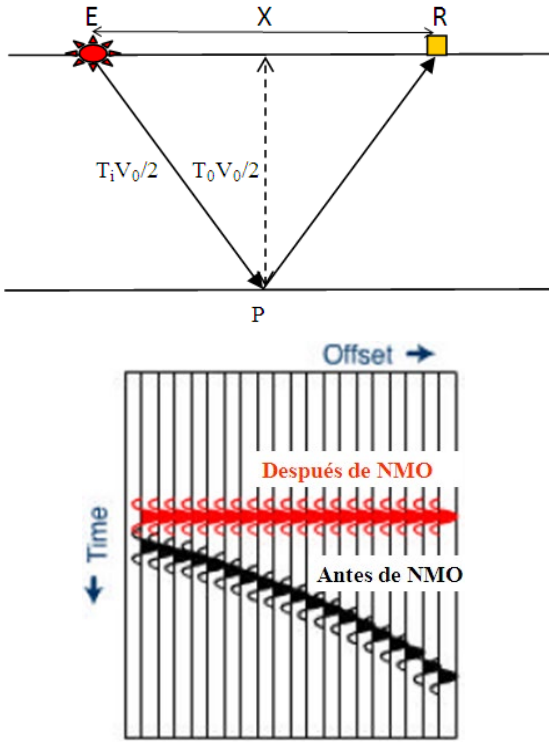


Figura 36, Corrección NMO, Gather CDP [8]

Ejemplo: Veremos los tiempos "Ti" para distintos valores de X (moveout), considerando que V_0 = 2000 m/s y que la interface reflectora se encuentra a los 100 m.

$$250 = T_0 V_0 / 2$$; recordar que los tiempos son dobles (de ida y vuelta), entonces

$$T_0 = 250 / 1000 = 0{,}25 \text{ s}$$

X [m]	T_i [s]
	0,25
20	0,251
100	0,255
500	0,354
1000	0,56
1500	0,79
2000	1,03
2500	1,27
3000	1,52

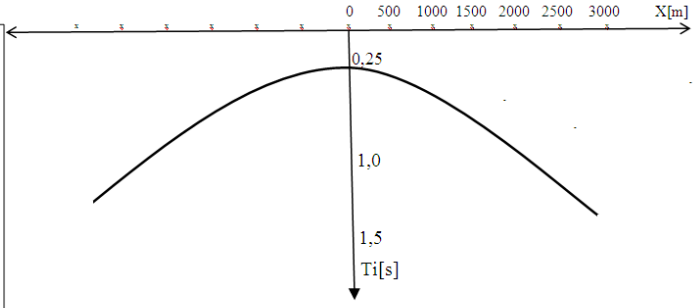


Figura 37, curva NMO [8]

La figura 38, corresponde a un registro de 2 D "split spread", con 80 canales a cada lado del emisor (fuente: explosivo), espaciados cada 25 metros. El "offset mínimo" fue de 12,5 m y el "offset máximo" fue de 1987,5 m (25 * 79 + 12,5).
El reflector marcado en rojo presenta un "T_0" de aproximadamente 500 ms y el "T_i" para el offset máximo es de aproximadamente 1250 ms.
Como también apreciamos en reflexiones más profundas ($T_0 \approx$ 1450 ms), la curvatura se aplana cuanto más profundo es el horizonte reflector (T_{imax} ≈1750 ms).

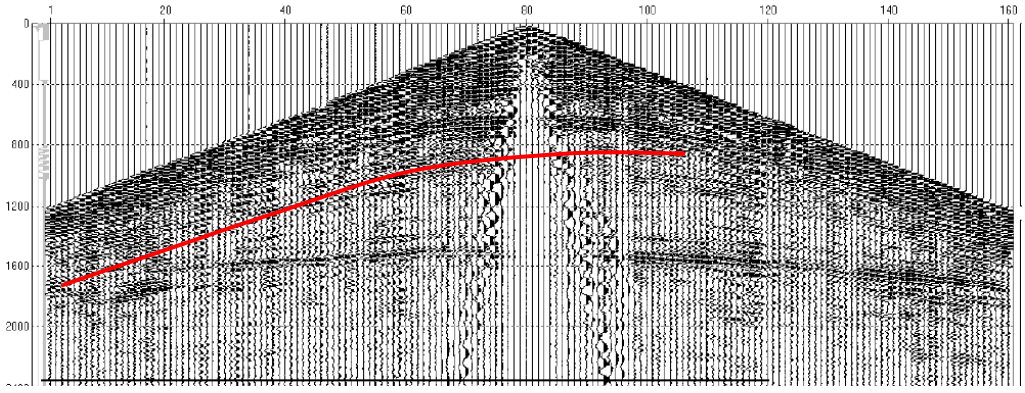


Figura 38, Registro de Campo con 160 Canales y 25 metros de intervalo de grupos [11]

Capas buzantes (dip layers)

Cuando la interface reflectora no es plana y presenta un ángulo "θ" con respecto a la horizontal, la ecuación del NMO ya no es válida y debe

agregársele la corrección por buzamiento o "DMO" (Deeping Moveout). Esta corrección es más importante cuanto mayor sea el ángulo de buzamiento "θ", cuando más superficiales sean los reflectores, cuanto mayor sean los "offsets" y cuanto menores sean las velocidades de las capas.

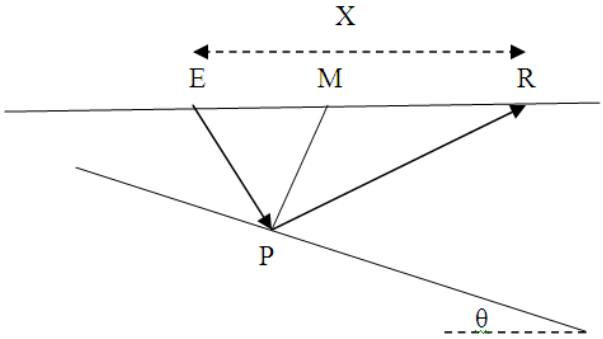


Figura 39, Calculo de "Ti" para capas inclinadas [11]

$$T_i^2 = T_0^2 + \frac{X^2 \cos^2 \theta}{V_0^2}$$

Reemplazando: $\cos^2 \theta = 1 - \text{sen}^2 \theta$

$$T_i^2 = T_0 + \underbrace{\frac{X^2}{V_0^2}}_{\text{NMO}} \underbrace{- \frac{X^2 \text{sen}^2 \theta}{V_0^2}}_{\text{DMO}}$$

Como vemos al tiempo de viaje "Ti" se le ha agregado otro término dependiente del ángulo de buzamiento "θ" de la interface (DMO). Si "θ = 0º", no hay buzamiento, "sen θ = 0" y nos queda la ecuación original.

Aunque la velocidad de la capa "V_0" sea constante, el buzamiento cambia la estructura punto a punto, por lo tanto habrá que calcular la velocidad para cada CDP.

Migración 2D

Hasta ahora hemos considerado que tanto la fuente emisora de energía como los receptores se encuentran en el mismo plano y que los puntos reflectores del subsuelo pertenecen a ese mismo plano. Aun en esas condiciones el tema se complica si tenemos horizontes buzantes en el mismo plano.

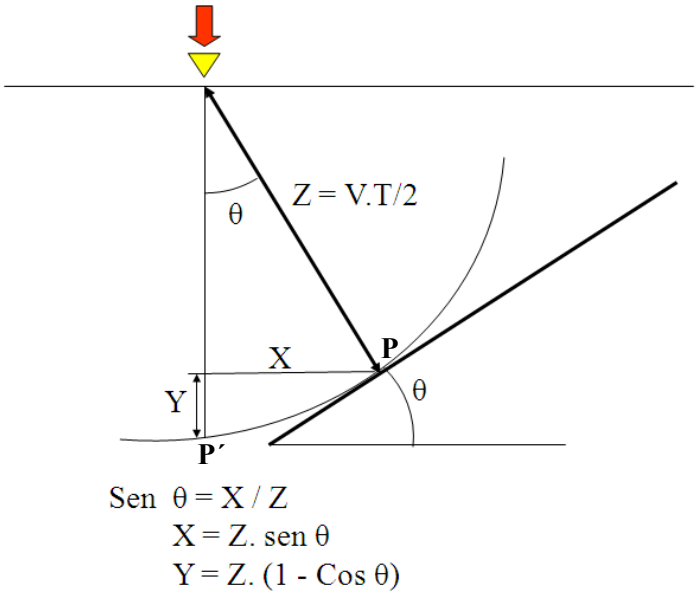


Figura 39, horizonte buzante y migración del punto reflector [11]

La figura 39 muestra la posibilidad de un subsuelo que forme un ángulo "θ" con la horizontal. Y que se encuentre a una profundidad "Z". Sin conocer la geología del lugar, en 2D le adjudicaríamos al punto P´ la imagen del subsuelo (se encuentra a la misma profundidad "Z" y sobre la misma capa de velocidad "V").

Existe un procedimiento denominado "**Migración"** que permite obtener la imagen del verdadero punto reflector "P", corrigiendo la ubicación P´ mediante los ajustes de coordenadas X e Y. (ver figura 39).

Para muchos geofísicos, la migración es la etapa más importante en el proceso del dato sísmico, ya que no solo mueve los eventos a su correcta posición sino que también incrementa la resolución espacial y colapsa las difracciones.

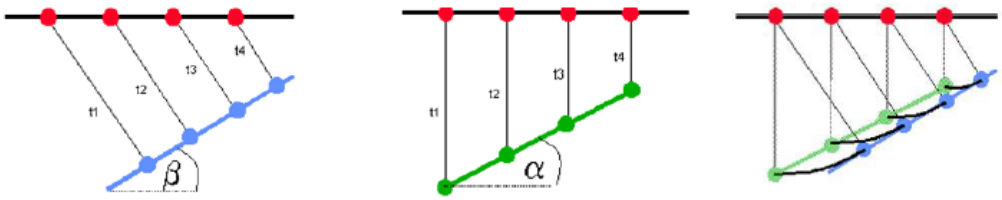
Pero la condición para que esto sea correcto es que "P" y "P´" pertenezcan al mismo plano y la realidad indica que "P" podría encontrare fuera de dicho plano y entonces la migración no sería acertada, tendríamos que trabajar en tres dimensiones (**3D**).

Ejemplo teórico de "zero-offset migration":

Supongamos que tenemos un reflector buzante como lo indica la figura 40-a, siendo "β" el ángulo de buzamiento y los puntos rojos representan los emisores-receptores para "0 offset".
La imagen en tiempo obtenida de la estructura buzante sería la mostrada en la figura 40-b, donde los puntos en verde serían los puntos de reflexión debajo de los receptores, siendo los tiempos de reflexión: "t1 – t4".
Se comprueba la relación: **sen β = tan α,** si la velocidad de la capa es constante.

Si desde cada punto emisor-receptor en la figura 40-b trazamos un semi-arco de radio igual al tiempo de reflexión que le corresponde y luego trazamos la tangente a todos esos semi-arcos, obtenemos la figura 40-c, que corresponde a la sección sísmica migrada (segmento azul).

En la figura 40-c se nota que el "segmento azul" es más escarpado y corto que el "segmento verde", indicando que las frecuencias serán más bajas en la sección migrada.



(a) *Estructura en profundidad* (b) *Sección sísmica sin migrar* (c) *Sección sísmica migrada*

Figura 40, Teoría de "zero offset migration" [8]

Zona de Fresnel

Desgraciadamente los puntos comunes profundos (CDP) de reflexión, no son tan comunes, sino que se desparraman alrededor del punto teórico en forma de elipses concéntricas (circunferencias en el caso de incidencia vertical). Esta dispersión de la reflexión resulta de una menor calidad del apilamiento "stacking).

El radio de la Zona de Fresnel será más chico cuando menor sea la longitud de la onda sísmica (λ). Recordar que: $\lambda = V/f$ (V: velocidad de propagación, f: frecuencia).

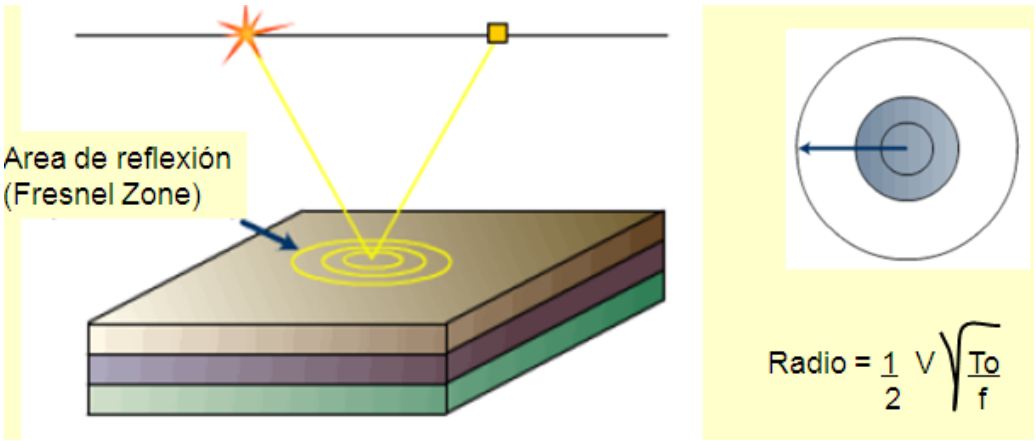


Figura 41, Zona de Fresnel [5]

Sísmica 3D

La migración 2D no resuelve la verdadera posición del reflector si el buzamiento del horizonte es perpendicular a la línea sísmica.
Para realizar una correcta ubicación de una estructura profunda, habría que poseer un modelo adecuado de dicha estructura, tanto para ubicar la línea 2D como para luego migrar los datos. Hasta ahora nos habíamos manejado en un plano y esta no es la verdadera dimensión por la cual se propagan las ondas sísmicas.

Una buena adquisición 3D (survey 3D), deberá tener una buena cantidad de "folds" y una buena distribución de "offsets" y "azimuths".
Es evidente que incrementando el apilamiento vertical (fold) aumentamos la relación S/N, y el método será más eficiente sumando rayos provenientes de distintas distancias emisor-receptor (offsets), y de diferentes direcciones (azimuths).

Veamos el siguiente ensayo de laboratorio realizado en la Universidad de Houston.
Se fabricó una gran pileta de cemento en forma de semi-elipsoide de revolución y se la tapó agregándole varias camionadas de tierra, de tal forma que la pileta no podía ser detectada desde la superficie.

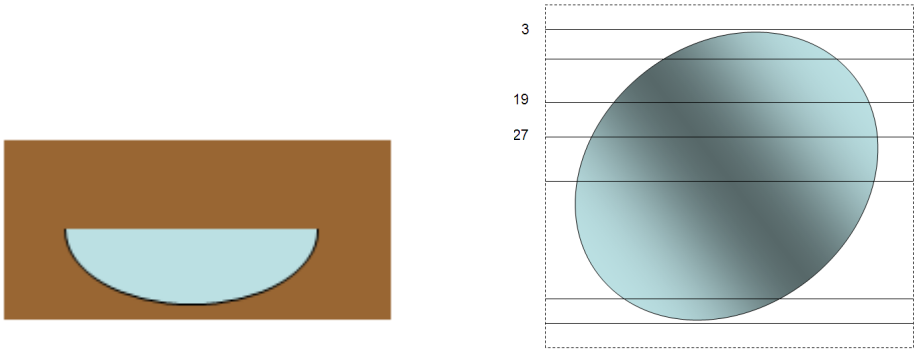


Figura 42, forma de la pileta del Modelo Universidad de Houston y las Líneas Sísmicas adquiridas [1]

Luego se contrató una compañía para que hiciera una adquisición 2D sobre este terreno y procesara los resultados, sin conocer previamente el contenido del subsuelo.
Posteriormente otra compañía fue contratada para que haga una adquisición 3D sobre la misma superficie y procesara el resultado.

En la figura 43, se observa:

- En (a) la sección sísmica 2D sobre la Línea Sísmica 27 sin haberla migrado, las imágenes obtenidas muestran cierta tendencia pero no tiene buena definición.

- En (b) la sección anterior migrada ya posee la forma casi completa de la pileta enterrada aunque el extremo izquierdo de la sección presenta una estructura discontinuada.

- En (c) se muestra la sección sísmica de la Línea 27 luego de una adquisición 3D migrada, ahora la estructura ha quedado perfectamente definida.

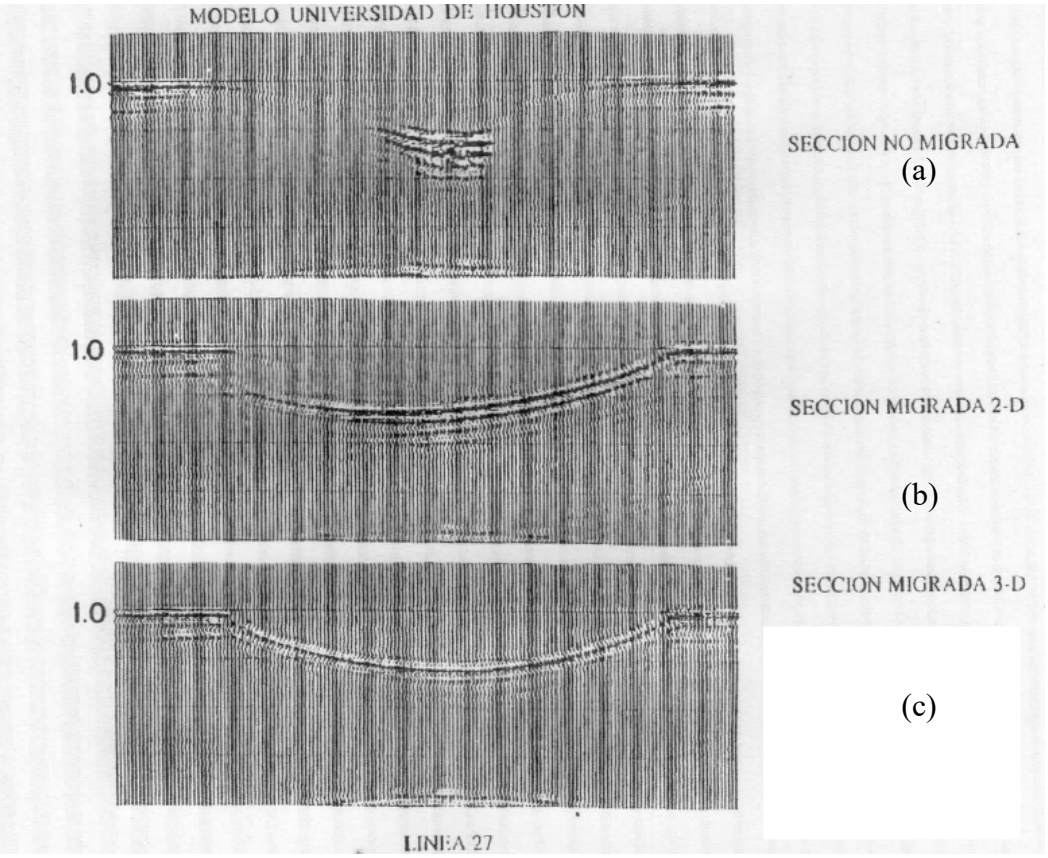


*Figura 43, Secciones Sísmicas correspondientes al Modelo Universidad de Houst*on [1]

Superficie Imagen del Subsuelo (bin)

En 2D obteníamos imágenes de puntos en el subsuelo sumando las trazas que contienen los CDP, luego de las correcciones dinámicas. En 3D las trazas a sumar para el apilamiento vienen de distintas direcciones (azimuts) que forman planos Emisores-Receptores diferentes y ya no podemos hablar de "punto común profundo" y tendremos que considerar en su lugar una: "superficie común profunda" donde los rayos que se reflejen dentro de ella serán los que deban ser apilados.
A esta superficie la denominamos: **"bin"**, y como generalmente el punto reflector se encuentra a mitad del camino entre emisor y receptor, ahora

hablaremos de **"Punto Medio"** (Mid Point) ya que conoceremos las trazas a apilar conociendo la posición Emisor-Receptor.

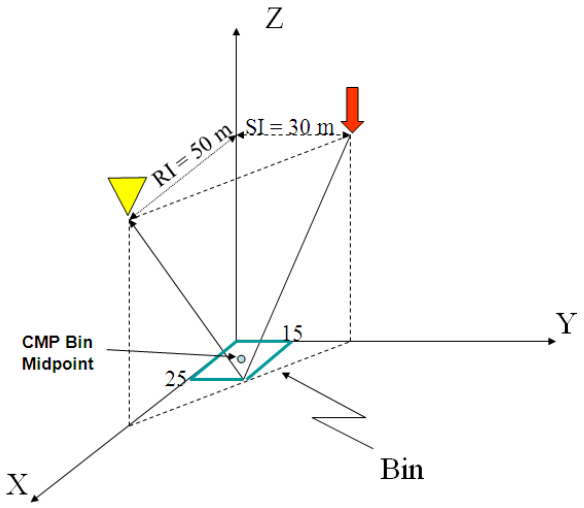


Figura 44, definición del "bin" [11]

Como vemos en la figura, la superficie del "bin" es un rectángulo que tiene por lados: la mitad de la distancia entre grupos de receptores (en nuestro ejemplo: 50/2 = 25m) y la mitad de la distancia del grupo de fuentes (30/2 = 15 m).

Definiciones y términos en Sísmica 3D

Para ejemplificar tomamos un proyecto 3D ortogonal, donde las líneas receptoras (en puntos negros) son transversales a las líneas emisoras (en puntos rojos). Se propone valores de distanciamientos y cantidades de canales adquiridos para mejor interpretar el proyecto 3D.

Patch: es la cantidad de canales que vamos a adquirir entre todas las estaciones receptoras disponibles. En la figura 45 adquirimos 8 líneas receptoras de 36 estaciones cada una (288 canales).

Salvo: es la cantidad de Puntos Emisores que se emplean en el "patch", en nuestro caso empleamos 5 puntos emisores por patch. Completados estos disparos, se desplazará el "patch" una línea receptora, dejando otra fuera del patch.

Celda (box): es el rectángulo que conforman dos líneas de receptores consecutivas y dos líneas emisoras consecutivas.

Xmin: es la distancia máxima entre el emisor de una celda y el receptor de esa misma celda. Generalmente se elige para que sea de 1 a 1,2 el valor de profundidad del horizonte más somero que se quiere obtener imagen.

Xmax: es la distancia máxima entre un emisor de un "patch" y un receptor del mismo "patch". Generalmente se elige para que sea del orden de la profundidad del reflector profundo objetivo del proyecto.

RI (receptor interval): intervalo entre estaciones receptoras.

RLI: (reception line interval): es la distancia que existe entre líneas receptoras.

SI (source interval): intervalo entre estacionas fuentes (emisoras).

SLI (source line interval): es la distancia que existe entre líneas fuentes.

NCL: Número de Canales activos por línea 3D.

NRL: Número de líneas receptoras en el spread.

In Line: en la misma dirección que las líneas receptoras.

Cross Line: en sentido transversal a las líneas receptoras.

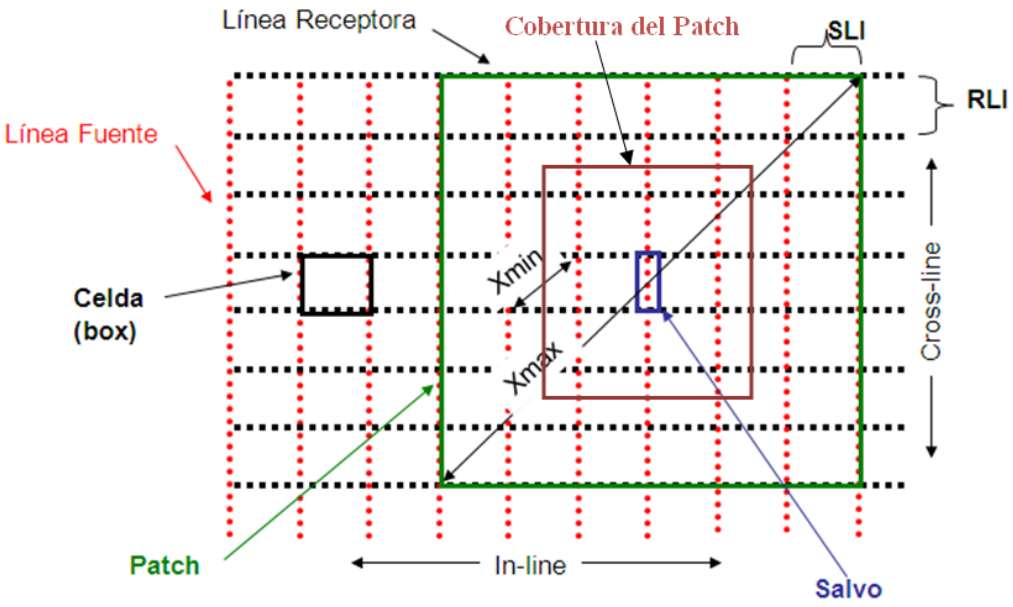


Figura 45, nomenclaturas usadas en 3D [2]

En la figura 45 se muestra un ejemplo de sísmica 3D, donde se adquieren canales de 8 líneas receptoras de 36 canales c/u, adquiriéndose simultáneamente 288 canales. Estos canales definen el "patch" que es único para todos los 5 emisores (shots) que componen el "salvo". También vemos cual es la cobertura lograda en el subsuelo (mid point coverage template) al completar dicho "patch".

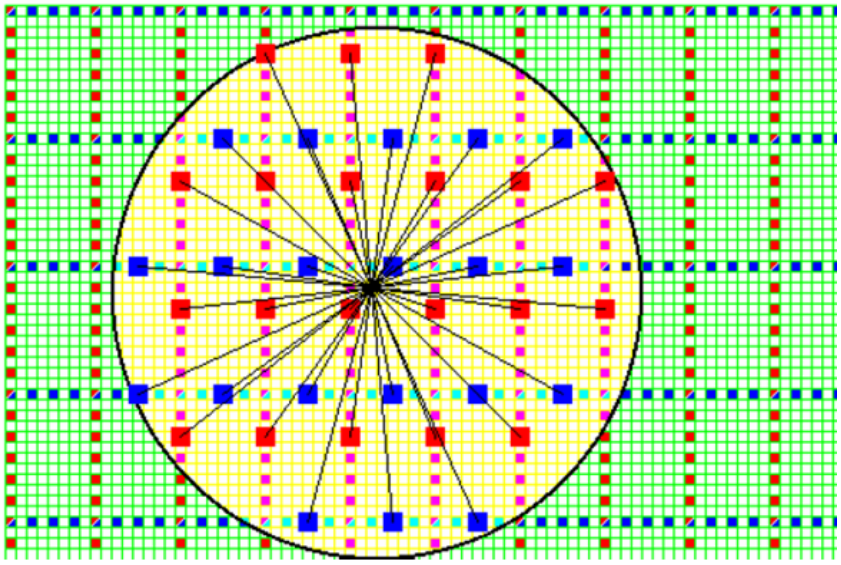


Figura 46, ejemplo de 20 pares emisor-receptor cuyos puntos medios pertenecen a un "bin" [2]

En la figura 46 se ejemplifica los rayos que inciden dentro de un "bin", los cuales pertenecen a varios pares emisor-receptor, con distintos "offsets" y distintos "azimuts".

Ejemplo de Proyecto 3D

Veamos rápidamente como se diseñó un proyecto 3D real.

Datos Geológicos del Proyecto:

- *Horizonte cercano (Shallow layer): 1,2 seg. ~ 2050 metros*
- *Horizonte profundo (Deeper layer): 2,5 seg. ~ 4300 metros*
- *Angulo Máximo de Buzamiento: θ = 30º*
- *Horizonte de interés (Target layer): Todas las capas entre 2050 y 4300 m.*
- *V_{int} (velocidad interválica en el horizonte de interés): 3500 metro/segundo**

a) Intervalo entre Estaciones Receptoras (RI)

Se calcula estimando la frecuencia máxima se la señal sísmica sin aliasing espacial para el ángulo de buzamiento de la capa objetivo:

$$RI = Vint / (2 \times fmax \times \text{sen } 30º)$$

$$RI = 3500 / (2 \times 40 \times 0.5) = 87,5 \text{ metros}$$

Se eligió trabajar con un RI = 50 m < 87,5 m

b) Máximo Offset Mínimo:

La condición a cumplir es que: $X_{min/max} < Z_{\text{shallow target}} = 2050$ m

Elegimos valores tentativos y deseados de: RLI = 400 m y SLI = 400 m. Entonces:

$$X_{MinMax} = \sqrt{(SLI - 0.5\ RI)^2 + (RLI - 0.5\ SI)^2} = [2 \times (400 - 25)^2]^{-1/2} = 530\ m < 2050\ m$$

Los distanciamientos entre líneas receptoras y entre líneas fuentes de 400 m, son correctas para cubrir los horizontes menos profundos.

c) Offset Máximo

La condición a cumplir es que: $X_{max} > Z_{target}$ ó $\geq Z_{\text{deeper layer}} = 4300m$

Definidos anteriormente RI, RLI y SLI, conociendo que el offset máximo debe ser mayor que 4800 y manteniendo un diseño simétrico emisor-receptor, definimos ahora que queremos operar con 12 líneas receptoras (NRL= 12) con 144 canales c/u (NCL= 144)

$$X_{Max} = \sqrt{2 * (RI * NCL / 2)^2 + 2 * (RLI * NRL / 2)^2} = [2 * (50 * 144 / 2)^2 + 2 * (400 * 12 / 2)^2]^{-1/2} = 6118\ m > 4300\ m$$

Vemos que cumplimos el objetivo de que Xmax > 4300 m

d) Cobertura (Fold)

La cobertura en el subsuelo puede ser calculada como el producto de la "cobertura Inline" por el producto de la "cobertura Crossline". Las ecuaciones pueden ser fácilmente deducidas, pero que exceden los alcances de este capítulo, pero que pueden ser consultadas mediante las referencias propuestas al final del mismo.

Cobertura Inline: $IF = \frac{NCL \times RI}{2 \times SLI} = \frac{144 \times 50}{2 \times 400} = 9$

Cobertura Crossline: XF = NRL / 2 = 12 / 2 = 6

Cobertura Nominal: IF * XF = 9 x 6 = 54

Mapa de la cobertura del proyecto

Los extremos del proyecto no poseen la cantidad del "fold" nominal y tampoco lo tendrán áreas interiores que no puedan ser cubiertas con estaciones receptoras o emisoras.

En la figura 47 se muestra una parte del proyecto que hemos calculado, donde la cobertura perimetral apenas alcanza a la suma de 2-4 trazas por "bin" (perímetro crossline: rosa-violeta)) y de 8 a 10 trazas en sentido "Inline" (color celeste).

La parte central del proyecto presenta una cobertura continua de 54 trazas de cobertura (color amarillo)

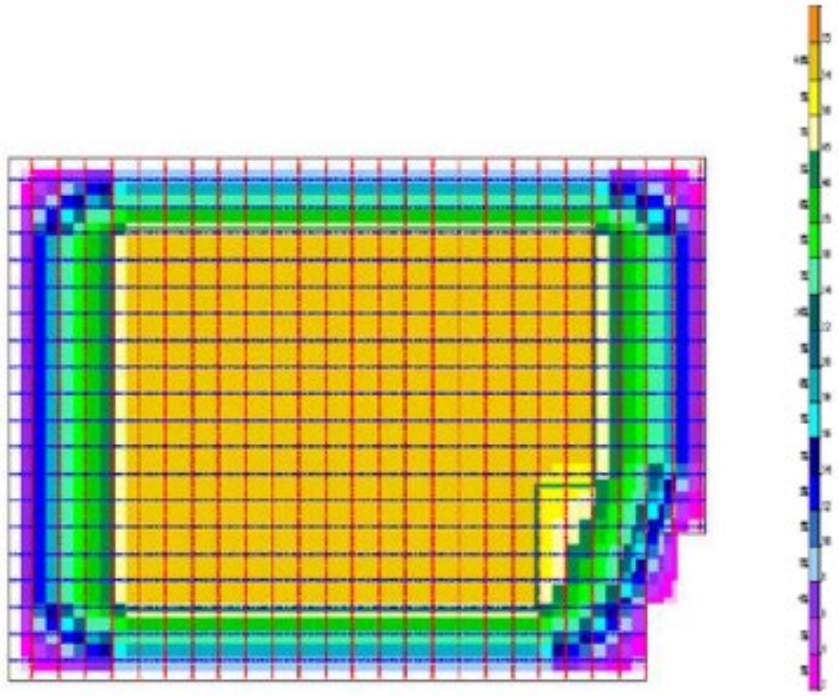


Figura 47, Mapa de Cobertura (fold map) [2]

Ventajas de la Sísmica 3D

Resumiendo**, l**as siguientes son las principales ventajas de trabajar en 3D:

- Correcto Posicionamiento Espacial de los Reflectores. La Migración 2D no resuelve la verdadera posición del reflector si el buzamiento del horizonte es perpendicular a la Línea Sísmica.
- Mejora la Relación Señal- Ruido. La energía de difracción se colapsa mejor en 3D, limpiando a la traza sísmica de la interferencia causada por dicho ruido convirtiendo Imágenes difusas en nítidas: "focussing".
- Mejor Resolución Espacial. Los mapas confeccionados con los datos 3D contienen mucha más información que los obtenidos con 2D.
- Mejor Interpretación Sísmica. El Geofísico cuenta con una gran base de datos y con programas de procesamiento interactivos que le permiten obtener representaciones estructurales detalladas, así también Mapas de Atributos para estudiar la estratigrafía del reservoreo y monitorear su progreso.

Consideraciones Sísmicas Finales

Con los conceptos hasta aquí manejados, podemos establecer algunas comparaciones adicionales entre la actividad sísmica horizontal, con la vertical de los perfiles obtenidos de pozos. En el Perfil Sónico, una herramienta se desplaza en el interior del pozo, la herramienta contiene a la fuente de energía y se encuentra a muy corta distancia del perfil a ensayar y del receptor del perfil (contenido también en el mismo cuerpo de la herramienta). La Fuente de Energía Sísmica, en cambio, se encuentra sobre la superficie del subsuelo (o muy cercana a él, tal como es el caso de la dinamita), la señal sísmica debe viajar ida y vuelta desde la superficie y muchos obstáculos en el camino contribuirán a alargar la ondículas emitida, de tal manera que la señal recibida ha perdido poder de resolución.

Principales fuentes de Distorsión en el camino de la señal sísmica

Las principales fuentes de distorsiones o filtros adicionales que se suman a la Función Transferencia del Subsuelo son:

a) Acoplamiento de la Fuente de Energía

La efectividad del acoplamiento de la Plancha del Vibro en la superficie o de la Dinamita en la profundidad y carga adecuada, son fuentes de filtrados importantes.

b) El efecto del Weathering

La capa meteorizada produce una absorción selectiva de altas frecuencias en la energía emitida.

c) Divergencia Esférica

Cuando la señal es emitida, la energía se encuentra prácticamente concentrada en un punto, luego el frente de onda se entra a expandir reduciéndose la densidad energética. Es decir, existe un atenuador de amplitud tanto en el camino de descenso como en el de ascenso.

d) Atenuación inelástica

Parte de la energía emitida se gasta en deformación plástica del medio reduciendo la energía útil ó elástica. Esta atenuación también es selectiva y afecta a las altas frecuencias en una manera exponencial con respecto al tiempo.

e) Reflexiones Fantasmas y Reverberaciones

Las "interfaces" que poseen grandes contrastes de impedancias acústicas (base del weathering, fondo marino, superficie-agua), originan "rebotes de energía" que luego se mezclan con fases distintas con la señal original provocando importantes atenuaciones.

f) Reflectividad del subsuelo

Hasta ahora considerábamos que las "interfaces" eran homogéneas y que los coeficientes de reflexión eran absolutos. En realidad existen variaciones de reflectividad laterales, variaciones por rugosidad del reflector, variaciones con el ángulo de incidencia, variaciones de reflectividad variables con la profundidad. Todo esto afecta a la amplitud de la señal sísmica.

g) Ruidos

Los ruidos generados por nuestra fuente sísmica, por el medio ambiente y por el Instrumento de adquisición, contribuyen a disminuir la resolución de la señal sísmica recibida.

h) Acoplamiento y Respuesta de los Geófonos

El acoplamiento de los Geófonos al terreno es de esencial importancia debido a que el Geófono es "el trasductor sísmico-eléctrico" de un evento sísmico de muy bajo grado. Se requiere el mejor grado de sensibilidad posible para que tanta matemática y física sean justificables.

El Geófono es un "sensor de velocidad", es decir que la señal eléctrica generada es análoga a la componente de velocidad del desplazamiento provocado en su bobina, modificando la fase de la onda sísmica (adelantándola 90º). La curva de respuesta del Geófono debe ser perfectamente conocida si es que se quiere realizar un "Modelado de la Señal Sísmica Recibida".

i) Respuesta del Instrumento de Adquisición

Los amplificadores y filtros del sismógrafo modifican tanto la fase como la amplitud de la señal sísmica. Los Filtros y Amplificadores tienen la virtud de tener muy conocidas sus respuestas. El Correlador, usado para correlar los datos recibidos cuando la Fuente es Vibroseis, es un aparato matemático que remueve las fases existentes dejando una mezcla de fases al final del proceso de adquisición de la señal sísmica. Así se entrega para su Procesamiento.

Deconvolución

"La deconvolución es más un arte que una ciencia".

El pasaje de la señal sísmica por el subsuelo, su recepción en el Geófono, la manipulación electrónica en el instrumento de adquisición hasta su grabación (en cinta o disco), modifican considerablemente a dicha señal. Cada etapa modificadora puede ser considerada como un filtro que se aplica a la señal, y al final de esta cascada de filtros el dato grabado es el resultado de la Convolución de la señal origen, con todos los filtros de la cascada: Modelo Convolusional.

Si la tierra fuera un cuerpo elástico perfecto, el impulso generado en nuestra fuente viajaría sin deformarse y luego de reflejarse en las capas del subsuelo, se adquiriría como un impulso de recepción.

Tal como vimos, a partir del "Perfil Sónico", podemos obtener la "Respuesta Impulsiva del Subsuelo: h(t)" y que luego utilizábamos un proceso de "Convolución" para obtener un "Registro Sintético":

Convolución $y(t) = x(t) * h(t)$

x(t): Ondícula de Ricker o de Klauder según corresponda
h(t): Respuesta Impulsiva del Terreno
y(t): Traza Sintética obtenida

Si queremos obtener perfiles sísmicos lo más selectivos posibles, ello implica, a partir de nuestra "Traza Sísmica: y(t)", obtener la "Respuesta Impulsiva del Terreno: h(t)", que matemáticamente se denomina:

"Deconvolución" $h(t) = y(t) * 1 / x(t)$

La Deconvolución es un proceso que mejora la resolución temporal de los datos sísmicos por compresión de la ondículas básica. Es decir deberíamos fabricar un filtro inverso que nos permita obtener la "respuesta impulsiva de la tierra". Este filtro es denominado: "filtro de Deconvolución".

Este Procesamiento se aplica generalmente en los Centros de Procesamientos de Datos Sísmicos, antes del Apilamiento ("Stack" o suma CDP) aunque también suele aplicarse a los datos ya sumados.

Existen diferentes tipos de procesamiento que permiten la "deconvolución" para obtener una respuesta impulsiva del terreno aproximada, y la comparación de la Sísmica Horizontal con los "Perfiles Verticales en Pozos (VSP)" en el área de prospección, ayudan en gran medida a la interpretación sísmica.

Desgraciadamente la propagación sísmica es tan complicada que mucho de los filtros son desconocidos para ser fácilmente removidos y por lo tanto no puede ser utilizada permanentemente la "Deconvolución determinística", debiéndose utilizar algún tipo de "Deconvolución estadística", siendo la más utilizada la "Deconvolución predictiva".

El tema excede a nuestro alcance, pero para plantear las dificultades que se presentan para lograr la respuesta impulsiva del terreno partiendo de las trazas sísmicas, diremos que los diferentes tipos de deconvoluciones estadísticas basan generalmente sus diferencias, en las suposiciones tomadas para simplificar este procesamiento. La "Deconvolución Predictiva" puede a su vez subdividirse en: "Spiking" y en "Predictiva Propiamente Dicha".

Cuando aplicamos filtros de Deconvolución tipo "spiking" a los datos de vibradores, lo hacemos estimando que removemos el efecto (generalmente desconocido) filtrante de la secuencia geológica que, como pensamos, es de Fase Mínima.

Sin embargo, debido a que la ondícula de la fuente (Ondícula de Klauder, cuando empleamos Vibroseis), es de banda limitada y fase cero, al aplicar la Deconvolución "spiking", el cálculo de la fase de la secuencia geológica será incorrecto. Para obviar este inconveniente, se aplica una corrección que convierta la "fase cero" de la Ondícula de Klauder en "fase mínima".

Pero no existe un equivalente de "fase mínima" de dicha ondícula debido a que su banda espectral es limitada Para definir el equivalente a fase mínima de una ondícula simétrica se deben especificar las amplitudes de las componentes de frecuencia exteriores a las frecuencias extremas que limitan el ancho de banda del barrido, agregando un pequeño valor de amplitud constante para c/u de las frecuencias adicionadas (ruido blanco).
Pero ese pequeño valor de amplitud tiene un efecto importante en la corrección de fase para llevar a la ondícula de Klauder a fase mínima, provocando sustanciales diferencias de fase en los datos deconvolucionados entre ondículas de Klauder corregidas con diferentes amplitudes de "ruido blanco".

Ejemplos: Amplitudes de ruido blanco de: 10% y con 0,01%

La ondícula corregida con el 10% se parece a una ondícula de 90 grados.

La " " " " 0,01% se parece a una ondícula de 180 grados.

Las dos son de fase mínima pero la Deconvolución practicada con cada una de ellas, genera diferencias de fases significativas entre un resultado y el otro conduciendo a diferentes interpretaciones estratigráficas e inclusive estructurales. La corrección de fase, también implica nuevas especulaciones matemáticas en el procesamiento de la información.

Finalmente volvimos al principio, cuando tratamos la "Respuesta Impulsiva del Terreno" obtenida a través de un Sónico. Finalizamos el tema volviendo a graficar el problema y dejamos que el interesado siga con el tema con un especialista en la materia.

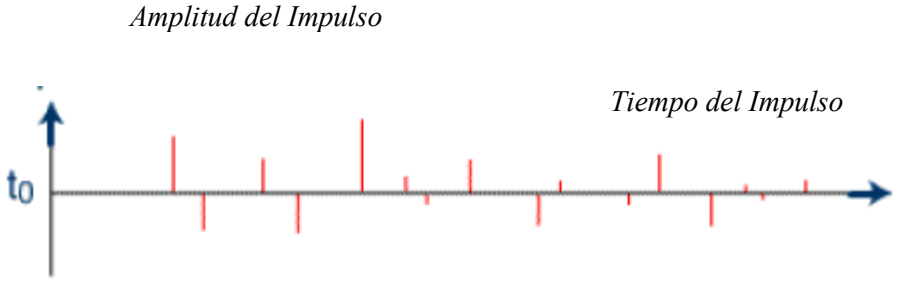


Figura 48: Traza Sísmica desde "perfectos reflectores": "Respuesta Impulsiva" [11]

- El tiempo del impulso corresponde al viaje de ida y vuelta (two way path) al reflector.
- La amplitud del impulso está dado por el coeficiente de reflectividad del reflector.

Como la tierra no es un cuerpo elástico perfecto, la agudeza de nuestro impulso inicial se modifica hasta adquirir la forma de una ondícula sísmica (wavelet). La traza sísmica está compuesta por numerosas y diferentes Ondículas debido a los diferentes caminos que han recorrido las mismas para llegar a la estación sísmica donde es recibida (traza sísmica).

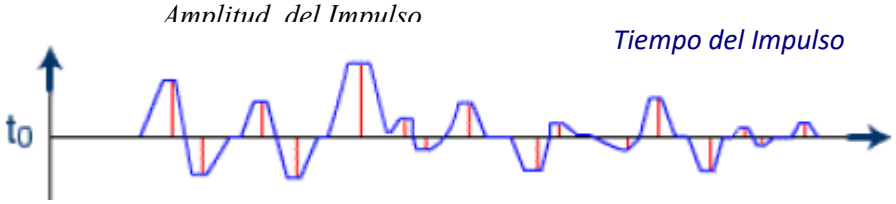


Figura 49: Traza Sísmica Adquirida [11]

Bibliografía consultada:

1. *Sísmica 3D, Raúl Mera.*
2. *3D seismic survey design optimization, Gijs J.O. Vermeer, 3DSymSam – Geophysical Advice, Netherlands.*
3. *Introduction to wavelet processing, Andrew Furber, February 2000.*
4. *Geocafe, portal geofísico de Facebook.*
5. *Adquisición Sísmica 2-D y 3-D, Diseño y Control de Calidad, Mustaghresource Ltd; curso dictado en WesternGeco Buenos Aires en 2007.*
6. *Introduction to the Seismic, John F. Hermance, September 2002.*
7. *Señales y Espectros, varios autores de Ingeniería en Telecomunicaciones.*
8. *Basic Seismic Processing for interpreters, by Rob Hardis.*
9. *Elasticidad y Resistencia de Materiales – Universidad Nacional de La Plata- Facultad de Ingeniería.*
10. *Eduardo Corti, revisión y corrección del Tratado.*
11. *Curso de entrenamiento en adquisición sísmica, P.R. Concetti, WesternGeco 2002.*
12. *Statics - Refraction Theory &EGRM, Mubarik A. Malik, September 2000-*
13. *Combining P-wave and S-wave Seismic Data to Improve Prospect Evaluation" by Bob A. Hardage –Bureau of Economic Geology – The University of Texas at Austin – 1996.*

CAPITULO 4 – INTRODUCCION A LA ADQUISICIÓN SÍSMICA- 2

Señales y Ruidos Sísmicos

Podemos considerar que la información sísmica recibida del subsuelo, se compone de señales y ruidos:

Datos recibidos = Señal + Ruido

$$y(t) = s(t) + n(t)$$

Se conoce como señal a todo estímulo que lleva una información significativa para construir un mensaje y como ruido a cualquier otro estímulo que acompaña a la señal, dificultando la adecuada transmisión, almacenamiento y comprensión de la misma.

En general buscamos concentrarnos en la señal, portadora de información, y reducir el ruido, que obstaculiza la percepción de la información significativa. A la relación, o proporción, entre la intensidad de la señal y la intensidad del ruido que la acompaña, la denominamos relación señal/ruido y se la indica y mide en dB, o decibeles. Esta fórmula fue concebida para comparar potencias, pero se desprende de la misma la comparación de amplitudes.

$$S/N = 10 \text{ logaritmo} \frac{\text{Potencia Señal}}{\text{Potencia Ruido}} = 10 \log \frac{(\text{Amplitud Señal})^2}{(\text{Amplitud Ruido})^2} = 20 \log \frac{\text{Amplitud Señal}}{\text{Amplitud Ruido}}$$

Podemos dividir los ruidos que se suman a nuestra señal entre: coherentes e incoherentes.

Los ruidos son **coherentes** si existe **correlación** entre las fuentes, es decir que presentan las mismas frecuencias con la misma fase. Los ruidos incoherentes son los que no poseen ninguna relación con la fuente que genera la señal.

Ruidos Coherentes	Ruidos Incoherentes
Rayo Directo	Viento
Onda Aérea	Tránsito Vehicular
Ground Roll	Otros ruidos ambientales
Refracciones	
Difracciones	

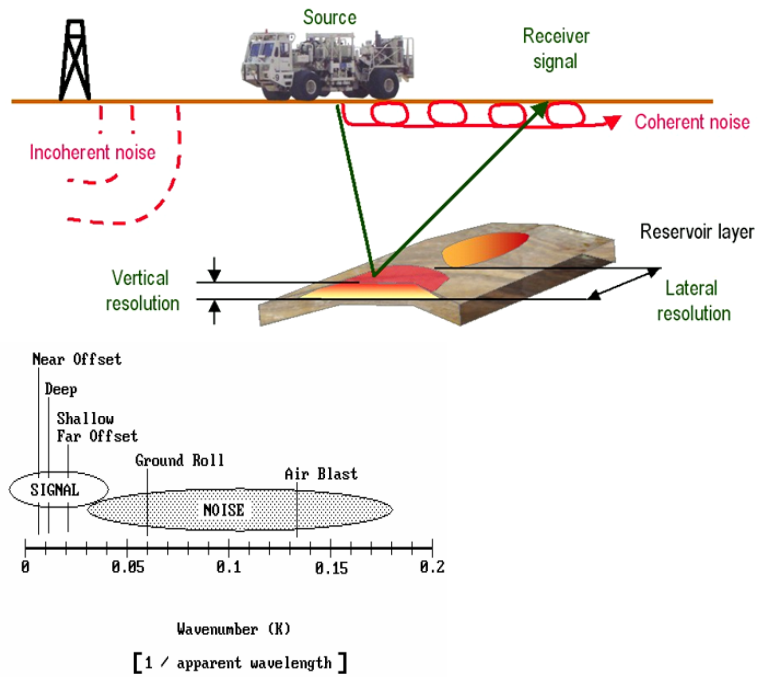


Figura 1, Señal reflejada mezclada con ruidos coherentes e incoherentes [1]

En la figura 1, se esquematiza la prospección sísmica de un yacimiento de hidrocarburos donde existen ruidos que obstaculizan a la señal reflejada en el subsuelo porque llegan simultáneamente al receptor y comparten frecuencia temporal y espacial. La frecuencia espacial (k: wavenumber) de señales y ruidos muestra que el grado de solapamiento de señal y ruidos, depende de la dirección de la señal del subsuelo, del espaciamiento entre estaciones receptoras y de la naturaleza de los ruidos.

Hemos apreciado como el apilamiento (stacking) de trazas sísmicas, luego de las correcciones dinámicas, incrementa la energía de la señal y atenúa los ruidos coherentes e incoherentes en:

$$\text{Aumento de la Señal y Reducción del Ruido} = \sqrt{\text{Número de sumas}} = \sqrt{\text{Ns}}$$

$$y(t) \approx \sqrt{Ns}.\ s(t) + n(t) \,/\sqrt{Ns}$$

Pero la raíz cuadrada es una curva que tiende a la histéresis, por lo tanto un mayor esfuerzo por sumar más términos, a veces no se ve recompensado con los resultados obtenidos.

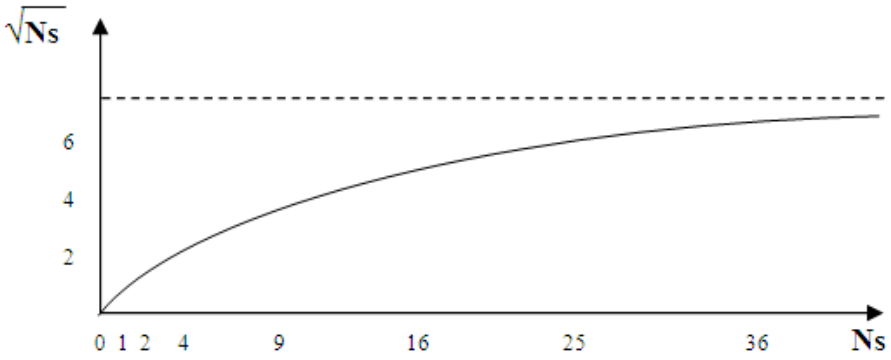


Figura 2, Raíz cuadrada del número Ns

Con vibradores se ha generalizado la aplicación de una fórmula "S/N", que es muy útil para comparar energía emitida en función del: Número de Vibradores empleados (Nv), Fuerza Fundamental Emitida (Fnd), Longitud del Barrido (Ts), Rango de Frecuencia del Barrido (ΔF) y Número de Barridos (Ns):

$$S/N = 20 \log (Nv.Fnd.\sqrt{Ls*\Delta F*Ns})$$

Vemos en la formula anterior, como participa el número de sumas (barridos en este caso) bajo una raíz cuadrada.

El apilamiento de trazas presupone un filtrado espacial de ruidos, como si el conjunto de las estaciones receptoras formaran un largo arreglo de receptores. El peso que tiene en la suma cada traza depende de este filtrado espacial, tanto en la distancia entre estaciones receptoras como del arreglo de los receptores de cada estación ya que en cada caso se produce un "muestreo espacial" (spatial sampling).

Muestreo Espacial

Nuestro receptor sísmico en Argentina, fue durante mucho tiempo (Sísmica 2D), un Arreglo Lineal de 12 Geófonos. En nuestro ejemplo mostramos la composición de esta Ristra de Geófonos SM-24 en Configuración 6x2, balanceada, que genera un voltaje diferencial sobre la entrada al Sismógrafo (ver capítulo 6).

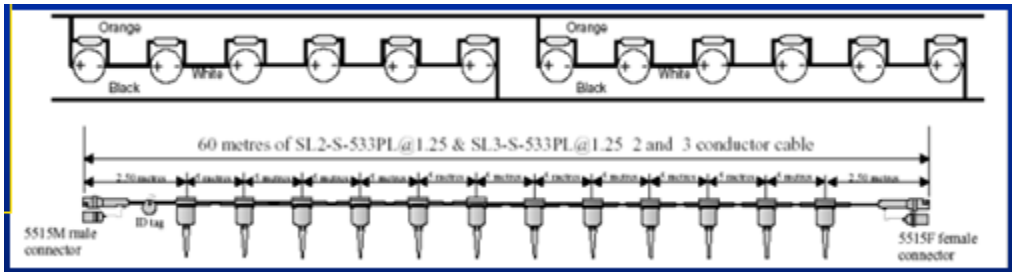


Figura 3, ristra de geófonos SM-24 en configuracion 6x2 [Sensor I/O Inc.]

Este arreglo recibe, habitualmente, la porción de la energía sísmica emitida por la fuente de energía, luego de su viaje por el subsuelo de la tierra. Los valores de voltajes eléctricos máximos para una señal sísmica no son mayores a 20 mVp (15 mVrms), cuya frecuencia (si fue emitida con vibradores), queda limitada a la Frecuencia Inicial y Final Emitida (valores habituales: 8 - 120 Hz). Con Dinamita (Fuente Impulsiva), podríamos aventurar que se podría obtener un aumento en amplitud (especulando: del orden de 12 DB) y un gran espectro de frecuencias, atenuadas por el filtro-terreno (filtro corta altos), y limitadas por el Rango Dinámico del Conversor A/D del sismógrafo. El Preamplificador de Entrada al Sistema, amplifica la Señal Diferencial de Entrada y atenúa los ruidos de Modo Común (mayormente: hasta 100 dB). También establece el nivel de Ruido Interno del Sismógrafo (típico Sercel 428 para G400: 250 nano Voltios).

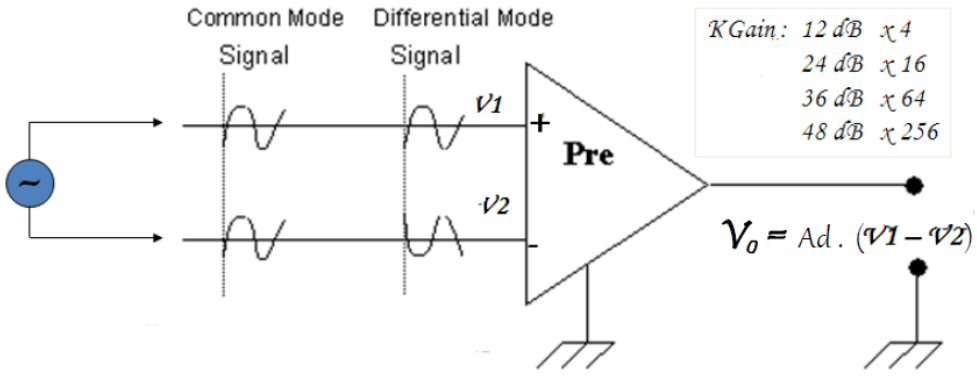


Figura 4. Preamplificador Diferencial, entrada de todo Sistema de Adquisición Sísmica

El arreglo de receptores es un buen filtro espacial para los ruidos superficiales que se encuentren en el mismo plano que los geófonos que lo constituyen y cuyas frecuencias espaciales no se encuentren mezcladas (aliadas) con la señal sísmica recibida desde nuestro horizonte de interés. El arreglo produce una suma contributiva para la señal profunda y su atenuación de ruidos superficiales dependerá de: el azimut de la fuente de energía y de la configuración del arreglo en términos de longitudes de onda, por lo tanto no es tan efectivo en sísmica 3D.

Otra importante consideración es que, en general, la superficie del terreno no es perfectamente plana y cada receptor presenta variaciones locales de elevación con lo cual el aporte individual de c/receptor no es totalmente contributivo al arreglo. Este fenómeno, denominado **"perturbaciones"**, tiene como efecto una cancelación parcial de señal y un filtrado de altas frecuencias (la señal se estira temporalmente).

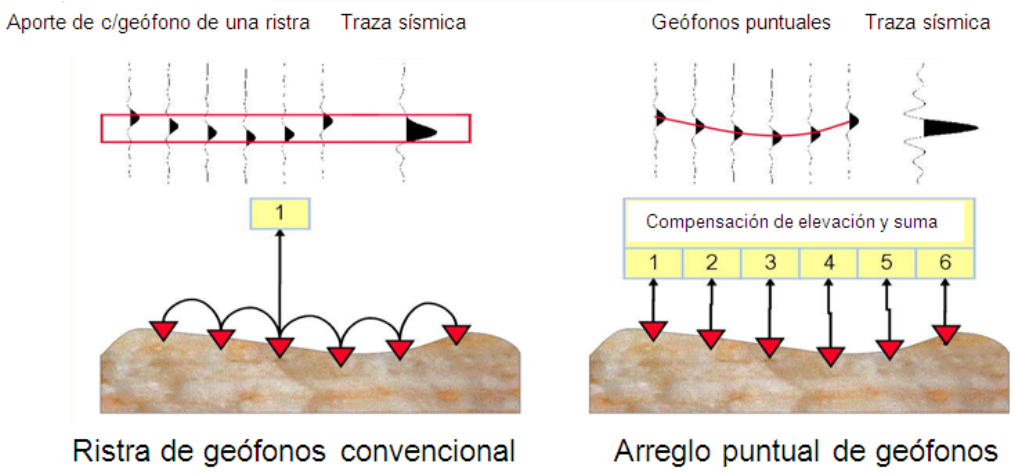


Figura 5, geófonos a diferente altura generan perturbacionesen la señal [1]

Este fenómeno de adquisición es irreversible y las perturbaciones causan un nivel de ruido tal que limita el IDR (Instantaneous Dynamic Range; Rango Dinámico Instantáneo) considerablemente, siendo este nivel de ruido mayor que el ruido de "cuantización" (ver capítulo 7) y entonces una señal muy pequeña recibida simultáneamente con un ruido mucho mayor, resulta totalmente no-detectada.

Si pudiéramos utilizar un único receptor por estación (receptor puntual), las correcciones estáticas se practicarían individualmente permitiendo que una reagrupación digital posterior (DGF: Digital Group Forming), genere una suma contributiva a la señal, tanto en amplitud como en frecuencia. Otras de las posibilidades del receptor único, es que podemos aplicarle un adecuado filtro espacial anti-alias antes de su reagrupamiento suma, cancelando ruidos coherentes e incoherentes que normalmente se mezclan con la señal.

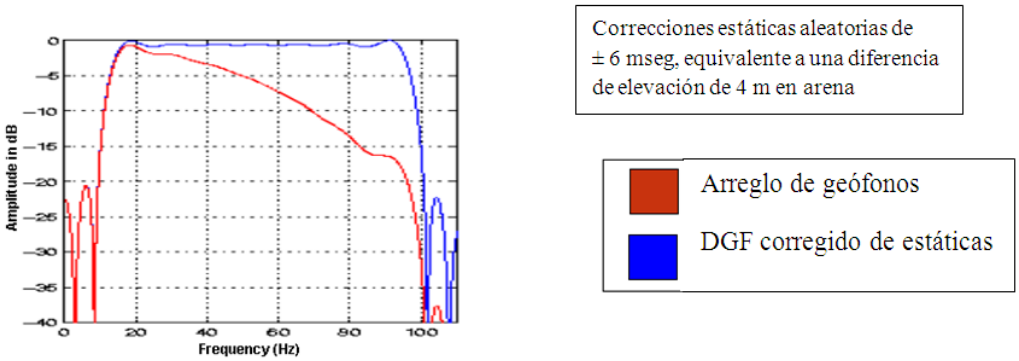
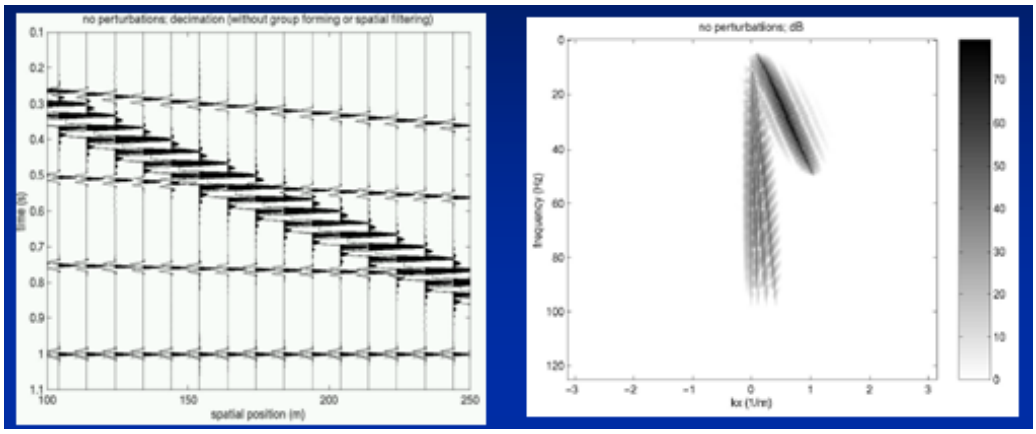


Figura 6, espectro de amplitudes entre una señal con y sin perturbaciones [1]

Perturbaciones

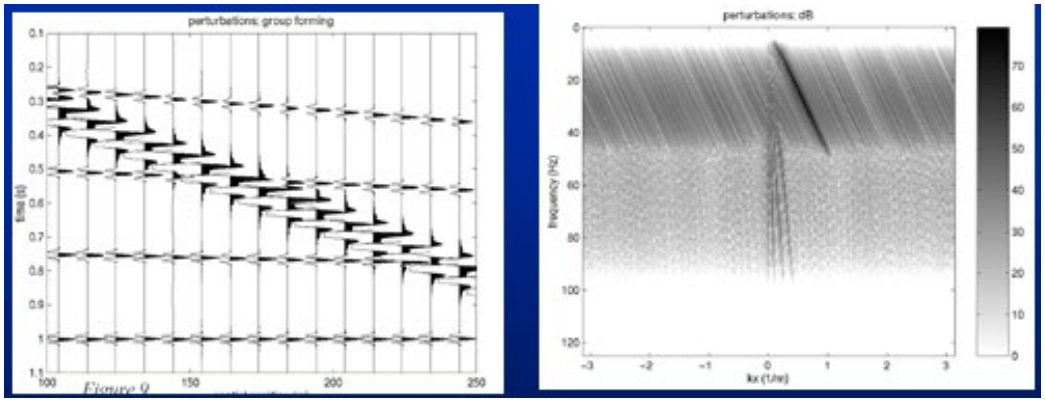
El siguiente ejemplo sintético explica como las perturbaciones acotan el rango dinámico instantáneo (IDR) de la señal adquirida.
Un evento sísmico sin perturbaciones, es mostrado mediante cuatro velocidades que representan a los datos sísmicos y una velocidad representando al "ground roll". Los sensores están espaciados cada 1 metro. La figura 7 muestra la representación x-t y f-k (frecuencia temporal vs. frecuencia espacial) de los eventos mencionados (ver concepto de Velocidades Aparentes a continuación).



(a) (b)

Figura 7: Trazas sísmicas: (a) x-t y (b): f-k sin perturbaciones

La figura 8 muestra a esos mismos eventos con perturbaciones en tiempo de: 1,5 mseg y de 5% en amplitud. Todo el gráfico f-k de la figura 2 se ve contaminado con estas perturbaciones produciendo un ruido del orden de los –30dB. El IDR se ve disminuido en 30 dB que corresponden a 5 bits de mantisa del Conversor A/D.



(a) *(b)*

Figura 8: Trazas sísmicas: (a) x-t y (b): f-k con perturbaciones

Las trazas sísmicas, originalmente analógicas, se digitalizan para su preservación y procesamiento. El Conversor AD de 24 bits, tiene un Rango dinámico efectivo (o instantáneo: IDR) de 120 dB y el "ruido de

cuantificación" se considera que en promedio es de 10 nanovoltios (10 x 10^{-9} voltios).

Resulta importante recalcar que el ruido producido por las perturbaciones es mucho mayor que el "ruido de cuantificación" de la conversión A/D.
Un problema mayor de ruidos se produce cuando estos se mezclan con la señal útil compartiendo similares frecuencias.

Velocidades Aparentes

Repasemos el concepto de Velocidad Aparente, para entender mejor como los ruidos superficiales se mezclan con las señales que no inciden verticalmente con dicha superficie.
Si recibimos reflexiones de horizontes someros o provenientes de largos "offsets", o de buzamientos importantes en el mismo sentido que la propagación sísmica, estas reflexiones se degradan ya que la longitudes aparentes de la señal sísmica y de los ruidos coherentes (que viajan casi horizontalmente, ("Ground Roll", por ejemplo) son similares y se alían (se mezclan).

En la Figura 9, representamos un frente de Ondas Sísmicas que incide sobre la superficie con un ángulo "**θ"** donde se encuentran dos Estaciones Sísmicas: "A" y "B", separadas por una distancia "d". Debido a la angularidad del frente de onda, la estación "A" recibirá primero dicho frente y luego de un tiempo "t", la estación "B" recibirá al mismo frente. Este mismo acontecimiento ocurriría, si una onda superficial propagándose a una Velocidad "Vapp" excitara a las mismas dos estaciones. Vemos que se puede relacionar la velocidad "V" del frente de onda con la velocidad aparente Vapp.

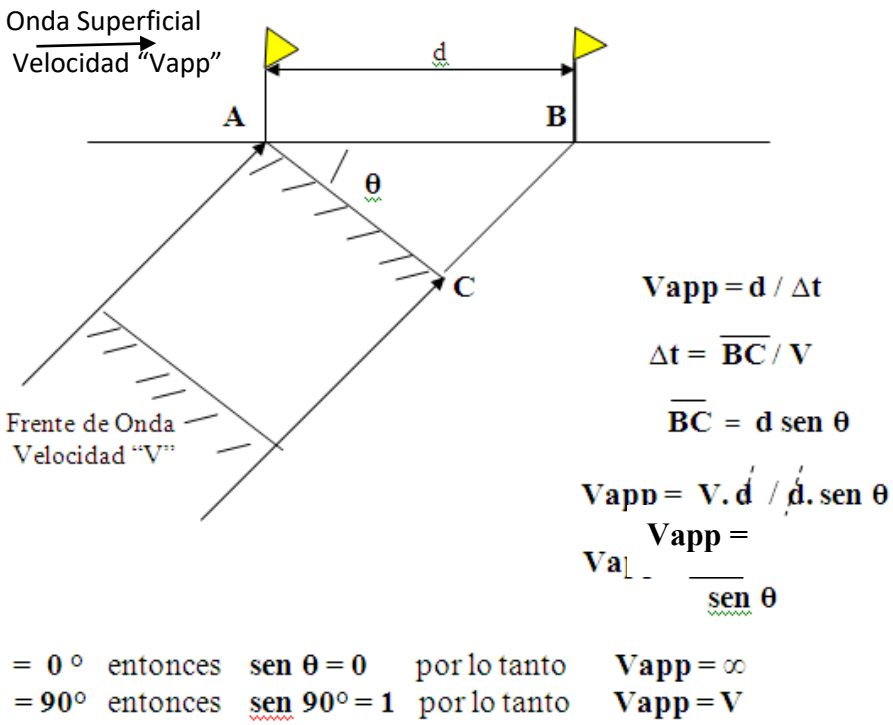


Figura 9, Velocidad Aparente de un frente de ondas [10]

Como vemos, si el ángulo "θ" es de 0º, el frente de onda es perpendicular a la superficie y las dos estaciones recibirían en el mismo instante de tiempo dicho frente (t = 0), por lo tanto la Velocidad Aparente debería ser de un valor infinito (Vapp = ∞).

En cambio si el ángulo "θ" fuese de 90º, el frente de onda viajaría horizontalmente a una Velocidad Aparente igual a la verdadera velocidad del desplazamiento del frente de onda (Vapp = V).

Como la velocidad es igual al producto de la longitud de onda por la frecuencia de la misma:

$$V = \lambda * f$$
$$V_{app} = \lambda * f / \text{sen } \theta$$
$$\lambda_{app} = \lambda / \text{sen } \theta$$

La longitud de onda es la que aparenta modificarse con el ángulo de incidencia del frente sísmico, la frecuencia temporal de la onda no se modifica pero suele aliarse con los ruidos cuyas longitudes de onda coinciden con las longitudes de onda aparente de la señal sísmica. Hasta ahora la única forma de separar parcialmente los ruidos superficiales con las ondas sísmicas, es por medio de filtros espaciales que consisten en arreglos de receptores.

En general los Ruidos Superficiales que llegan hasta las mismas Estaciones Sísmicas anteriores, se propagan prácticamente a su real velocidad y estas velocidades son menores, que las velocidades aparentes de las ondas reflejadas anteriores.

En realidad, las longitudes de ondas de Señal y Ruido no son tan fácilmente separadas, pues estas suelen solaparse (Aliasing or Overlap). No existe una sola longitud de onda **λ** para los Ruidos Superficiales, las longitudes de ondas aparentes de la Señal también varían en un espectro muy amplio. Además, al colocar un filtro para una determinada "λ" de ruido, producimos cierta atenuación de Señal, que es más importante cuanto mayor es su frecuencia.

Para que la Velocidad del Ruido sea menor que la Velocidad Aparente de una Señal, para una misma frecuencia (f), deberá ser la Longitud de Onda del Ruido (**λr**: Noise Wavelength) menor que la Longitud de Onda Aparente de la Señal (**λ**app: Signal Wavelength).

$$\boldsymbol{\lambda r} < \boldsymbol{\lambda}\text{app}$$

$$\mathbf{1/\ \lambda r > 1\ /\ \lambda}\text{app}$$

$$\mathbf{kr} > \mathbf{k}\text{s (ciclos/metro)}$$

A la inversa de la longitud de onda aparente la denominamos "Número de Onda: k" o "Frecuencia Espacial" o, en inglés: **wavenumber.**

"k" es la cantidad de longitudes de onda que se producen por metro y para Nyquist, en su "Teoría del Muestreo", posee las mismas propiedades que la "frecuencia temporal" (f = 1 / T).

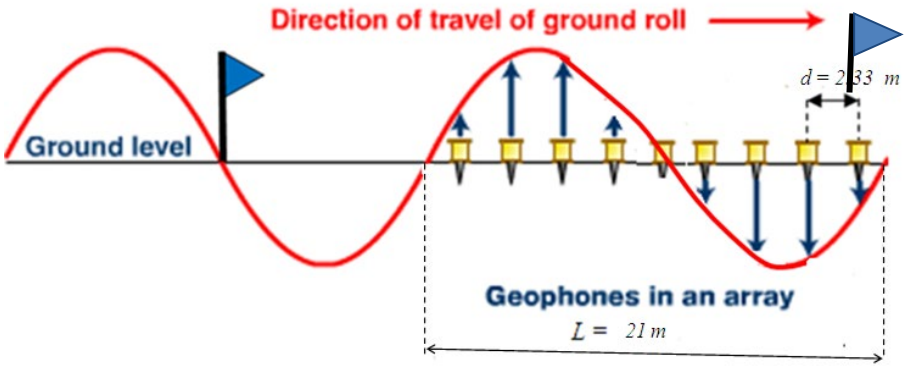


Figura 10, "ground roll" incidiendo horizontalmente sobre una ristra de 9 geófonos [10]

En la figura anterior las estaciones receptoras se encuentran a 21 metros una de otras, coincidiendo con la longitud de onda del "ground roll" (λr = 21 m). También vemos que la traza está compuesta por la suma de 9 geófonos (GI: group array), que generan en ese instante de tiempo un voltaje de "0 Voltios". El arreglo de geófonos anula totalmente a la onda de ruido para esta frecuencia espacial de: **kr** =1/**λr = 0,05 m**$^{-1}$, porque la suma de los voltajes individuales de los geófonos resulta nula.
También se comprueba que la suma de voltajes será nula para: 2 λr, 3 λr, etc; que corresponden a: 0,1 m^{-1}, 0,15m^{-1}, 0,2m^{-1}, etc.

Los geófonos del arreglo, producen una sintonía más fina en el filtrado espacial que el del intervalo de grupos (GI: group interval = 21 m). En el ejemplo la distancia entre geófonos es de: GI /9 = RI = 2,33 metros (RI: receptor interval).

Veremos más adelante que, para este tipo de espaciamiento entre estacas y arreglo de geófonos, el filtro espacial tendrá una banda pasante de: 0 – 0,02 m^{-1} que contendrá a la Señal, que habrá una zona de atenuación (Reject Zone) entre 0,05 y 0,4 m^{-1}, donde los Ruidos se solaparán con la señal pero con cierta atenuación, y que para frecuencias espaciales mayores a 0,4 m^{-1} no habrá atenuación de ruidos.

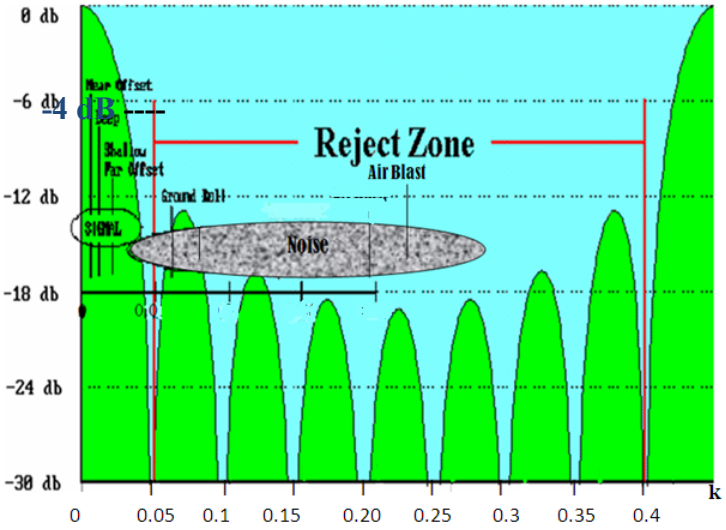


Figura 11, Curva de atenuación perteneciente al arreglo de geófonos de la figura 10

$$k_{Nq} = \frac{1}{2L} = \frac{1}{42} = 0{,}02\ m^{-1} \qquad y \qquad k_{Nq} = \frac{1}{2d} = \frac{1}{4{,}66} = 0{,}21\ m^{-1}$$

Muestreo Espacial

Las estaciones receptoras están ubicadas a distancias discretas unas de otras (intervalos GI), y las ondas que se propagan a velocidades aparentes finitas son captadas por dichas estaciones a diferentes tiempos. Es decir: cada estación recibe una muestra distinta de las ondas presentes por su ubicación en el espacio.

Supongamos que las Estaciones Receptoras de encuentren distanciadas "Δx" metros entre sí y en un instante de tiempo "t" toman el siguiente "Muestreo Espacial" de esas Ondas Aparentes.

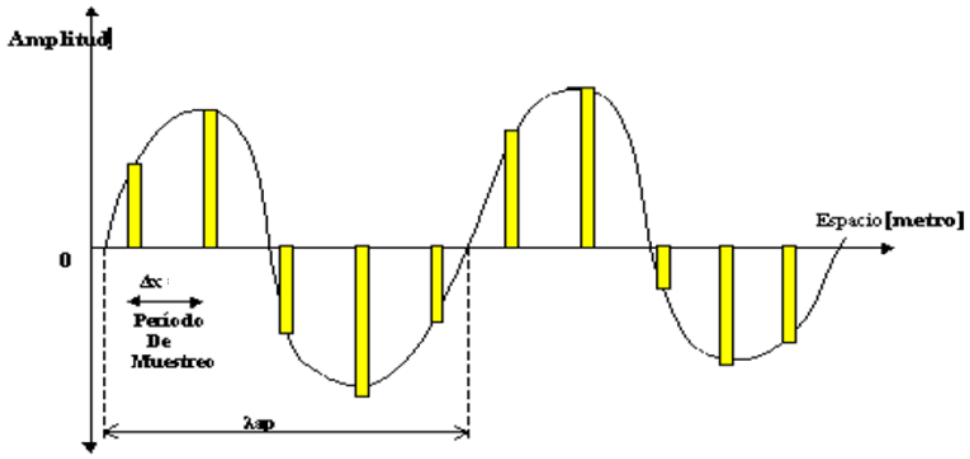


Figura 12, Muestreo Espacial ocasionado por los receptores de las Estaciones Sísmicas [10]

La inversa del distanciamiento entre estaciones sísmicas "1/Δx", representa a la frecuencia de muestreo espacial "km" (km = 1 / Δx).
Como veremos más adelante, todas las propiedades físicas establecidas para el muestreo temporal son aplicables al muestro espacial. Por lo tanto alrededor de la frecuencia de muestreo se producirán dos "Bandas Laterales", que dependiendo del "Número de Onda" (wavenumbers) de las Ondas aparentes, podrán solaparse o no.

Tal como se muestra en la figura 13, alrededor de la frecuencia de muestro "km" se producen Bandas Laterales que reproducen simétricamente el Espectro de Número de Ondas originales:

k_{min}: minimum wavenumber
k_{max}: maximum wavenumber.

Como vemos, la Banda Lateral Inferior es la que podrá solaparse con el espectro original y esto se producirá a partir de:

$$km - kmax = kmax$$

Entonces:

$$kmax = km / 2 = \mathbf{k}_{Nyquist}$$

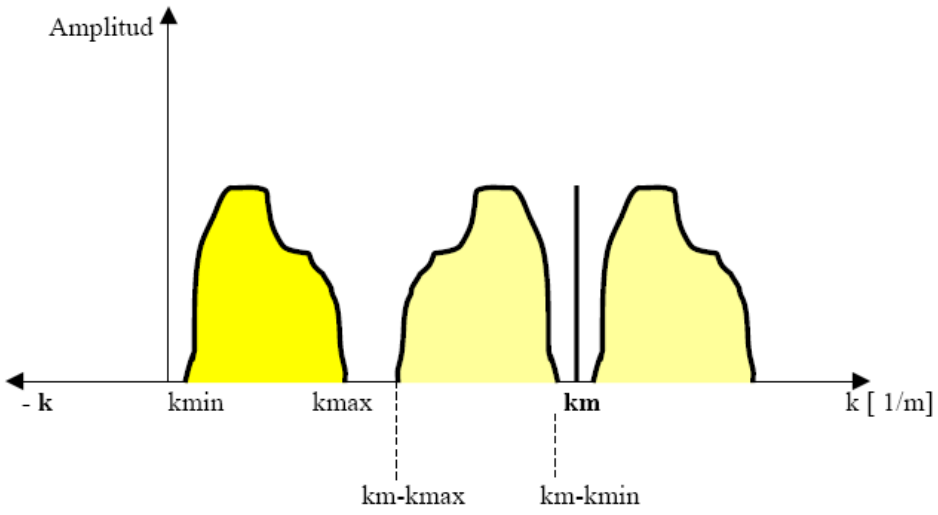


Figura 13: Espectro de Amplitud de Ondas Sísmicas Aparentes [10]

La expresión anterior corresponde al valor de "Número de Onda Máximo", para un determinado muestreo espacial, a partir del cual se producirá "Aliasing" entre el Espectro Original y la Banda Lateral Inferior. Este valor no es otro que el Número de Onda de Nyquist: "$\mathbf{k_N}$".

Si $\Delta x = 50$ m: $k_N = km / 2 = 1 / 2\,\Delta x = 0{,}01\ m^{-1}$.

Si en lugar de colocar nuestras estaciones a "$\Delta x = 50$ metros" las ubicamos ahora a una distancia de 10 metros ($\Delta Xs = 10$ metros):

$$km = 1 / \Delta Xs = 0{,}1\ m^{-1}$$
$$k_N = 1 / 2\,\Delta Xs = 0{,}05\ m^{-1}$$

Vemos ahora que con la disminución del distanciamiento entre estacas receptoras, aumenta la capacidad de recepción de "Wavenumbers" libres de "Aliasing".

Adquirir los datos sísmicos con este alto muestreo espacial ($\Delta xs = 10$ metros), nos permitirá contar con datos más libres de "aliasing". Luego, ya adquiridos los datos sísmicos, podríamos disminuir el muestreo espacial (decimation) hasta obtener el muestreo original ($\Delta x = 50$ metros). Durante este proceso se aplicarán Filtros Digitales Anti-alias Espaciales para que los datos finales se encuentren también libres de "aliasing".

Respuesta de arreglos de geófonos

Tal como se muestra en la figura 10, una onda sinusoidal de longitud "λ" que se propaga horizontalmente sobre un arreglo de receptores de su misma longitud ($L = \lambda$), resulta totalmente atenuada por este arreglo. Lo mismo ocurre para longitudes de onda que son submúltiplos de la longitud del arreglo:
Atenuación Total para:

$$\lambda = L, L/2, L/3, L/4,...., d$$

O lo que es lo mismo para: $k = 1/L, 2/L, 3L, 4/L,....., 1/d$

La siguiente serie de Fourier permite calcular la atenuación de un arreglo de "N" geófonos.

$$e^{i\varphi} = \cos\varphi + i\,\mathrm{sen}\varphi = \exp(i\varphi);\ \text{Formula de Euler}$$

$$A(k) = \sum_{n=1}^{N} \exp(i2\pi knd)$$

$$Z = \exp(i2\pi kd)$$

$$A(k) = \sum_{n=1}^{N} Z^{n} = Z\,\frac{Z^{N} - 1}{Z - 1}$$

Como vemos la serie de Fourier suma N señales sinusoidales de "k_{nd}" frecuencias (para n = 1 hasta N). La atenuación A(k) será cero para:

$$Z^N - 1 = 0$$

Entonces $Z^N = 1 = \exp(i2\pi k_{nd}) = \cos 2\pi + i \,\mathrm{sen}\, 2\pi$

Esta suma será igual a cero: knd = i (i=1, 2, 3,..., N)

Espectro de Amplitud:

A manera de ejemplo volvemos a considerar un arreglo de geófonos de longitud L = 21 m (k = 1/21 = 0,05 m^{-1}), donde se observan "ceros" para: 0.05 m^{-1}, 0.1 m^{-1}, 0.15 m^{-1}, 0.20 m^{-1} y 0.25 m^{-1}, 0,3 m^{-1}, 0,357 m^{-1} y 0.4 m^{-1}.

El eje de abscisas corresponde a la frecuencia espacial "k" (wavenumber), la ordenada muestra la amplitud en escala logarítmica y normalizada (para k = 0 el valor es 0 dB).
Las señales sísmicas se encuentran cercanas a "k=0" y por lo general tienen menor frecuencia espacial que los ruidos, por lo tanto podríamos considerar aceptable que la banda pasante de señal se encuentra entre k = 0 a k = 0,025 donde la atenuación es de –4 dB.

La frecuencia de Nyquist constituye el límite del no solapamiento de señal con ruido:

$$\mathbf{k_N} = 1/2L = 0{,}025\ m^{-1}$$

A partir de k = 0,05 m^{-1} se encuentra una zona de atenuación, donde los ruidos se solapan con la señal pero atenuados 18 dB en promedio (8 veces).

"k = 0.4 m^{-1}" es la mayor frecuencia espacial de ruido atenuada.

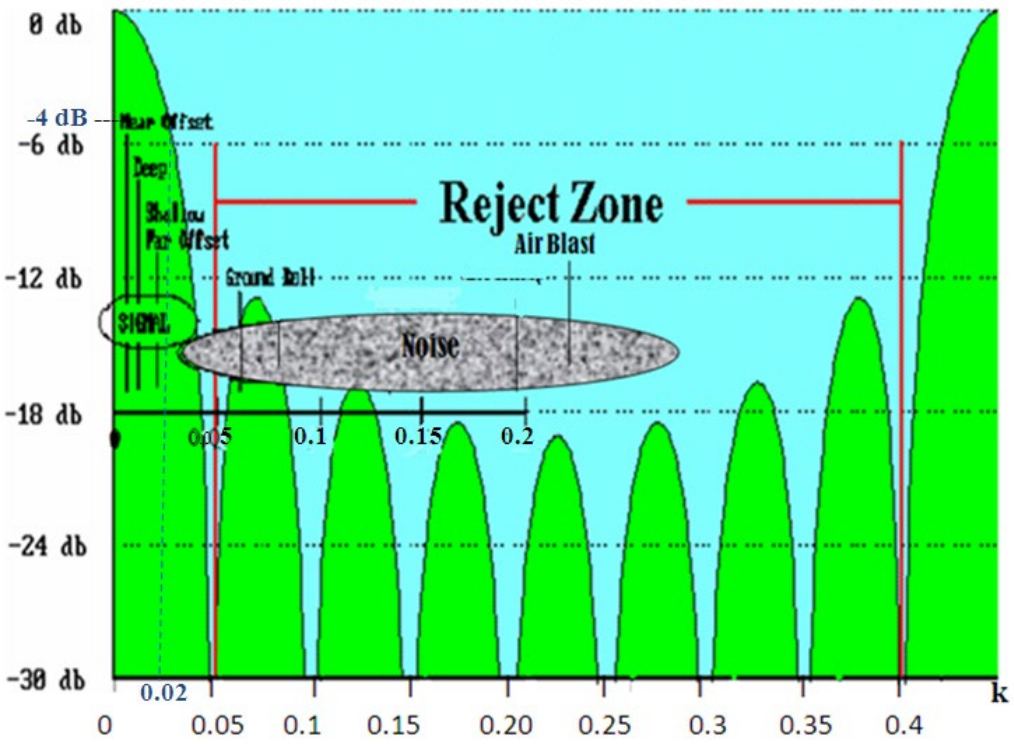


Figura 14, Curva de atenuación de un Arreglo de 9 geófonos separados 2,33 m

Si debemos elegir el arreglo de geófonos en función de los ruidos, adoptaríamos una longitud del arreglo "L" del orden de la mayor longitud de onda de ruido "λr" a filtrar (menor kr) y espaciaríamos los geófonos a una distancia cercana a la menor "λr" que se desee atenuar (mayor kr). Por supuesto que esto es muy difícil cumplir ya que la separación entre estacas depende de razones económicas y estratégicas y, si estamos en proyectos 2D, la distribución de geófonos debe ser continua para cumplir con el "stack array".

Gráficos F-K (para separación de 100 metros entre estaciones)

En la Figura 15 se representa, en coordenadas "F-K", las velocidades aparentes de las señales y de los ruidos presentes en un Registro Sísmico Marino. Las Estaciones Sísmicas se encuentran linealmente separadas 100 metros c/u.

En coordenadas "F-K" las velocidades de los eventos sísmicos son fácilmente representadas por rectas, porque corresponden a la pendiente de los gráficos allí representados:

$$V = f / k$$

Se observan las siguientes velocidades:

- 300 m/seg: velocidad de propagación de la onda en el aire (airblast).

• 1500 m/seg: velocidad de propagación de la onda en el agua (direct arrival in water).
• 3000 m/seg: velocidad Aparente Mínima de la señal (limita la "Zona A").
• 8000 m/seg: velocidad Aparente Referencia de la Señal (limita "Zona B").

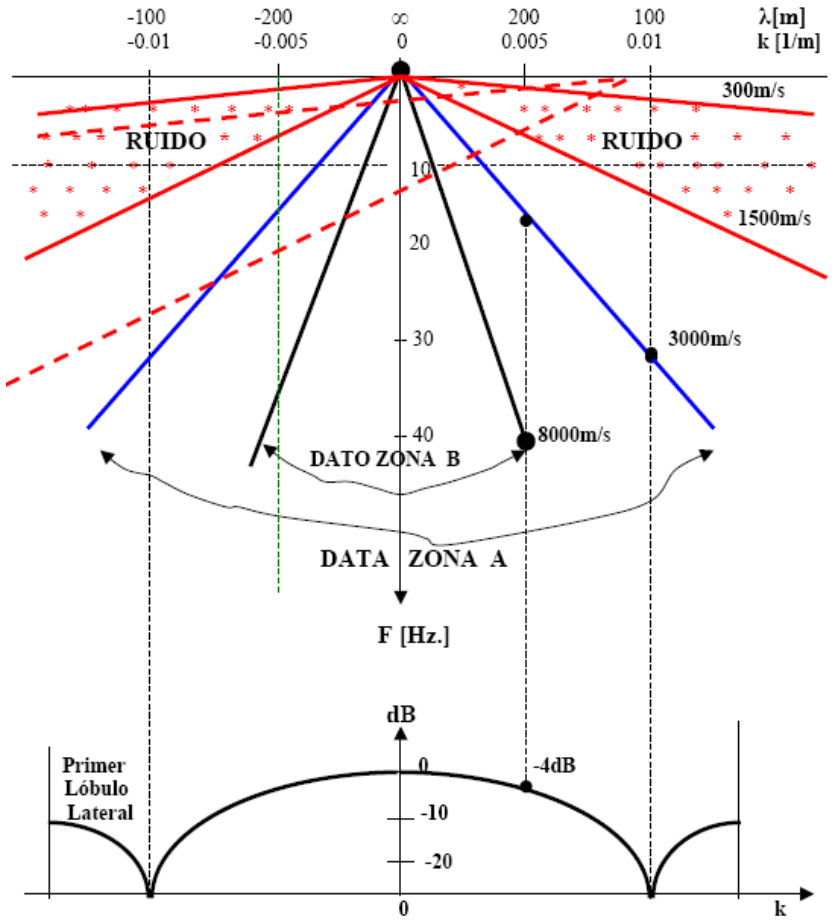


Figura 15, gráfico F-K [10]

En el ejemplo anterior, debido a la separación de los hidrófonos, hemos dimensionado un Filtro Espacial Notch, sintonizado para reyectar la frecuencia espacial de ruido "k = 0.01" (Notch Filter; k = 1 / 100 m).
Vemos también que este filtro también reyecta Señal a frecuencias superiores a 30 Hz para Velocidades aparentes de 3000 m/seg. Vemos que las señales con esta velocidad aparente, sufren una atenuación de 4 dB a partir de frecuencias de 15 Hz. (Ídem para señales de Vapp = 8000 m/seg y frecuencias del orden de los 40 Hz.).
Como vemos, las longitudes de ondas de Señal y Ruido no son tan fácilmente separadas, pues estas suelen solaparse (Aliasing or Overlap). Colocar un "Notch" para una determinada "λ" de ruido, produce también, una atenuación de Señal que es más importante cuanto mayor es la frecuencia (>30Hz. para el ejemplo).
El problema es mayor:

- Cuando mayor es la separación entre Fuente Emisora y Receptor (offset).

• Cuando menos profundos sean los Horizontes Sísmicos ("To" someros).
• Cuando el sentido de "buzamiento" del horizonte reflector se encuentra en el mismo sentido de propagación de la onda sísmica (downdip shooting).
• Cuando mayor sea la separación entre Estaciones Receptoras (Spatial Sampling).

Resulta evidente que para mejorar la separación entre Señal y Ruido, una buena opción sería: disminuir la separación entre Estaciones Sísmicas a fin de aumentar la Velocidad Aparente de las señales. En otras palabras "Aumentar el Muestreo Espacial".

Adquirir los datos sísmicos con este alto muestreo espacial (Δxs = 10 metros), nos permitirá contar con datos más libres de "aliasing". Luego, en Procesamiento de Datos (ya adquiridos), vamos a disminuir el muestreo espacial (decimation) hasta obtener el muestreo original (Δx = 100 metros). Durante este proceso se aplicarán Filtros Digitales Anti-alias Espaciales para que los datos finales se encuentren también libres de "aliasing".

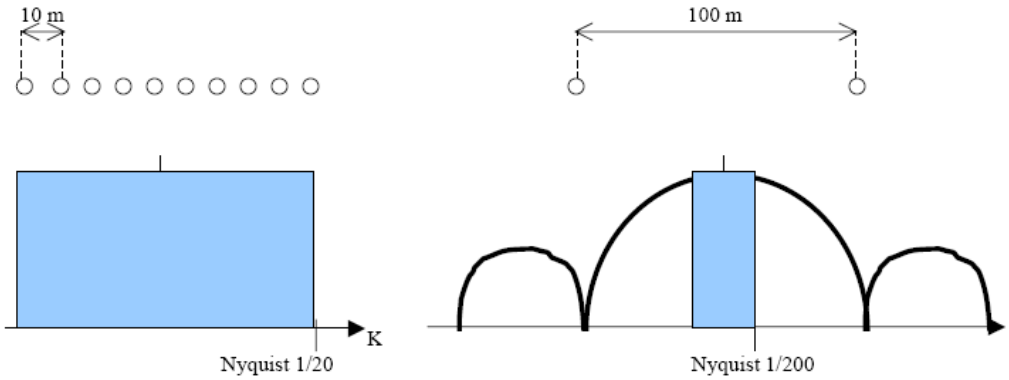


Figura 16, Frecuencias espaciales para estaciones receptoras cada 10 y 100 metros [10]

Grafico F-k (para separación de 10 metros entre estaciones)

En la Figura 17, podemos observar:

- Las mismas velocidades de ruido de 300 m/seg y de 1500 m/seg de la Figura 15, aparecen también aquí casi con la misma pendiente, ya que son prácticamente horizontales y no sufren mayor variación con el cambio de distanciamiento. La velocidad aparente de la señal aumentará con relación a los valores mostrados en la Figura 15.

- El Ruido de 300 m/seg se repetirá cuando alcance la Frecuencia espacial de Nyquist (KN= 0,05 m^{-1}) y se mezclará con la Señal (a k = 0) para frecuencias mayores a 32 Hz. Vemos en la Figura 15, que este ruido se "solapa" con la señal a partir de los 3 Hz.

- El Ruido de 1500 m/seg recién tocará al eje "k=0" cerca de los 140 Hz, pero en la Figura 15 lo estaba tocando (comenzando su aliasing con los datos) a partir de los 14 Hz.

Lo anterior nos indica que hemos corrido 10 veces los espectros (original y banda lateral) al disminuir la distancia entre estaciones sísmicas (aumentando 10 veces el muestreo espacial).

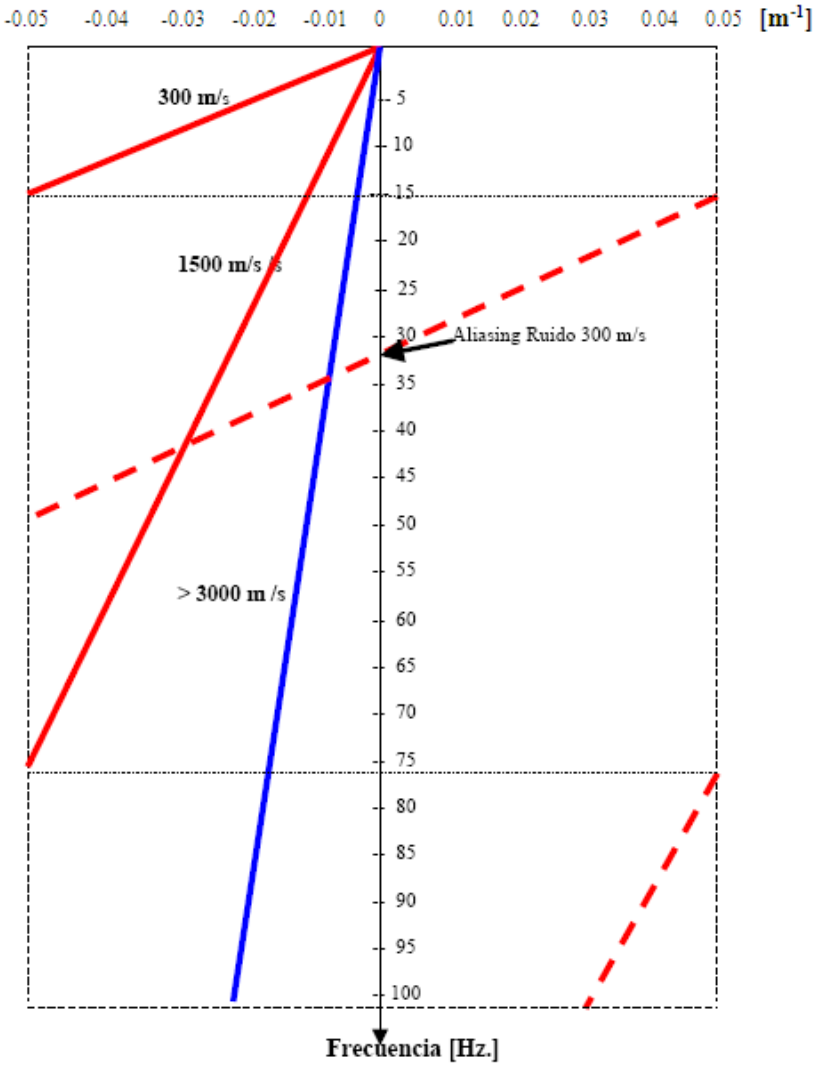


Figura 17, grafico F-K para distanciamiento entre estacas de 10 metros [10]

Ejemplo:

Supongamos un caso extremo de ruido de muy baja velocidad aparente (300 m/s) y una frecuencia alta (50 Hz). ¿A qué distancia tendríamos que colocar los intervalos de geófonos para que este ruido no se mezcle con la señal?

$$k_N = f_{max} / v_{min} = 50 / 300 = 1 / 6\ m^{-1} = 1 / 2\ \Delta x_s$$
$$\Delta x_s = 6 / 2 = 3\ m$$

Respuesta: deberíamos colocar las estaciones a menos de 3 metros una de otras.

Arreglos de Geófonos en 3D

En sísmica 3D, el arreglo de recepción y el de emisión ya no se encuentran en un mismo plano y el azimut varía para cada estación sísmica y para cada cambio de posición de la fuente de energía.
La respuesta sísmica neta debe ahora obtenerse convolucionando los arreglos de recepción y de emisión y ahora, suponiendo que la longitud de ambos arreglos es similar, la "Zona de reyección" á dependerá más de la longitud de los arreglos que del número de elementos de dichos arreglos.

Tomemos un ejemplo real donde la separación entre estaciones receptoras es de 60 metros y cada estación posee 12 geófonos espaciados cada 5 metros
Las líneas emisoras son ortogonales con las receptoras y se ha adoptado una perfecta simetría entre estaciones de recepción y emisión, la separación entre estaciones emisoras también fue de 60 metros.
En una prueba de "walk away" se obtuvieron los siguientes datos:

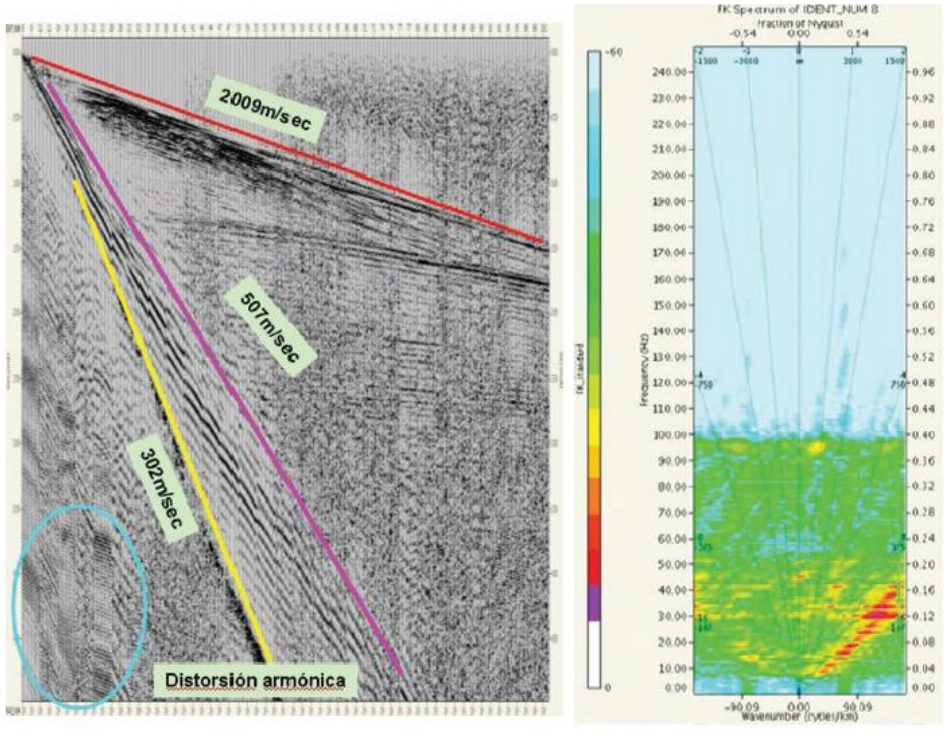
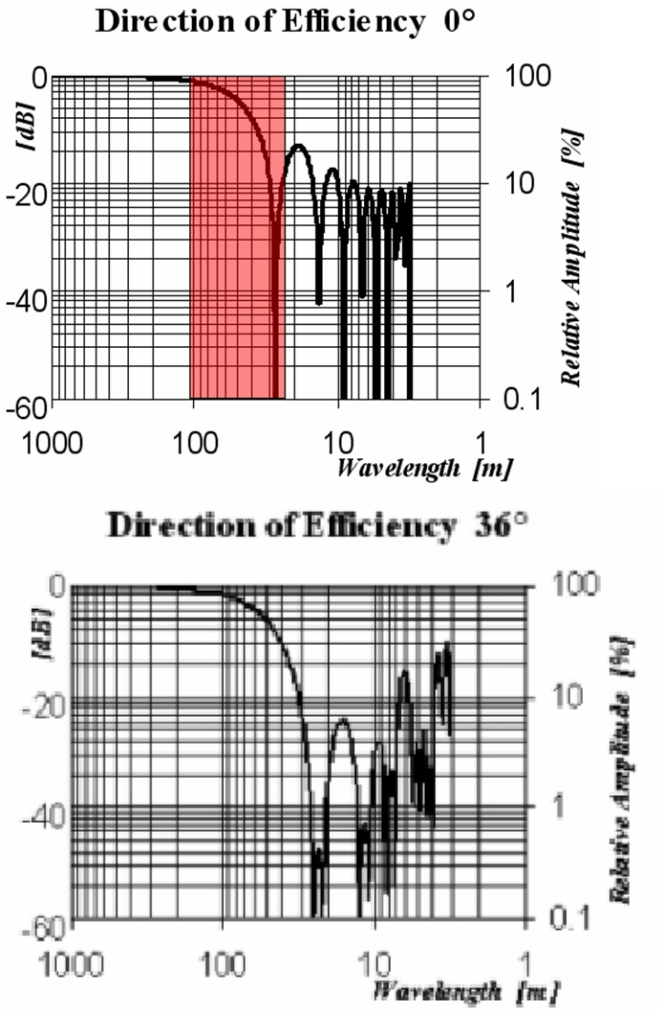


Figura 18, (a) Monitor de la prueba de ruido; (b) Gráfico f – k [9]

Con los valores de frecuencia y velocidades se puede obtener las longitudes de onda (v/f) donde se puede apreciar que el tren principal del "ground roll" se encuentra en los siguientes rangos de longitudes de onda.

	Frecuencia (hz)		Longitud de onda (m)	
Velocidad (m/s)	mínima	Máxima	Máxima	Mínima
507	5	20	101.4	25.35

En la Figura 19, vemos la Convolución de los arreglos de emisión y recepción y notamos como varían las respuestas en función del Azimut.



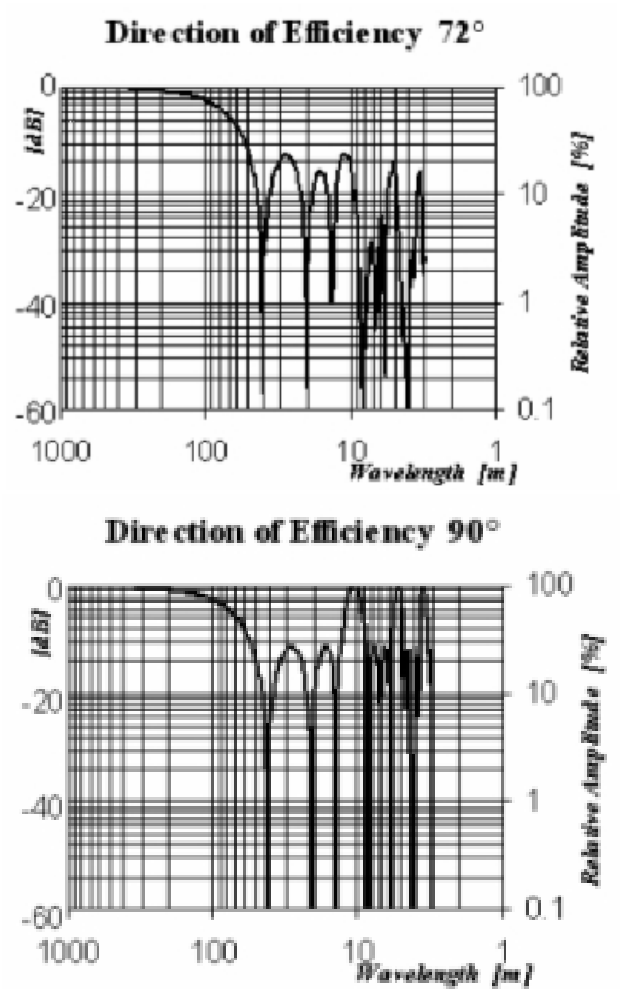


Figura 19, curvas de respuestas de los arreglos de recepción en función del azimut [9]

En general en un arreglo convencional de geófonos, la respuesta 3D, tanto en el sentido "Inline" (kx) (la fuente emisora y la estación receptora), como en el "Crossline" (ky) (la fuente emisora es ortogonal a la estación receptora), presenta varios lóbulos (notches) donde la atenuación de ruidos no es significativa (entre -10 dB y -20 dB). Por lo tanto con receptores convencionales la atenuación de ruidos varía de acuerdo a la dirección azimutal de la fuente con respecto al arreglo. El resultado es que las contribuciones azimutales, claves para la técnica del AVAZ, (Amplitud Variable con el Azimuth), se ven alteradas en sísmica convencional por la irregular atenuación del ruido.

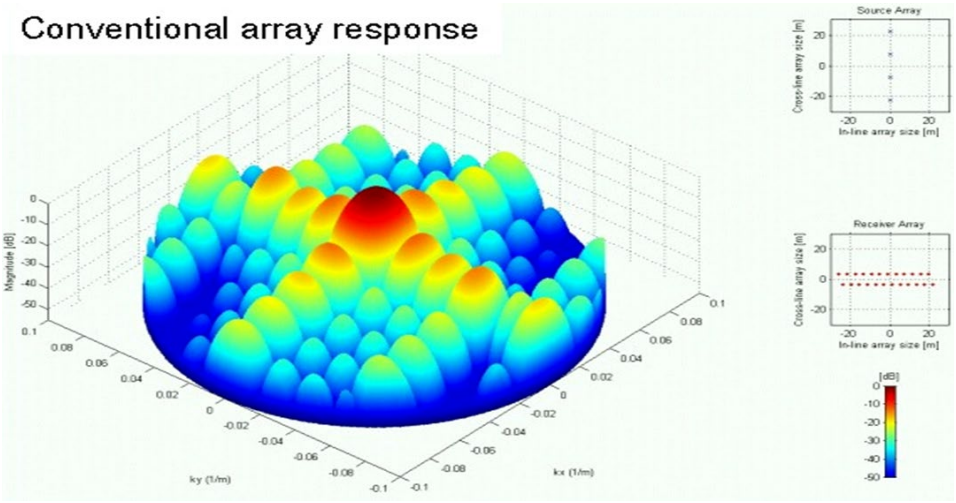


Figura 20, atenuación de un arreglo convencional en 3D [1]

En cambio si utilizáramos un solo receptor (geófono o acelerómetro), la respuesta poseería un solo lóbulo centrado sobre "k=0" y la atenuación de ruidos sería superior a -30 dB.

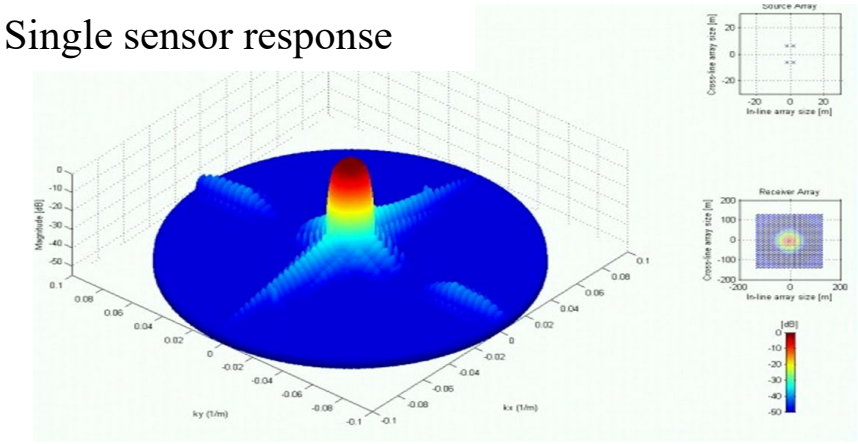


Figura 21, atenuación de un solo geófono por estación receptora [1]

Ejemplo de Recepción Puntual:

Consideramos una ristra de 6 geófonos como Estación Receptora con una separación de "RI" entre ellos, por lo tanto la longitud del arreglo será de: "6 RI = GI" (GI: Group Interval).

En el grafico "f-k" de la figura 22, se muestra la banda pasante de la señal útil que es muestreada por el arreglo convencional. Los ruidos (especialmente el Ground Roll), comienzan a aliarse con la banda pasante a partir de la frecuencia de Nyquist de este arreglo: $k_N = 1 / 2GI$.

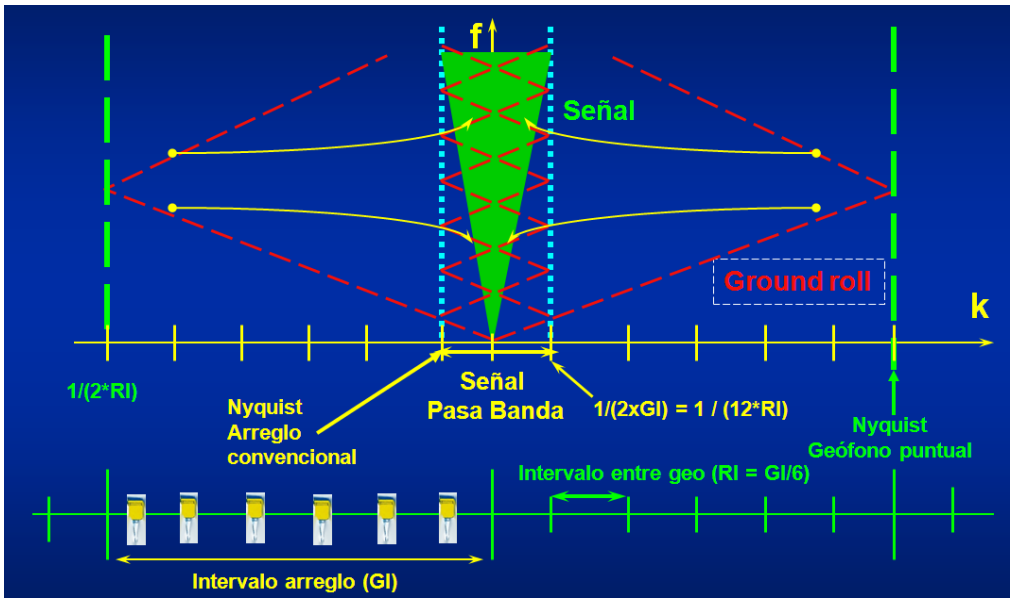


Figura 22, grafico f-k para una separación entre estaciones receptoras: GI [1]

En cambio sí c/u de los geófonos es tomado en forma individual, la nueva frecuencia de Nyquist será: $k_N = 1 / 2 * RI =$

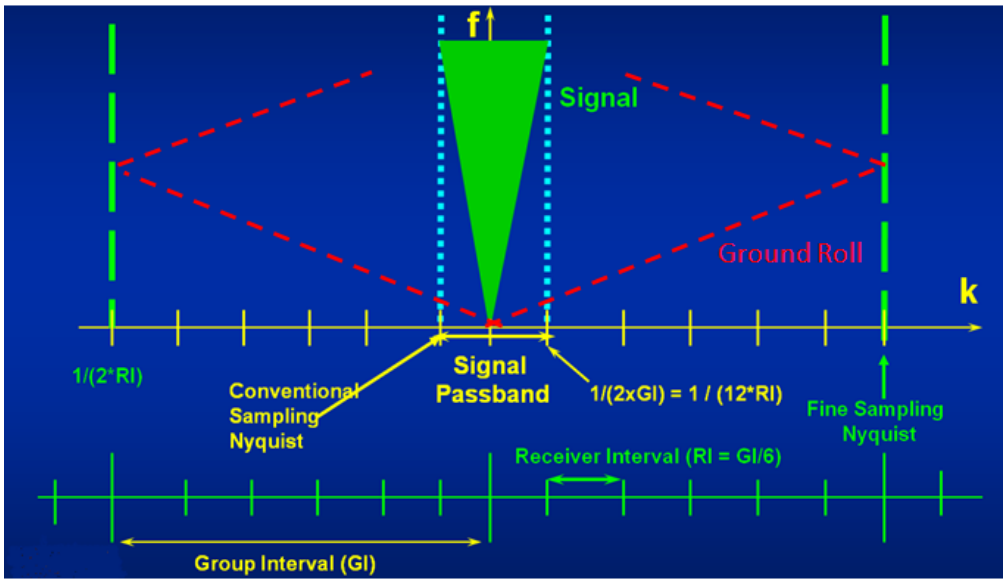


Figura 23, grafico f-k para una separación entre estaciones RI = GI/6 [1]

La banda pasante permite ahora que el Ground Roll comience aliarse para frecuencias muy altas, posiblemente fuera de nuestro interés sísmico (Figura 23).

Si a c/uno de estas nuevas estaciones las filtramos con un filtro espacial Anti-alias antes de re-muestrearlas al valor original GI, la banda pasante no contendrá la frecuencia aliada (Figura 24).

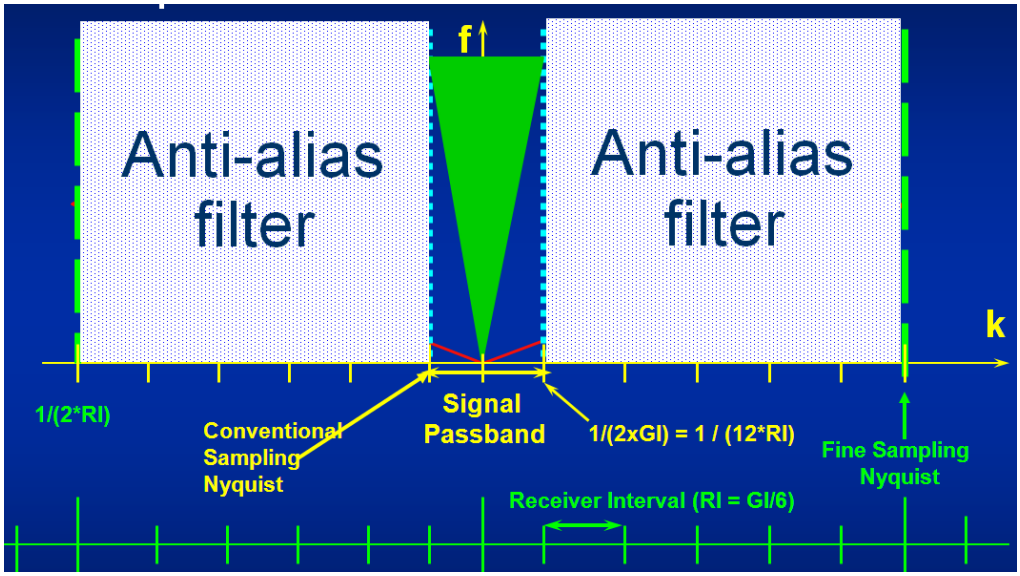


Figura 24, Filtros Antialiasing aplicados antes de re-muestrear las estaciones [1]

Aunque hemos considerado el ejemplo para el ruido generado por el ground roll, el filtro k atenúa eficazmente cualquier ruido ambiental presente.

Comparación de respuestas

Para comprobar los resultados teóricos hasta ahora desarrollados, tomamos un ejemplo real, donde realizamos el filtrado de ruidos con arreglo convencional y puntual de geófonos en presencia de los siguientes ruidos:

- Onda Aérea provocada por la fuente de emisión (airwave: vibradores).
- Ruido producido por inducción de una línea eléctrica de alta tensión (high-line).
- Ruidos de vehículos circulando cerca de la línea receptora (local incoherent noise).

En la figura 25 (a), se muestra el monitor del VP obtenido con los ruidos mencionados y debajo su espectro de amplitud.

En la Figura 25 (b), se muestra el filtrado FK realizado sobre los datos anteriores donde vemos que no ha sido efectivo la atenuación de dichos ruidos y en su intento hemos deteriorado parcialmente datos.

En la figura 25 (c) los datos se obtuvieron con receptores puntuales y se muestran luego de su filtrado adaptativo obtenido a partir de "cross-spread" y posterior agrupamiento DGF (Digital Group Forming), tanto ruidos coherentes como incoherentes son prácticamente eliminados preservando los datos que se ven a su vez beneficiados por no ser afectados por la distorsión del arreglo receptor.

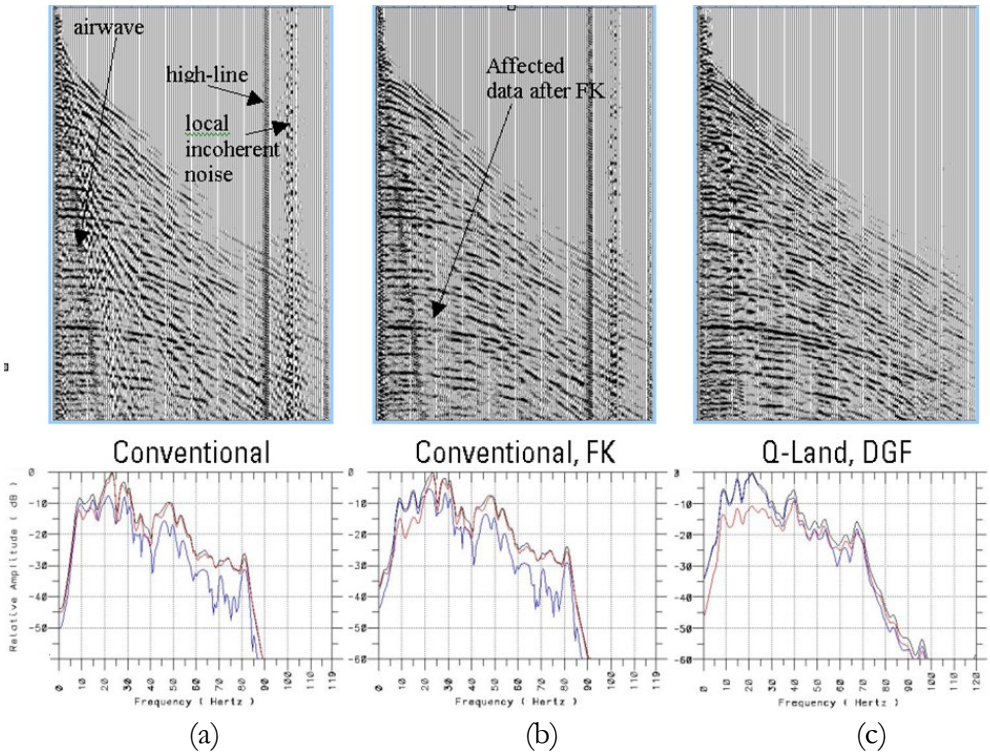


Figura 25, comparación de filtrado de ruidos con arreglo convencional y con recepción puntual [1]

Virtud de la Emisión y Recepción Puntual:

La recepción y emisión puntual serán las técnicas que se utilizarán en el futuro inmediato, porque también hace factible la exploración repetida de un reservorio para conocer sus atributos y estado (Sísmica 4D), al filtrar ruidos ambientales que varían permanentemente y que hacían imposible una buena evaluación del proceso con el tiempo.
La técnica de emisión y recepción puntual, se fundamenta en una adquisición de datos sísmicos de muy alta densidad espacial, obtenidos a partir de emisores y receptores de energía "puntuales".

Como resultado la adquisición sísmica se practica con:

- Gran atenuación de ruidos coherentes e incoherentes.
- A partir de lo anterior se incrementa enormemente la relación señal/ruido.
- Los parámetros de reservorios, tales como AVO, AVAZ e Inversión, son ahora obtenidos sobre un amplio espectro ya que las amplitudes se encuentran prácticamente libre de ruidos aliados.
- La Sísmica 4D es realizable mediante periódicas Sísmicas 3D que no resultan afectadas por variaciones locales y/o estacionales del área bajo prospección.
- Los proyectos son absolutos y repetibles, permitiendo su intercalación.

Sísmica 3C o de Multicomponentes

Introducción:

La mayor integración entre la Sísmica de pozo (VSP) y la Sísmica de Superficie, ha encontrado en la registración con multicomponentes, una herramienta muy poderosa para mejorar la imagen del subsuelo bajo observación sísmica. La utilización de la técnica 3D tardó aproximadamente 20 años en ser aceptada en la industria y la 3C no ha sido demasiada utilizada en Argentina, porque las producciones en sus Yacimientos convencionales son bajos y las posibilidades de mayor producción son de por si escasas.

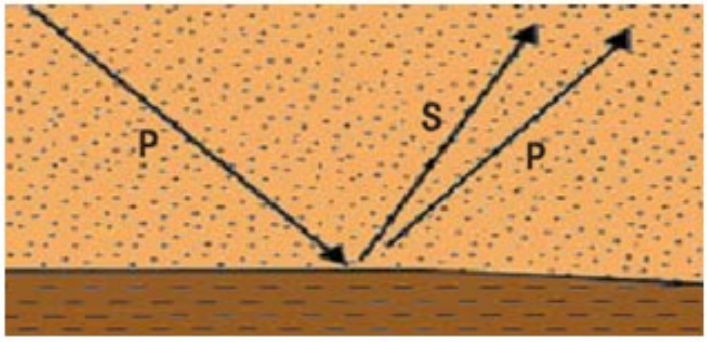


Figura 26, Onda S Convertida por incidencia de onda P [6]

La adquisición sísmica con tres componentes (3C) permite registrar Ondas Compresionales (P Waves) y Ondas de Corte (S o Shear Waves) generadas y/o convertidas. Las Fuentes de Energía Sísmica generan Ondas P y S, aún los Vibradores de Ondas P, debido a deficiencias en sus "planchas", generan un cierto porcentaje de Ondas S. También a partir de Ondas P se generan Ondas S, cuando las primeras inciden sobre un cambio de Impedancia Acústica en el subsuelo y como estas Ondas S no se generaron en la fuente de energía original, se denominan Ondas Convertidas S o PS. Nuestra sísmica convencional no utiliza esta energía y la considera: energía perdida. Si bien eran conocidas muchas de las características y propiedades de las Ondas "S", la cantidad de Estaciones Sísmicas necesarias para registrarlas, limitaban las posibilidades de utilizarlas comercialmente, ya que se debe multiplicar por tres la cantidad de Canales de una Brigada Sísmica para tal tipo de adquisición.

Otros factores que retardan la aplicación de la adquisición 3C son:

El valor de compra o de alquiler de los Geófonos de 3C es todavía elevado.

Es necesario un mayor esfuerzo de plantado y orientación de los sensores en el campo.

Las componentes Transversales y Longitudinales son más frágiles que las Verticales. Las suspensiones laterales de los geófonos horizontales, que

proporcionan la cupla antagónica, deben a su vez soportar el peso de la bobina.

Nuevos Sensores Digitales (MEMS: Micro Electro Mechanical System) permiten ahora acelerar los procesos de plantado y orientación pero el costo de estos sensores (ahora se trata de acelerómetros) se mantiene elevado.

La Figura 26, intenta mostrar una registración sísmica 3C, donde cada estación sísmica está compuesta por 3 componentes (V: componente vertical, H1: componente longitudinal, H2 componente transversal) que comparten una misma estructura de acople al terreno. Los H1 Y H2 son ambos geófonos horizontales equivalentes, pero se encuentran orientados dentro de su estructura contenedora de manera que H1 enfoca hacia la fuente de energía (o en dirección de la línea de recepción) y H2 se enfoca transversalmente al anterior.

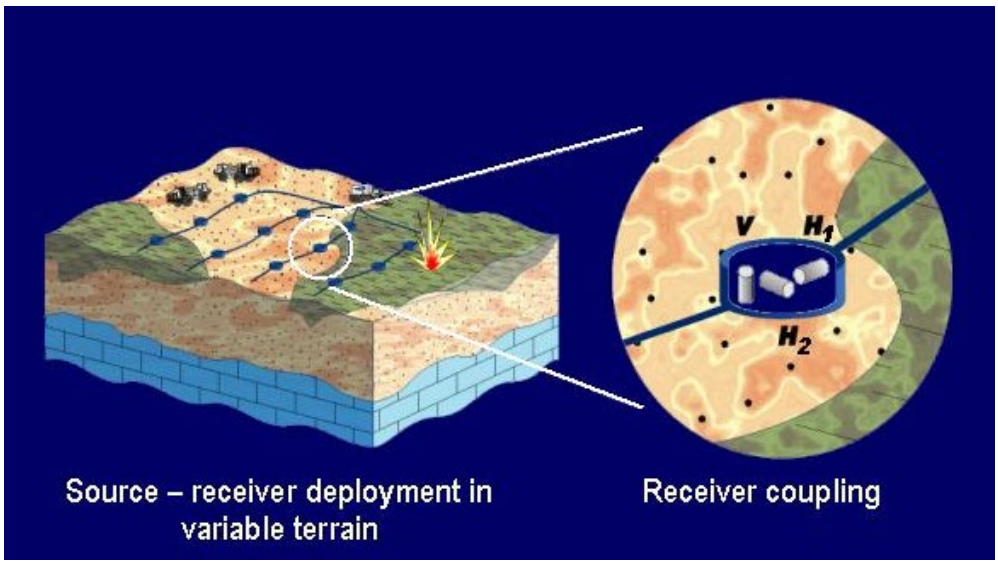


Figura 26, adquisición con tres componentes o Sísmica 3C

El registrar 3 componentes por estación, implica que 3 canales sísmicos de registración serán empleados y deberán ser perfectamente diferenciados para que luego puedan ser identificados y procesados independientemente.

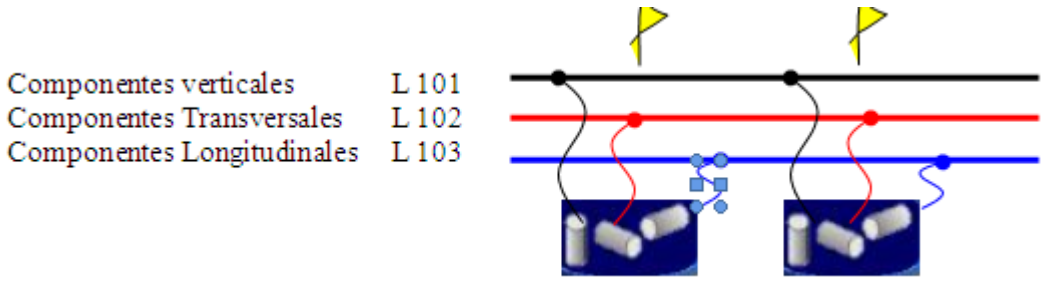


Figura 27, tres componentes por Estación Receptora en sísmica 3C con geófonos

En la Figura 27, la línea receptora 100, por comodidad de procesamiento y control operativo, se dividió en 3 sub líneas: L 101, L 102 y L 103, de tal manera que cada cable identificado con estos números de líneas, conecta a una determinada componente. De esta manera resulta más fácil diferenciar y controlar c/componente durante la adquisición y posterior procesamiento.

Corrección NMO en la Sísmica 3C

Las Ondas convertidas PS, no se reflejan en el subsuelo en el punto medio de la distancia (X) entre la Fuente y el Receptor (CMP: Common Mid Point) y por lo tanto no son aplicables los cálculos de tiempo para corregir las diferencias de caminos de los distintos rayos que inciden en el mismo punto profundo (CDP: Common Depth Point).
NMO (Normal Move Out) es la corrección de las trayectorias que permite obtener un tiempo "To" equivalente para cada recorrido (tiempo de ida y vuelta al CDP con la Fuente y el Receptor ubicado sobre la vertical al CDP). Este proceso (NMO) es indispensable para luego sumar todos estos datos ("Stacking"), válido tanto para Ondas PP como para Ondas PS.

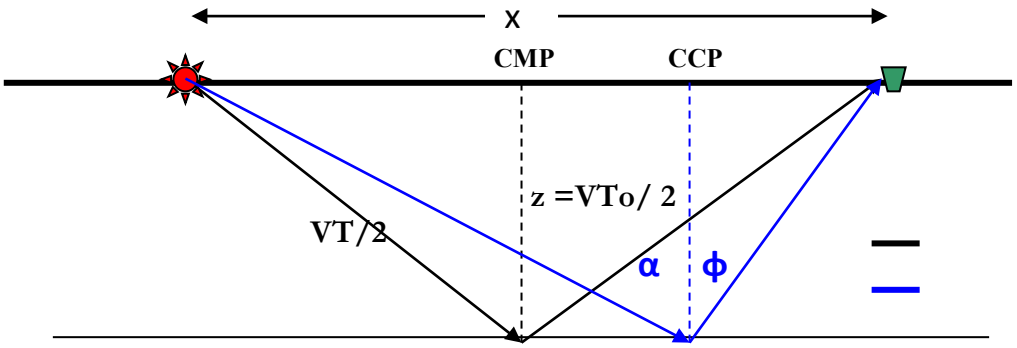


Figura 28, trayectoria de Onda PP y PS [6]

Las Ondas PP son las que se propagan hacia la superficie reflectora como Ondas P y se reflejan como Ondas P siguiendo la primera Ley de Snell (ángulo de incidencia igual al ángulo de emergencia), en cambio las que luego de incidir como Ondas P sobre la superficie reflectora se transforman en Ondas reflejadas S se denominan Ondas PS y no sigue la Ley de Snell.

Para las Ondas PP tenemos que: CMP = X / 2

Aplicando Pitágoras:

$$(VT / 2)^2 = (X / 2)^2 + (VTo / 2)^2$$

Tiempo de arribo de una Onda P para una distancia "X" entre Fuente y Receptor:

$$T = \sqrt{(X / V)^2 + To^2}$$

La fórmula utilizada en el proceso NMO de un rayo de onda P convertida a S debe ser reformulado, adicionándole un sumando que represente el aumento de tiempo en función del viaje de la S por la capa. La fórmula siguiente resulta aproximada y es aplicable cuando la relación entre "offset" (X) y espesor de la capa (z) no es muy grande:

$$T(ps) = To/2 + \sqrt{(To^2/2) + (X^2 / 2\,V^2rms(ps)}$$

T(ps): tiempo de viaje del rayo completo desde la fuente hasta el receptor
To: tiempo de viaje de la onda convertida S corregida de offset (corregida al CCP)
To: tiempo de viaje corregido por offset con respecto al CMP
X: distancia entre fuente y receptor
Vrms: Velocidad de la onda convertida en valor eficaz.

El CCP (Common Conversión Point) es el Punto del Horizonte Profundo donde se produce la Conversión de Ondas P a S (binning), es el que se tiene que calcular para referenciar los tiempos NMO y luego sumar con todos los demás CCP comunes (stacking)

El CCP no se encuentra más en el medio de la distancia entre Fuente y Receptor y se aproxima más al Receptor cuanto más delgada es la capa de conversión. La siguiente fórmula es una aproximación asintótica que permite calcular la distancia de la Fuente al CCP:

$$Xccp = Xs\text{-}r / (1 + Vs/Vp)$$

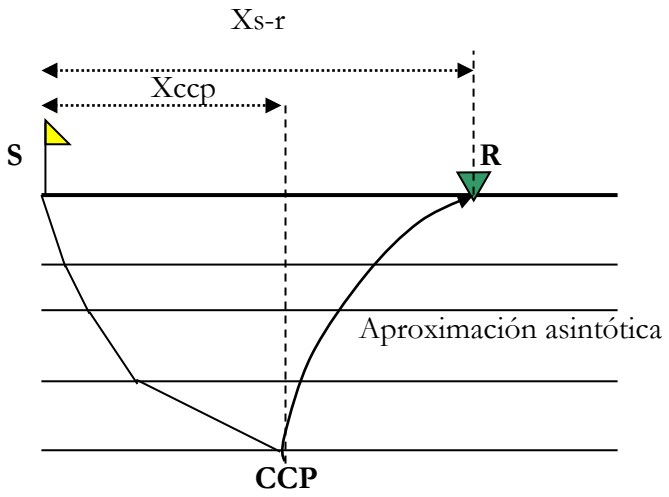


Figura 29, Recorrido de una Onda "P" luego Convertida a "S" [6]

Información Geológica-Geofísica proporcionada por sísmica 3C

1. **Definición de Interfaces con bajo contraste de Impedancias Acústicas**:

"Un bajo contraste de Impedancias Acústicas entre capas estratigráficas para Ondas P (Vp1 ~ Vp2), impide la detección de esa Interface, pero esta puede ser definida por Ondas S, ya que el contraste de velocidades de Onda S, para esos mismos sustratos, puede ser mayor que para Ondas P".

El contraste de impedancias en la secuencia arena-arcilla a veces es muy pequeño, ocasionando una muy pobre imagen de dicha interface por métodos convencionales. A no muy grandes profundidades, la impedancia de la arcilla es mayor que la de la arena pero a mayores profundidades la impedancia de la roca de arenisca supera a la arcillosa. Lo anterior presupone que en alguna profundidad las impedancias se igualan y para esa profundidad las reflexiones de Ondas P son muy débiles. Las Cuencas Terciarias con sedimentos fracturados (sedimentos clásticos) son representativas de este fenómeno.

Como hemos visto, la Impedancia Acústica define las facilidades de transmisión de una Onda Acústica en una determinada roca de densidad "ϱ" y velocidad "Vx".

Vx depende del modo "x" de propagación de dicha Onda: para nuestro análisis "x" será: "P" para modo compresional y "S" para modo de Corte

Como ya hemos visto, cada roca sedimentaria, presentará distintas Impedancias en función del modo de propagación de la Onda.

Impedancia para Ondas P: $Ip = Vp \times \varrho$

Impedancias para Ondas S: $Is = Vs \times \varrho$

La reflexión de una Onda Sísmica, depende del Índice de Reflexión de la Interface, definida por el cambio de roca sedimentaria y consecuente cambio en la impedancia acústica por el cual debe desplazarse nuestra onda sísmica.

El Índice de Reflexión se define mediante la siguiente relación de impedancias acústicas:

$$\text{Coeficiente de Reflexión: } R \approx \frac{V2 - V1}{V2 + V1}$$

Si $V2p \approx V1p$ entonces $R = 0$ y no habrá Onda P reflejada en esa interface,
Si $V2s - V1s > 0$ habrá reflexión de Ondas S.
En general la relación Vp/Vs varia con las rocas entre los siguientes valores:

Tipo de Roca	*Vp/Vs*
Sandstone (Areniscas)	*1.59 – 1.76*
Dolomite	*1.78 – 1.84*
Limestone (Calizas)	*1.84 – 1.99*
Shale (arcillas)	*1.70 - 3.00*

***Tabla 1**, (Tabla de Domenico) [6]*

La Figura 30, muestra el resultado de un VSP en un pozo del Golfo de México (cuenca terciaria), donde los sedimentos se encuentran suficientemente consolidados por debajo de una profundidad de 1500 metros. En (a) donde se muestran los registros individuales de velocidades Vp y Vs, vemos que Vp = 2620 m/seg entre los 1300 a 2300 metros de profundidad del pozo, Vs en cambio varia de 1100 m/seg a 1228 m/seg detectando la interface que identifica a la Base del Mioceno.

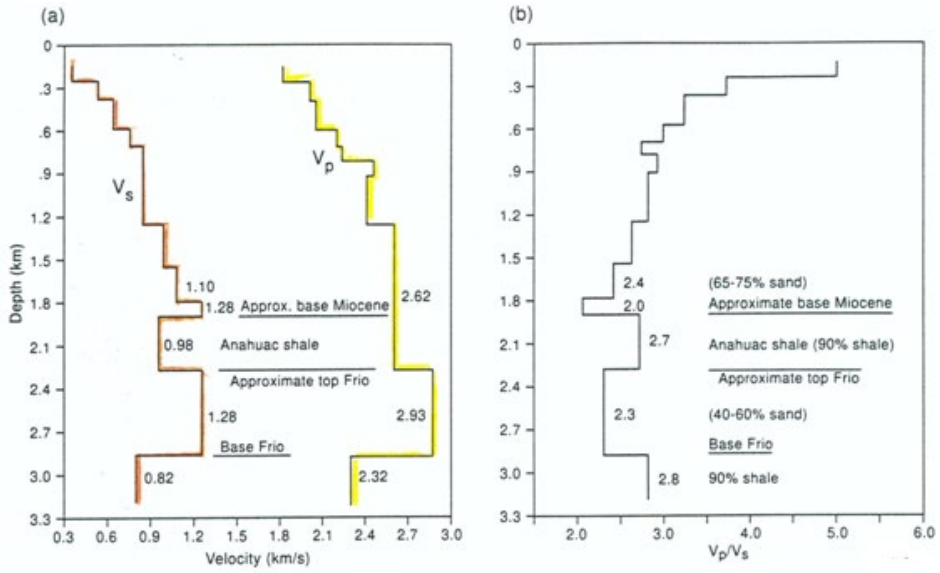


Figura 30, VSP: (a) registro individual de velocidades: Vp y Vs, (b) registro de la relación Vp/Vs [6]

Siempre es más práctico trabajar con la relación Vp/Vs y como se ve en (b) esta relación es mayor cuando se trata de rocas arcillosas (Anahuac Shale, 90 % of shale, Vp/Vs = 2,7) que cuando se trata de rocas arenosas (Frio, 40-60 % sand, Vp/Vs = 2,3).
También podemos apreciar, que las velocidades de desplazamiento de las Ondas S son mucho menores que las Ondas P, por lo tanto las Ondas S serán recibidas por los receptores sísmicos con un cierto retardo con respecto a la recepción de las Ondas P.

Nota: En una adquisición sísmica 3C, deberemos colocar tiempos de adquisición mayores a los adoptados para Ondas P (generalmente se adopta dos veces el tiempo de adquisición de Ondas P),

2. Mejor Resolución Vertical

Al ser las Ondas P más veloces que las Ondas S (Vp > Vs) y si estas S fueron convertidas a partir de Ondas P, conservan la misma frecuencia "f" de desplazamiento de partículas y por lo tanto poseerán menor longitud de onda que las Ondas P (**$\lambda s < \lambda p$),** consecuentemente proveen de mejor resolución vertical.

Si Vp > Vs

Entonces $\lambda p \cdot f > \lambda s \cdot f$ (la frecuencia es la misma)

Por lo tanto $\lambda p > \lambda s$

La Figura 31, muestra imágenes obtenidas con Ondas P y la figura 32 Ondas S, utilizando la técnica denominada: "Croswell Seismic Profiling", donde es necesario contar con dos pozos cercanos (en este caso distanciados entre sí en: 56 metros) uno de ellos utilizado como: Pozo Emisor (source well) y otro como: Pozo Receptor (receiver well). Con este método se puede obtener una sísmica de alta resolución, cubriendo una pequeña extensión del subsuelo. Claramente se aprecia que la imagen obtenida con Ondas S, es mucho más detallada que con Ondas P (mayor cantidad de reflexiones por unidad de profundidad) y tal es así que las Ondas "S" revelan un reservorio de carbonatos (marcado con líneas discontinuas) inapreciable en la imagen con Ondas P.

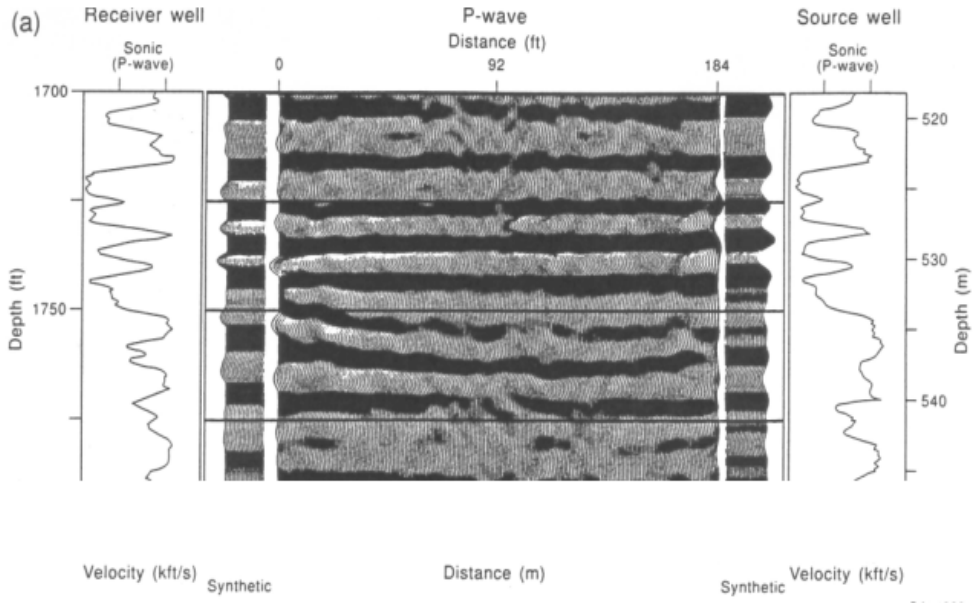


Figura 31 (a), Croswell Seismic Profiling P Waves [6]

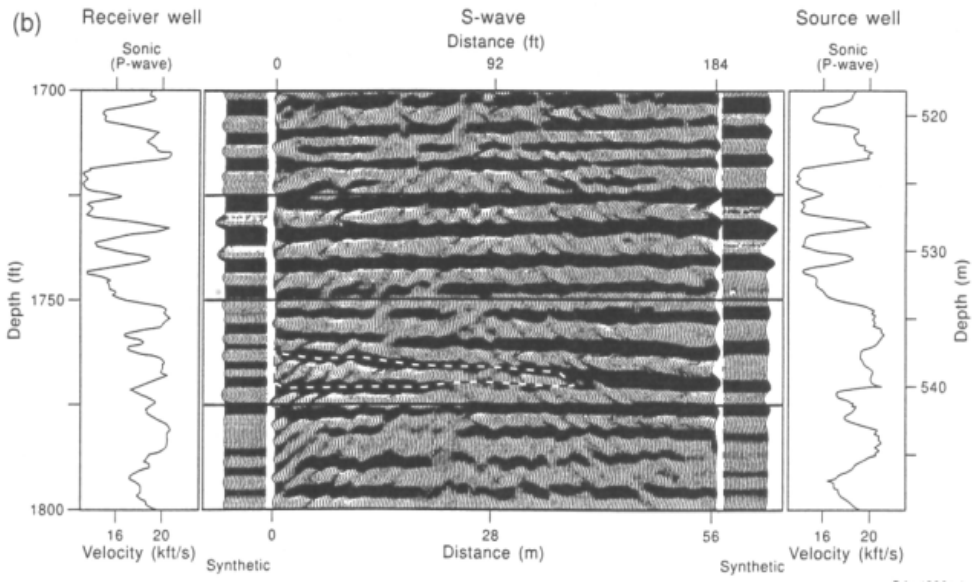


Figura 32, Croswell Seismic Profiling S Waves [6]

Nota: "Cuando los datos obtenidos a partir de Ondas "S" tienen el mismo ancho de banda que los obtenidos a partir de Ondas P, entonces las Ondas "S" tienen una Resolución Espacial de aproximadamente el doble de la provista por Ondas "P"

3. Obtención de imágenes a través de capas basálticas

Podremos obtener una imagen del subsuelo por debajo del basalto o por debajo de capas de muy alta velocidad y poca profundidad, donde ahora solamente con gran esfuerzo sísmico y Ondas P obtenemos una pobre imagen.

La Figura 33 muestra resultados parciales de un proyecto con Multicomponentes en un área con capas de basalto cercanas a la superficie. En este proyecto también se están procesando Ondas SS, que son reflexiones de las Ondas PS (ondas P convertidas a S) que se reflejan en las capas de basalto en su camino ascendente. Esta experiencia fue presentada en el Congreso del IAPG de noviembre de 2005 por las Compañías: Pan American Energy y WesternGeco.

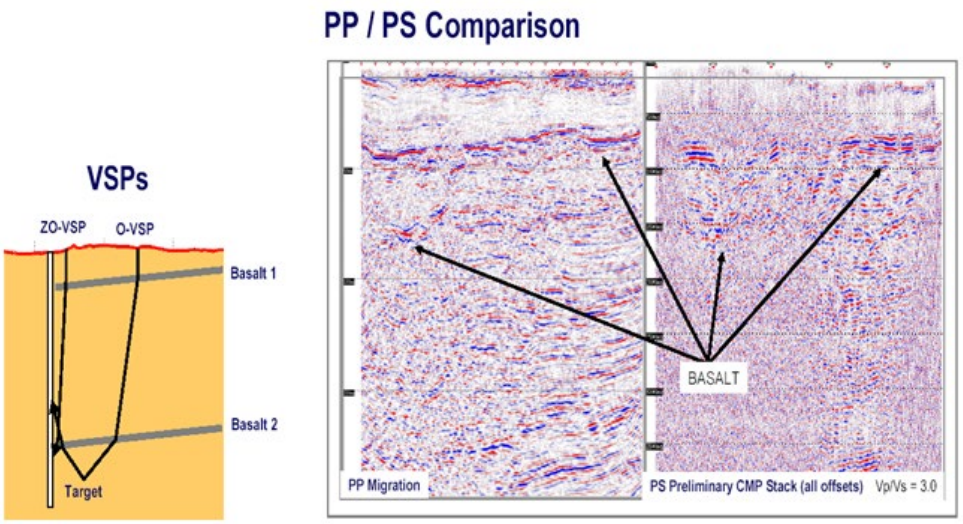


Figura 33: Multicomponentes en Golfo de San Jorge Basin – Argentina [6]

4. Mejor conocimiento litológico

Mediante la combinación de las velocidades de las Ondas P y Ondas S (Vp/Vs) podemos conocer mejor las características de algunas rocas (litología) ya que numerosas propiedades afectan a las velocidades de propagación de las Ondas P y S a través de dicha roca: porosidad, forma de los poros, cementación, tipo de fluido contenido en los poros, fracturación, temperatura, etc.

En la Figura 34, vemos los resultados de una prueba de Laboratorio, donde se tomaron una rocas sedimentarias saturadas con agua y se midieron la relación Vp/Vs en función de su porosidad. La porosidad de la roca se varia por aplicación de presión externa sobre la misma con valores comprendidos entre 0 a 10000 psi. Luego se toma el mismo tipo de roca sedimentaria saturada en gas y se la somete a la misma presión anterior. Se puede comprobar que:

- En todos los casos la relación Vp/Vs crece con el aumento de la porosidad, ya que Vs decrece más rápidamente que Vp con el aumento de estas.
- Volviendo sobre los conceptos básicos de elasticidad, podremos observar como la relación Vp/Vs se incrementa proporcionalmente al Módulo de Poisson (σ)
- La relación Vp/Vs siempre es mayor para la misma roca saturada en agua que en gas, para las mismas condiciones de presión/temperatura. También aquí regresando a los conceptos de elasticidad, podemos apreciar como el Módulo de Bulk (k: o de incompresibilidad) es menor para el Gas que para el Agua, afectando solamente a Vp (Vp para gas < Vp para agua; μ no varía con el tipo de fluido).

$$Vp = \sqrt{(k + 4/3\mu) / \varrho} \quad ; \quad Vs = \sqrt{\mu / \varrho}$$

- La relación Vp/Vs entre roca saturada en agua y en gas, tiende a igualarse para valores pequeños de porosidad.

Nota: La relación Vp/Vs permite obtener un valor numérico, que define el tipo de roca y la clase de fluido que ocupa sus poros.

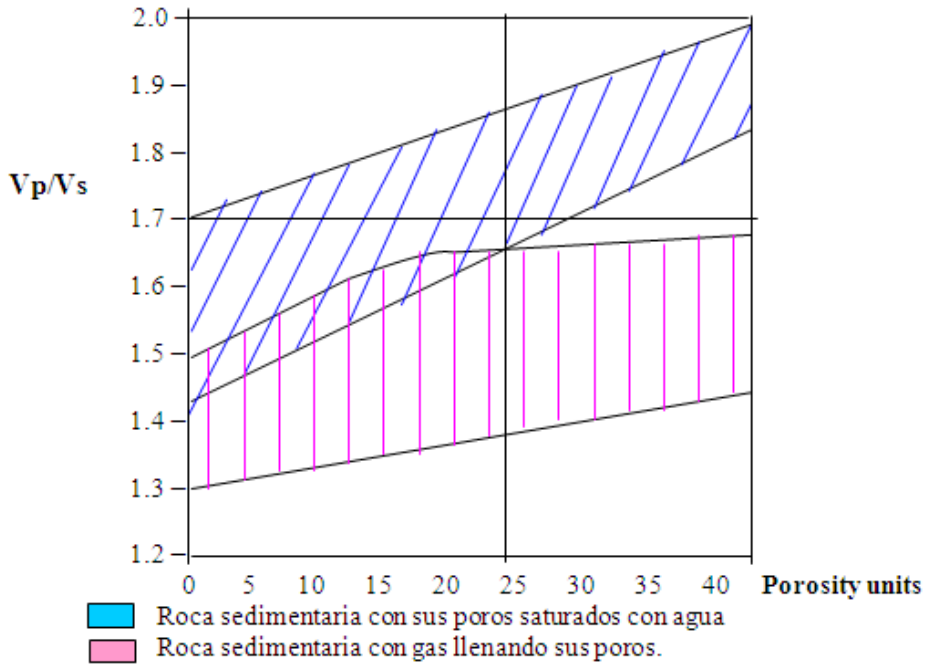


Figura 32, Experiencia Gregory [6]

5. Detección de Fluido en Sedimentos (Gas, agua, etc.)

En el ítem anterior se mostró una experiencia de Laboratorio donde a partir de la relación Vp/Vs se podía determinar si una misma roca poseía en sus poros agua o gas. Esta experiencia ya se aplica en sísmica de superficie para hallar yacimientos gasíferos. Si se producen en un mismo CDP reflexiones de ondas P y S, estas reflexiones se encuentran asociadas con un cambio de litología del subsuelo. Podrá o no haber cambio de fluido en los poros de los sedimentos.

Cuando una reflexión de una onda P ocurre en el subsuelo pero no existe onda S reflejada en ese mismo CDP, entonces con gran probabilidad existe un cambio de fluido en los poros del sedimento y no así con su litología.
En la Figura 35, se muestran las imágenes (Ondas P y S) de un mismo perfil sedimentario obtenidos con sísmica de superficie, sobre un yacimiento reservorio de gas, donde existen varios pozos perforados (3 productivos y otro seco) que permiten avalar la sísmica de superficie. Allí apreciamos que:

- Las reflexiones comunes en ambas imágenes confirman un cambio litológico (ver: High Amplitud Reflection –lithology).
- En cambio las fuertes reflexiones mostradas en (a) para Ondas P, correspondiente a una interface creada sobre la roca por cambio de

fluido Gas-Agua (ver: Flat Spot & High Amplitude Reflection), no aparecen en (b) en la imagen de Ondas S. La sísmica de superficie hubiese sido suficiente para medir el reservorio gasífero.

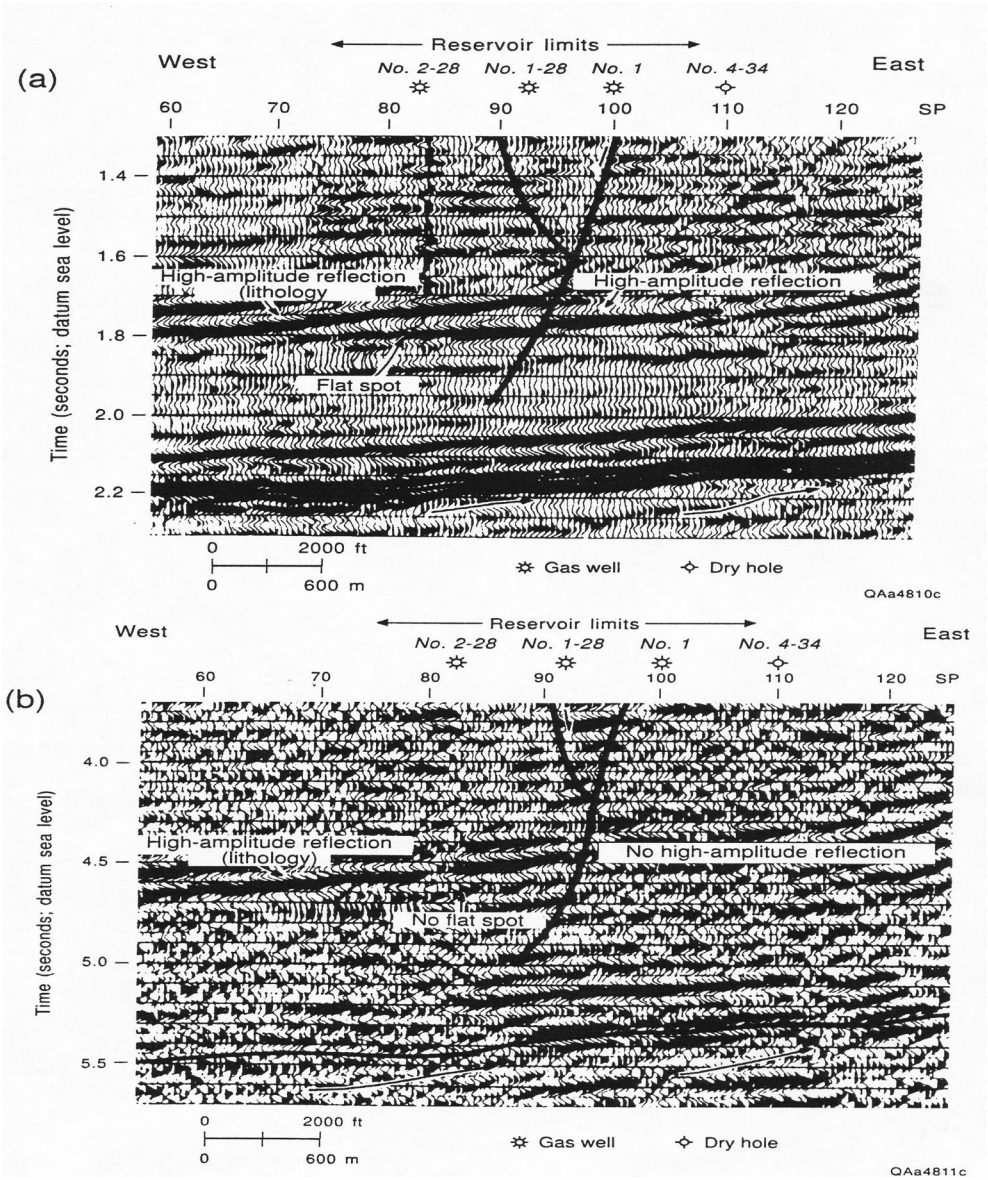


Figura 33, secciones sísmicas de un reservorio: (a) con Ondas P y (b) con Ondas S [6]

6. Detección de la Orientación de Fracturas

La fractura es la más común de las propiedades de anisotropía de las rocas (anisotropía de una roca es la modificación de sus propiedades físicas: permeabilidad, porosidad, etc).

La propagación de las Ondas S se ven seriamente afectadas al pasar por una roca con anisotropía, dividiéndose en dos Ondas: S1 y S2. Estas dos ondas continúan con la misma dirección de propagación que la incidente a la roca, pero modifican el plano de su movimiento perpendicular de partículas al ingresar a la roca *anisotropica*. Las Ondas P no se separan en dos al propagarse por rocas anisotrópicas.

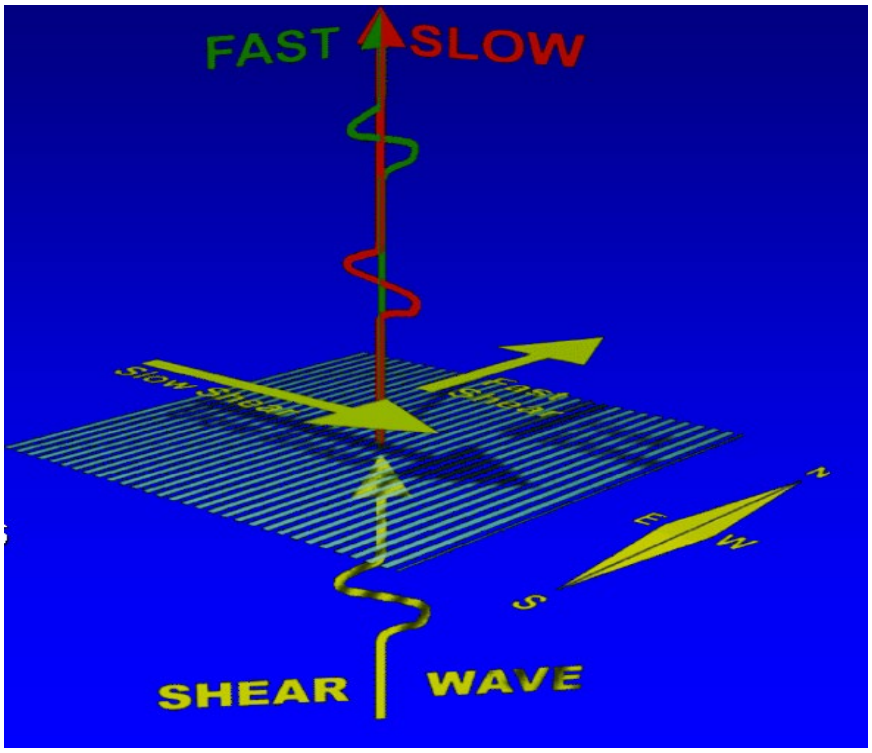


Figura 36: Roca fracturada donde la Onda S incidente se separa en Ondas S1 y S2 ortogonales [6]

En la Figura 36, vemos la representación de una roca fracturada donde la Onda S incidente viene con una polarización de partículas en un determinado plano. La Onda se divide en Onda S1 y S2, la S1 emerge de la roca con una polarización de partículas en un plano paralelo al de la dirección de fractura (σmáx.) y la S2 en un plano perpendicular a la dirección anterior (σmín.). La Onda S1 viaja a mayor velocidad que S2 así que al detectar el primer arribo u Onda S1, podemos conocer la orientación de fractura de la roca. Si se tratase de otro tipo de anisotropía (pero no fractura), S1 debería ser considerada como la que se encuentra orientada en la dirección de la máxima dureza de la roca anisotropica y S2 como la orientada en la dirección de menor dureza.

Nota: La información anterior puede ser crítica para Geólogos e Ingenieros de Reservorio que quieren construir un modelo tectónico o perforar un pozo horizontal, determinar variaciones azimutales de permeabilidad o implementar procesos de recuperación.

Calibración de la Profundidad de las Imágenes de Ondas P y Ondas S

Por lo visto anteriormente, el desafío más importante en la interpretación de la prospección sísmica con multicomponentes, es identificar las reflexiones de Ondas P y Ondas S que pertenecen a la misma interface estratigráfica. Sabemos que los tiempos de arribo de las Ondas S son casi el doble que los de las Ondas P.

A la metodología empleada en obtener las coordenadas de tiempo (reflexiones Ondas P y Ondas S) que corresponden a una misma profundidad (interface sísmica) se denomina: Calibración.
Existen distintos métodos que permiten obtener una Calibración:

- Por medio de registración de VSP con sensores de tres componentes y generando Ondas P y Ondas S (o por conversión PS) en la superficie del pozo a ensayar.
- Por intermedio de Sismogramas Sintéticos, obteniendo velocidades interválicas de Ondas P y Ondas S.

En un VSP (0 Offset) conocemos permanentemente la profundidad (z) del pozo donde se encuentra ubicada la herramienta que contiene a los Geófonos (de tres componentes). Si generamos Ondas P y también Ondas S, por intermedio de Vibradores desde la superficie del pozo sin demasiado apartamento del mismo (0 Offset), podemos medir tiempos directos (verticales) sin tener que realizar ninguna corrección por trayectoria angular.

En la Figura 37, vemos los registros obtenidos con Ondas P (a) y con Ondas S (b). Sobre la parte izquierda se encuentra un esquema del pozo donde se realizó el VSP con la herramienta ubicada a una profundidad "z", recibiendo allí el rayo directo (flecha en azul) generado por la vibración en superficie (Vibrador esquematizado en amarillo). A una profundidad "Z" se encuentra la interface donde se refleja la Onda P y Onda S (flecha en negro) y que luego es recibida por los Geófonos.

En los gráficos de la derecha se encuentran identificadas dos reflexiones "A" y "B" (aunque "B" no es observada para Ondas P) Si seguimos la reflexión "A", vemos que para una profundidad de Z = 610 metros, la reflexión coincide con el primer arribo o rayo directo pues allí "z = Z".
Leyendo los tiempos a los cuales este evento se produjo vemos que este es: 0,23 seg para Ondas P y 0,5 segundos para Ondas S.

Realizando lo mismo para la reflexión "B" en el registro de Ondas S, vemos que para z = 290 metros se produce la coincidencia del primer arribo y la reflexión para un tiempo de: 0,2 seg. Aunque esto no se aprecia en Ondas P, la profundidad de la interface debe ser la misma, así que la marcamos allí y obtenemos el tiempo que correspondería a la llegada de una reflexión de Ondas P: 0,1 seg. Con esto se ha obtenido una relación directa profundidad-tiempo.
Generalmente los tiempos obtenidos se refieren al plano de la superficie de emisión que simplemente será el doble de los leídos en la Figura 20 (por ser los 2 caminos verticales y prácticamente iguales en sus trayectorias)

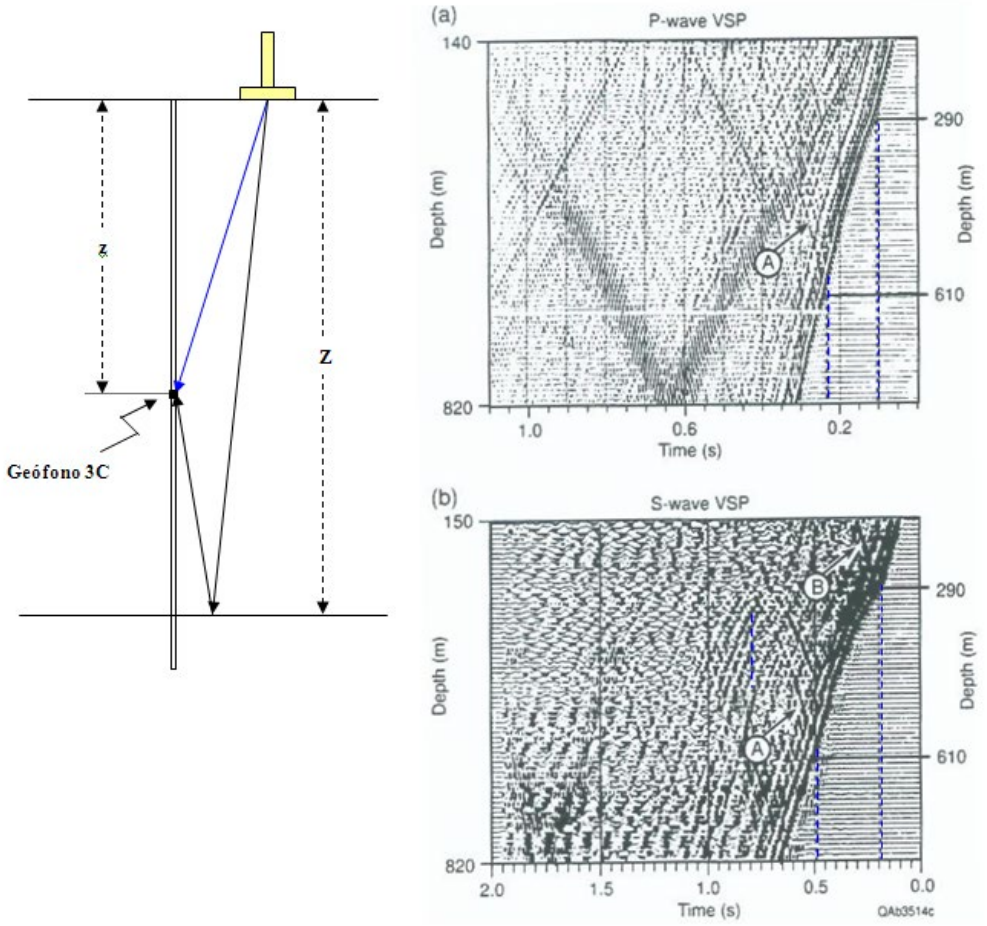


Figura 37, VSP utilizado para Calibración de Ondas P vs. Ondas S [6]

Por lo tanto el camino de ida y vuelta de las Ondas:

z	Ondas P	Ondas S
290 metros	0,2 seg	0,4 seg
610 metros	0,46 seg	1,0 seg

Nota: La sísmica 3C justificaría una nueva prospección sísmica sobre áreas previamente exploradas en 3D.
Los VSPs y especialmente los "offset VSPs", deberían ser procesados para medir el porcentaje de Ondas PS captadas como una medida de integración entre la sísmica vertical y de superficie.
La combinación 3C/4D puede constituirse en una herramienta fundamental para medir el progreso de un yacimiento en explotación.

Bibliografía consultada:

1. *Q-System bibliography by WesternGeco-Schlumberger. Expuesto por P.R. Concetti durante el Seminario de Campos Maduros en 2005.*

2. *Relación Señal/Ruido, Universidad Nacional de Tucumán Facultad de Filosofía y Letras Especialización en Comunicación para el Desarrollo Tucumán. Argentina.*

3. *Adquisición Sísmica 2-D y 3-D, Diseño y Control de Calidad, Mustaghresource Ltd; curso dictado en WesternGeco Buenos Aires en 2007.*

4. *"Applications and Interpretation of converted waves" by ADL (resume from Robert Stewart SEG Course).*

5. *"Combining P-wave and S-wave Seismic Data to Improve Prospect Evaluation" by Bob A. Hardage –Bureau of Economic Geology – The University of Texas at Austin – 1996.*

6. *"Using converted shear waves to image reservoirs with low-impedance contrast" by Folke Engelmark – The Leading Edge – June 2000.*

7. *Seismic Exploration Using Mode-Converted Waves by Jim Gaiver – Western Geophysical -2000*

8. *G. San Jorge Basin – Eduardo Oviedo (Pan American Energy), Andreas Laake (WesternGeco), julio 2004.*

9. *Arreglos de Geófonos en Sísmica 3D, Caso Testigo, (presentado en el VII Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos del IAPG – 2008 Mar del Plata – Buenos Aires, Argentina).*

10. *Curso de entrenamiento en adquisición sísmica, P.R. Concetti, WesternGeco 2002.*

CAPITULO 5 - Las Estaciones Sísmicas Receptoras

Introducción

Las estaciones receptoras, son las encargadas de captar las ondas acústicas generadas por una fuente de energía sísmica, las que se han reflejado/ refractado en las distintas capas del subsuelo de la cuenca sedimentaria. También reciben los ruidos que suelen superar en amplitud a las señales, que llegan simultáneamente a estas y/o poseen la misma frecuencia temporal o espacial.

Como hemos visto en "Introducción a la Sísmica", la Acústica es la ciencia que estudia: la generación, transmisión, recepción, absorción, conversión y control del sonido.

Habíamos definido una "Onda" a una perturbación en un medio que se propaga sin desplazamiento de partículas, sino que las partículas del medio vibran alrededor de su posición de equilibrio estable, transmitiendo estas vibraciones a las partículas aledañas.

Por lo tanto deberemos empezar por estudiar el Movimiento Vibratorio para entender como captarlo. Nos ocuparemos aquí de tratar los movimientos vibratorios simples ya que los movimientos vibratorios complejos los trata el Teorema de Fourier como suma de movimientos vibratorios simples.

Movimiento Armónico Simple (m.a.s.)

Un movimiento armónico simple es el que describe una partícula sometida a una fuerza restauradora proporcional a su desplazamiento. Se genera entonces un movimiento periódico, es decir que se repite cada cierto intervalo de tiempo.

El ejemplo más sencillo de movimiento vibratorio simple es el del péndulo ideal que realiza oscilaciones de pequeña amplitud alrededor de su posición media de oscilación. Este sistema mecánico tiene un solo grado de libertad, es decir que el estado del sistema en cada instante se puede definir por un solo número: "por la longitud del resorte: x".

En el sistema oscilatorio de la figura 1, una masa "M" se encuentra en su posición de equilibrio estable bajo la acción de un resorte de constante elástica "K" (ver ley de Hooke). Si desplazamos mediante una fuerza exterior la masa M de su posición de equilibrio una distancia "x" y luego se la libera, por la acción del resorte el resorte ejercerá una fuerza "F" recuperadora que devolverá a la masa "M" a su posición de equilibrio y oscilará con igual amplitudes periódicamente. Siempre que no superemos el límite elástico del resorte, la fuerza será proporcional al desplazamiento que ha sufrido la masa.

$$F = - K_x x \text{ (fuerza de reacción del resorte)}$$

Como:

$$F = m_x a = m.\frac{d^2x}{dt^2}$$

$$m.\frac{d^2x}{dt^2} = -K.x \xrightarrow{(I)} \boxed{\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{K_x}{m} x =}$$

(I) Es una ecuación diferencial lineal de segundo orden donde:

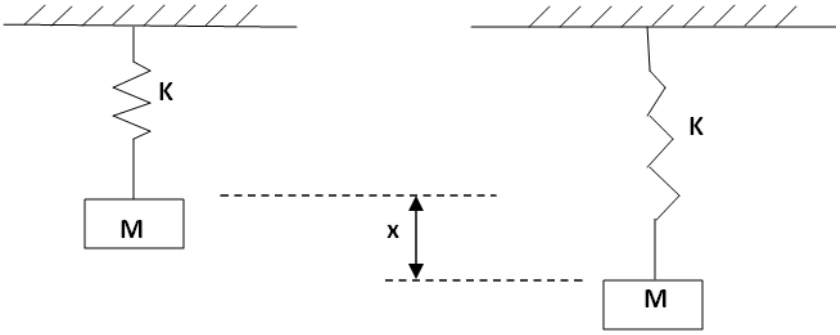


Figura 1, movimiento oscilatorio simple con un grado de libertad

$K/M = \omega^2$: velocidad angular o pulsación al cuadrado

La solución de la ecuación diferencial lineal de segundo orden (1) es:

$$(II) \qquad x = A.\cos(\omega t+\varphi)$$

Donde:

A: Amplitud del desplazamiento

φ: Fase inicial. En las figuras 2, $\varphi = 0$

Para comprobar que (II) es la solución de (I) hallaremos las derivadas de x(t):

$$(III) \qquad \frac{dx}{dt} = -A.\omega.\text{sen}\,(\omega t+\varphi)$$ **[velocidad de la oscilación]**

$$(IV) \qquad \frac{d^2x}{dt^2} = -A.\omega^2.\cos\,(\omega t+\varphi)$$ **[aceleración de la oscilación**

Reemplazando (IV) y (II) en (I) se comprueba la ecuación:

$$-A.\omega^2.\cos\,(\omega t+\varphi) + A.\omega^2.\cos\,(\omega t+\varphi) = 0$$

Como observamos existe una relación directa entre el movimiento armónico simple y la cinemática, donde conocemos la velocidad angular "ω" como la velocidad que gira el radio vector de una circunferencia.

$$\omega = 2\pi f = 2\pi/T$$

Donde:

T: Período o tiempo que tarda el radio vector en recorrer el perímetro de la circunferencia (2π)

f = 1/T: frecuencia o cantidad de vueltas que da el radio vector en 1 segundo.

En la figura 2 se muestran las curvas correspondientes al desplazamiento en función del tiempo: x(t), la velocidad en función del tiempo: v(t) y la aceleración en función del tiempo: a(t). Observar que la aceleración adelanta 90° a la velocidad y la velocidad adelanta 90° al desplazamiento.

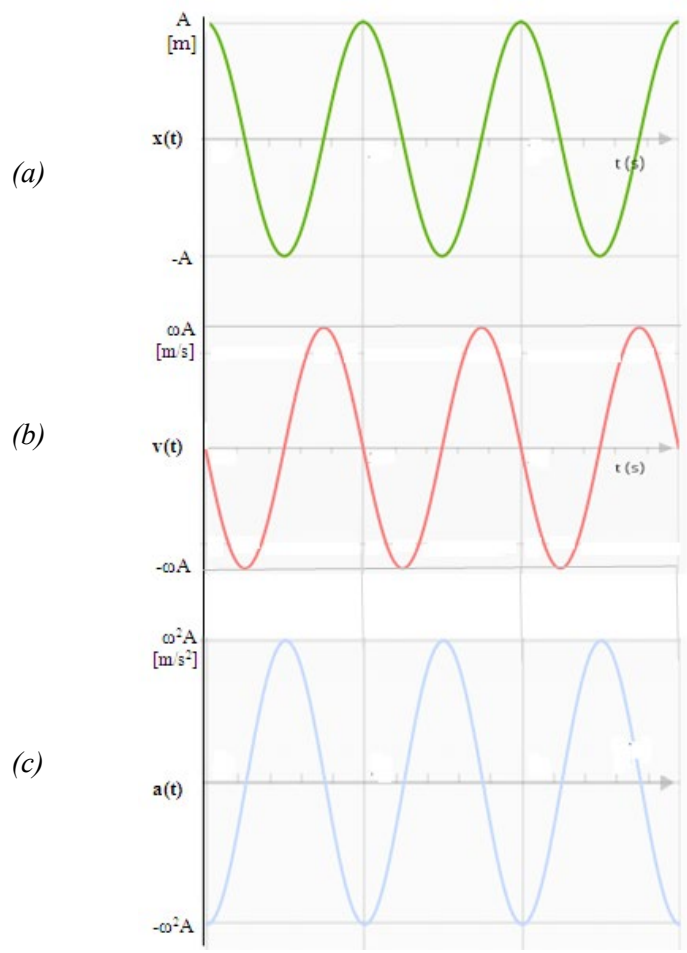


Figura 2, (a) x(t)=A.cos(ωt); (b) v(t)=-A.ω.sen(ωt); (c) a(t)=-A.ω²cos(ωt)

El Receptor Sísmico

El receptor o "sensor sísmico", es un transductor de energía mecánica (o electro-mecánica, como en los Mems) a eléctrica, es decir que convierte el movimiento del terreno, con el cual se encuentra acoplado, en un voltaje eléctrico análogo a la velocidad o aceleración de dicho movimiento.

Podríamos clasificar a los sensores utilizados en las estaciones receptores en dos grandes grupos:

- Sensores de velocidad: Geófonos.
- Sensores de aceleración: MEMS y GAC

El sensor de la estación receptora, constituye la primera etapa del Instrumento de Adquisición y es la unidad básica del sistema interviniente en la operación sísmica.

Geófonos (geo: tierra, phono: voz)

El geófono fue hasta hace muy pocos años el sensor más utilizado en las estaciones receptoras de la industria sísmica.
Generalmente varios geófonos son conectados eléctricamente en distintas configuraciones para filtrar espacialmente ruidos que se propagan por la superficie del terreno en el cual han sido tendidos. Cuando más de un geófono compone a la estación receptora, nos referimos a una "ristra de geófonos" que van a ser distribuidos sobre la estaca identificadora de la estación de recepción en configuraciones y arreglos diversos, para amplificar la señal sísmica recibida y atenuar los ruidos superficiales.

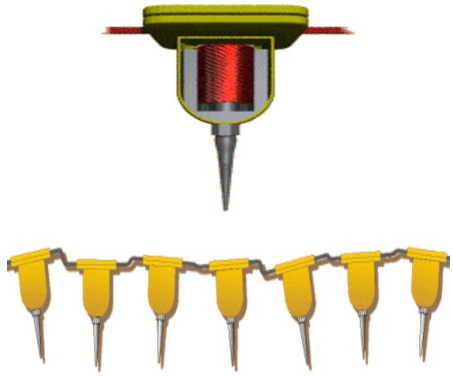


Figura 3, el geófono/ ristra de geófonos, utilizado como estación receptora sísmica

El geófono convierte la velocidad que se mueven las partículas del terreno al que se encuentra acoplado, en voltajes eléctricos análogos (análogo: posee la misma fase que la velocidad).

El principio físico que explica al geófono es la Ley de Faraday/Lenz que dice:

> "Si un conductor eléctrico de longitud **"l"** se mueve a una velocidad **"v"** perpendicularmente a las líneas de un campo magnético de densidad "**B**", sobre sus extremos se generará una Fuerza Electromotriz Inducida (f.e.m) de valor: "B.l.v", medida en voltios ".

B: Densidad de Campo Magnético, se mide en Webers/m^2.
L: longitud del conductor, se mide en metros.
V: velocidad del movimiento del conductor, se mide en metros /segundo.

> Este fenómeno se produce porque la varilla conductora de la electricidad, al cortar en su movimiento a velocidad "v" líneas de flujo magnético, genera un desplazamiento de electrones hacia un extremo

de la varilla, quedando el otro extremo con excesos de cargas positivas. De acuerdo a la "regla de la mano izquierda", donde el dedo pulgar señala la dirección de desplazamiento de la varilla (velocidad), el dedo índice señala la dirección del flujo magnético y el dedo anular señala el desplazamiento de los electrones hacia el lado izquierdo de la varilla en la figura 2. Por lo tanto se ha creado un potencial entre los extremos de las varillas que se denomina: "f.e.m. Si a esa varilla le colocamos un circuito cerrado, circulará una corriente eléctrico por el mismo que será proporcional a al voltaje generado e inversamente proporcional a la impedancia de la carga del circuito (i = voltaje / R, si la carga fuese solo resistiva).

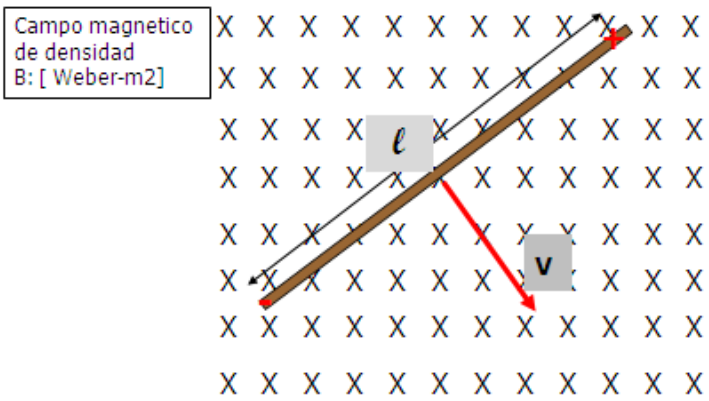


Figura 4, Ley de Faraday/Lenz

Como el Campo Magnético es teóricamente constante e invariable, y la longitud de la varilla es única, el término: "B.l" es una constante y se denomina "Sensibilidad del Geófono (Sensitivity). Entonces el voltaje generado es análogo a la velocidad de movimiento de la varilla conductora.

$$\text{fem (voltios)} = \text{Constante}_x \text{Velocidad}$$

Implementación del geófono

En el geófono básico, mostrado más abajo, consideramos que en lugar de una varilla existe una bobina conductora de longitud "l" que se encuentra suspendida de un resorte (spring) junto a una masa (mass). El resorte se encuentra sujeto al resto de la estructura.

La estructura contiene un imán permanente y se encuentra fija (acoplada) al terreno que se quiere sensar, moviéndose solidariamente con este, mientras que la bobina conductora queda prácticamente en la misma posición de equilibrio para seguir luego con cierto retraso igual movimiento. El movimiento relativo del imán con respecto a la bobina genera un voltaje análogo a la velocidad de dicho movimiento.

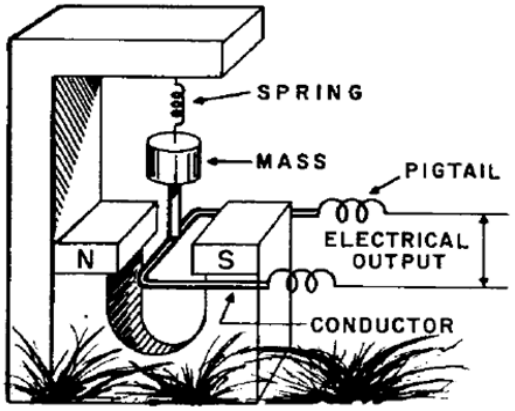


Figura 5, desarrollo básico de un geófono [6]

Si la estructura con el imán se mueve rápidamente hacia arriba (o hacia abajo), la masa y bobina siguen con atraso este movimiento y luego empiezan a oscilar como un péndulo sobre su punto de equilibrio (en realidad la fricción contra el aire, perdidas de energía en el resorte, harían finalmente detener tal oscilación).
La frecuencia natural de resonancia "f_0" está definida en la oscilación pendular de la bobina cuando no se amortigua la misma y determinada por la relación de la masa total suspendida y la constante elástica del resorte.

$$\omega = 2.\pi.f_0 = \sqrt{K/m}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{K/m}$$

Si a la bobina le colocamos una resistencia eléctrica "Rd" (llamada: resistencia de amortiguamiento), la f.e.m. hará circular sobre este circuito cerrado, una corriente eléctrica de sentido tal que producirá una fuerza contra-electromotriz que tratará de detener el movimiento (Ley de Lenz: "el sentido de una fem inducida es tal que se opone a la causa que la produce").

Dependiendo del valor de la resistencia de amortiguamiento, podremos tener desde un amortiguamiento crítico (resistencias de bajo valor), hasta movimiento sub-amortiguado (0,6 a 0,7 % es el ideal).

En la figura siguiente se muestra la curva de amortiguamiento en función de la respuesta al pulso sobre un geófono:

a. Sin resistencia de amortiguamiento (Rd = ∞ Ω), la bobina oscila sobre su posición de equilibrio y las amplitudes de los voltajes generados A_1 y A_2 son iguales ($A_1 = A_2$). En esta situación el "Damping" es cero (no existe amortiguamiento).

b. Cuando el valor de la resistencia de amortiguamiento es muy chica (Rd > tendiendo a cero), estamos en presencia del Amortiguamiento Crítico. La amplitud de voltaje A_1 es normal pero el de A_2 es

prácticamente cero y entonces: "A1/A2 = ∞. En este caso el valor del amortiguamiento es: D = 1.

c. Vemos que la mejor repuesta esperada para la recepción de una onda sísmica, se produce cuando el valor del amortiguamiento es cercano a D = 0.7 del valor crítico y esto se logra colocando una Rd que produzca una relación de amplitudes: $A_1 / A_2 = 23$.

Nota: El amortiguamiento crítico parecería tener una mejor respuesta, pero no es así, el geófono no estaría en condiciones de responder rápidamente a nuevas excitaciones; por lo tanto deberíamos de cargar a la bobina con un valor de amortiguamiento entre 0,6 y 0.7 del amortiguamiento crítico.

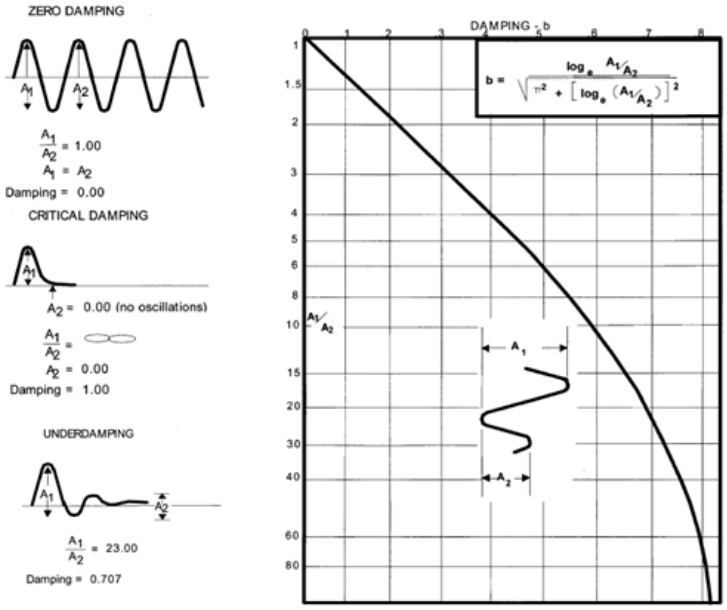


Figura 6, medida del amortiguamiento (dumping)[6]

Geófono real

En la figura que sigue, vemos las intimidades de un geófono Sensor SM4.

- Se aprecia una doble bobina inductora que tendrá por finalidad anular las inducciones de campos magnéticos externos.
- Las bobinas están soportadas por dos resortes: uno inferior que soporta el peso de bobina y masa y uno superior que evita su choque contra la estructura. La calidad de estos resortes, determinan muchas de las características del geófono.
- El imán permanente consta de un: una magneto central cilíndrica (magnet) con una pieza polar superior y otra inferior de aluminio que

constituyen el polo norte y sur del imán (pole pieces). Las líneas magnéticas salen radialmente de los polos atravesando las bobinas móviles y cerrándose sobre el cuerpo exterior de aluminio del geófono.

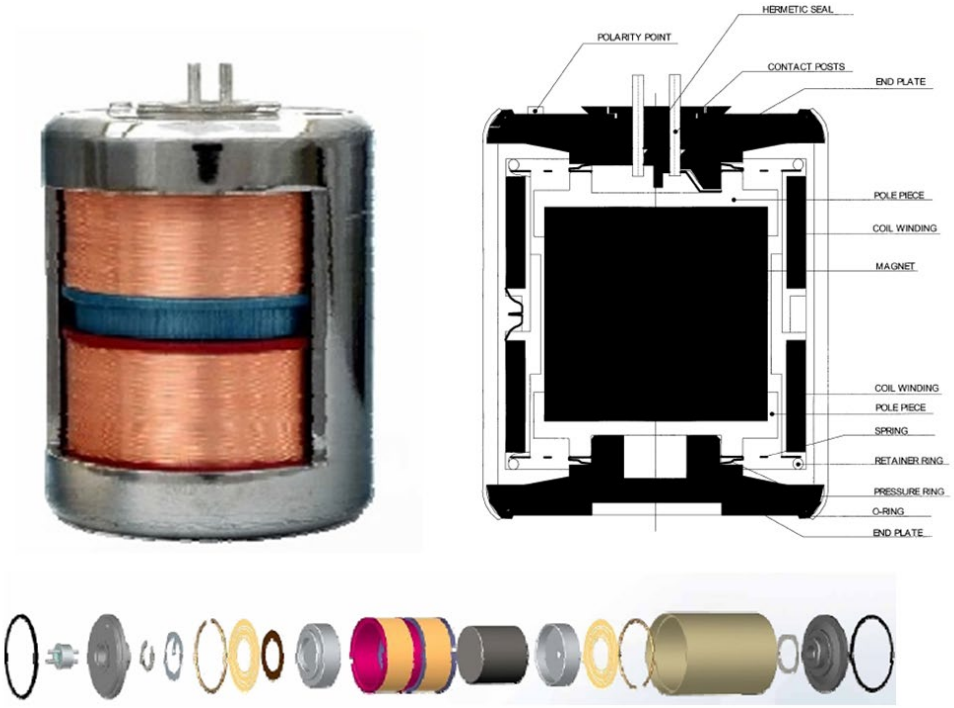


Figura 7, geófono SM4, cortes y despiece [1]

Las dos bobinas conductoras están conectadas en serie pero fueron bobinadas en sentido contrario, de tal manera que un campo magnético externo inducirá voltajes de similar amplitud pero de polaridades opuestas. En cambio para el campo magnético propio, las bobinas inducirán iguales voltajes con la misma polaridad, de tal manera que se suman ambos voltajes.

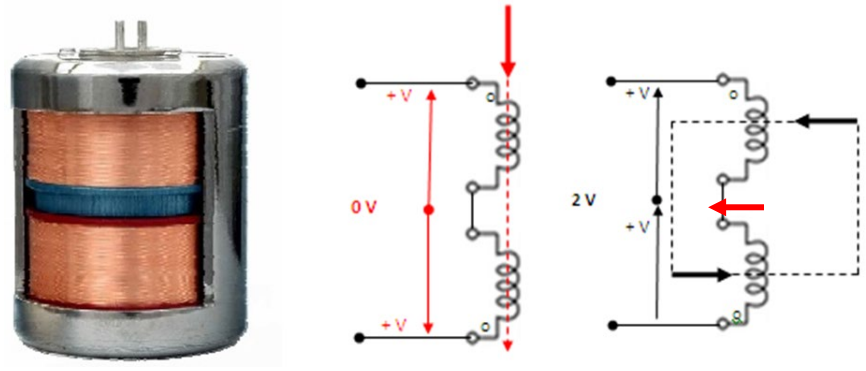
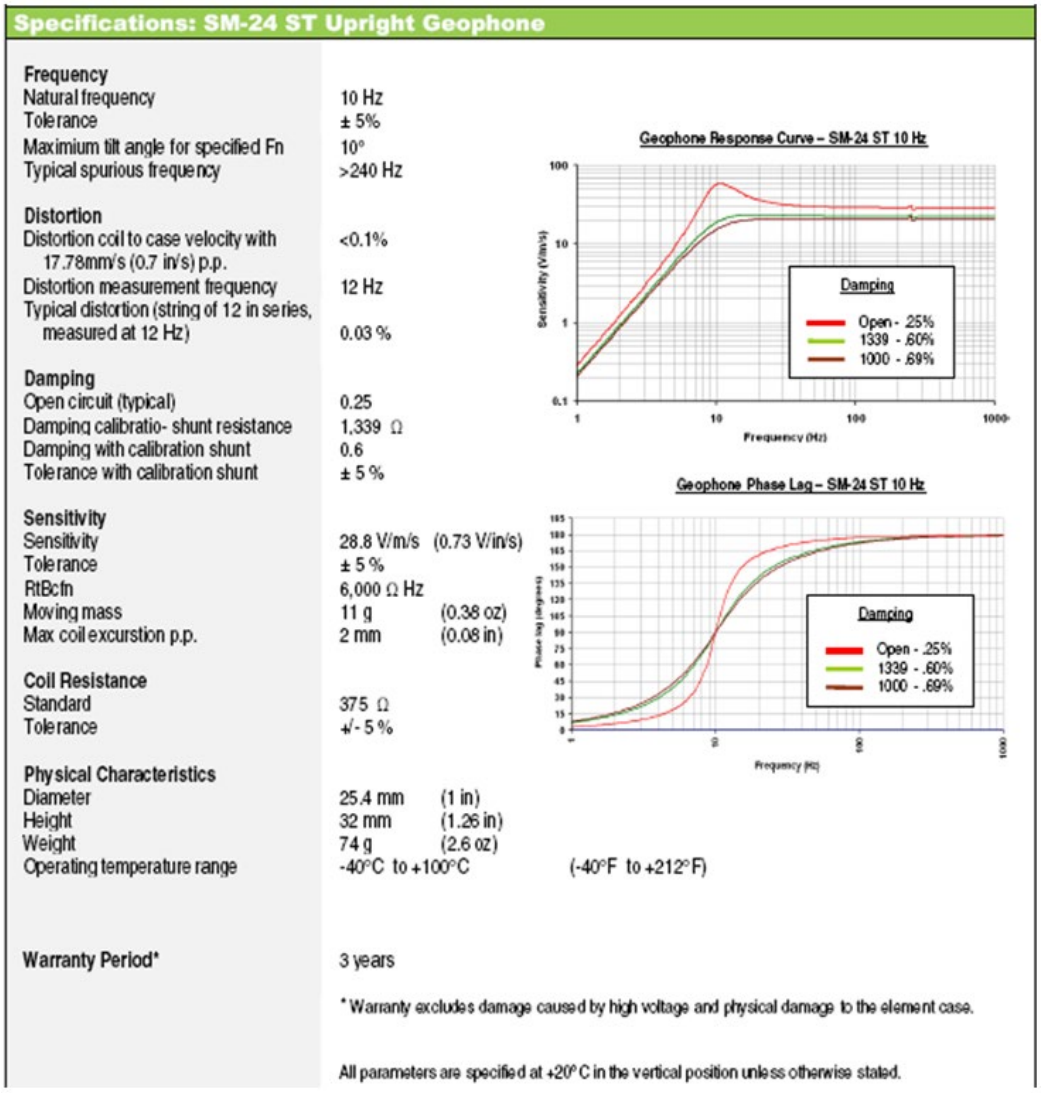


Figura 8, doble bobina para atenuar campos magnéticos externos al geófono [1]

Especificaciones del fabricante

Vamos a observar las especificaciones técnicas que proporciona la fábrica Sensor para su geófono de componente vertical (Upright) SM24 ST.



Specifications: SM-24 ST Upright Geophone

Frequency	
Natural frequency	10 Hz
Tolerance	± 5%
Maximium tilt angle for specified Fn	10°
Typical spurious frequency	>240 Hz
Distortion	
Distortion coil to case velocity with 17.78mm/s (0.7 in/s) p.p.	<0.1%
Distortion measurement frequency	12 Hz
Typical distortion (string of 12 in series, measured at 12 Hz)	0.03 %
Damping	
Open circuit (typical)	0.25
Damping calibratio- shunt resistance	1,339 Ω
Damping with calibration shunt	0.6
Tolerance with calibration shunt	± 5 %
Sensitivity	
Sensitivity	28.8 V/m/s (0.73 V/in/s)
Tolerance	± 5 %
RtBcfn	6,000 Ω Hz
Moving mass	11 g (0.38 oz)
Max coil excurstion p.p.	2 mm (0.08 in)
Coil Resistance	
Standard	375 Ω
Tolerance	+/- 5 %
Physical Characteristics	
Diameter	25.4 mm (1 in)
Height	32 mm (1.26 in)
Weight	74 g (2.6 oz)
Operating temperature range	-40°C to +100°C (-40°F to +212°F)
Warranty Period*	3 years

* Warranty excludes damage caused by high voltage and physical damage to the element case.

All parameters are specified at +20° C in the vertical position unless otherwise stated.

Figura 9, Especificaciones del geófono Sensor SM-24 ST [1]

- La **frecuencia natural de resonancia** es: 10 Hz medida con una tolerancia de ± 5% (entre 9.5 y 10.5 Hz). Vemos en el espectro de amplitud, que los 10 Hz se encuentran en plena curva de atenuación, este punto se determina cuando la amplitud se atenúa 3dB con respecto a la banda pasante. La atenuación del espectro hacia las bajas frecuencias es de aproximadamente 12 dB por Octava.

- La inclinación máxima que puede ser sometido este geófono sin perder sus especificaciones (máximum **tilt angle** for specified fn) es de 10º.

- Especifica el fabricante que el espectro plano de amplitud está garantizado hasta los 240 Hz, con lo cual podemos considerar a esta frecuencia como el límite superior de la banda pasante, luego el fabricante no garantiza que **frecuencias espurias** sean sumadas al dato sísmico. Podríamos trabajar con un muestreo de 2 milisegundos donde utilizamos un "Aliasing Filter" de 200Hz, pero si muestreáramos a 1 milisegundo las frecuencias espurias caerían

dentro de la banda pasante (Aliasing Filter para 1 ms de muestreo corta frecuencias mayores a 400 Hz). Ver artículo sobre teoría del muestreo temporal en el Capítulo correspondiente.

- La **Distorsión** presupone una deformación de la onda sísmica original y el mayor culpable de que esto suceda son los resortes del geófono que producen la cupla antagónica. La distorsión es proporcional a la excursión de la bobina que presiona y tracciona las láminas que ofician de resortes. Las especificaciones indican que la distorsión es menor a 0.3% medida a una frecuencia de 12Hz y a una velocidad de 17.78 mm/s, esta velocidad es muy superior a la generada por una onda sísmica (onda sísmica para horizontes someros pueden ser del orden de los 3 mm/s). Una ristra de geófonos genera menos distorsión cuantos más geófonos la compongan (0.03 %: típica distorsión para 12 geófonos SM24 ST en serie).

- El valor del **Amortiguamiento (D) a circuito abierto** (sin resistencia de amortiguamiento), es de 0.25 con respecto al crítico. Vemos también que para obtener un D = 0.6 del crítico, se debe colocar una resistencia de Rd = 1339Ω y para D = 0.669 una resistencia de 1000Ω (estos dos espectros de amplitud son muy parecidos). La tolerancia de la medida es de ± 5% (con la Rd colocada).

- La **Sensibilidad** (B.l) de este geófono es de 28.8 V/m/s con una tolerancia de medida de ± 5%. La masa suspendida con la bobina es de 11 gramos y la excursión máxima de la bobina sin tocar los extremos es de 2 milímetros.

- La Resistencia eléctrica de la bobina es: 375 Ω ± 5%.

- El **Periodo de Garantía** es de 3 años. No es que los geófonos tienen una vida útil promedio de 3 años, sino que desde su compra hasta los 3 años, la fábrica se hace cargo de reponer los geófonos fallados. Un geófono, mientras los tests a que es sometido diariamente avalen su performance, debe ser considerado apto. La fecha de fabricación generalmente viene impresa en el geófono.



(a) *(b)*

Figura 10, Fechas de fabricación geófonos: (a) enero de 2011; (b) agosto de 2006

Circuito eléctrico equivalente del geófono

El circuito eléctrico equivalente del geófono, nos muestra que se genera un divisor potencio métrico entre la RCA y la RD que atenúa el voltaje transducido.

Sin insistir en desarrollos eléctricos, la resistencia equivalente del geófono se obtiene cortocircuitando la fuente de voltaje (Blv) quedando la resistencia de la bobina y la de amortiguamiento en paralelo.

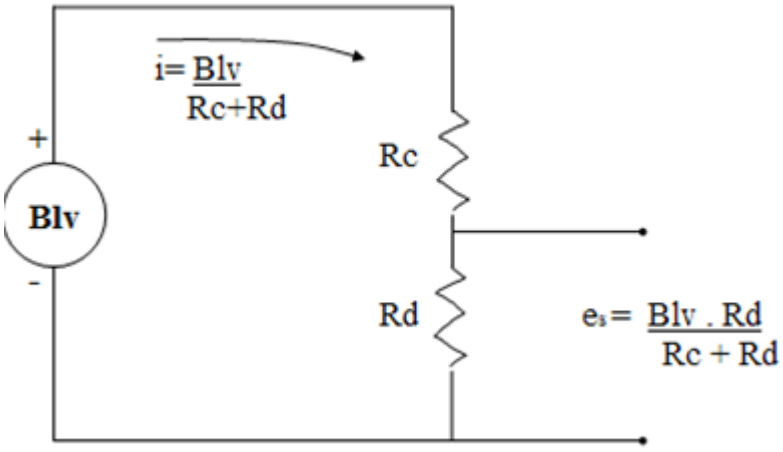


Figura 11, circuito equivalente de un geófono SM 24 ST

Entonces la Resistencia equivalente del geófono, reemplazando por los valores especificados, resulta:

$$Re = \frac{Rc * Rd}{Rc + Rd} = \frac{375 * 1000}{375 + 1000} = 273\ \Omega$$

La Sensibilidad del geófono con la Resistencia de Amortiguamiento Rd, se calcula considerando un valor unitario para "v" (velocidad variable con la amplitud de la onda sísmica):

$$Se = \frac{Blv * Rd}{Rc + Rd} = \frac{28{,}8 * 1000}{1375} = 20{,}95 \text{ Voltios/metro/segundo}$$

Ristras de geófonos

Las ristras con arreglos lineales de geófonos, son utilizadas con éxito en sísmica 2D para atenuar ruidos superficiales que se propagan en el mismo plano constituido por los geófonos y la fuente de energía sísmica. Este filtrado espacial se optimiza conociendo las longitudes de onda de los ruidos superficiales y depende de la cantidad de unidades del arreglo de geófonos y del distanciamiento entre esas. (Ver artículo Arreglos de geófonos en sísmica 3D).

Para el dato sísmico, cuya velocidad aparente es muy superior a la de los ruidos superficiales, el frente de onda incidente sobre los geófonos del arreglo puede considerarse plano y que llega a todos ellos en el mismo tiempo, para este tipo de acontecimiento, la respuesta de la ristra de 6 geófonos y la de 12 geófonos es la misma.

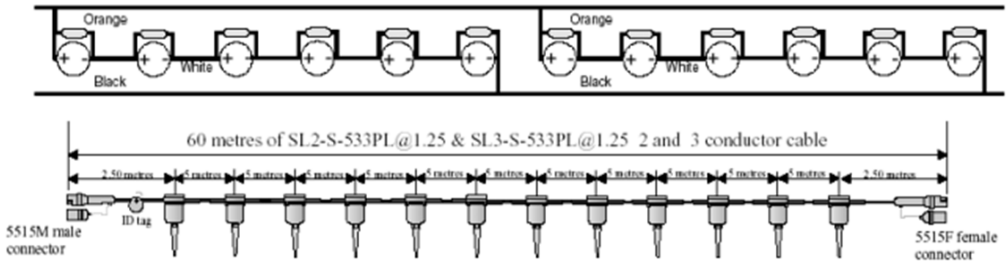


Figura 12, Ristras de 12 geófonos conectados en configuración 6 x 2 [1]

En la figura anterior vemos una configuración típica muy usada en sísmica 2D, 6 geófonos en serie conectado en paralelo con otros 6 geófonos en serie. Se denomina: configuración 6 x 2.

Las fuentes de voltajes (fems) de los geófonos en serie se suman, como así también se suman sus resistencias equivalentes:

Sensibilidad de ristra de 6 geófonos = 6 * Se = 6 * 20.95 = 125.7 V/m/s
Resistencia de ristra de 6 geófonos = 6 * Re = 6 * 273 = 1638 Ω

Si ponemos dos fuentes de voltaje de igual magnitud en paralelo, el voltaje permanece con la misma amplitud y duplica su capacidad de entregar corriente (duplica su potencia, cosa que no necesitamos aprovechar). Lo que

si disminuimos a la mitad es el valor de su resistencia total. Esto sucede con 2 ristras de 6 geófonos c/u y en paralelo:

Sensibilidad de ristra de 12 geófonos = 125.7 V/m/s
Resistencia de ristra de 12 geófonos = Re /2 = 1638 / 2 = 819 Ω

Veremos a continuación que es importante mantener la impedancia de la ristra lo más baja posible, para evitar el efecto antena, el cual es proporcional a su impedancia.

Ristras balanceadas vs desbalanceadas:

La correcta elección de los parámetros eléctricos en una ristra de geófonos (diámetro y longitud del cable, cantidad de geófonos en serie y/o paralelo, etc.), ayudará a mejorar la relación Señal / Ruido (S/N) de todo el sistema de adquisición.

Debemos considerar que la señal sísmica expresada en voltios, es de muy pequeña magnitud llegando a valores tan pequeños como 10^{-6} voltios y aun menores. Por lo tanto mínimos desequilibrios en la línea de transmisión de la señal sísmica, afectan a la misma distorsionándola, sumando ruidos en su mismo espectro e inclusive enmascarándola hasta hacerla no procesable.

Para evitar varios de los inconvenientes mencionados, se utilizan "Ristras de Geófonos Balanceadas", que emplean 3 conductores y minimizan las interferencias electromagnéticas (EMI: Electrical) como ser: inducciones de líneas de energía y descargas electrostáticas por eventos atmosféricos.

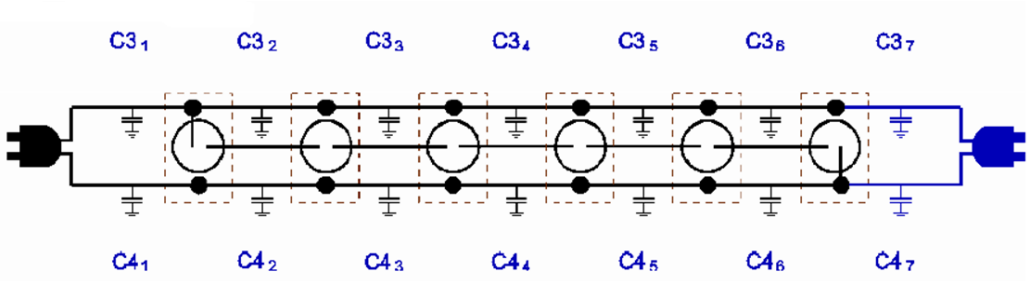


Figura 13, ristra de geófonos balanceada [6]

En una ristra balanceada los dos principales conductores presentan igual "impedancia capacitiva" con respecto a tierra (C3 y C4), las descargas electrostáticas y la EMI (Electro Magnetic Interference), generan iguales voltajes (con respecto a tierra) sobre los dos terminales de la ristra con la misma fase y amplitud. La entrada diferencial del equipo de adquisición atenúa las señales de "modo común" (CMRR: Common Mode Rejection Ratio) entre 90 y 110 dB. Ver Preamplificacion Diferencial, Capitulo 6.

En una ristra des-balanceada, los dos principales cables conductores poseen diferente longitudes y parte de las señales serán convertidas a señales de "modo diferencial" y serán amplificadas.

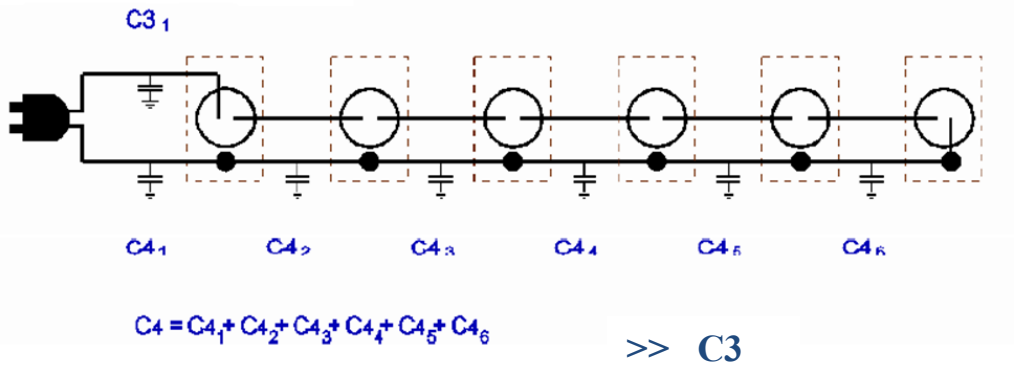


Figura 14, ristra de geófonos des-balanceada [6]

Ingresando un poco más sobre la teoría de las líneas de transmisión, vemos que los pares de cables poseen capacidades parásitas entre ellos que son Fuente de Interferencias (C1 and C2).

Ejemplo: En los viejos sismógrafos, un cable multipar transmitía la señal sísmica de todos los canales, hacia el "Sismógrafo", las vibraciones del motor-generador de energía del camión movía imperceptiblemente a dicho cable (tanto dentro de la cabina como en las cercanías del camión) originando un ruido coherente por microfonismo (desplazamiento relativo de los conductores del par). Este ruido, estuvo presente en toda adquisición sísmica de esos tiempos.

También, como hemos visto, cada conductor del par posee una capacidad parásita con la tierra (C3 and C4). Estas fuentes de interferencia son de relativa alta impedancia y por lo tanto pueden ser consideradas como "Fuentes de Corrientes". En una situación de desbalance de cables, una corriente eléctrica circulará por la impedancia de grupo (Zgroup). El voltaje diferencial generado por EMI es por lo tanto proporcional a la impedancia de grupo. Por lo tanto el paralelo de geófonos en la ristra de configuración 6x2, se realiza para bajar la impedancia de la ristra, que no es otra que la: Zgroup
C5 representa a la capacitancia entre los cables del geófono y es del orden de 80pF/m) 80 picofaradios por metro de cable).

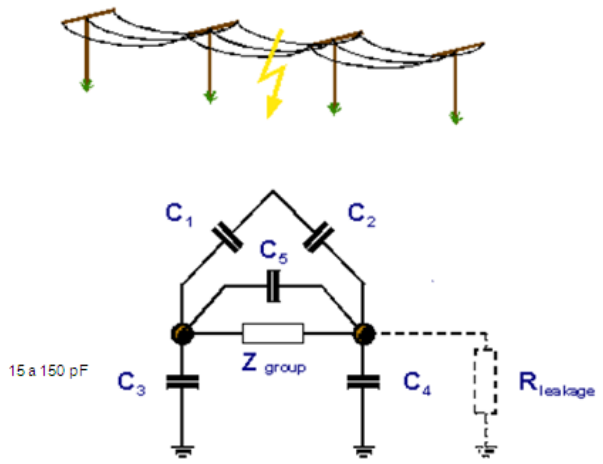


Figura 15, capacidades parasitas en una línea de transmisión [6]

Las capacitancias de los conductores a tierra (C3 y C4) varían de 15 a 150 pF/m, 15 pF/m cuando el cable se encuentra elevado de la tierra (arriba de las matas) y significativamente mucho más alto si se encuentra tirado sobre barro o agua.
Un camino de perdida a tierra (Rleakage) también creará un similar desbalance del Puente.

Ejemplo 2: Se han ensayado simultáneamente la ristra balanceada de la figura 13 y la desbalanceada de la figura 14, en presencia de ruidos electromagnéticos, más específicamente cercanas a una línea de mediana tensión eléctrica. Se puede observar en la figura siguiente que para la inducción electromagnética de 50 Hz, la ristra desbalanceada ha aumentado 10 veces su amplitud.

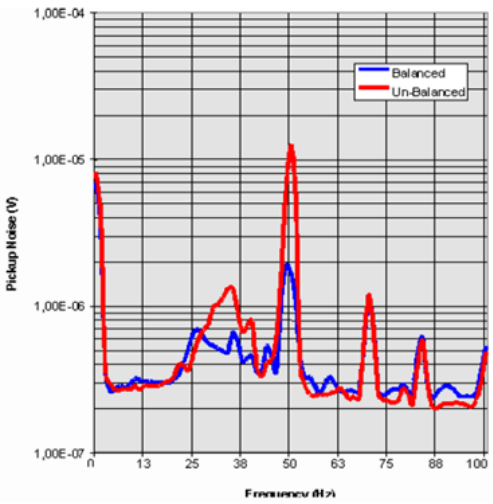


Figura 16, ensayo de ristras balanceada y desbalanceada [6]

Rango Dinámico de los geófonos

Varias veces durante la lectura de los temas propuestos, nos referiremos al "rango dinámico", y en este caso se trata de la relación

logarítmica entre el máximo voltaje y el mínimo voltaje que el geófono puede manejar, lo que es lo mismo que consideremos las velocidades alcanzadas, análogas a esos voltajes.

$$RD\ [dB] = 20 \log\left[\frac{Vmax}{Vmin}\right] = 20 \log\left[\frac{veloc.max}{veloc.min}\right]$$

El voltaje máximo que el geófono puede producir, estaría determinado por la aceleración necesaria para que se desacople del terreno, es decir: 1g (≈ 10 m/s^2) y su voltaje mínimo podríamos considerarlo equivalente al producido por el "ruido de la tierra en reposo sin excitación sísmica" (background noise).

- Valor estimado de velocidad equivalente a "1 g" para 10 Hz ~ 160 mm/s
- Valor estimado del ruido de fondo de la tierra en reposo ~ 0,25 * 10^{-4} mm/s

Rango Dinámico Teórico del Geófono = 20 log (160 /0.000025) ~ 133 dB

Este enorme rango dinámico teórico de 133 dB (6,4 millones de veces), marca los extremos de transducción del geófono, pero esta capacidad se verá afectada por factores que pueden o no presentarse simultáneamente (en el mismo instante). Algunos de estos factores son:

1. Las amplitudes de las excursiones de la bobina móvil, generan distorsiones proporcionales a dichas amplitudes.
2. El estado del aislamiento eléctrico de los cables empleados para transportar el voltaje analógico desde la estación receptora hasta la Central Electrónica del Sistema de Adquisición. Ejemplo: pérdidas de aislamiento del cable respecto a tierra ("leakage") o pérdidas entre pares de cables conductores aledaños ("crossfeed"), atenuaciones en el cable y cabezas de conexión, etc.
3. De la falla en la simetría o balance eléctrico de c/conductor del par (common mode noise).
4. Acople del geófono sobre el terreno.
5. Etc.

Cada muestra de voltaje adquirida por nuestro instrumento poseerá una resolución diferente a la total posible (el rango dinámico disponible), dependiendo de las causas anteriores y de las componentes del espectro sísmico recibido.

La principal causa de distorsión en un geófono es la no-linealidad del resorte que provee la cupla antagónica a la bobina móvil. Cuanto mayor es la excursión de la bobina, mayor es la distorsión generada. El valor típico de

distorsión especificado para el SM-24, es menor a 0,1 %, (medidos a una frecuencia de 12 Hz y con una excitación de 0,7 pulgadas/segundo (17,8 mm/s, valor bastante elevado con respecto a las excitaciones normales en sísmica).

Por lo tanto el Rango Dinámico Instantáneo del Geófono SM-24, debido al efecto de distorsión, es de:

$$R.D = 20 \log (1/0{,}001) = 60 \text{ dB}$$

Si se consideran valores de excitación más cercanos a los reales en sísmica, las especificaciones muestran valores típicos de distorsión del orden del 0,03% (reduciendo a un 10% el valor anterior de excitación) y en este caso:

$$R.D = 20 \log (1/0{,}0003) = 71 \text{ dB}$$

Si ahora consideramos el valor total de la distorsión típica de una ristra de 12 geófonos SM-24, vemos que este baja al orden de: 0,01%.

$$R.D = 29 \log (1/0{,}0001) = 80 \text{ dB}$$

Los demás efectos mencionados: la extensión del Cable de Registración, que ocasionaría: "leakage", "crossfeed", atenuaciones e inducciones varias, dependerán del buen mantenimiento practicado sobre ellos.

Podemos sugerir que en condiciones normales de operación, la resolución o rango dinámico instantáneo debería estar comprendido entre 60 y 80 dB.

Cables de Registración

Si bien se ha prácticamente suprimido el empleo del cable de registración en la labor sísmica, al digitalizar la señal analógica a la salida de la estación receptora, resulta interesante recordar cómo se transportaba largas distancias esas salidas analógicas mediante "cables de registración" hasta el Sismógrafo.

El bajo voltaje generado por las ristras de geófonos se conectaba a una boca de salida (take out) del cable, la boca de salida a su vez estaba conectaba a un par de conductores trenzados que conducirían a la señal sísmica hasta el sismógrafo, pasando por varios tramos de cables con sus cabezas conectoras.



(a) *(b)*

Figura 17, (a) cable de registración multipar; (b) corriente circulando por un cable [6]

Los pares conductores se trenzan, porque: "cuando circula corriente por un conductor se genera un campo magnético a su alrededor" (ver figura 17). A su vez, cuando se coloca un conductor cerca de un campo magnético variable, se induce una tensión sobre él. Al trenzar los pares de cables se logra reducir la inducción debido a que se rompe con la alineación de los conductores. Se sigue generando campo magnético en cada cable, pero el trenzado impide la formación de un único campo con polaridad definida y se reduce la inducción de ruido electromagnético exterior.

Si bien los pares estaban trenzados y se trataba de mantener una transmisión "diferencial", la inducción cruzada entre pares (crossfeed) era inevitable.

Ejemplo real:

Para tener una idea de cuales dificultades operativas creaban los cables de registración antes del comienzo de la telemetría, tomamos el siguiente ejemplo de un sismógrafo de 24 canales que empleaba un cable de registración de 48 pares con cabezas macho en un extremo y hembra en el otro extremo de cada tramo.

Se utilizaban 8 tramos de cable de 6 bocas de salida (takeouts) c/u, espaciadas cada 55 metros entre sí. La longitud de cada tramo de cable era de 6 $_x$ 55 = 330 metros. La longitud total del tendido era de 8 $_x$ 330 = 2640 metros.

El Canal 1 está ubicado en la Estaca # 1, el Canal 12 está ubicado en la Estaca # 12. Existe un "gap" de 3 Estacas entre el Canal 12 y el 13 y en la Estaca # 14 se encuentra el Punto de Explosión. Entonces el Canal 13 se encuentra sobre la estaca # 16 y el Canal 24 en la estaca # 27. En la Estaca 48 se encuentra el sismógrafo en cuyo Panel de Entrada se conecta el cable de registración.

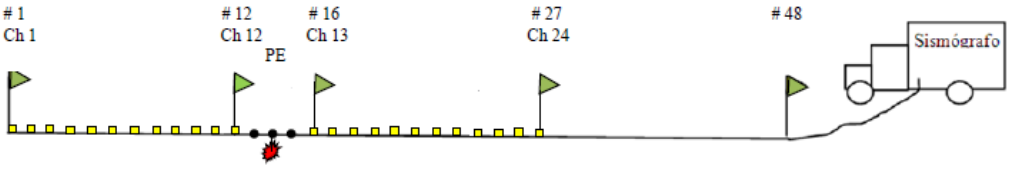


Figura 18, tendido sísmico con cable de 48 pares

Podemos apreciar el largo recorrido que realizan los datos recolectados, especialmente el Canal 1, aunque los 24 canales exponen sus pares conductores en toda la longitud del tendido.
Además existen 8 conexiones de cabezas para unir los 8 tramos de cable, las cuales solían ocasionar falsos contactos y atenuaciones.
Un detalle muy importante lo constituye la correcta polaridad de la conexión de la estación receptora con el "take-out". Generalmente los pines impares de la cabeza de cada tramo se conectaban a las referencias positivas y se las identificaba con color "rojo" y "negro" a la otra entrada del Take-out (ver Normas de Polaridad SEG).

En la figura 19 se presenta el esquema de conexionado del Cable de Registración donde se aprecia que pares de conductores le corresponde a cada estación receptora. Un máximo de 48 estaciones pueden conectarse simultáneamente, si por ejemplo en lugar de 8 tramos de cables, por equivocación se conectaran 9 tramos, las 6 bocas del tramo noveno estarían en paralelo con 6 Canales activos.

En las Estacas del "gap" no se conectaban geófonos, para evitar que produzcan "crossfeed" sobre los conductores de los 24 canales de datos.
Otro inconveniente debido a lo extenso de cada tramo del cable y de su polarización, era que debía preverse que cabeza (macho o hembra) era necesaria contar para seguir conectando los tramos y no era muy sencillo desenredar un tramo de cable encima del "camión tira-cables" para cambiar de cabeza.

En el extremo derecho de la figura 19, se encuentra la denominada: "Llave de Stacking", donde se seleccionaba para un determinado P.E., que Estaciones Receptoras van a ser utilizadas como: Canales de Datos. Se aprecia que fueron elegidas las estaciones de la Estaca 1 a la 12 y de la 16 a la 27.

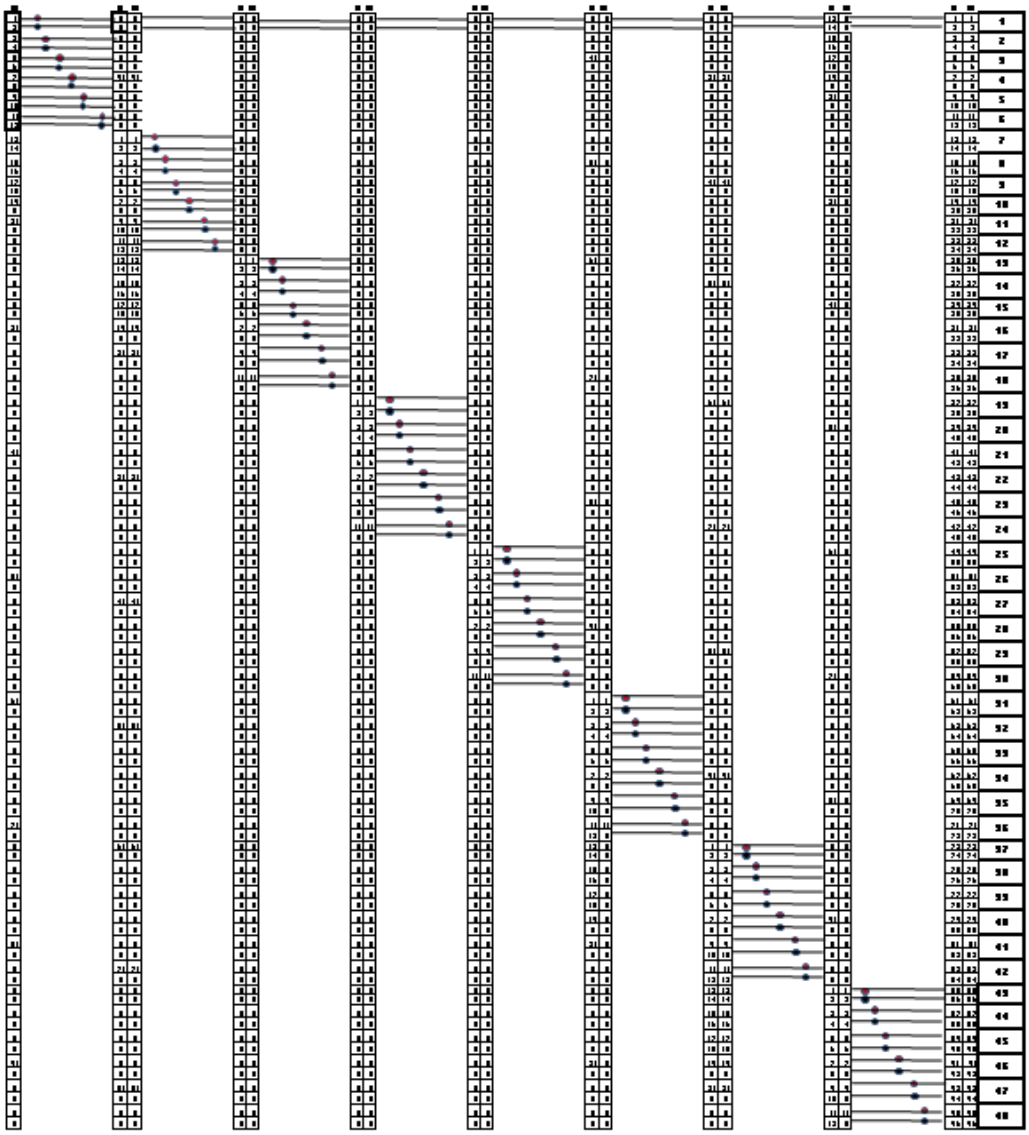


Figura 19, cableado de 8 tramos de cable de registración de 48 pares

Mantenimiento y Control de Ristras de Geófonos y Cables (si los hubiera)

A continuación enumeraremos las acciones que se deberían tomar en el mantenimiento y control de las ristras de geófonos.

1. Todas las ristras y cables deberán estar numeradas a fin de llevar un estricto control de las mismas e historial de reparaciones y fallas. Deberá contarse para cada ítem, con un registro de control donde se encuentre el historial mencionado.

2. Las ristras serán chequeadas parcial o totalmente durante el "startup" del grupo sísmico. Se puede comenzar con el chequeo de un muestreo de ristras (20 % del total, por ejemplo) y si los resultados indican un mal estado técnico-operativo de las mismas, se podrá exigir, antes del inicio de la

adquisición y a costo de la Contratista, el chequeo del total de las ristras.

3. El chequeo de ristras y cables incluirá un test de "leakage" (perdida de aislamiento), sumergiendo la ristra con sus cables de conexionado en un tambor/pileta con agua. La resistencia de pérdida entre el par de conductores unidos y el agua deberá medirse con megómetro en un voltaje de 250 Voltios o superior, la medida deberá ser superior a 10 MΩ.



Figura 20, Test de "leakage" utilizando tanque de agua y Megahometro [Lote 39 2D 2011, Grupo 877 de Geokinetics*, Perú]*

4. La ristra de Geófonos no deberá poseer más de dos reparaciones por tramo de cable, debiéndose sustituirse el tramo afectado en la primera rotación.

5. Se deberá realizar una rotación continua del material de línea, a un ritmo de 100 estaciones por día.

6. El Grupo Sísmico deberá contar con un taller de reparación de ristra de geófonos y equipo de diagnóstico (ejemplo: SMT-200) para efectuar pruebas del material en el campo y en la base. Las Ristras de Geófonos deberán superar las especificaciones de su fabricante.

7. El Grupo Sísmico deberá disponer de suficiente cantidad de repuestos como para no entorpecer las operaciones de

adquisición, aun en caso de circunstanciales contingencias (ejemplo: daños en cables debido a animales roedores, incendios, etc.)

8. El Grupo Sísmico deberá disponer de suficiente cantidad de repuestos como para no entorpecer las operaciones de adquisición, aun en caso de circunstanciales contingencias (ejemplo: daños en cables debido a animales roedores, incendios, etc.)

9. Todos los geófonos de una ristra deberán ser sometidos al Test de Polaridad. Todos deben responder con la misma polaridad ante el "tap on the top test" (golpeando moderadamente cada geófono de arriba hacia abajo).





(a) (b)

Figura 21, (a) test de performance de ristras durante un "startup"; (b) Geophone Tester [South Illizi, Argelia, WesternGeco 2011].

```
Starting at 26/05/2012  09:25:26    NoNA
SMT-200 Geophone Tester Version 2.02 Serial nr. 2051
Spec  Ser    Par    Shunt Mass  Fdist VelDist     Excur DataCorr    Tests
Sensor-SM24 6      2     1000  11.0  12.00 0.700 0.0020      1     NABCI
Tested:     Noise Res    Freq  Damp  Sens  Dist  Imp    Pol   RC    Reject:     Temp  Tin
Min:        0.0   798    9.75  0.686 122.5 0.00        -1
Nom:              818    10.00 0.686 125.7         2135                         @20.3
Max:        5.0   839    10.25 0.721 128.8 0.10          1

Num:  mV    ohm   Hz          V/m/s %     ohm                              øC
Note  0
964   0.9   800   10.12 0.708 126.5 0.02  2100  1     22    Test OK     14.7  09:25:56
2292  0.7   801   10.14 0.696 126.3 0.04  2114  1     22    Test OK     14.7  09:26:42
1085  0.7   799   10.11 0.712 127.6 0.03  2113  1     22    Test OK     13.5  09:27:38
2187  0.9   801   10.23 0.704 127.0 0.02  2108  1     22    Test OK     13.5  09:28:20
2360  0.7   803   10.24 0.707 127.6 0.04  2113  1     22    Test OK     13.0  09:28:55
727   0.6   801   10.15 0.701 126.7 0.04  2110  1     22    Test OK     13.0  09:30:28
2348  0.4   806   10.15 0.704 126.6 0.03  2110  1     22    Test OK     12.6  09:31:06
84    0.4   803   10.18 0.707 127.2 0.03  2110  1     22    Test OK     12.6  09:32:28
3     0.4   805   10.19 0.700 126.8 0.02  2118  1     22    Test OK     12.2  09:33:06
1147  0.5   803   10.18 0.713 126.3 0.04  2081  1     22    Test OK     12.2  09:33:35
30093 0.4   807   10.21 0.702 127.8 0.03  2134  1     22    Test OK     12.1  09:34:13
7861  0.4   820   10.20 0.699 126.1 0.03  2105  1     22    Test OK     12.1  09:34:55
391   0.2   808   10.18 0.703 126.2 0.03  2103  1     22    Test OK     11.6  09:36:36
1555  0.3   804   10.20 0.707 127.0 0.02  2105  1     22    Test OK     11.3  09:37:20
1212  0.2   807   10.03 0.706 125.3 0.04  2091  1     22    Test OK     11.3  09:37:50
2696  0.3   809   10.22 0.701 126.4 0.03  2107  1     22    Test OK     11.0  09:38:31
1983  0.3   809   10.18 0.706 126.9 0.03  2112  1     22    Test OK     11.0  09:38:55
2088  0.2   812   10.20 0.699 126.1 0.03  2108  1     22    Test OK     10.9  09:39:32
```

Figura 22, resultados obtenidos de un Test de Performance con SMT-200.

Geófonos de 3 componentes (3C)

Hemos tratado hasta aquí, el geófono de componente vertical (upright) y vimos que si la vertical gravitatoria del SM24 superaba los 10º no se garantizaba su performance. Pero existen geófonos de 3 componentes que permiten obtener una completa recepción sobre los tres ejes coordenados ortogonales: vertical (V), horizontal (H1) y transversal (H2). Generalmente estos geófonos son mas delicados que los verticales ya que los H1 y H2 tienen que mantener sus bobinas suspendidas sobre láminas elásticas más rígidas que elevan la frecuencia natural de resonancia (generalmente su f_0 = 15 Hz).

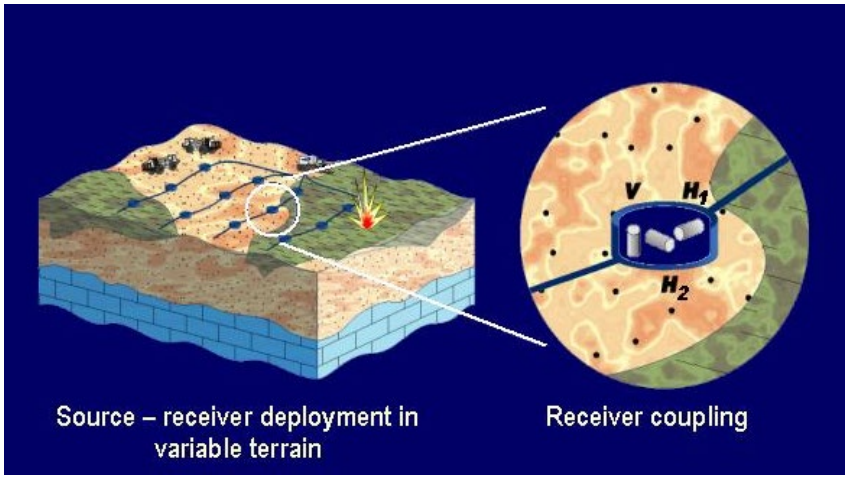


Figura 23, geófono de 3 componentes (3C)

La fuente de energía sísmica (explosivos, vibradores, etc.) no solo emite Ondas de compresión (Ondas P), sino que también se generan Ondas de Corte (Ondas S) en la emisión y en las reflexiones de las Ondas P. En una adquisición de multicomponentes, por comparación de reflexiones de Ondas P y Ondas S se pueden determinar el contenido de los poros de las rocas (gas, petróleo, ningún-fluido), pues las Ondas S no se reflejarán en los fluidos y las Ondas P si lo harán.
El Geófono 3C también es ampliamente empleado en las herramientas de adquisición de perfiles verticales (sísmica de Pozo): Checkshot y VSP.
Para más detalles Ver Articulo sobre Sísmica 3C, Capitulo 4

Los acelerómetros: MEMS y GAC

Los MEMS y los GAC son acelerómetros pues generan voltajes eléctricos análogos a la fuerza que debe ejercer el elemento sensor para detener el movimiento que los excita:

$$\text{Fuerza} = \text{Masa} \times \text{Aceleración}$$

Al ser la masa "M" un escalar (constante sin dimensión), estamos captando la aceleración que sufre el acelerómetro debido al movimiento del terreno.
Estos acelerómetros son muy útiles para usarlos como "Point Receivers" (un solo receptor por estaca) y poseen un AD Converter dentro de la misma carcaza que lo contiene donde se digitalizan las muestras recibidas.

Como vemos, estos sensores necesitan trabajar con una fuente de alimentación eléctrica (no así los geófonos). La actual aplicación como: receptores puntuales digitales (digital point receivers), los convierten prácticamente en Unidades Receptoras que transmiten telemétricamente los datos recolectados a una unidad central remota.

Pasar de velocidad a aceleración es muy sencillo y no presupone inconveniente porque: ambas señales sísmicas son sinusoidales y su relación de amplitud puede calcularse como:

$$\text{Acc} = v * 2\pi f; \quad v = \text{Acc} / 2\pi f$$

Conociendo el valor de la velocidad para una determinada frecuencia**,** podemos hallar la aceleración correspondiente. En cuanto a la fase, como estamos tratando funciones sinusoidales, la aceleración adelanta 90º a la velocidad.

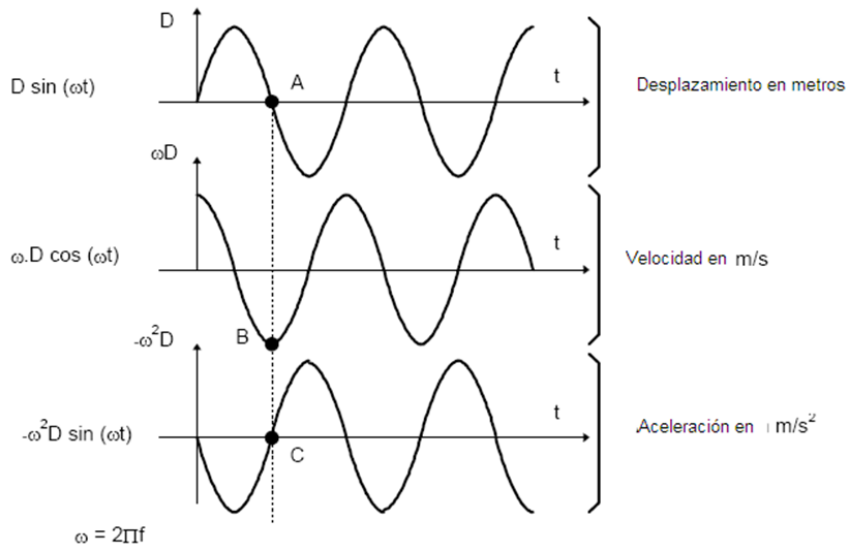


Figura 24, desplazamiento, velocidad y aceleración de una vibración

GACs (Geophone Accelerometer)

El Geophone Acelerometer (GAC) es el receptor construido a partir de un geófono conectado a un circuito electrónico que lo convierte en acelerómetro.

Consta de un geófono de velocidad convencional de 18 Hz de frecuencia de resonancia, conectado a un Amplificador Operacional. El voltaje producido en la bobina, análogo al movimiento a que es sometida su carcaza, se aplica sobre las entradas al Amplificador Operacional. La salida del amplificador se realimenta a la entrada produciendo una corriente inversa y de igual magnitud a través del resistor de realimentación R, que se opone a la corriente eléctrica generada por el movimiento de la bobina e intenta dejar detenida la bobina del geófono. El voltaje de salida es proporcional a la fuerza empleada para detener la bobina, es decir que es proporcional a la aceleración del movimiento ejercido sobre el geófono ($F = m_x a$).

Un A/D Converter Sigma Delta de 24 bits digitaliza el voltaje del Amplificador. Esta realimentación permite extender la respuesta del receptor hasta los 2 Hz (-3 dB) reduciendo a su vez los valores de distorsión (10 veces, 20 dB) ya que estos son proporcionales a la alinealidad de los resortes (que ahora se desplazan muy poco).

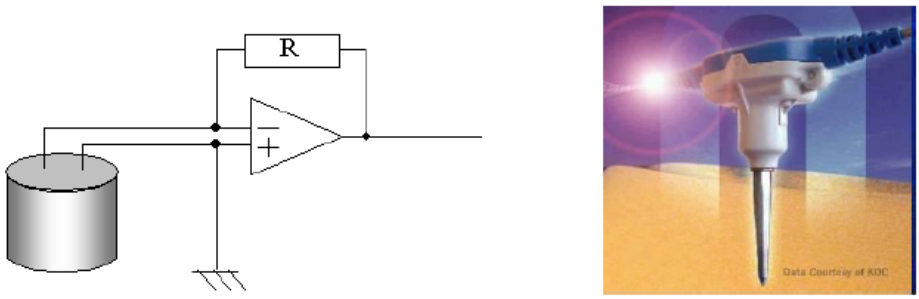


Figura 25, principio de funcionamiento del GAC y foto del receptor completo [4]

Se eligió utilizar un geófono de 18 Hz, pues sus resortes son tan rígidos que le permite mantener sus especificaciones de traducción indiferente al ángulo de inclinación (tilt) que este posea, inclusive puede ser empleado como componente horizontal para ser utilizado en 3C.

En las figuras siguientes se comparan las curvas de respuestas de un geófono convencional SM 24 y el GAC.

- En (a) el espectro de amplitud es evaluado en valores de velocidad para observar el efecto de filtro corta bajo (low cut) del geófono convencional (f_0 = 10 Hz).
- En (b) el espectro de amplitud es evaluado en valores de aceleración para apreciar cómo se extiende la respuesta hasta valores cercanos a DC (0 Hz).

El valor de transducción del GAC de aceleración a voltaje eléctrico es: 3.37 Voltios /g, siendo:
"g" = 9,81 m/s^2, la aceleración gravitatoria a nivel del mar.
La transducción reemplazando el valor de "g":

$$3.37\ V\ /\ 9{,}81\ m/s^2 = 0.34\ V/m/s^2$$

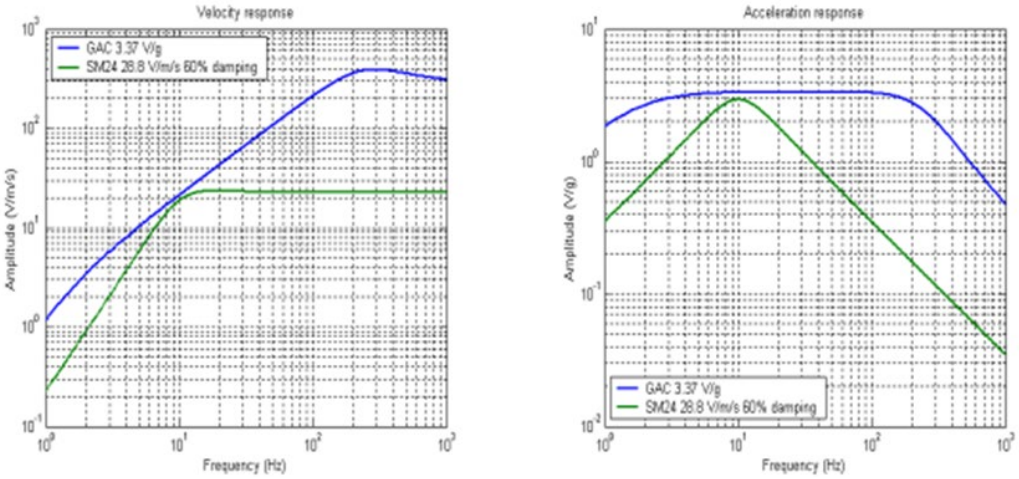


Figura 26, curvas de respuesta del SM 24 y el GAC [4]

Vamos ahora a calcular cual sería el valor máximo de aceleración que genera el máximo voltaje que admite el Sercel 428 con ganancia G1 (valor de "full scale": 2.262 Voltios), para compararlo luego con el MEMS.

0.34 Voltios ---------- 1 m/s^2
2.262 Voltios -------- 2.262 /0.34 = 6.65 m/s^2

Entonces un valor mayor de aceleración a 6.65 m/s^2 seria recortado por el Sercel 428 con G1

M.E.M.S (Micro Electric Mechanical System)

Estos relativamente nuevos sensores son completamente distintos en su concepción que los geófonos. Aquí describiremos al acelerómetro DSU (Digital Sensor Unit) de Sercel.
Este acelerómetro está constituido por una pequeña pieza de silicón (piezoeléctrico) de aproximadamente 1 centímetro de largo y que pesa 1 gramo.
El movimiento relativo de la masa inercial con respecto a la estructura es de apenas unas décimas de nanómetros (10^{-9} metros) contra los 2 milímetros de excursión máxima de los geófonos.

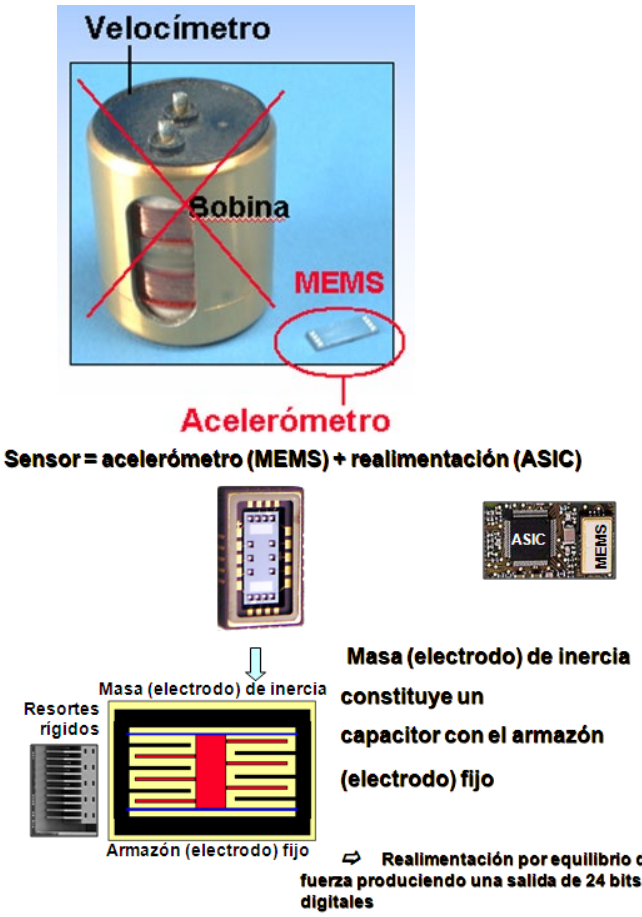


Figura 27, MEMS comparado con un geófono, estructura interna del receptor MEMS [3]

Como vemos en la figura superior, la pieza de silicón (electrodo de inercia), compuesta de placas o electrodos, se encuentra suspendida y sus placas se mueven enfrentando placas fijas a la estructura (armazón). Las placas móviles y fijas conforman capacitores que modifican su capacidad en función del movimiento a que es sometido el acelerómetro. Otro módulo en la unidad, denominado ASIC, proporciona la realimentación necesaria para oponerse al movimiento de placas (ídem GAP) y esta fuerza es convertida en muestras digitales de 24 bits.
La frecuencia natural de resonancia de este dispositivo, se encuentra por encima de la frecuencia de interés sísmico (1KHz) y la banda pasante es de 0 – 800 Hz (ídem GAP).

Nuevamente se aprecia en la comparación del espectro de amplitud entre MEMS y el Geófono SM 24, como se extiende la respuesta del acelerómetro en baja frecuencia, aunque el MEMS no es tan preciso en esta parte del espectro.

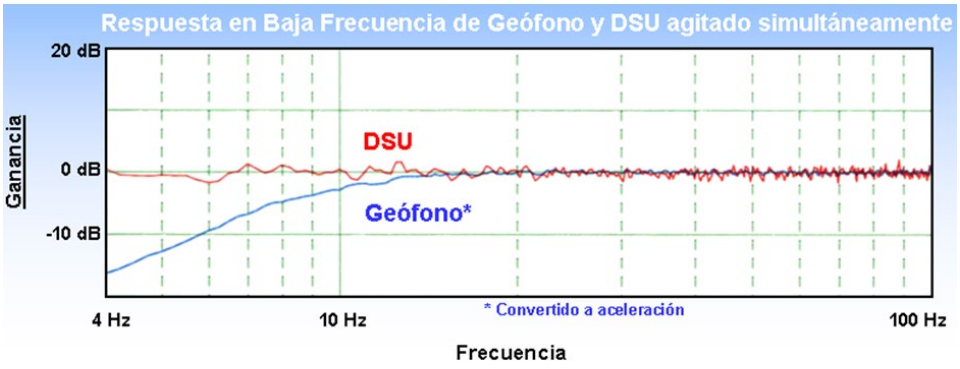


Figura 28, espectros de amplitud del DSU y del SM 24 (convertido a valores de aceleración) [3]

Comparando ahora el espectro de fase del MEMS contra el Geófono SM 24, vemos que en los acelerómetros DSU la fase es de 0º para todo el espectro. Mientras que para el SM 24 varía desde casi 0º hasta casi 180º entre 0 – 100 Hz.

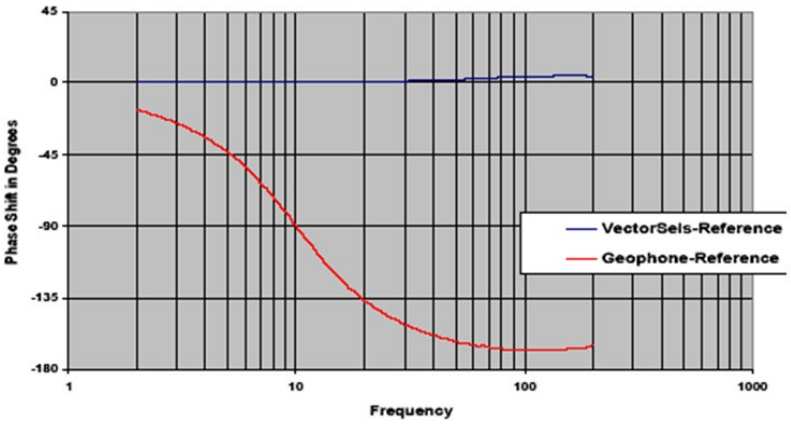


Figura 29, espectros de fase del VectorSeis y el geófono SM 24

5 m/s^2: es el valor de transducción de los MEMS (según el fabricante) que genera el máximo voltaje que admite el Sercel 428 con ganancia G1 (valor de "full scale": 1600 mVrms o 2262 mVpico).

Si quisiéramos comparar que diferencia de voltaje seria el generado por el MEMS contra una ristra SM 24 de 6 geófonos en serie, para una señal de f = 25Hz:

La velocidad equivalente (a 5 m/s^2) = a / 2πf = 5 / 2 * 3.14 * 25 = 0.032 m/s

La sensibilidad de una ristra de 6 geófonos SM 24 es de: 120 V/m/s

Entonces para la velocidad equivalente de 0.032 m/s, la ristra generaría:

0.032 * 120 = 3.840 mVoltios

Entonces para igual magnitud de onda sísmica:

- El MEMS generará……: 2262 mV

Como vemos, la diferencia de amplitud para la señal sísmica será menor de 6 dB (1,7 veces), aunque los ruidos superficiales serán bastantes más grandes en los MEMS ya, que por tratarse de una sola unidad, no puede realizar ningún filtrado espacial.

El pequeño tamaño de los receptores digitales MEMS, los hace especiales para Sísmica de 3 Componentes (3C) y al poder adquirir hasta valores de 0 Hz (DC), registramos el "vector gravedad" y con este valor corregimos las desviaciones con respecto a los tres ejes coordenados del receptor 3C.

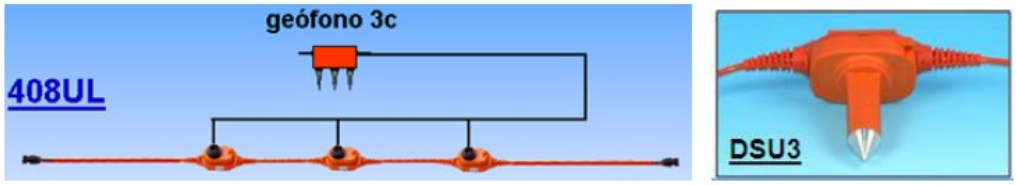


Figura 30, geófono de 3 componentes, versus el DSU3 (3 MEMS componentes) [3]

Polaridades SEG para sensores de 3 Componentes

Las direcciones y sentidos de los componentes quedan determinados por la "ley de la mano derecha", tal como se muestra en la figura:

- El dedo "pulgar" hacia abajo indica la dirección y sentido de la componente vertical. El sentido indica como practicar el "tap on the top test".

- El dedo "índice" debe coincidir con la flecha del DSU indicando la dirección y sentido "inline". El sentido indica cómo se debe practicar el "tap test".
- El dedo "anular", como consecuencia, indica la dirección y sentido "crossline", El sentido indica cómo se debe practicar el "tap test".

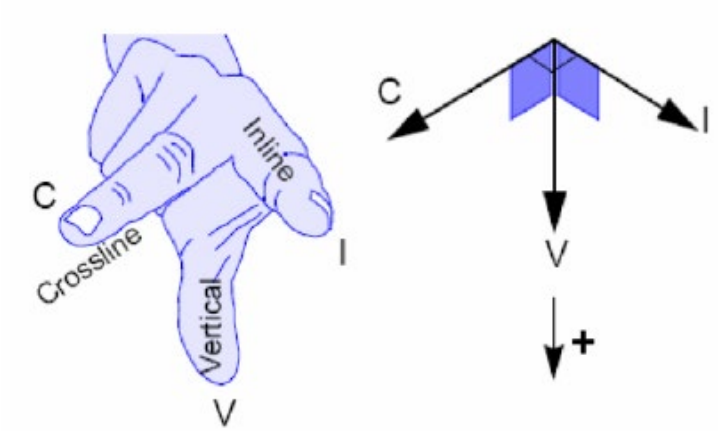


Figura 31, dirección y sentido para colocar y polarizar los sensores 3C [3]

El Sercel 408/428 y el "Tilt"

El Sercel 408/428 denomina como "Sensor Tilt Test" a dos test totalmente distintos:

a) Tilt Test para geófono.
b) Tilt test para DSUs.

a) Test de "tilt" para geófonos (sensor de imán permanente y bobina móvil)

El test de "tilt" en el Sercel 408 y 428, es equivalente al Geophone Response Test en el I/O System II.

Durante el test de tilt, la FDU del Sercel aplica un pulso de voltaje eléctrico a la ristra de geófonos conectada a esta, lo que provoca que sus bobinas se muevan hacia un extremo de su carrera (por convención se suspenden en el extremo superior), al finalizar la aplicación del pulso las bobinas caen y oscilan sobre sus resortes libremente, generando un voltaje eléctrico análogo a la velocidad de dicho movimiento.

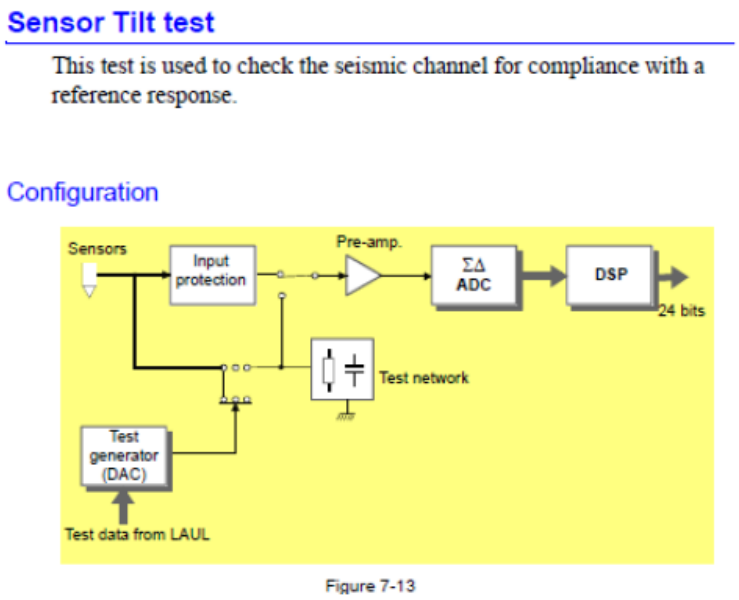


Figura 32: Diagrama en bloques de la FDU para: Sensor Tilt test, del manual del Sercel 428, USER 3 [3]

La figura 32 corresponde al diagrama en bloques de la FDU vinculada con la generación del pulso eléctrico (Test Generator) y posterior recepción de la señal de respuesta de la ristra.
Los valores de amplitud y tiempos de la señal eléctrica generada en la ristra, se compara contra similares valores tomados como referencia, que generalmente corresponden al de una ristra perfectamente plantada en el tendido sísmico; si la diferencia excede en un 5% a los valores de referencia (% seleccionable por el Cliente), se considera que la ristra tiene geófonos con "tilt" (geófonos mal plantados, volcados, con mucha inclinación).

Este mismo método es aplicado por el Geophone Tester SMT-200 para determinar las características técnicas de la ristra.

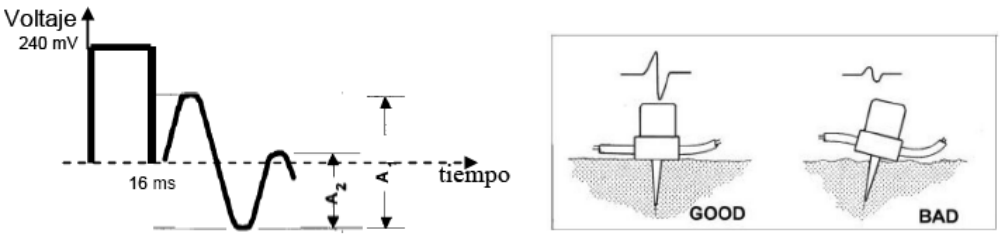


Figura 33, Pulso externo y respuesta al pulso

Nota: Para geófonos convencionales no existe en el Sercel 408/428 posibilidades de corrección del dato sísmico por "tilt", hay que accionar sobre la ristra defectuosa la cual tiene que ser re-plantada.

b) Test de "tilt" para DSU3 (3 sensores MEMS)

En la figura 34 se muestra la página del manual del Sercel 428, (DSU3 Test Functions, USER 3), donde se aclara que no se aplica ninguna tensión eléctrica sobre el sensor MEMS, sino que solamente se mide el voltaje de corriente continua (DC offset) generado por el MEMS debido a la fuerza de gravedad terrestre.

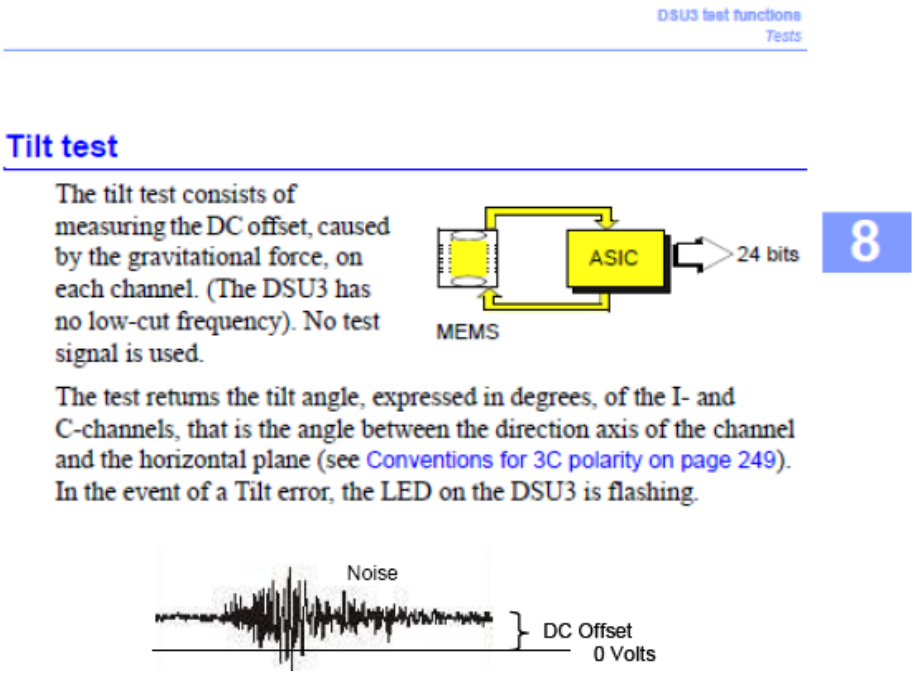


Figura 34, Introducción del DSU Tilt test [3]

Como evaluación de la lectura efectuada, el Tilt test calcula el ángulo de inclinación "θ" para cada una de las componentes del DSU3, de acuerdo a lo que veremos a continuación.

A manera de ejemplo, utilizando el artículo: "Another Look at MEMS sensor…and Dynamic Range" **(John Gibson and Roy Burnett,** Veritas DGC, Houston, Texas, U.S.), imaginamos como el Sercel 408/428 mide el ángulo de inclinación θ (tilt angle).

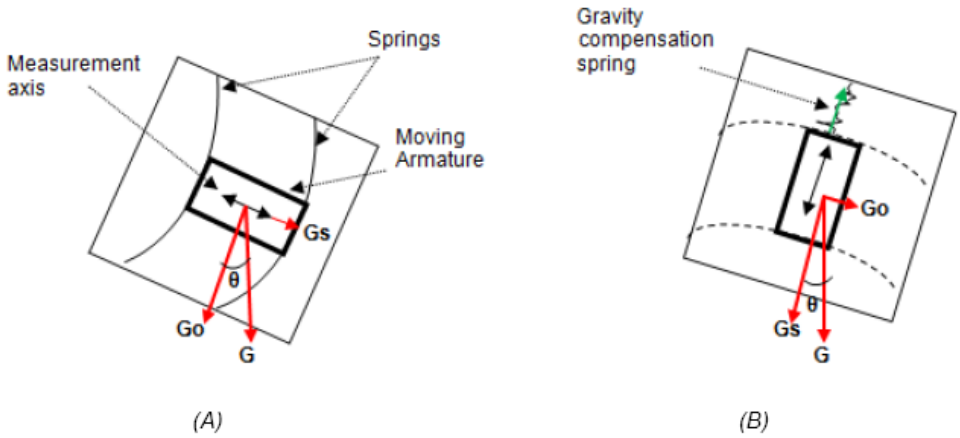


Figure 35, (A) Componente horizontal; (B) Componente vertical del DSU3 [3]

En la figura 35 se muestra un diagrama de dos MEMS de la DSU3 con cierto grado de inclinación con respecto al eje de gravedad: en (A) se representa una componente horizontal y en (B) la componente vertical.
En el caso (A) si no existiera "tilt", el valor de aceleración sensado (Gs) deberá generar un valor equivalente a 0 voltios (DC Offset = 0) y la componente de aceleración ortogonal (Go) será igual a la aceleración gravitatoria (G). Pero de existir un ángulo θ entre Go y G, las componentes de aceleración serán:

$$\text{y} \qquad \textbf{(I)} \qquad \begin{aligned} Go &= G \cdot \cos\theta \\ Gs &= G \cdot \operatorname{sen}\theta \end{aligned}$$

Entonces: $\operatorname{arc\,sen}(Gs / G) = \theta$

En el caso de la componente vertical (B), los DSU poseen la armadura del MEMS suspendida de un resorte que compensa la fuerza de gravedad, por lo tanto de no existir "tilt" la aceleración resultante sería:

Aceleración resultante = $B = Gs - G = 0$ (pues $Gs = G$)

Pero al existir un "tilt" de θº, ahora habrá una aceleración resultante distinta de cero:

$$\textbf{(II)} \qquad \begin{aligned} B &= Gs - G = G\cos\theta - G = \\ B &= -G(1 - \cos\theta) \end{aligned}$$

Entonces: $\arccos(B / G + 1) = \theta$

Nota: G es un valor conocido (9.81 m/s^2 a nivel del mar)

En base a las formulas anteriores John Gibson and Roy Burnett (ver artículo), calculan las curvas del Rango Dinámico que utiliza el dato sísmico en función del "tilt" del sensor que lo recepciona, en nuestro caso se trata de la componente vertical y las horizontales del DSU 3.

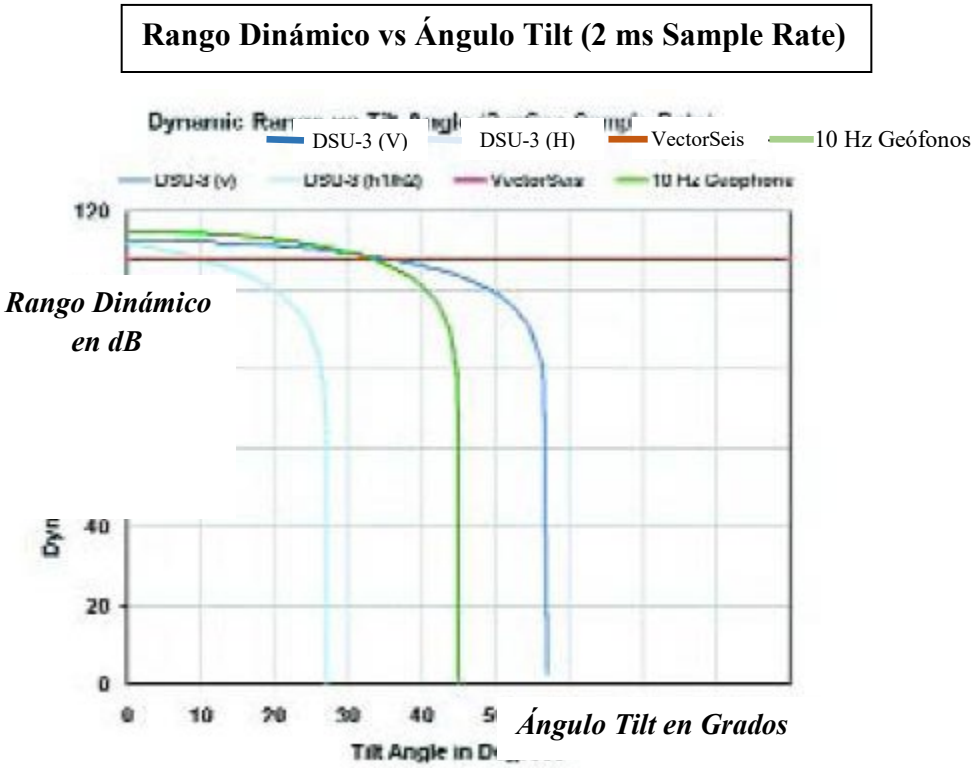


Figura 36: Degradación del Rango Dinámico en función del "tilt" del sensor [3]

En la figura 36 se encuentran las curvas mencionadas.

- 120 dB es el rango dinámico útil del Sercel 408/428 (prácticamente de cualquier registrador que utilice Sigma-Delta A/D Converter).
- Los MEMS VectorSeis (de ION). poseen un rango dinámico constante de 108 dB para cualquier "tilt" (curva violeta).
- Para los geófonos de 10 hz de frecuencia de resonancia, el rango dinámico cae rotundamente a partir de los 40º de "tilt" (curva verde).
- La componente vertical de los DSU supera a la del geófono convencional y el rango dinámico cae rápidamente a partir de los 55º de "tilt" (curva azul).
- Las componente horizontales de los DSU3 presentan la caída más intensa de rango dinámico, con una caída abrupta a partir de los 20º de "tilt" (curva celeste).

Nota: De acuerdo a lo anterior, consideraría importante utilizar la "DSU Tilt Correction" cuando procesamos las 3 componentes del DSU3, pero si solamente procesamos la componente vertical, no sería necesario emplear corrección de "tilt".

DSU Tilt Correction

El Sercel 428 tiene la posibilidad de compensar la amplitud de las componentes de los DSU en base a lo que vimos en el ítem anterior.

Seismic recording instrumentation

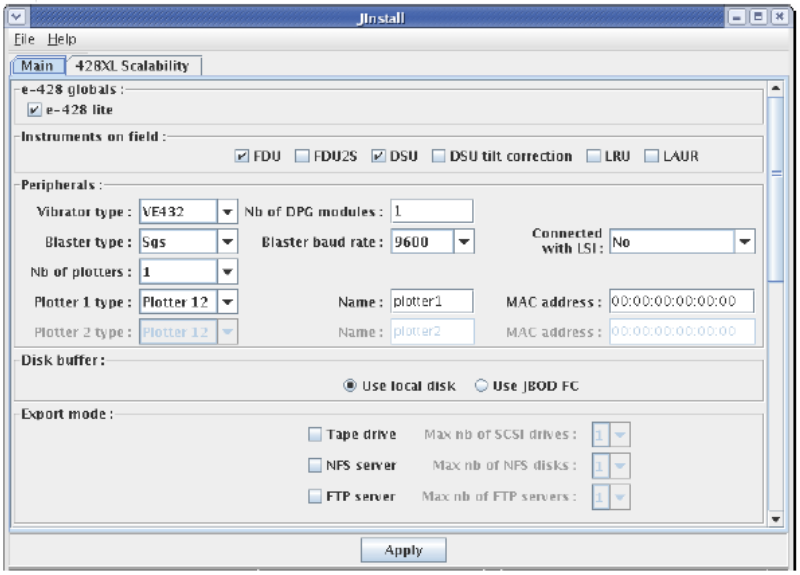


Figure 3-1 Install window ("Main" tab)

Figura 37, Install Menu del Sercel 428 [3]

En la figura 37 se observa el "Install Menu" del Sercel 428, donde los seteos indican que: se están adquiriendo datos sísmicos tanto con FDUs (con geófonos) como con DSUs. La opción "DSU tilt correction" no ha sido seleccionada.
Cuando la opción "DSU tilt Correction" es seleccionada, los ángulos de "tilt", calculados durante el "Tilt test" son utilizados en las siguientes fórmulas para corregir cada muestra de cada traza sísmica de acuerdo a que componente del DSU3 la ha adquirido (ver Manual del Sercel 428, User 3, Capítulo 9: Reference Information):

$$V' = a_1 V + b_1 I + c_1 C$$

$$I' = a_2 V + b_2 I + c_2 C$$

$$C' = a_3 V + b_3 I + c_3 C$$

Where:

V, I, C are the 3 components of the DSU3 acquired at the same time.

V', I', C' are the 3 components of the DSU3 after correction.

Los coeficientes: an, bn y cn contemplan los "tilts" calculados para las distintas componentes.

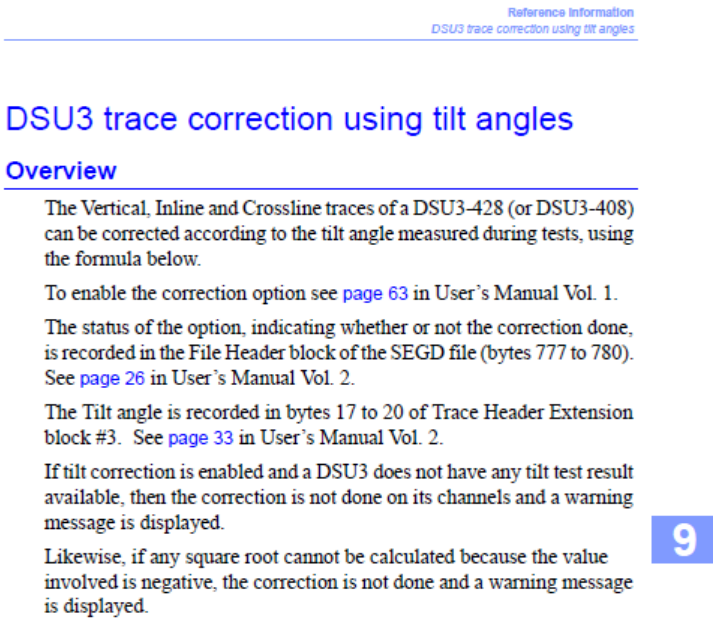


Figura 38, Parte del Manual del Sercel 428, User 3, capítulo 9 [3]

En la Figura 38 se copia parte del texto suministrado como referencia por Sercel, donde se destaca:

- Los ángulos de "tilt" calculados durante el test, son grabados en el "Header" de cada "file" en el "Trace Header Extension block #3", en los bytes 17 al 20.
- Si la "DSU Tilt Correction" fue o no seleccionada, queda registrado en el "File Header block" de cada "file", entre los bytes 777 a 780.
- Si la "DSU Tilt Correction" fue seleccionada pero no se realizó ningún "Tilt test", entonces el dato sísmico no es corregido y un mensaje de error es reportado en el display del Sercel 428.

Bibliografía consultada

1. *Sensor, geophone SM-4 specifications y arreglos..*
2. *Lineas de Transmisión, capacidades parásitas.*
3. *Sercel DSU manuals.*
4. *Q-Land specifications, Westerngeco.*
5. *Another Look at MEMS sensor…and Dynamic Range"* ***(John Gibson and Roy Burnett,*** *Veritas DGC, Houston, Texas, U.S.*
6. *Geophone Field Operation Manual, WesternGeco 2003.*

CAPÍTULO 6: EL INSTRUMENTAL DE ADQUISICIÓN NO TELEMÉTRICO

Introducción al sismógrafo

El sismógrafo o sismómetro, es un instrumento para medir terremotos o pequeños temblores provocados por los movimientos de las placas tectónicas o litosféricas o, como en nuestra profesión: para medir la respuesta del subsuelo a un micro-sismo inducido.

El primer sismógrafo fue inventado en 1842 por el físico escocés James David Forbes (Edimburgo: 1809 – 1868).

Los sismógrafos originales, se basaron en el principio de la inercia de los cuerpos: "todos los cuerpos tienen una resistencia al movimiento o a variar su velocidad". Por esta razón el movimiento del suelo puede ser medido con respecto a la posición de una masa suspendida por un elemento, que le permita permanecer en reposo por algunos instantes con respecto al suelo, cuando este se mueva por alguna razón. Esto es exactamente el fundamento del geófono estudiado anteriormente.

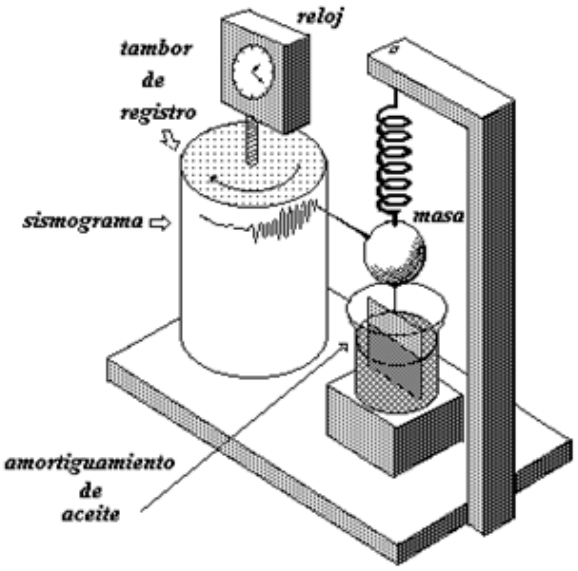


Figura 1, sismógrafo vertical [12]

La figura 1 muestra un sismógrafo vertical básico donde la masa inercial se encuentra sostenida por un resorte a una estructura solidaria con el suelo. Cuando el suelo se mueve la estructura transmite este movimiento al resorte y este transfiere con cierta demora el movimiento a la masa la cual, luego, empieza a oscilar sobre su posición de equilibrio. La masa posee una pluma que grafica sobre un papel solidario a la estructura, el movimiento relativo entre esta y la masa (denominado: sismograma); la masa luego oscilará sobre su posición de equilibrio a la frecuencia natural, determinada por la constante

elástica del resorte y la magnitud de la masa. Para amortiguar la oscilación masa-resorte, se sumergía una lámina colgada a la masa en un tambor de aceite, con la fricción placa-aceite se atenúa la amplitud de resonancia hasta detenerse por completo.

Como el movimiento del suelo abarca las tres dimensiones, existen sismógrafos horizontales donde una estructura solidaria al suelo, cuelga de un fino hilo a una gran masa. Con el movimiento del suelo la estructura se mueve al ritmo de este pero la masa, debido a su inercia, permanece estática y una pluma solidaria a la masa grafica el movimiento de la estructura. El hilo no permite el movimiento vertical de la masa.

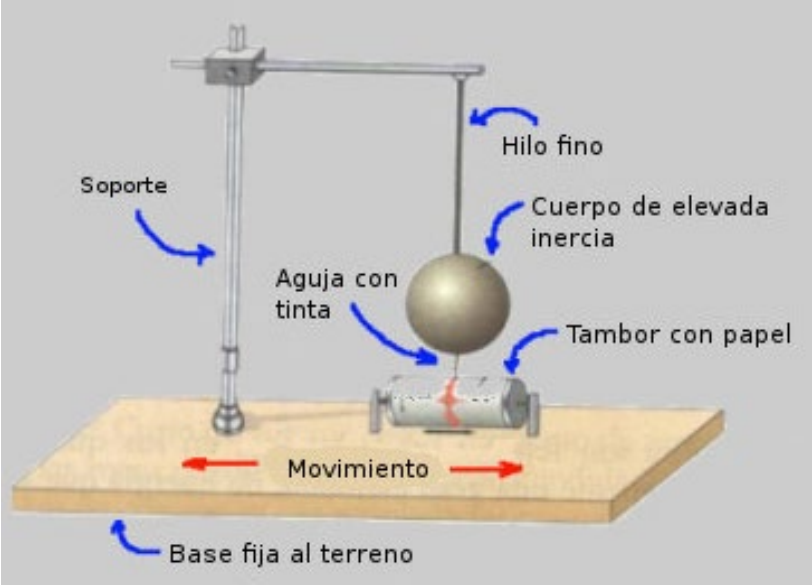


Figura 2, sismógrafo horizontal [12]

La onda sísmica convertida en voltaje eléctrico

Al capítulo anterior sobre las estaciones receptoras, se lo denominó como: "la primera etapa que constituye el Instrumental de Adquisición Sísmica", donde los geófonos basan su funcionamiento en principios similares a los de los primeros sismógrafos, y debido a la complejidad de obtener imágenes profundas del subsuelo, se le fueron sumando diferentes etapas para procesar y mejorar la señal sísmica recibida en dichas estaciones.

Ahora nuestra Onda Sísmica se ha convertido en un voltaje eléctrico análogo a la velocidad con que se ha movido el suelo donde el geófono se encuentra acoplado.

Las demás etapas que se fueron agregando al instrumental de adquisición, evolucionaron permanentemente a través de los años, debido a las crecientes necesidades de rescatar más datos escondidos en la información adquirida.

Tres etapas posteriores a la de recepción, se han mantenido a través de los años y una cuarta etapa se agregó cuando se comenzó a digitalizar el dato

sísmico (Conversión Analógica a Digital). Variaron las componentes pero no así los principios que las caracterizan:

- Preamplificación de las señales recibidas, para preservarla de los ruidos externos e internos a la electrónica utilizada y aumentar el rango dinámico del sismógrafo.

- Filtrado de las frecuencias temporales indeseadas para separar la señal útil de algunos ruidos característicos.

- Grabación de los datos adquiridos en el mejor medio disponible para memorizarlos y poder seguir procesándolos.

Historia reciente del Instrumental Sísmico

Recordemos que hemos recibido la energía acústica remanente, a un micro-sismo generado por una fuente de energía sísmica y que ha perdido por el camino muchas componentes de frecuencia y se le han incorporado ruidos coherentes y aleatorios que la superan en magnitud en casi el total de su espectro.

La estación receptora (etapa 1), transformó la respuesta del terreno en un voltaje eléctrico análogo de muy baja amplitud y muy baja frecuencia, a la que se le añaden ruidos de diferentes procedencias. Por lo tanto debemos añadir etapas para: amplificar la señal sísmica, filtrar las frecuencias indeseadas, convertirla en muestras discretas y luego en dígitos binarios y someterla a diferentes procesos matemáticos para mejorar la relación señal-ruido.

Estas etapas variaron a través de los años, evolucionando con la electrónica hasta nuestros días.

Sismógrafo analógico sin grabación magnética

Los primeros sismógrafos que utilizó Y.P.F. en Argentina fueron equipos electrónicos valvulares, que se conectaban a un cable de 24 pares, donde unas clavijas seleccionaba 12 de los 24 pares disponibles para amplificar y filtrar individualmente los canales seleccionados, para luego impresionar a un papel fotográfico. Este equipamiento era montado sobre un camión que también oficiaba de laboratorio fotográfico, para revelar el papel sensible.
Estos sismógrafos amplificaban mediante válvulas la señal recibida, filtraban gran parte de las bajas frecuencias para atenuar el "ground roll" y las altas frecuencias para filtrar ruidos debido al viento (en la Patagonia especialmente), atenuando también componentes importantes de señal a criterio del observador quien era prácticamente el geofísico del grupo sísmico. En general estos sismógrafos fueron utilizados en la época de la adquisición convencional (no existía por entonces el "stacking"), y el cambio de cables y posición del camión sismógrafo eran muy frecuentes.

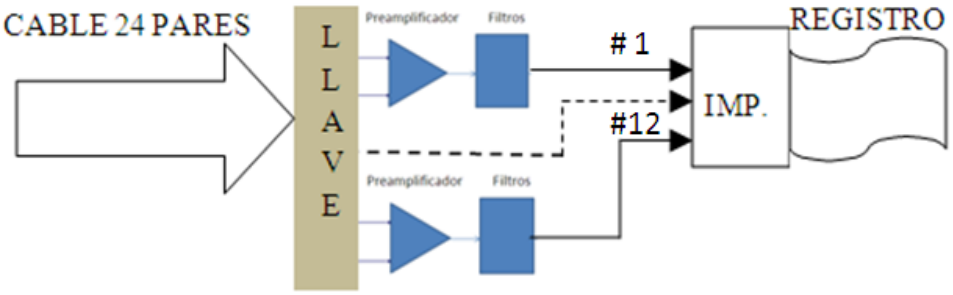


Figura 3, sismógrafo de 12 canales con registro de papel [10]

Más tarde y en un verdadero esfuerzo de voluntad y habilidad, los registros de papel eran colocados sobre una tabla móvil, que se deslizaba sobre un carro movido a muy baja velocidad por un motor, mientras que un operador, tratando de dibujar la traza sísmica que se deslizaba frente a él, movía verticalmente una especie de lápiz que en la parte posterior interactuaba como elemento permeable, modulando el flujo magnético de un transformador. De esta manera: traza por traza, registro por registro, de los papeles que se pudieron recuperar, fueron grabados en cintas magnéticas de Amplitud Modulada (AM) varias líneas 2D para someterlas, a un todavía precario procesamiento analógico.

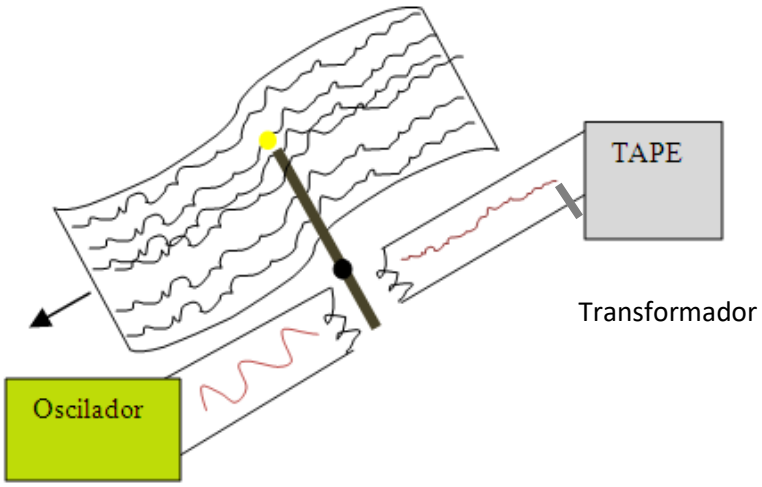


Figura 4, convertir la traza del papel a traza en cinta magnética [10]

Sismógrafo analógico con grabación magnética

El comienzo del apilamiento de trazas (stacking), produjo una gran revolución técnica en la adquisición sísmica y fue necesario mejorar las prestaciones del sismógrafo. Se aumentó la cantidad de canales adquiridos a 24, los cables "multipares" aumentaron su capacidad a 36 y 48 pares para poder abastecer la mayor cantidad de trazas necesarias.

En la década del 30, se inventó la grabación magnética y el instrumental sísmico lo incorporó inmediatamente ya que fue una manera fundamental y permanente de almacenar información. Así se empezó a grabar la onda sísmica en anchas cintas magnéticas en amplitud modulada (AM) y posteriormente en frecuencia modulada (FM).

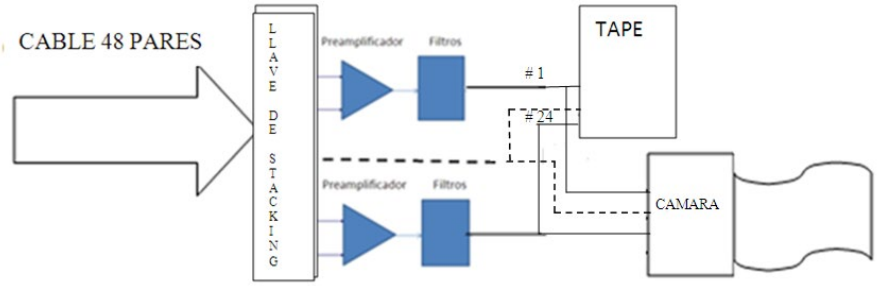


Figura 5, sismógrafo de 24 canales con grabación magnética [10]

Grabación Magnética

Comencemos analizando los principios de la grabación magnética, aunque pertenezca a la última etapa del instrumental de adquisición, porque la "grabación magnética analógica" nos permite recrear la historia de la evolución del instrumental y porque los principios allí involucrados, son similares a los de la grabación magnética digital y aún más complejos.

La cinta magnética es una cinta de plástico no deformable (generalmente de poliéster) donde se le ha adherido una resina con una gran cantidad de limaduras de óxido de hierro (o de cromo o de ferrocromo) en forma homogénea, es decir que se han agregado dipolos magnéticos o pequeños imanes de alta remanencia orientados al azar (en una cinta virgen), siendo el magnetismo total: "nulo".
La cinta magnética se mueve a una velocidad constante "v_c" sobre una cabeza grabadora (electro-imán de Permalloy), y esta cierra el circuito magnético del electro-imán en la zona de la abertura "d" (o entrehierro o "gap", ver figura 6).

Si por la bobina del electro-imán circulase una corriente "i(t)", se produciría un flujo magnético "Φ(t)" que al cerrarse sobre la cinta produciría una orientación de dipolos magnéticos proporcional a la magnitud de "i(t)". Por lo general se utiliza una fuente de corriente proporcional al voltaje eléctrico de la señal que se quiere grabar: "Ve":

$$i(t) = K.Ve(t)$$

y como $$\Phi(t) = k.i(t)$$

$$\Phi(t) = C.Ve(t) \quad \textit{donde } C = k.K$$

Como vemos la magnetización es proporcional al voltaje de entrada.

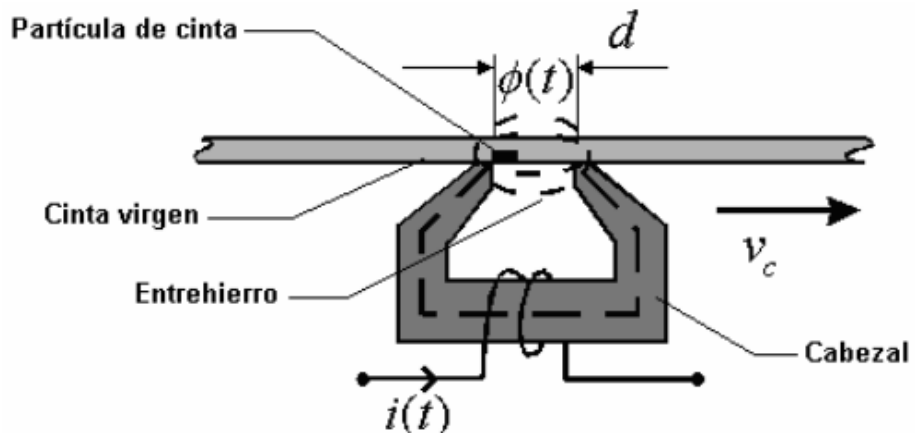


Figura 6, grabación magnética [1]

Si Ve (t) fuese sinusoidal: Ve (t) = V_E.sen wt

$$\Phi (t) = C.V_E.\text{sen } wt$$

Los dipolos magnéticos de la cinta poseen una alta remanencia y el electro-imán posee una baja remanencia. Esto lo explica la curva de histéresis de los materiales magnéticos, figura 7.

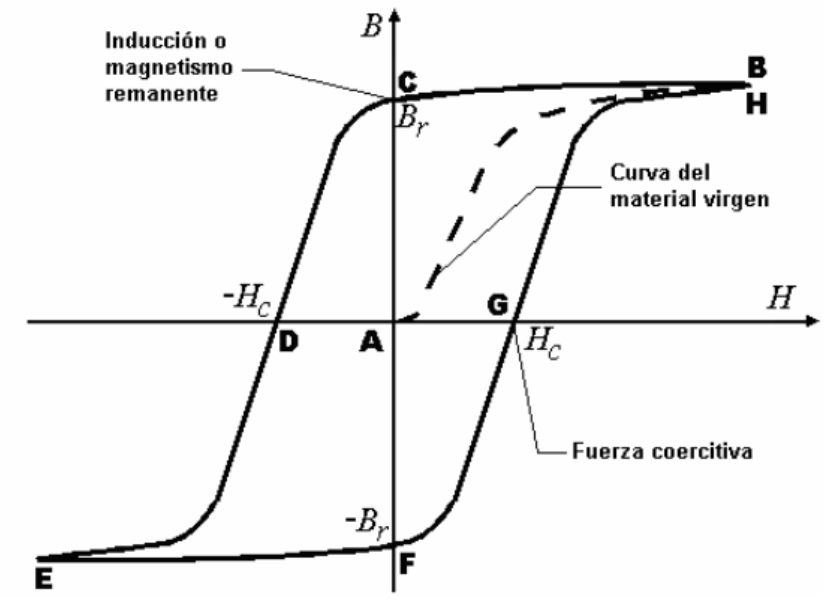


Figura 7, Curva de Histéresis magnética {2]

Cuando el material magnético es virgen, la corriente "i(t)" que circula por la bobina, genera un Campo Magnetizante "H" que produce una imantación "B" partiendo de un valor "0" (punto A) hasta un valor "Hmax/Bmax" o de saturación, donde todas las partículas magnéticas están con la misma orientación impuesta por la excitación.

Si disminuimos la corriente aplicada a la bobina (disminuye el valor de H), comienza a disminuir la inducción B, pero no lo hace recorriendo el mismo

camino B-A, porque parte de las partículas magnéticas vuelven al desorden primitivo (se desmagnetizan) y otras quedan orientadas como si aún actuara el campo de la bobina. Cuando la excitación magnética es cero i(t) = 0 (H=0), la inducción conserva un valor "Br". Este efecto se denomina: "**remanencia**".

Por lo anterior, necesitamos que los dipolos de la cinta magnética tengan una alta remanencia para que memoricen la excitación. Por el contrario, el electroimán debe tener una remanencia muy baja para no alterar la grabación.

Si queremos borrar el valor de inducción remanente, deberemos aplicar un campo magnetizante de polaridad opuesta al original de valor: "-Hc", para anular la inducción "B" que se denomina: **"fuerza coercitiva"** (tramo CD en la figura 7).

Si seguimos aumentando el valor de "H" con polaridad opuesta, llegamos a valores de "–Hmax/-Bmax" iguales y opuestos en polaridad a los excitados originalmente (tramo DE en la figura 7).
Si volvemos a disminuir la corriente de la bobina hasta "0" (tramo EF) conservaremos un valor de inducción "-Br" y para anular esta remanencia deberemos aplicar un campo "Hc" (tramo FG).
Se aprecia en la figura 7 que el camino que ha tomado la última magnetización, es totalmente distinto al inicial que correspondía al material virgen.

Si el valor máximo del campo magnético H no es lo suficientemente grande, como para llegar al punto de saturación, el regreso se hará por un lazo de histéresis más pequeño, dando lugar a una Br de valor menor. De modo que la intensidad máxima del campo en la magnetización de cada porción de cinta resultará proporcional al valor de Br, que por otro lado es lo único que queda almacenado de la señal.

El problema es que Br es proporcional al valor máximo del campo, pero no directamente proporcional, o sea que la relación no es lineal.

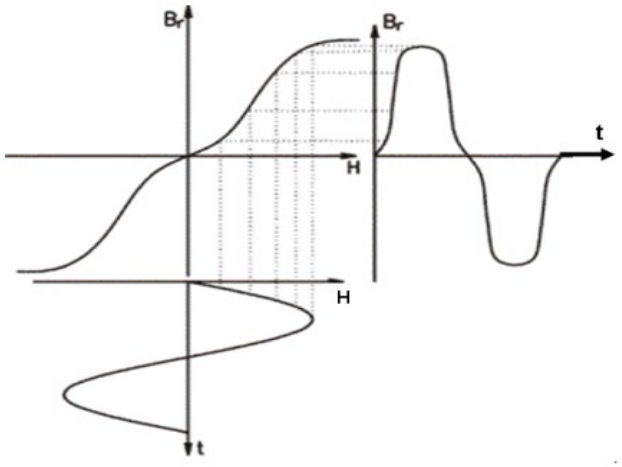
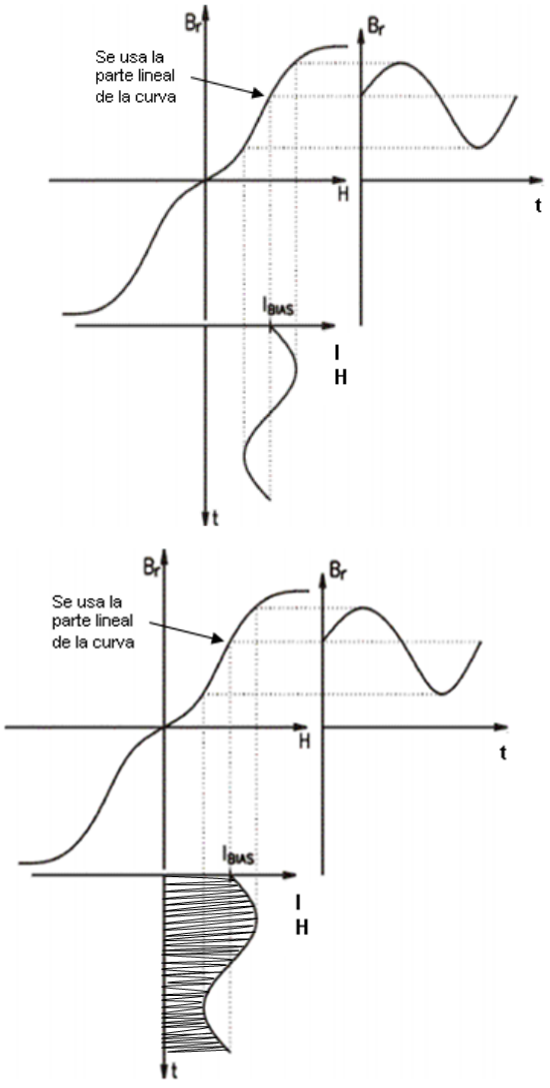


Figura 8, Distorsión no lineal producida por la curva de transferencia entre el campo magnético H y B [2]

Como vemos en la figura 8, la no linealidad de la curva H-B generaría que se grabe la señal distorsionada.
Para eliminar esta distorsión se utiliza solamente la parte lineal de la curve H-B, agregándole:

1. O una corriente continua de polarización (Ibias), con lo cual generamos un campo magnetizante H constante.

2. O una señal de radiofrecuencia o portadora, modulada por la señal a ser grabada o en amplitud (AM) o en frecuencia (FM).



(a) *(b)*

Figura 9, (a) Bias de corriente continua, (b) Bias de radiofrecuencia modulada en AM [1]

Reproducción magnética

La lectura de cinta magnética es realizada por una cabeza independiente cercana a la de grabación, pero las condiciones se modifican. El campo magnético remanente que permanece en la cinta, al moverse a velocidad constante "v_c" frente al entrehierro, produce en el circuito magnético del cabezal un flujo Φ'(t) dando origen a una fuerza electromotriz inducida (f.e.m.) "Vs" que es proporcional a la derivada del flujo magnético Φ´(t).

$$Vs = -\frac{d\,\Phi'(t)}{dt} = -\frac{d}{dt}(C.Ve.\text{sen } wt) = -\,w.C.Ve.\cos wt$$

Siendo $w = 2\pi f$

El valor máximo inducido será entonces: $Vs = w.C.Ve$

Esta fórmula nos dice que la magnitud de la señal inducida "Vs", es proporcional a la frecuencia de la señal grabada, es decir: una señal sinusoidal de 40 Hz generara un Vs dos veces superior a una señal sinusoidal de 20 Hz, grabadas con la misma amplitud.

Para compensar esta situación, se recurre a procesos de ecualización, es decir circuitos que graban amplificando más las frecuencia más bajas y menos las frecuencia mayores.

Por último debemos considerar que: la velocidad de deslizamiento de la cinta magnética en el proceso de grabación "v_c", debe ser igual a la velocidad de reproducción de esa misma cinta.

Otro dato importante es que: la velocidad "v_c" debe ser suficientemente alta y la distancia del entrehierro o gap "d" lo suficientemente pequeña, para que el tránsito de los dipolos magnéticos de la cinta respondan a la excitación instantánea y no se altere su remanencia durante el resto del recorrido de la distancia "d" del entrehierro.

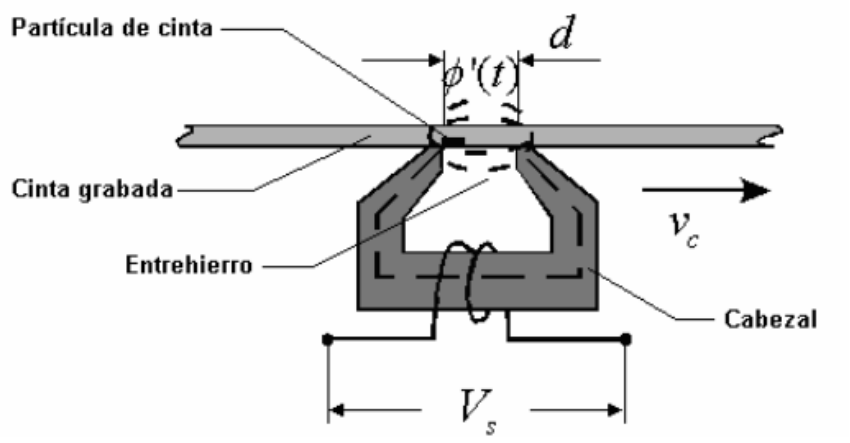
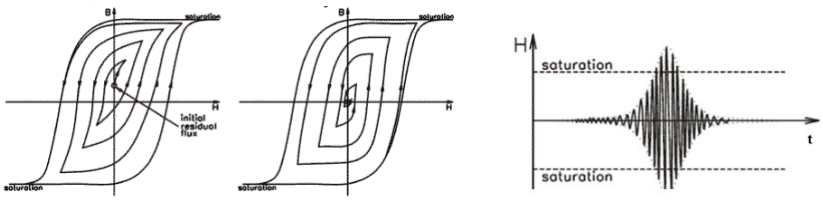


Figura 10, reproducción Magnética [1]

Borrado Magnético

Existe también una cabeza de borrado (erase head**)** independiente de la de grabación y de la de reproducción, la cual es alimentada con la señal de alta frecuencia, usada para la polarización. La frecuencia del generador de borrado se encuentra entre 70KHz y 150KHz para diferentes equipos, pero para cada equipo la frecuencia se mantiene estable. La señal de borrado es relativamente fuerte de modo de asegurarse que la cinta es enviada a saturación cuando pasa por la cabeza de borrado (de varias decenas de voltios).

Cuando la cinta no es virgen, posee magnetismo remanente que debe ser cancelado para no sumar ruido a otra nueva grabación sobre dicha cinta. Para obtener una cinta magnéticamente neutra debemos primero llevarla a la saturación de sus dipolos en ambas polaridades mediante el campo magnético de alta frecuencia para luego ir disminuyendo la amplitud para que los lazos de histéresis sean cada vez menores, hasta alcanzar el punto de remanencia cero.



(a) Aumento del campo *(b) Disminución del campo* *(c) Alta frecuencia de borrado*

Figura 11, proceso de borrado magnético [1]

En definitiva se necesitaban 2 cabezas por pista, una para grabar y otra para reproducir. También existía una cabeza de borrado, aunque muchas veces las cintas se borraban externamente al grabador para asegurar su neutralidad magnética.

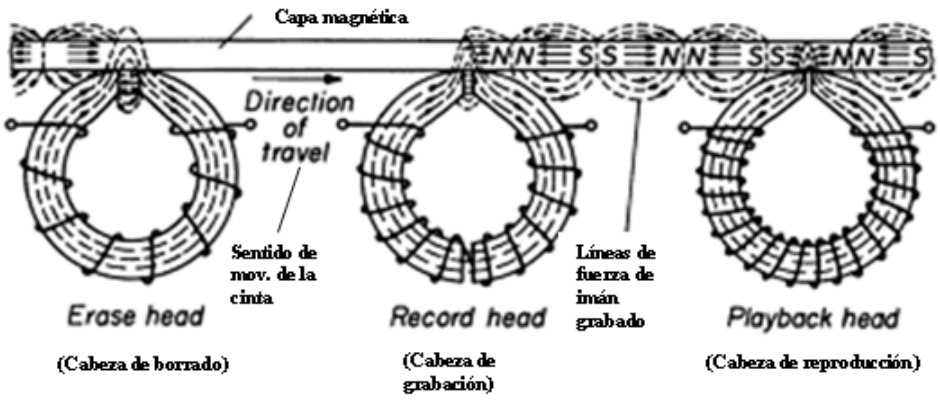


Figura 12, las tres cabezas de un sistema de grabación magnética analógico. [1]

Conclusión: La grabación magnética digital resulta mucho más sencilla que la analógica, pero los fundamentos físicos son los mismos.

Digitalización de la señal sísmica y del desarrollo del procesamiento sísmico:

A comienzos de 1970, YPF importó a la Argentina el primer sismógrafo digital: el DFS-3 de Texas Instruments, y entonces la señal sísmica comenzó a ser grabada en números binarios (digitalmente), obtenidos a partir de muestras discretas de la señal analógica. Podemos definir a esta etapa como el "Comienzo del Procesamiento Matemático del Dato Sísmico" ya que permitió el empleo directo de la Teoría de las Comunicaciones a la sísmica y Fourier se convirtió en geofísico. Hasta entonces, el fenómeno de adquisición sísmica, desde el arreglo de Geófonos hasta la grabación magnética, era "analógico".

Aquí se agregan dos nuevas etapas al instrumental sísmico; la del **"Muestreo"** y el de la **"Conversión Analógica a Digital"** (Conversor A/D) y posteriormente se le agrega una etapa que precede a las dos anteriores: el **"Amplificador de Ganancia Instantánea"** (IFP).
Cada una de estas etapas será tratada individualmente más adelante.

Pero todavía el voltaje eléctrico generado en los Geófonos era expuesto a un largo viaje a través de un par de cables eléctricos, que conjuntamente con otros pares vecinos, lo conducían hacia el camión sismógrafo. Inducciones electromagnéticas, pérdidas de aislamiento entre pares, entre estos y tierra (crossfeed-leakage), ruido por microfonismo, etc. degradaban el poco rango dinámico que el instrumento manejaba. Si bien los objetivos geofísicos del momento eran alcanzados y la nueva tecnología electrónica se aplicaba a la exploración comercial de hidrocarburos, siendo esta la segunda o tercera industria en importancia luego de la militar, la cantidad de estaciones sísmicas que podían ser conectadas a un cable multipar resultaba limitada. Los sismógrafos digitales no telemétricos llegaron a registrar hasta un máximo de 120 canales simultáneamente. Podemos recordar entre estos al MDS-10 (Mandrel Digital System) y al DFS-V (Texas Instruments Digital Field System).

Telemetría aplicada a la adquisición sísmica y el comienzo de la sísmica 3D

Luego siguieron los sismógrafos telemétricos, estos acercaron la electrónica a los geófonos del campo. El sismógrafo quedaba distribuido en la línea de registración y c/caja electrónica preamplificaba, filtraba, muestreaba y convertía en dígitos binarios a las señales recibidas de las estaciones receptoras más cercanas. En definitiva la señal eléctrica recorría ahora menor camino quedando menos expuesta a los factores anteriores (entre 6 a 8 canales por caja manejaban los registradores más comunes). Los datos digitalizados eran transmitidos telemétricamente vía cable o vía radio

hacia la Central Electrónica. Con esto se logró incrementar la cantidad de canales de adquisición sísmica y se hizo posible la "Registración Sísmica 3D". Entre los Sismógrafos que pertenecieron a esta camada los más conocidos en Argentina fueron: MDS-16 de Mandrel-Geosource, DFS-VII de Texas Instruments, Sercel 368 y el System I de I/O.

Aquí podríamos añadir a la **"Telemetría"** como una nueva etapa del instrumental sísmico, la cual separa a las primeras etapas de las ultimas del proceso de adquisición.

Conversión AD Sigma Delta y optimización del muestreo temporal

Otro momento trascendental en la evolución de la adquisición sísmica lo constituyó la introducción de la tecnología Sigma Delta, que reemplazó al Filtrado Antialias Analógico, al Amplificador de Ganancia Flotante Instantánea (IFP) y al Conversor Analógico Digital tradicional de 14 Bits por un Conversor A/D de 24 Bits de muy alta velocidad de muestreo, evitando el filtrado analógico Antialias (ahora el filtrado es digital), aumentando el Rango Dinámico del Sistema y el ancho del espectro de la señal sísmica adquirida. Como consecuencia directa de la eliminación de la electrónica que involucraba a esas etapas, se redujo el volumen de las unidades de campo y el consumo eléctrico asociado, permitiendo incrementar aún más la cantidad de canales disponibles y haciendo más efectiva a la Sísmica 3D por aumento de cobertura y precisión en el dato obtenido (Vision, I/O System II - Image, Sercel 388).

Aquí se reemplazó la etapa de Muestreo y la de la Conversión A/D por el Conversor Sigma Delta, que incluye y supera ampliamente a esas dos etapas.

Internet aplicado a la adquisición sísmica

La tecnología de Internet, generó protocolos de transmisión telemétrica de redes muy eficientes (protocolos TCP/IP) y esta tecnología se aplicó a la adquisición sísmica. Las estaciones sísmicas de campo se transformaron en terminales, las cajas de cruce de línea en "routers" y la Central Electrónica en el Servidor Principal del sistema. Con esto se logró un mejor manejo operativo de las estaciones sísmicas de campo con relación a su Central Electrónica, y por lo tanto podemos todavía controlar más Estaciones Sísmicas. Sercel 408/428, System IV, Aram.Aries fueron algunos de los sistemas más utilizados.

El concepto de red (network), cambió la dinámica de la adquisición, de tal manera que funciones que debían ser desarrolladas inteligentemente por el Operador del instrumental, ahora se realizaban automáticamente.

Sistemas Nodales

Con la tecnología anterior, podemos manejar gran número de canales, quizás unos 10.000 canales simultáneamente en tiempo real, con un conveniente muestreo temporal que permite un correcto filtrado de frecuencias. No sucede lo mismo con el filtrado espacial, continuamos adquiriendo datos sísmicos con una separación entre estaciones muy grande (25-50 metros) y esto no permite un adecuado muestreo de ruidos superficiales dejando energía de ruido aliada con el dato sísmico. La sísmica actual y futura, emplea-empleará estaciones receptoras con un solo receptor (Single Sensors o Point Receivers) distanciados a muy corta distancia (2,5 a 10 metros), la adquisición y procesamiento se integrarán ya que el dato final grabado dependerá de un pre-proceso de agrupamiento digital de estaciones sísmicas. Los "Sistemas Nodales" se crearon en parte para mejor implementar la recepción puntual del dato sísmico, aunque no mejoran el rango dinámico de la señal adquirida (ver Sistemas Nodales).

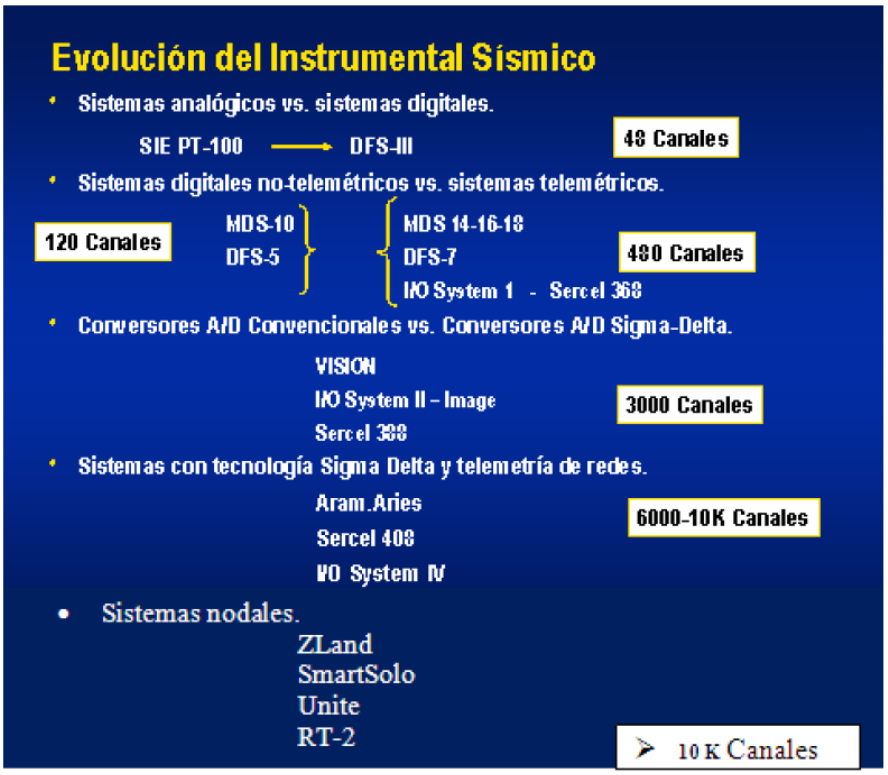


Figura 13, Evolución del instrumental de adquisición sísmica [10]

El Preamplificador de Entrada

Constituye la segunda etapa del instrumental sísmico y recibe el voltaje eléctrico generado en la estación receptora. El preamplificador de entrada, se ha mantenido incólume en todo el instrumental mencionado variando sus componentes electrónicos y no así sus principios.

Como vimos en el capítulo sobre Estaciones Receptoras, los sensores (geófonos o acelerómetros), están conectados a cables con salidas

balanceadas, es decir que no se vinculan a ningún potencial eléctrico común (ejemplo: tierra); las señales llegan al Preamplificador en "modo diferencial" como se muestra en la figura 14.

Las inducciones magnéticas externas (líneas de electricidad, radios, relámpagos) se inducen en un cable conductor en "modo común", es decir que poseen con tierra (ground) un polo común.

Vemos en la figura que poseyendo un amplificador que amplifique solamente diferencias de voltajes y atenué voltajes similares, filtraríamos algunos ruidos muy inconvenientes para el procesamiento de la señal. Si aún esa diferencia la amplificamos sin introducirle demasiado ruido electrónico (propio de los circuitos electrónicos), podemos considerar que hemos rescatado a la señal sísmica para tratar de limpiarla de otros ruidos y grabarla en el medio más conveniente.

La figura 14 corresponde a la etapa de Preamplificación del I/O System 2, que posee cuatro valores de amplificación seleccionables (12, 24, 36 y 48 dB). En la mayoría de los casos los valores de voltajes que genera la señal sísmica, van desde algunos microvoltios (μV), hasta algunos voltios, dependiendo de los receptores empleados, de la distancia a la fuente de emisión de los mismos y de los ruidos cercanos. También apreciamos que la frecuencia de la señal es muy baja (cercana a continua) y los amplificadores deben ser muy especiales para no confundir señal a amplificar con polarizaciones de CC (corriente continua) que se emplean para alimentar a las componentes electrónicas.

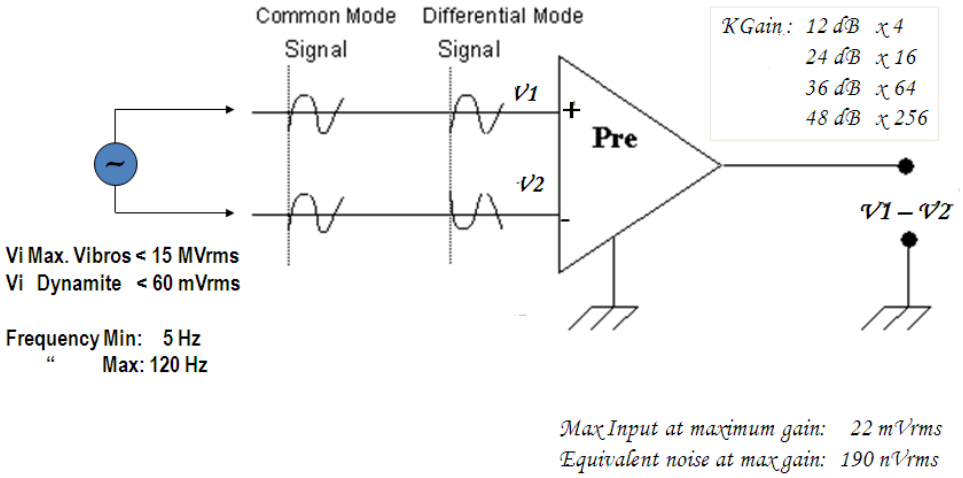


Figura 14, Preamplificador de Entrada del Sistema I/O 2 [10]

Veamos como un circuito puede amplificar diferencias de voltaje y atenuar voltajes similares.

$$(I) \qquad V_0 = A_d\,(V_1 - V_2)$$

Consideremos: $A_d = 1$; $V_1 = 100\ \mu V$; $V2 = -100\ \mu V$,

Entonces: $V_0 = 200\ \mu V$

Si ahora: $V_1 = 300\ \mu V$ y $V_2 = 100\ \mu V$

Entonces: $v_0 \neq 200\ \mu V$

En la práctica no puede cumplirse estrictamente la ecuación anterior porque, en general, la salida no solo dependerá de la señal diferencia sino también del valor medio denominado: "señal de modo común" (V_c).

$$V_c = ½ (V_1 + V_2)$$

El Amplificador Diferencial es el que mejor se comporta en el manejo de señales débiles, como sabemos que es la señal sísmica. La composición y diseño electrónico del Amplificador Diferencial (figura 15), define importantes especificaciones del Instrumental Sísmico, como ser: Ruido Interno del Sistema de Adquisición Referido a la Entrada (EINT), Rechazo de Modo Común (CMRR) e Impedancia de Entrada a la Central Electrónica. También al Amplificador Diferencial, es utilizado en casi todos los amplificadores lineales de circuitos integrados, filtros activos y en muchos amplificadores realimentados, por lo que le dedicaremos un estudio un poco más profundo a sus características.

La figura 15 muestra un Amplificador Diferencial Básico, donde suponemos que existe una simetría perfecta, es decir que los transistores (Q1 y Q2) y el resto de las componentes son idénticos.

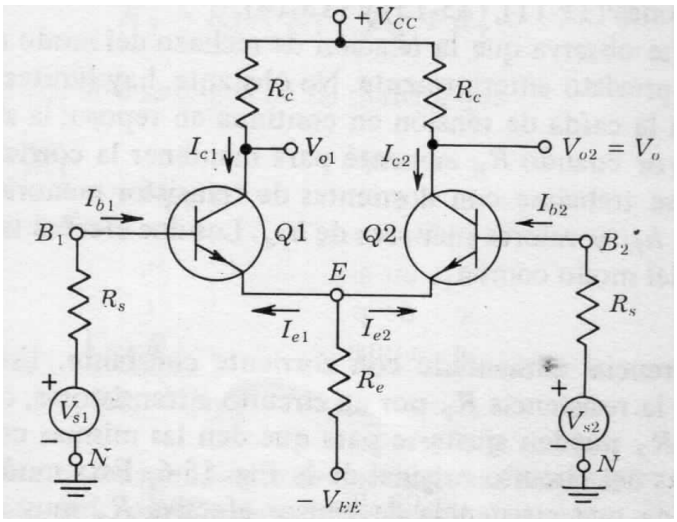


Figura 15, amplificador diferencial básico [6]

Se trata de un amplificador diferencial acoplado por emisor que se conecta a una resistencia de emisor muy grande "Re".

Si: $Vs_1 = Vs_2 = Vs$

$Vd = Vs_1 – Vs_2 = 0$

Vemos que: $V_0 = V_{02} = Ac.Vs$ (amplificación común por señal de entrada)

Si: $Re = \infty$

Entonces: $Ie_1 = Ie_2 = 0$

Como: $Ib_2 << Ic_2$ (la corriente de base es mucho menor que la de colector)
Entonces: $Ic_2 \approx Ie_2 + Ib_2 = 0$
Por lo tanto: $V_0 = 0$
Entonces $A_C = 0$

En un circuito simétrico y para Re =∞, la relación de rechazo de modo común es infinita.
Existen limitaciones prácticas para colocar una Re muy grande, ya que tienen que mantenerse las condiciones de polarización en continua de los transistores en reposo y debería aumentarse el valor de V_{EE} para mantener la corriente de reposo con el aumento de Re.

En la práctica se utiliza un transistor (Q3) trabajando como generador de corriente constante en lugar de Re, tal como lo muestra la figura 16, donde las resistencias R1, R2 y R3 pueden ajustarse para que se den las mismas condiciones de reposo para Q1 y Q2 que las del circuito original y a su vez proporciona una resistencia de emisor muy elevada.

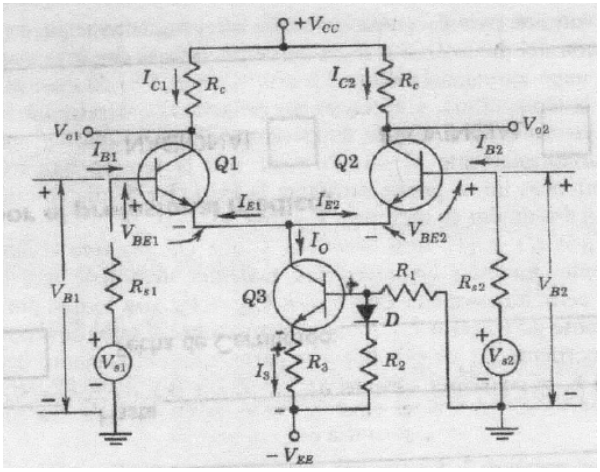


Figura 16, amplificador diferencial con un generador de corriente constante [6]

Conclusión:

Los sistemas actuales logran rechazo de señales en modo común mayores a 100 dB:

CMRR > 100 dB (más de 100.000 veces)

El ruido que genera esta etapa es "referido a la entrada", para analizar el instrumental como si todas las señales y ruidos se producen en el exterior al mismo. Los sistemas actuales poseen valores de ruidos del orden de:

EINT < 0,250 μV

Filtrado Analógico

Un filtro es un sistema que permite el paso de señales eléctricas a un rango de frecuencias determinadas e impide el paso del resto.

El filtrado analógico recién se dejó de aplicar con el advenimiento del Conversor Sigma Delta de 24 bits, donde resulta mucho más eficiente y práctico el filtrado digital de la señal convertida. Igualmente se emplean filtrados analógicos no muy complicados en diversas etapas del instrumental pero estos no presuponen el corrimiento de fase de la señal sísmica.

Describiremos esta etapa, ya superada, que caracterizaba a los sistemas de adquisición pre-Conversión AD Sigma-Delta.

Inmediatamente después del Preamplificador de Entrada, los sismógrafos convencionales tenían el Filtrado Analógico, para atenuar componentes de frecuencias no deseadas, generalmente pertenecientes a ruidos. Por ejemplo en bajas frecuencias el "Ground roll" suele ser de gran magnitud y se solapa con las componentes de la señal; en altas frecuencias el viento produce ruidos en forma directa o indirecta que también suele solaparse con las componentes de la señal; las líneas de transmisión eléctrica poseen una frecuencia de 50 o 60 Hz, por lo tanto están dentro del espectro sísmico y se empleaban filtros bien sintonizados denominados: "Notch Filter" (o filtro corta banda) para atenuar esta frecuencia.

Se debía actuar sobre estos ruidos para que no ocuparan espacio en el pequeño "Rango Dinámico" disponible en el Converso AD (13 bits +signo = 84 dB de Rango Dinámico).

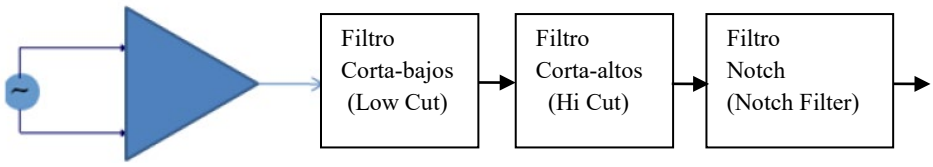


Figura 17, Preamplificador de Entrada seguido por las etapas de filtrado analógico [10]

Filtros Ideales

Los filtros ideales son los que permiten eliminar las frecuencias a partir de una denominada "frecuencia de corte" o de una banda de frecuencias de corte.

En la figura 18 se muestran los tres tipos de filtros (ideales) utilizados en el instrumental sísmico:

- Filtro corta-bajos: La figura 18 (a) muestra una frecuencia de corte de 10 Hz eliminando las frecuencias inferiores a esta, inclusive la de 0 Hz (DC o Corriente Continua). Antiguamente, cuando el Rango Dinámico del instrumental era muy bajo (60 dB por ejemplo), se

empleaba para tratar de atenuar componentes de "ground roll", a costa de atenuar señal sísmica.

- Filtro corta-altos: La figura 18 (b) muestra una frecuencia de corte de 125 Hz, eliminándose las frecuencias superiores a esta. Antiguamente se ajustaba la frecuencia de corte para atenuar ruidos de alta frecuencia (viento por ejemplo) y, con el advenimiento del "muestreo de la señal para su digitalización", se lo utiliza como "filtro anti-alias", para atenuar frecuencias de las bandas laterales generadas en el proceso de muestreo.
- Filtro Notch: Es un filtro corta-banda muy estrecho, tendiente a eliminar la frecuencia inducida en nuestro registrador, por las líneas de alta tensión eléctrica (50 Hz en nuestro país).

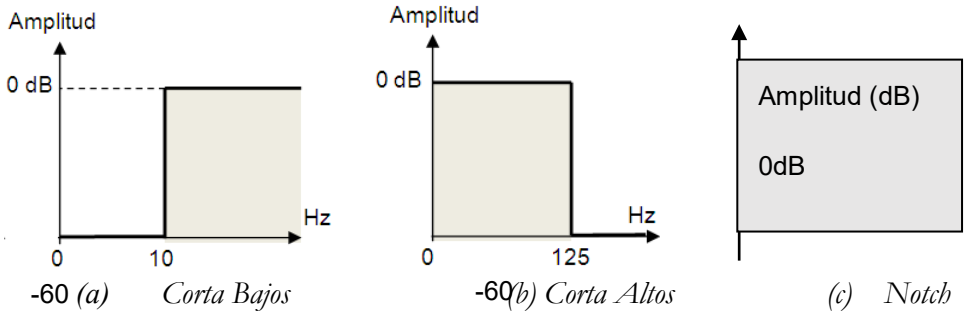


Figura 18, filtros ideales [10]

Generalmente los Espectros de Amplitud se expresan en "decibelios", es decir en dB:

$$\text{Amplitud en dB} = 20 \log \frac{\text{Amplitud de salida}}{\text{Amplitud de entrada}}$$

Si la amplitud de salida del filtro es igual a la amplitud de entrada, entonces:

0 dB si, motutzu no es malo, esta ahace años,,,,fijate la dife= 20 log (1)

Si la señal de salida se encuentra atenuada -60dB:

$$\text{Antilog}\left[\frac{-60}{20}\right] = 0{,}001 = \frac{\text{Amplitud de salida}}{\text{Amplitud de entrada}}$$

$$\text{Amplitud de entrada} = 1000 * \text{Amplitud de salida}$$

Decimos que estos filtros son ideales porque sus pendientes son infinitas. Es decir pasamos de 0 dB (no atenuación) a -60 dB (1000 veces menor), en "0 octavas".

Se entiende por octava superior, cuando pasamos de una frecuencia "f" a una "2 f" y como octava inferior cuando pasamos de "f" a "1/2 f".

En la realidad los filtros analógicos llegan a valores máximos de 90 dB por Octava, en cambio los filtros digitales llegan atenuaciones de 200 dB/octavas.

Una gran diferencia de los filtros ideales con los reales, radica en el corrimiento de fase que provocan estos últimos y que generalmente no es un corrimiento lineal.

Filtros reales

En comparación con el filtro ideal, los filtros reales poseen los siguientes inconvenientes:

- La transición entre la banda que se quiere dejar pasar y la que se quiere eliminar no es abrupta, sino que tiene una determinada pendiente que depende del número de orden del filtro.
- La respuesta en fase no es linear, esto aumenta la distorsión de la señal [2]significativamente.

Podemos entender la acción eléctrica de los filtros analógicos reales, analizando los siguientes circuitos eléctricos elementales:

Filtro Corta-bajos:

Si analizamos el circuito de la figura 19, que corresponde al de un filtro Corta-Bajos (o pasa-altos) elemental, construido por un Capacitor de capacidad "C" (medido en Faradios) y por una Resistencia "R" (medida en Ohms):

$$V_{out} = i(t).R \quad \frac{V_{in}.R}{R + Xc} \quad \frac{Vin.R}{R - j\,1/w.C} \quad \frac{Vin.R\,(R + j(1/wC)}{R^2 + 1/w^2C^2} \quad \frac{Vin.(w^2R^2C^2 + jwC)}{w^2R^2C^2 + 1}$$

Xc = - j 1/ 2.π.f.C: Reactancia capacitiva

El valor del voltaje de salida "Vout" tiende a 0 voltios cuando la frecuencia "f" tiende a 0 Hz, ya que la reactancia Xc tiende a infinito.
"Vout" tiende al voltaje de entrada "Vin" (no atenuación), cuando la frecuencia tiende a infinito, ya que Xc tiende a 0 (el capacitor oficia de cortocircuito).

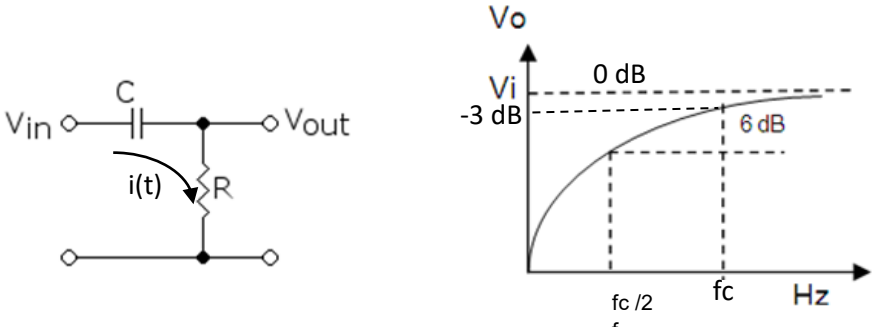


Figura 19, filtro RC corta-bajos (pasa altos) [10]

Se denomina "frecuencia de corte" a la frecuencia en la que la amplitud de la señal se atenúa al 30% (o -3 dB) y, en este caso, se produce cuando el valor de la Reactancia "XC" iguala al de la Resistencia "R".

$$Xc = R$$

$$1/2\pi.f.C = R$$

$$f_{corte} = 1 / 2\pi.f.R.C$$

Analizando el diagrama fasorial, cuando R = Xc

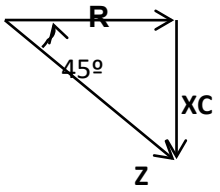


Figura 20, Diagrama fasorial del circuito de la figura 19

El diagrama fasorial nos dice que para la frecuencia de corte, la Impedancia del circuito: "Z" posee un ángulo de fase de 45º con respecto al vector resistencia "R" (eje real).

Como: $I.Z = Vin$

$I.R = Vout$

Se deduce que la fase de "Vout" adelanta 45º a "Vin" (w gira en el sentido inverso a las agujas del reloj).
Estos filtros presentan una pendiente de aproximadamente 6 dB/octava, es decir que la octava inferior a "f" (f/2), tendrá la mitad de amplitud que en "f".

Filtro Corta-altos:

La figura 21 representa a un circuito filtro Corta-altos:

$$Vout = i(t).XC = \frac{Vin.\,XC}{R + XC} = \frac{Vin}{R - j\frac{1}{2\pi.f.C}} * \frac{1}{j\,2\pi.f.C} = \frac{Vin}{1 + j\,2\pi.f.R.C}$$

La señal de salida "Vout" es igual a la señal de entrada "Vin" (no atenuación) para "f = 0" y tiende a un valor "0" cuando la frecuencia es muy alta.

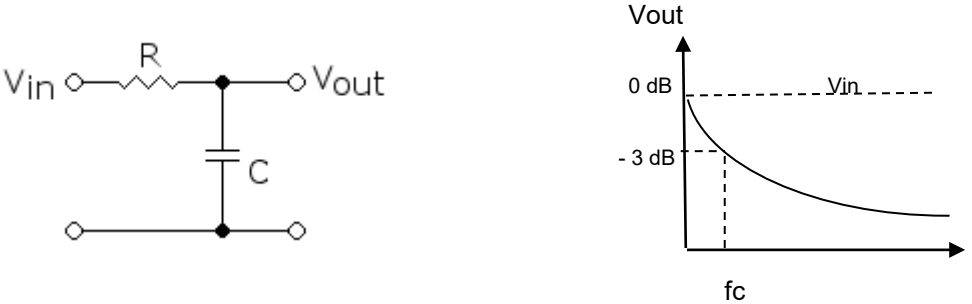
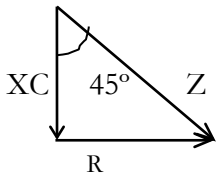


Figura 21, filtro RC corta-bajos [10]



Vout = I.XC
Vin = I.Z

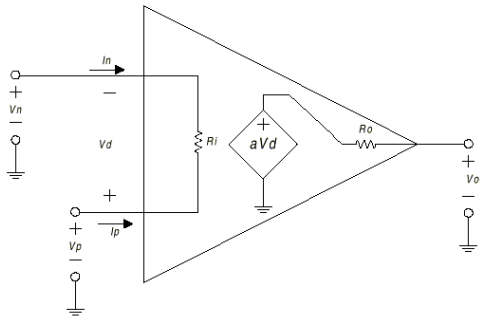
Figura 22, Diagrama fasorial del circuito Corta-altos [10]

La señal de salida "Vout", atrasa 45º a la señal de entrada "Vin", a la frecuencia de corte del filtro.

Filtros Activos

Con los filtros elementales no tenemos un buen manejo de sus pendientes, ni de las fases introducidas ni de las atenuaciones producidas. Los Amplificadores Operacionales solucionan en gran medida el filtrado analógico de la señal sísmica y se pueden agregar varias etapas para lograr pendientes más abruptas, o diferentes componentes para modificar la respuesta de amplitud y fase de estos denominados: "filtros activos".

El **concepto del amplificador operacional** procede del campo de los computadores analógicos, en los que comenzaron a usarse técnicas operacionales en una época tan temprana como en los años 40. El nombre del amplificador operacional deriva del concepto de un amplificador DC (amplificador acoplado en continua) con una entrada diferencial, con una impedancia de entrada y una ganancia teóricamente infinita, cuyas características de operación estaban determinadas por los elementos de realimentación utilizados.



Vd = Vn - Vp
V_0 = a.Vd
a = ∞ (la señal de entrada es prácticamente 0).
Ri = ∞ (la corriente eléctrica circula por el exterior al amplificador).
Ro = 0
BW (ancho de banda) = ∞

Figura 23, el Amplificador Operacional ideal [6]

La primera etapa de estos amplificadores, la que determina la mayoría de sus propiedades, ya las hemos anunciado en el "Amplificador Diferencial" que oficia de Preamplificador en todo sistema de adquisición sísmica.

La figura 24 muestra los filtros activos de segundo orden, empleados en los equipos con Conversores AD convencionales.

La relación entre Voltaje de entrada y Voltaje de salida se denomina "Función Transferencia" que depende de la frecuencia (s) y de los valores de "R" y "C".

La frecuencia de corte sigue estando definida por: fc = 1 / 2π.R.C

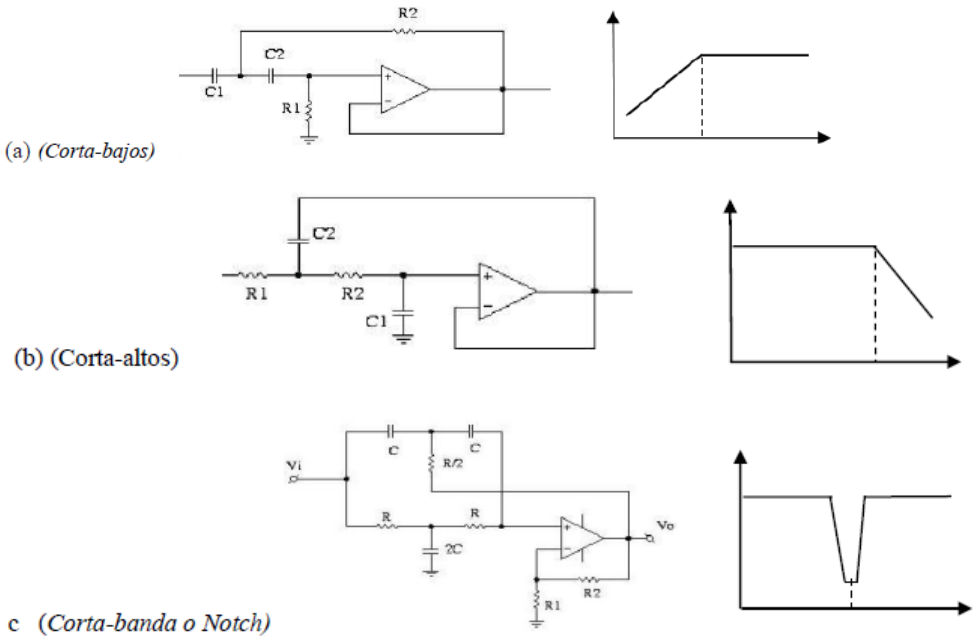


Figura 24, filtros activos [6]

La ganancia y la fase de un filtro pueden ser optimizadas para satisfacer los siguientes criterios:

- Una respuesta máxima plana en la banda de paso.
- Una transición rápida entre la banda de la señal deseada y la no deseada.
- Una respuesta de fase lineal.

La Función Transferencia de los filtros activos más complejos, deberán contener polos complejos conjugados para manejar su comportamiento y esto se consigue gracias a los amplificadores operacionales sin necesidad de emplear inductancias (L).

$$F\ (s)=\frac{A_0}{\left(1+a_{\ 1}.s++b_{\ 1}.s^2\right).\left(1+a_{\ 2}.s+b_{\ 2}.s^2\right)....\left(1+a_{\ n}.s+b_{\ n}.s^2\right)}$$

Existen innumerables filtros activos diferenciados en la forma y cantidad de resistencias y capacidades que se conectan a los circuitos operacionales. En general en el instrumental sísmico se utilizaban filtros activos Butterworth debido a su respuesta plana que permite una mejor precisión de medida en la banda de paso.

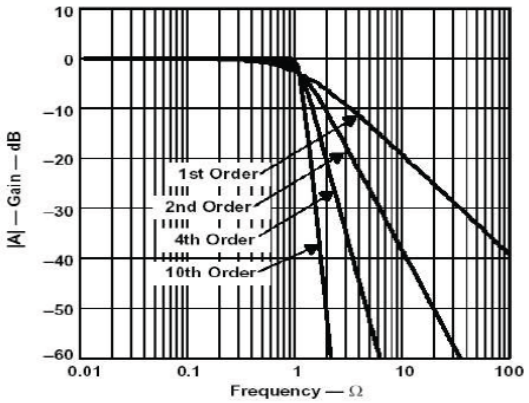


Figura 25, filtro Corta-altos Butterworth [3]

Otro filtro que se suele emplear es el de Bessel que tiene una respuesta lineal con respecto a la fase, lo cual resulta en un retardo constante en todo el ancho de banda deseado.

Filtros en el sismógrafo MDS-10

Como explicamos, el bajo Rango Dinámico disponible en el Conversor AD, hacía necesario atenuar componentes de ruidos que podían compartir frecuencias con la señal sísmica. En la figura 26, se muestra el espectro pasante pretendido con las pendientes y atenuaciones posibles.
El Corta-bajos poseía frecuencias de corte (12 y 24 Hz) y pendientes (18 y 36 dB/oct) seleccionables. Con esto se pretendía atenuar el "ground roll" intentando no atenuar demasiado la señal sísmica.
El Corta-altos debía poseer una pendiente lo más abrupta posible (90 dB/Oct), y la frecuencia de corte debía seleccionarse en función del muestreo utilizado.
Por Ejemplo: f = 500 Hz es la frecuencia de muestreo en 2ms, entonces debía elegirse una frecuencia de corte del filtro 4 veces inferior, es decir: fc = 125 Hz, para evitar el "aliasing" o superposición de espectros originados en el muestreo (ver muestreo temporal).
El "Notch" se sintonizaba a la frecuencia de línea de alta tensión local (50 Hz en nuestro caso) y llegaba a atenuaciones de 60 dB (1000 veces). Por supuesto que esto también atenuaba a las componentes de la señal en la banda de 48 a 52 Hz.

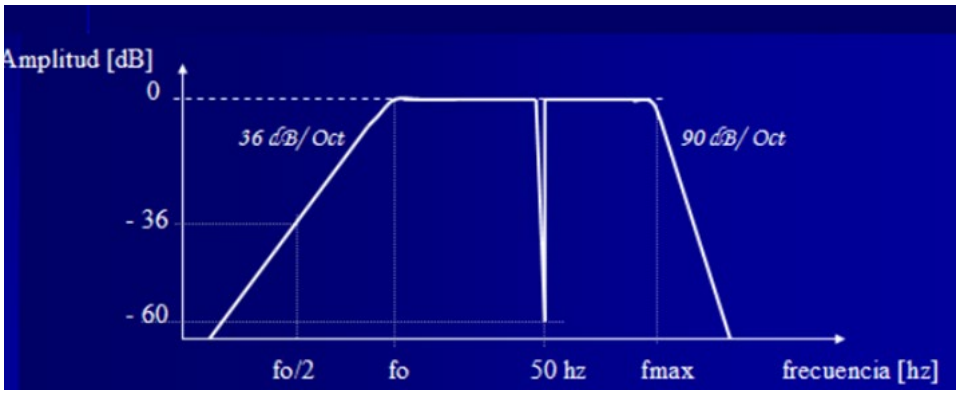


Figura 26, banda pasante sísmica en un sismógrafo MDS-10 [10]

Conclusión sobre filtros analógicos:

Como vimos el filtrado analógico es sofisticado y poco efectivo comparado con el digital. Además los componentes utilizados: resistencias y capacitores, no mantienen sus valores sino que poseen "drift", o corrimiento de sus especificaciones en el tiempo, y entonces los filtros debían ser calibrados y reparados regularmente.
Se debe aclarar, que había tantos sistemas de filtrados como Canales de Datos. Gracias a ello, muchos ingenieros en electrónica teníamos trabajo en abundancia (existieron en la Argentina, 13 grupos con MDS-10 de 120 canales c/u).

El Multiplexado de las Canales Sísmicos

En los sistemas con Conversores Analógicos-Digitales (AD) convencionales, la próxima etapa era: "Multiplexado de los canales sísmicos". En el MDS-10 la llave de multiplexeo era un transistor FET ubicado en la misma tarjeta donde se encontraba el Preamplificador y los Filtros, la salida de cada transistor se conectaba a un "Serial Data" o "multiplex data".

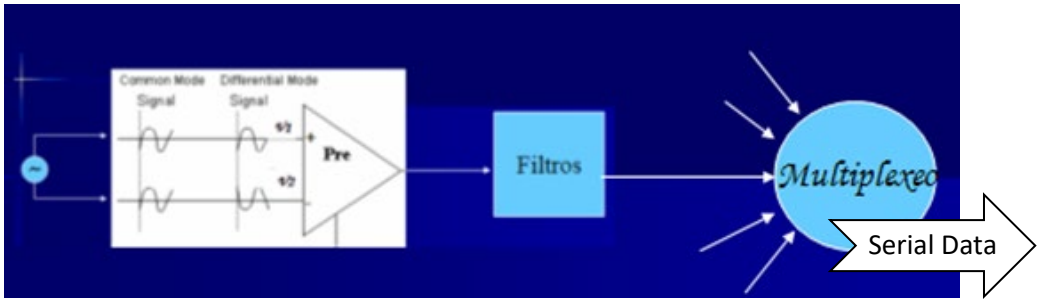


Figura 27, tarjeta "Preamplifier" del MDS-10 [10]

El multiplexeo permitía que cada canal sea conectado al "Serial Data", durante 15 µs una vez cada período de muestreo (2 ms, por ejemplo).

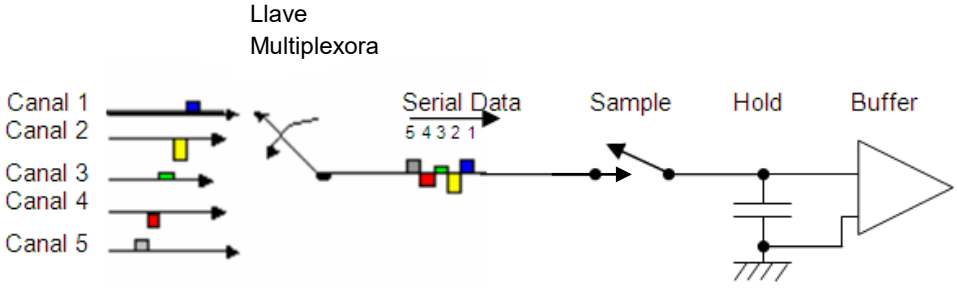


Figura 28, Multiplexeo de los canales sísmicos [10]

Los datos multiplexeados eran sometidos más luego a diferentes procedimientos, en sucesivas etapas de "Sample and Hold" (muestrea y contiene), donde la muestra de un canal es habilitada (sample) a descargar su voltaje en un capacitor (hold), que retiene el voltaje conjuntamente con un amplificador operacional (buffer), mientras el IFP (amplificador de punto flotante) o el Conversor AD procesan dicha muestra.

El mayor problema ocasionado por este método de datos multiplexeados, es el corrimiento en tiempos de cada canal en una muestra (2 ms), que se denomina en inglés: "skew". Si suponemos que un evento ocurre simultáneamente en todos los canales sísmicos y con la misma magnitud, todas las muestras deberán mostrar dicho evento en el mismo tiempo y con igual amplitud, pero como las muestras se toman en secuencia, cada una de ellas poseerá una amplitud ligeramente diferente pues fue tomada en diferente tiempo.
En la figura 29, observamos que la muestra del canal 120 es tomada casi al comienzo del próximo periodo. En el procesamiento fino del dato sísmico estos datos son compensados, pero en el chequeo diario había que tenerlo en cuenta cuando confrontamos, por ejemplo, similaridades de vibradores; había que colocar las señales a comparar lo más próximas posibles para evitar un mayor "skew".

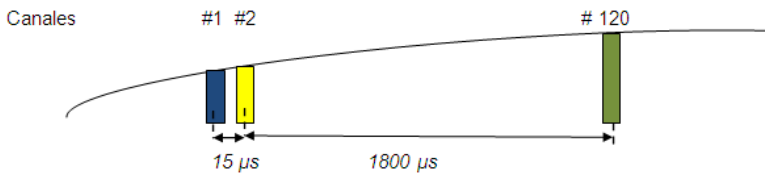


Figura 29, corrimiento de la muestra dentro de un "scan" de datos [10]

El Amplificador I.F.P.

El Amplificador I.F.P. (Instantaneous Floating Point Amplifier), permitía un buen manejo del Rango Dinámico del Conversor A/D, basándose en el principio fundamental de toda medición eléctrica: "la medición más precisa es la que se obtiene cuando el valor medido se encuentra más cercano al fondo de la escala de medida".

El I.F.P. permitía elevar el voltaje analógico de entrada, hasta lograr voltajes cercanos al máximo voltaje que el Conversor A/D podía convertir en una palabra digital. Por supuesto que la amplificación tenía sus límites (72 dB en el I/O System I, 90 dB en el MDS-16.

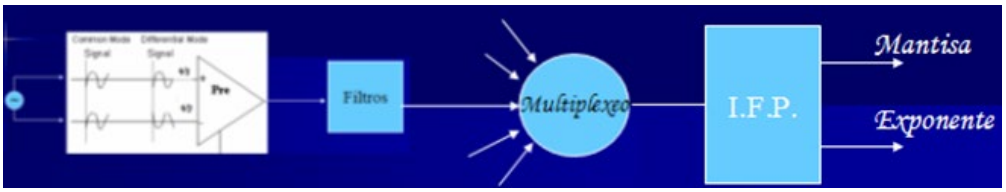


Figura 30, quinta etapa en la adquisición convencional: el I.F.P. [10]

En la figura 31 se esquematiza la función del I.F.P. El Conversor AD admite voltajes máximos a convertir de ± 10 voltios, y el IFP intenta amplificar cada muestra para que el voltaje de entrada al Conversor sea superior a ± 7,5 Voltios (3/4 de escala del Conversor AD, y conseguir que la palabra digital contenga a los bits más significativos.

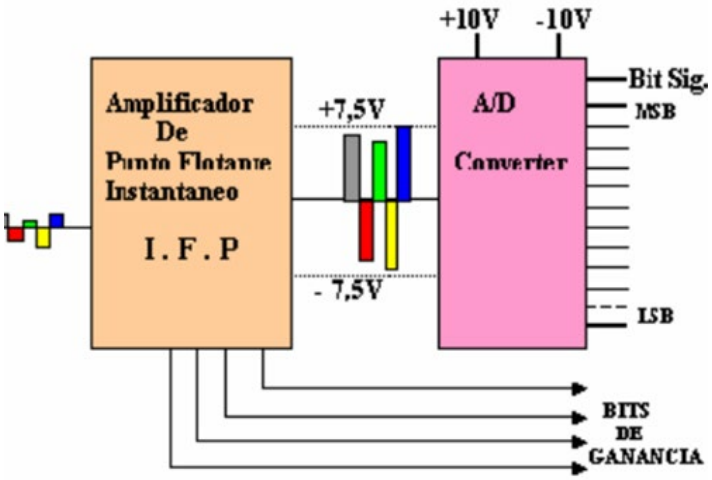


Figura 31, el I.F.P. y el Conversor AD [10]

El I.F.P. trabajaba así:

- La muestra de un canal retenida por un circuito "sample and hold", se aplica al IFP donde solamente la etapa de x48 dB se encuentra habilitada (S1 abierta y todas las demás cerradas). La muestra amplificada 256 veces (48 dB) se compara con los voltajes umbrales ± 7,5 Voltios. Si este voltaje no es superado la etapa x48 queda retenida (S1 permanece abierta) y si es superada se puentea cerrando la llave S1.
- Se abre la llave S2 y permanecen cerradas la S3 y S4, entonces el voltaje resultante de la primera etapa se aplica a la etapa x24 dB. Si el voltaje sobre el comparador no excede los 7,5 Voltios S2 queda abierta, si se supera el umbral; se cierra S2 y se "baipasea" la etapa.
- Así sigue el procedimiento hasta completarlo, determinándose la ganancia aplicada a la muestra que se grabarán en la cinta magnética como "bits de ganancia".

La amplificación gradual lograda al utilizar varias etapas del I.F.P., involucraba a numerosos circuitos electrónicos, regularmente complejos, que ocupaban casi el 30% del volumen total de una Unidad Remota Telemétrica.

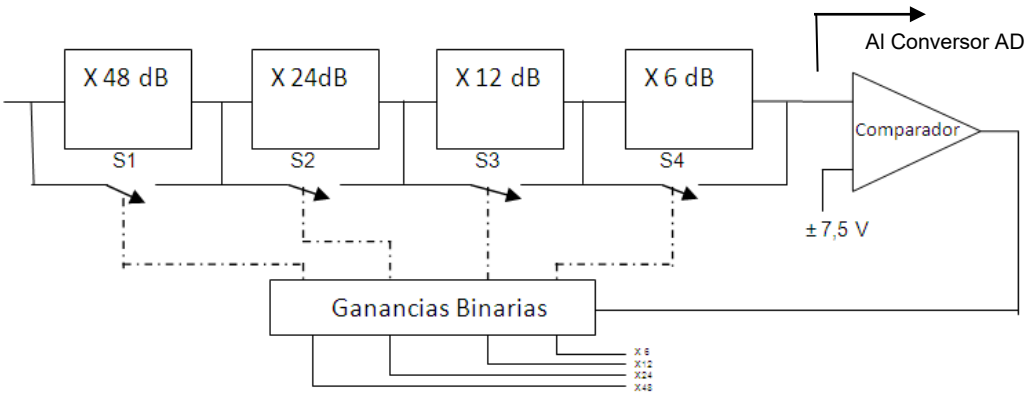


Figura 32, Etapas del I.F.P. [10]

Otro y definitivo inconveniente del I.F.P., es que no discrimina Señal/Ruido. Supongamos que el Conversor A/D convencional de 14 bits más Signo (84 dB de Rango Dinámico), con un voltaje máximo de conversión de +/- 10 Voltios, se encuentra conectado al I.F.P. anterior.

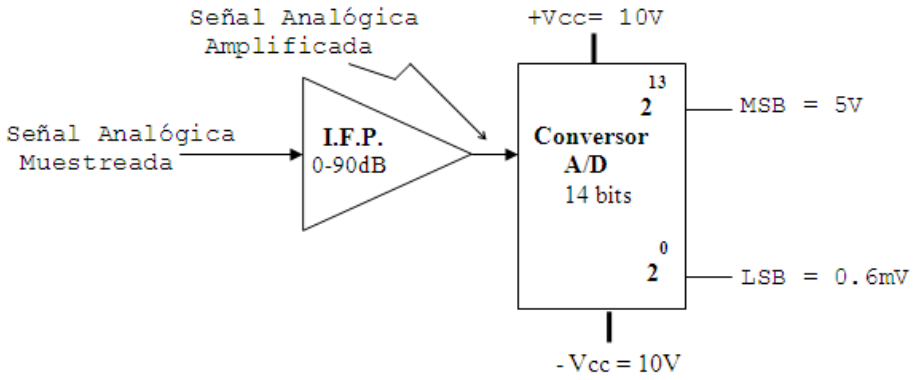


Figura 33: Conversión A/D convencional [10]

El "bit" más significativo de este Conversor A/D (MSB), representa un voltaje analógico de +/- 5 Voltios.

MSB = +/- 5 Voltios

El "bit" menos significativo de este Conversor A/D (LSB), a un voltaje analógico de:

84 dB = 20 Log (10V / LSB) =
LSB = +/- 10 V / antiLog (84/20) = +/- 0,6 mV

El voltaje analógico de "0,6 mV" es el mínimo voltaje que podrá ser convertido en un número, ya que un valor menor presente a la entrada del A/D, no podrá ni siquiera representarse con el "bit" menos significativo: "LSB".

Si ahora a la entrada del I.F.P. se le aplica una señal (libre de ruido) de 10 micro-voltios (10^{-7} Voltios), el amplificador automáticamente ajustará su

ganancia flotante hasta disponer de su ganancia máxima: 90 dB (unas 32.000 veces). Por lo tanto a la salida del I.F.P. (y entrada del A/D) se presentará un valor de voltaje de:

10 microV x 32000 = 320 mili-Voltios >> 1 LSB

Como vemos la señal de entrada excede el valor mínimo de voltaje (1 LSB) y realmente es representada digitalmente por once bits.

Pero si ahora, en el mismo instante de tiempo, se le suma a la señal anterior un ruido de 1 Voltio, el I.F.P. aplicará una ganancia de 18 dB (8 veces) y por lo tanto presentará a su salida:

Señal: 10 microV x 8 = 0,00008 Voltios = 0,08 mV < 0,6 mV
+
Ruido**:** 1 Voltio x 8 = 8,00000 Voltios
Suma: 8,00008 Voltios

Como se puede apreciar, la misma señal anterior ahora no podrá ser representada digitalmente ya que su amplitud es inferior a la mínima necesaria para ocupar un LSB.

Este fenómeno de "enmascaramiento" de la Señal Sísmica en presencia de Ruido que ocasiona la acción del I.F.P., podrá ser evitado:

- Colocando en lugar de un Amplificador I.F.P, un Amplificador de Ganancia Fija, pero, debido al gran Rango Dinámico de nuestra señal sísmica, el valor de ganancia del amplificador o: podría recortar señales o podría no amplificarlas demasiado para ser digitalizadas.
- No colocando ningún tipo de Amplificador, entonces deberíamos aumentar el Rango Dinámico del Conversor para conservar el Rango Dinámico Total. Con 24 bits el Rango Dinámico Teórico del A/D sería de: 138 dB (unas 8 millones de veces). El Ruido Interno del Instrumento podría ocupar una gran proporción de los bits menos significativos del A/D)
- Deberíamos disminuir el Ruido Interno de la Etapa previa al A/D, para que la Señal Sísmica ocupe el mayor Rango Dinámico posible ("Con el Sigma-Delta Converter", se logra un Rango Dinámico Efectivo de: 120 dB).

Veremos más adelante como el Conversor Sigma-Delta de 24 bits cumple con casi el total de las necesidades anteriores.

El muestreo: Anti-Alias Filter vs. Sample Rate

El "Teorema del Muestreo" y su consecuencia: la "Frecuencia de Nyquist", representa la ley elemental en la Teoría de la Información que los Ingenieros en Telecomunicaciones conocemos muy bien. Esta dice:

"Se necesita, como mínimo, dos (2) muestras (samples) por Período, para poder reconocer posteriormente a la señal muestreada".

Esta misma Ley se aplica al Muestreo Espacial producido por el distanciamiento de las Estaciones Receptoras (ver capítulo 8: Emisión y Recepción Puntual).

En la Figura 34, el Período de la señal es de 10 mili-segundos (f = 100 Hz.). De acuerdo al "Teorema del Muestreo" con solo dos muestras por período hubiésemos podido cumplir con el mismo, o sea muestreando cada 5 milisegundos.

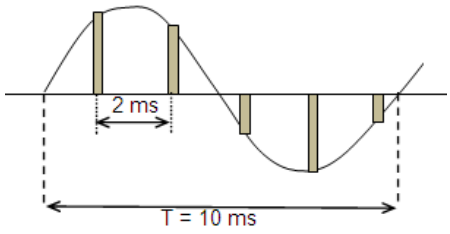


Figura 34: Señal Sinusoidal (Ts = 10 mseg.) Muestreada c/2 milisegundos

Pero como generalmente se utiliza una sola Velocidad de Muestreo para todo el Espectro Sísmico recibido, deberemos adoptar una velocidad que satisfaga al período más corto pretendido de adquirir. Muestreando a la velocidad de 2 ms el Período más corto sería: T = 4 ms

Como 1 / T = Frecuencia entonces

Frecuencia de Nyquist = 1 / 4 ms = 250 Hz

Otra manera útil de interpretar esta Ley es la siguiente. Supongamos que tenemos un Espectro de Señal Sísmica que se encuentra comprendido entre la banda: frecuencia mínima: **"f_i"** y una determinada frecuencia máxima: **"f_f".**

Cuando se muestrea las señales comprendidas en esta banda de frecuencias (f_f – f_i), con una frecuencia de muestreo **"f_m"** (sample frequency), se producen "Bandas Laterales" a ambos lados de "f_m", debido a la no-linealidad del sistema empleado.

Las frecuencias extremos de estas bandas serán:

$f_m - f_f$: extremo de la Banda Lateral Inferior

$f_m + f_f$: extremo de la Banda Lateral Superior

En la Figura 35, observamos como un Espectro (f_i-f_f), es trasladado alrededor de la frecuencia de muestreo f_m. Vemos que si el Espectro se mantiene dentro de ciertos límites, este no se "solapa" con las Bandas Laterales.

El Límite del "no-solapamiento" se producirá cuando:

$$f_f = f_m - f_f$$

Operando:

$$f_f = f_m / 2 = f_N \text{ (Frecuencia de Nyquist)}$$

Vemos que para que no se produzca "Aliasing" (solapamiento) entre el Espectro Original y la Banda Lateral Inferior, la frecuencia máxima a ser muestreada no debe superar a la "Frecuencia de Nyquist (F_N)", es decir: no debe ser mayor que la mitad de la frecuencia de muestreo

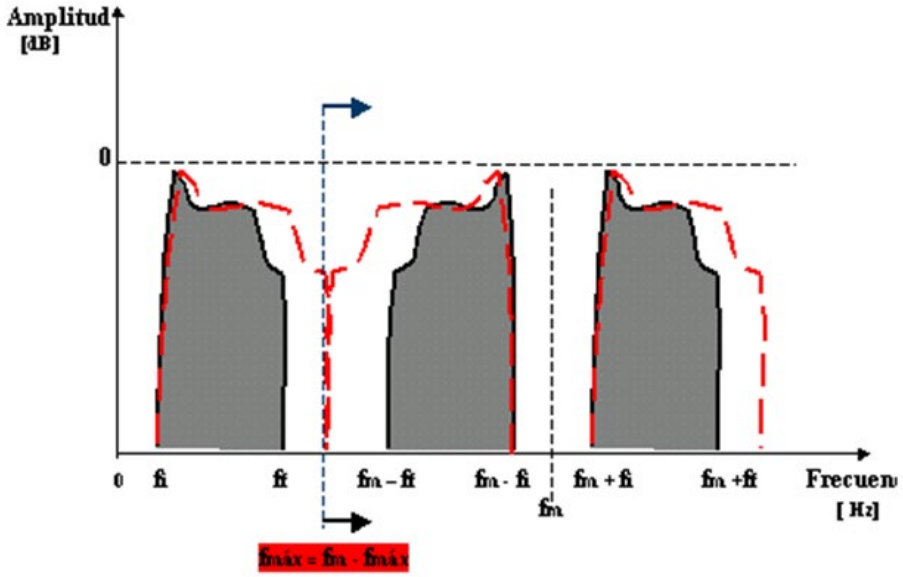


Figura 35: Espectro de Señal Muestreada a una frecuencia "fm" [10]

Ejemplo:

Para un periodo de muestreo de: T= 2mseg.

La frecuencia de muestreo es: $f_m = 1 / T = 500$ Hz.

Por lo tanto la Frecuencia Máxima admitida será de:

$$f_N = f_m / 2 = 250\text{Hz}.$$

Con esta interpretación llegamos a los mismos resultados obtenidos con el "Teorema del Muestreo".

Pero desgraciadamente no podemos adoptar como límite la "frecuencia de Nyquist" como frecuencia máxima pasante, pues no existe un filtro "corta altos" de pendiente infinita que nos permita separar el espectro original de la Banda Lateral Inferior.

Como vemos en la figura 35, para poder separar las figuras (en rojo) que se tocan, deberíamos cortar verticalmente desde "fmax = fm - fmax".

Ningún filtro, y menos los analógicos, se aproximan a este filtro ideal, por lo tanto tendremos que tomar algún margen adicional para no alcanzar la Frecuencia de Nyquist con nuestro espectro sísmico.

Con filtros analógicos debemos aumentar en "una Octava" la banda de separación para no introducir "frecuencias aliadas" (aliasing), debido a las características físicas del filtro.

Ejemplo: Para un filtro analógico la frecuencia máxima admitida deberá ser

$$f_{max} = F_N / 2$$

Para T=2 ms:

$$f_{max} = 250 \text{ Hz.} / 2 = 125 \text{ Hz.}$$

Por lo tanto en un Sistema convencional muestreando a 2 milisegundos, con un Conversor A/D convencional, deberemos aplicar un Filtro "Anti-Alias" de 125 Hz. previo a la etapa de muestreo.

El Conversor Sigma-Delta, posee una primera etapa que muestrea la información a una frecuencia: $f_m = 256$ KHz

Por lo tanto la frecuencia máxima permitida sin "aliasing" es de: 64 KHz.

Resulta evidente que en este caso estamos muy lejos de las frecuencias sísmicas esperadas y por lo tanto utilizando un simple Filtro Activo RC, podemos reyectar frecuencias superiores a 1 KHz, simplificando aún más la circuitería y evitando etapas generadoras de ruido eléctrico.

En una segunda etapa del Sigma-Delta Converter A/D, se realizará el "Filtrado Digital" de la señal sísmica (Lo-Cut, Hi-Cut y Notch Filters) y como ahora las pendientes digitales son mayores, podemos admitir frecuencias más cercanas a la de Nyquist. La mayoría de los sistemas actuales alcanzan a una: $f_{max} = 0{,}8\ f_N$.

NOTA: Con la tremenda cantidad de datos que hoy día deben ser digitalizados, tanto en astronomía, fotografía como también en la adquisición sísmica, se descubrió una nueva técnica donde ya no es necesario tomar tantas muestras como las exigidas por Nyquist ya que estas pueden definirse con un número pequeño de coeficientes, lo que constituye una forma de representación comprimida de las mismas. La Recepción Comprimida (compressed sensing) pertenece al campo matemático y es un nuevo paradigma que desafía a la adquisición de datos digitales convencionales.

Conversor Analógico-Digital Convencional (AD Converter)

Convertir la señal analógica en una serie de números (digitalización), es preservarla y predisponerla para el procesamiento matemático que la misma necesita para obtener imágenes del subsuelo.

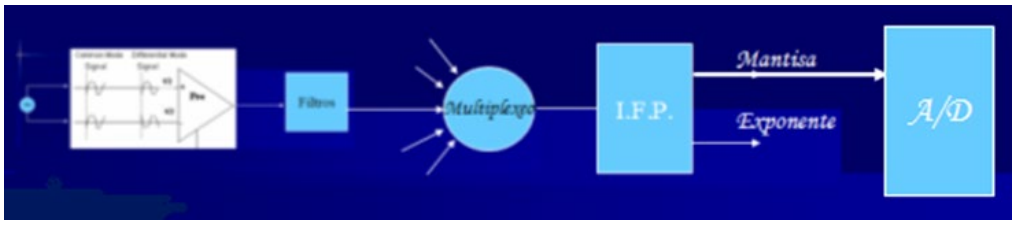


Figura 36, sexta etapa en la adquisición convencional: El Conversor AD de 15 bits [10]

El Conversor convencional, previo al Conversor Sigma Delta, poseía 14 bits de mantisa y un bit de signo.

Se define como **Rango Dinámico** del Conversor AD, a la relación logarítmica entre la máxima y la mínima señal analógica que puede convertir:

Si el Conversor tiene 14 bits de mantisa entonces pueden ser representados numéricamente: $2^{14}-1 = 16.383$ números.

$$\text{Rango dinámico} = 20 \log \frac{\text{Máximo Voltaje}}{\text{Mínimo Voltaje}} = 20 \log \frac{16.383}{1} = 84 \text{ dB}$$

El máximo voltaje que se puede convertir es equivalente al de la fuente de alimentación del Conversor AD menos el bit menos significativo:

$$10.000 \text{ mV} - 1 \text{ LSB} \approx 10.000 \text{ mV}$$

Entonces el LSB, o bit menos significativo (2^0) vale:

$$\text{LSB} = 10000 \text{ mV} / 2^{14} = 0{,}6 \text{ mV}$$

La figura 36 representa a este Conversor AD, al cual le llega una muestra de voltaje de +3.437,5 mV. De acuerdo a los valores de voltaje que cada bit representa, la representación numérica binaria será:

S	2^{13}	2^{12}	2^{11}	2^{10}	2^9	2^8	2^7	2^6	2^5	2^4	2^3	2^2	2^1	2^0	
0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
+		2500 +		625+312,5											= + 3.437,5 mV

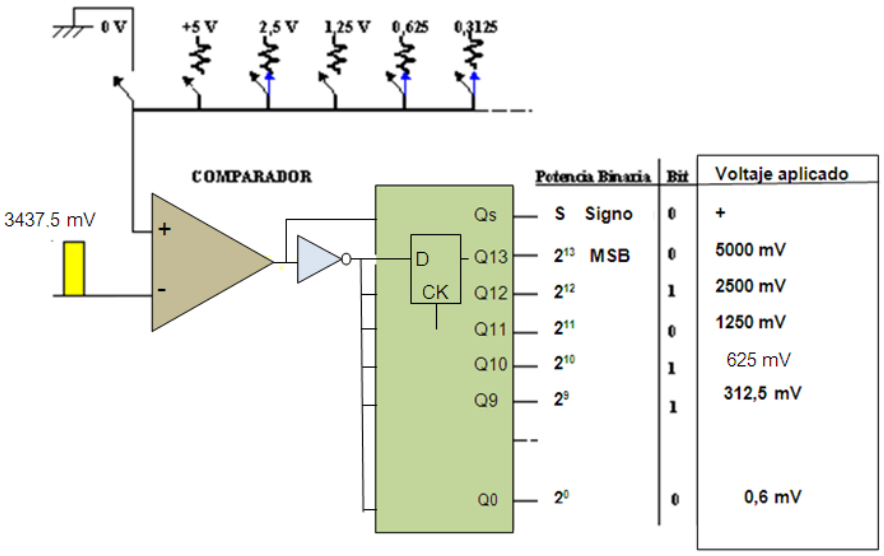


Figura 37, Conversor AD de 14 bits de mantisa y 1 bit de signo [10]

El Conversor AD posee voltajes de referencia que va a confrontar con la muestra a convertir en un Comparador.

- En el primer paso (o pulso de reloj): se coloca el voltaje de referencia a tierra (0 Voltios) y este se aplica a la entrada del Comparador. Como el voltaje de la muestra, en este caso, es superior a 0 Voltios, el Comparador genera un "0" en su salida y este se carga en un D Flip Flop a la salida Qs (se determinó así el bit de signo).

- El Conversor AD abre la llave de tierra y cierra la correspondiente a un voltaje de + 5 Voltios. Ahora este voltaje es mayor que el de la muestra, entonces la salida del Comparador es "1", el Inversor cambia de signo y entonces se aplica "0" a la entrada del D- Flip Flop. En el próximo pulso de reloj, Q13 copia a D (el MSB=0).

- Se abre la llave de + 5 Voltios y se cierra la de + 2,5 Voltios. Ahora este voltaje es menor que el de la muestra, por lo tanto la salida del comparador es "0", luego se invierte y se aplica "1" a la entrada del D-Flip Flop que en el próximo pulso de reloj lo carga en Q12 (Q12 = 1).

- La llave de +2,5 Voltios permanece cerrada y ahora también se cierra la llave correspondiente a +1,25 Voltios. La suma: 2,5 + 1,25 = 3,75 Voltios, se aplica sobre el comparador. Como este voltaje supera al voltaje de la muestra, la salida es "1", luego se invierte y "0" es aplicada a la entrada D del Flip-Flop que en el próximo pulso de reloj carga en Q11 (Q11=0).

- Se abre la llave de +1,25 y se cierra la de +0,625. La suma: 2,5 + 0,625 = 3,125 Voltios, se aplica al Comparador. Como este voltaje es menor que el de la muestra, la salida del comparador es "0", luego se

invierte y "1" se aplica a la entrada D del Flip Flop que en el próximo pulso de reloj carga en Q10 (Q10=1).

- Se mantiene cerrada la llave de +0,625 y se cierra la de +0,3125. La suma aplicada al comparador ahora es de: 2,5 + 0,625 + 0,3125 = 3,4375 Voltios, que coincide con el voltaje de la muestra. Entonces la salida del Comparador es "0" luego el inversor aplica un "1" a la entrada del D-Flip Flop que con el próximo pulso de reloj carga en Q9. (Q9=1)

- Como se alcanzó al valor de la muestra: +3,4375, los demás voltajes de referencia excederán este valor y colocaran los bits restantes en "0".

Cuantificación

Es la cantidad de valores numéricos (valores de cuantificación) que el Conversor posee para representar dichas muestras, depende directa y exponencialmente del número de bits empleados. En nuestro caso contamos con 15 bits (1 de signo y 14 de mantisa) y la cantidad total de valores numéricos que se pueden representar es de: $2^{14} - 1 = 16.383$

Esta cifra incluye a los números positivos y negativos y a un solo "0", ya que: si representamos con signo y magnitud cada muestra, nos encontramos que se crean dos ceros: un cero positivo y otro negativo:

Decimal	Bits S	Decimal	Bits S	1´Complemento S	2´Complemento S
7	0 111	-7	1 111	1 000	1 001
6	0 110	-6	1 110	1 001	1 010
5	0 101	-5	1 101	1 010	1 011
4	0 100	-4	1 100	1 011	1 100
3	0 011	-3	1 011	1 100	1 101
2	0 010	-2	1 010	1 101	1 110
1	0 001	-1	1 001	1 110	1 111
0	0 000	0	1 000	1 111	1 000

S MANTISA

- Cero Positivo: 0 00000000000000
- Cero Negativo: 1 00000000000000 en complemento de 2.
- Cero Negativo: 1 11111111111111 en complemento de 1.

La palabra digital queda dividida en "signo y magnitud".

Para que exista un único "0", tal como sucede con los números enteros, se pueden escribir los números negativos en "Complemento de dos". Esto resulta muy fácil de implementar en hardware y en software. Pero el Formato SEG D, como veremos más adelante, adoptó el "Complemento de 1" para expresar los números negativos, aceptando dos números "0", el positivo y el negativo.

Ejemplo: el número decimal negativo: -7 es expresado en signo y magnitud como: 1 111
Para transformarlos en complemento a 2 debemos:

- Hallar el número binario complementario a la magnitud anterior: 000
- Sumar "1" al número anterior: + 1

La expresión de "-7" en "Complemento a 2" es: 1 001

Como el único "0" es el que correspondía a los números positivos, existirá un número negativo más que en los positivos.

El "complemento a 1" resulta directamente de hallar el binario complementario: entonces el número "-7" se expresa en complemento a 1 como: 1 000.

Grabación Digital

La última etapa de la adquisición, es la grabación en cinta magnética y ahora la grabación será digital.
Como vimos, en los sismógrafos no telemétricos, los canales han sido multiplexados y cada muestra adquirida consta de 14 bits de Mantisa, 1 bit de Signo y 4 bits de Ganancia.

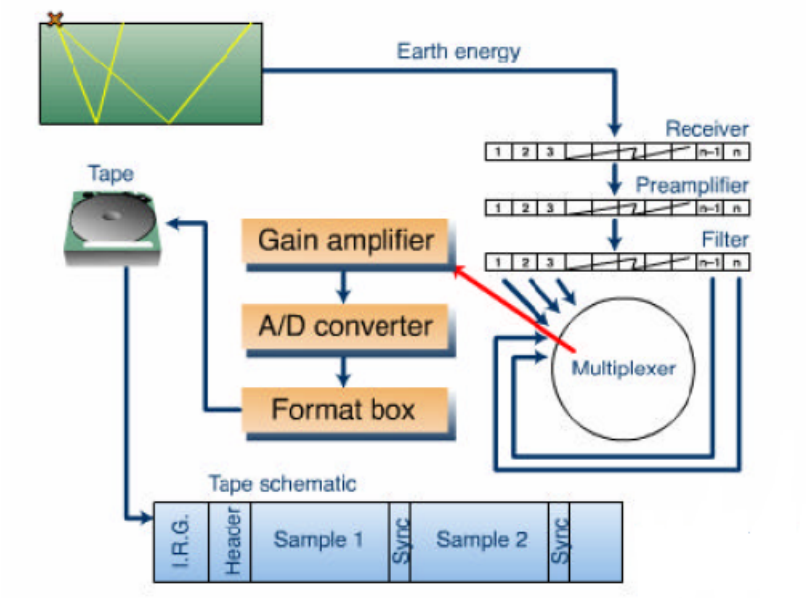


Figura 38, Etapas del Sistema Digital No-Telemétrico [11]

A continuación veremos los "Formatos y códigos de grabación", que la Sociedad de Geofísicos de Exploración recomendó adoptar en la industria de la adquisición sísmica.

La Sociedad de Geofísicos de Exploración (S.E.G.)

Existían muchas y diferentes formas (formatos) de grabar cintas magnéticas para la recolección y procesamiento de datos sísmicos. Debido a esto en 1966 la SEG recomendó a un comité de profesionales estandarizar la industria; en 1967 la SEG sugirió el empleo de los formatos **SEG A** y **SEG B** para las grabaciones de adquisición sísmica de campo con 9 Pistas de Grabación/Lectura, de densidad: 800 BPI y codificación de flujo magnético N.R.Z.I.

En 1971, con la implementación del Amplificador de Punto Flotante (I.F.P) y la necesidad de grabar más información digital, la SEG debió lanzar un nuevo formato, el **SEG C** adaptable para una densidad de grabación de 1600 BPI.

El Formato **SEG-Y**, fue desarrollado en 1973 para recoger la información sísmica en Centros de Procesos, provenientes de cintas magnéticas de ½ pulgada con grabaciones en 9 pistas y canales demultiplexeados. La información general se encuentra en la porción fija del formato y se prevé espacio para futuras reformas y expansiones. SEG presume que este formato abastece y abastecerá las actuales y futuras necesidades de los Centros de Procesamiento.

En 1975 la SEG implementa el Formato **SEG D**, donde los datos pueden ser grabados en el campo: multiplexeados o desmultiplexeados, los registros multiplexeados pueden ser grabados con "gap" o "sin gap", se pueden grabar Palabras (words) con 1, 1 ½, 2 ½ y 4 Bytes, prevé la utilización de diferentes muestreos o filtros durante el mismo registro y conserva la misma estructura del Encabezamiento (Header) en todas las opciones.

Algunas de las condiciones generales de grabación que adoptó la S.E.G. y que se siguen manteniendo son:

- Los datos se grabarán en columnas de 9 pistas (9 tracks), una de las pistas contendrá el "bit de paridad vertical Impar" y las restantes bits de datos.
- Cada columna que contiene 8 bits de datos se denominará "**Byte**" (*Byte: conjunto de 8 bits de datos que se escriben en la misma columna).*
- Se denominará Palabra *(***Word***)* al conjunto de bytes que constituyan una muestra (sample)*: (Word: Cantidad de Bytes que componen una muestra).*
- Bit de Paridad Impar*:* "la cantidad de "bits = 1" en cada Byte, deberá ser impar.
- Denominamos *"***Scan***", a los datos de cada muestreo completo de los canales multiplexeados.*
-

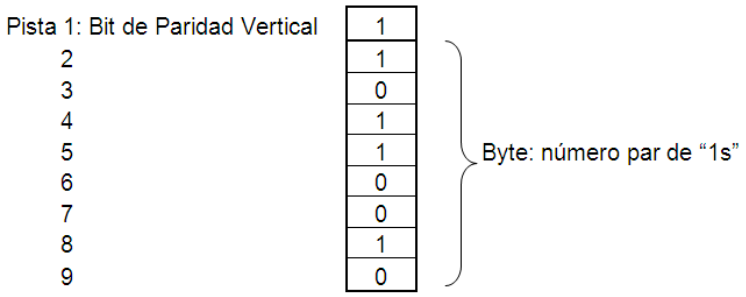


Figura 39, formato de grabación de un Byte con 9 pistas (tracks)

Cabezal Magnético

Se generalizó el empleo de 9 pistas y por lo tanto se deben emplear: 9 cabezas grabadoras y 9 cabezas lectoras. Previamente la cinta pasa por una cabeza de borrado.
Si bien los sistemas de grabación han variado y existen métodos no magnéticos de grabación, el formato indicado se mantiene rigurosamente.

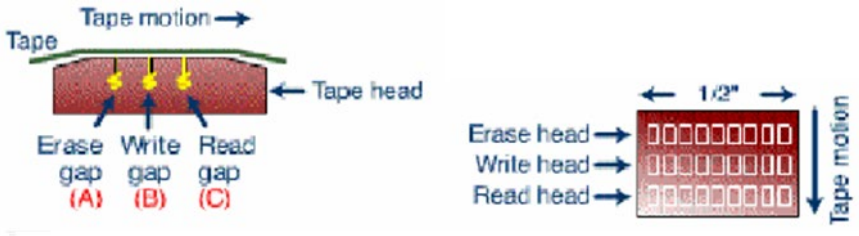


Figura 40, formato de grabación de un Byte con 9 pistas (tracks) [11]

Para mayor seguridad, los bits más importantes se graban en las pistas centrales y los demás a sus lados, donde las posibilidades de menor flujo magnético, pandeo de la cinta, efectos externos podrían invalidar algún bit menos significativo.



Figura 41, ubicación de las pistas de grabación y lectura [11]

Códigos de grabación

Si bien la grabación digital presume dos tipos de cambios de flujo magnético: una polaridad para "1s" y la opuesta para "0s", existen otras formas de codificar la escritura o cambios de flujo magnético para representar estos números. El aumentarse la cantidad de datos adquiridos, se necesitó incrementar la cantidad de bits a grabar y fue necesario, a su vez, incrementar

la densidad magnética de las cintas (cantidad de bits por pulgada: BPI) y preservar los bits en ella.

1. **NRZI:**

   En las primeras grabaciones digitales (en el DFS III, por ejemplo), la densidad de grabación era de 800 BPI, la cinta magnética ya era de ½ pulgada de ancho y el código binario de grabación se denominaba: N.R.Z.I. (Non Return to Zero Inverted), en donde los cambios de polaridad del flujo magnético representaban: "1s" y el no cambio de polaridad: "0s".

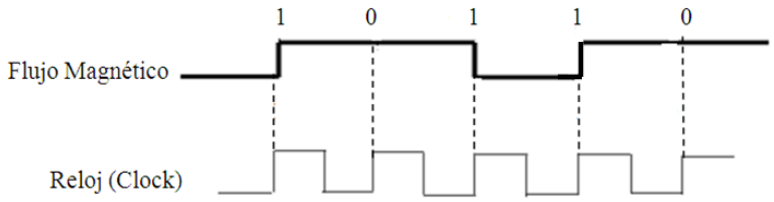


Figura 42, Código de grabación NRZI [10]

Si escribiésemos "Todos Unos" (All Ones), habría cambio de flujo constante y de una frecuencia mitad de la del reloj de grabación. En cambio sí escribiésemos "Todos Ceros" no habría ningún cambio de flujo magnético:

Frecuencia máxima de grabación: f / 2
Frecuencia mínima de grabación: 0 Hz (DC)

La velocidad de grabación típica es de: 60 kbytes/second, 75 in/sec.

Como la precisión mecánica para alinear las 9 cabezas de grabación y las 9 cabezas de lectura no era suficiente para los requerimientos electrónicos, el atraso o adelanto en la escritura/lectura en cada pista ("skew") se corregía electrónicamente:

- Se reproducía en el Tape Transport una Cinta Patrón con "Todos unos" y se tomaba una lectura de pista central con un canal del osciloscopio y con el segundo canal se medían los tiempos de atraso o adelanto de las demás pistas, para luego compensarlos con adelantos o atrasos de sus Relojes de Lectura.
- Corregido el "skew" de lectura, se grababa en el Tape Transport: "Todos Unos" en una cinta magnética común y se volvían a leer las pistas con la misma referencia. Los atrasos y adelantos en los flancos de los pulsos, eran ahora compensados con adelantos y atrasos en el Reloj de Escritura.

La cantidad máxima de canales admitidos en este formato fue de 24, más los canales auxiliares.
El Formato utilizado por el DFS III era el SEG A que correspondía a Canales Multiplexeados.

El sistema no poseía precisión en la escritura de ganancia de los canales, la escritura y lectura era demasiado sensible y frecuentemente se producían "errores de paridad", por perdida de algún bit o pista (por suciedad en las cabezas especialmente). Muchas veces el punto de explosión debía repetirse debido a que no pudo ser registrado ni existía una memoria que lo contuviese.

2. **Phase Encoded (PE)**

   Esta codificación de flujo magnético, permite operar con una densidad de grabación de 1600 bpi. En este código se interpreta un "1" con un flanco positivo de flujo magnético y un "0" con un flanco descendente de flujo magnético.

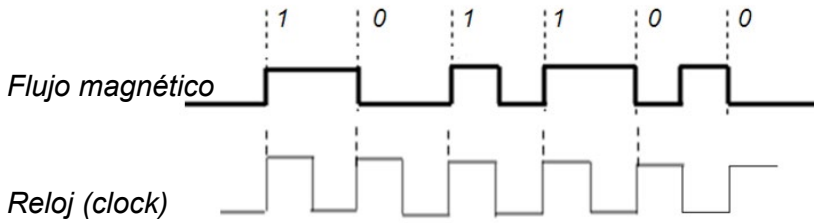


Figura 43, Código de grabación P.E. [10]

La frecuencia máxima es igual a la del reloj (f) cuando escribimos "Todos Unos" o "Todos Ceros" y es la mitad (f/2) si escribimos "unos y ceros" o "ceros y unos".

La velocidad de grabación típica es de: 200 Kbytes/segundo, 125 in/sec

Los "Sistemas Digitales No Telemétricos", como el sismógrafo: MDS-10 (Mandrel Digital System en 1975), utilizaba esta codificación con el Formato SEG C.
La gran ventaja, comparado con el código NRZI, era que las pistas ajustaban sus relojes individualmente con la grabación del "preamble" y el "postamble". El Preamble era la escritura de treinta "1s" seguidos de un "0", para ajustar la lectura en "forward", y el Postamble era un "0" seguido de treinta "1s" para ajustar la lectura en "reverse". Con este mecanismo no había que ajustar las cabezas de grabación y lectura como era requerido en el NRZI.

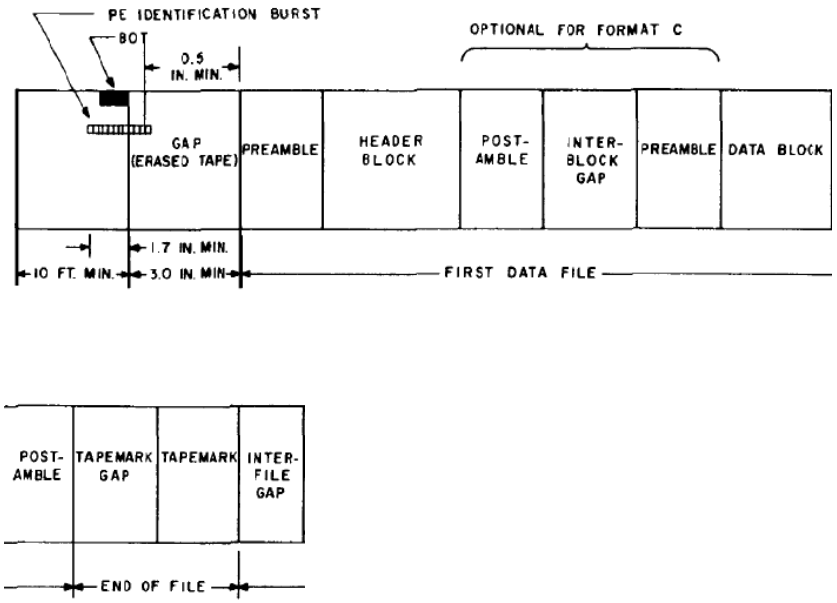


Figura 44, especificaciones generales para el Formato SEG C de 1600 BPI Phase Encoded [9]

El código PE tiene la posibilidad de corregir 1 bit por Byte.

3. Group Code Recording (GCR)

Esta codificación de flujo magnético es la actualmente más empleada, permite trabajar con una densidad de 6250 BPI (250 bits por pulgada). Esencialmente la codificación es NRZI pero no permite que se escriban más de 2 bits "0" consecutivos, esto se logra agregando un bit cada 4 bits de cada pista (finalmente es un Byte extra cada cuatro Bytes) y modificando el grupo de 4 bits originales para que no se graben más de dos bits consecutivos "0". Con esto se logra que cada pista autogenere su propio reloj cuando sea leída, evitando el preamble-postamble del SEG C.
Ejemplo:

4-bit value		GCR code		4-bit value		GCR code	
hex	bin	bin	hex	hex	bin	bin	hex
0x0	0000	1.1001	0x19	0x8	1000	1.1010	0x1A
0x1	0001	1.1011	0x1B	0x9	1001	0.1001	0x09
0x2	0010	1.0010	0x12	0xA	1010	0.1010	0x0A
0x3	0011	1.0011	0x13	0xB	1011	0.1011	0x0B
0x4	0100	1.1101	0x1D	0xC	1100	1.1110	0x1E
0x5	0101	1.0101	0x15	0xD	1101	0.1101	0x0D
0x6	0110	1.0110	0x16	0xE	1110	0.1110	0x0E
0x7	0111	1.0111	0x17	0xF	1111	0.1111	0x0F

La velocidad típica de grabación es de: 781 KBytes/segundo, 125 in/sec

Esta codificación permite recuperar hasta 2 bits por Byte

Formato SEG D 2,5 Bytes Multiplexeado y Exponente Binario

Siguiendo con el proceso de adquisición de un sistema no-Telemétrico que trabaja con fuente impulsiva (explosivos por ejemplo), hemos tomado el MDS-10 de ejemplo y este grababa sus 120 canales en cintas magnéticas de 1600 BPI en formato SEG D 2 1/2 Bytes (luego se identificó con el numero: 8015) y codificación P.E.
Para no exponer un formato en desuso, que posee propiedades comunes con el SEG D 4 Bytes -8058, el cual si vamos a desmenuzar al final del próximo capítulo, mostramos parte del Block de Datos para ver cómo se distribuyen los canales y sus ganancias:

Bit	0	1	2	3	4	5	6	7	
Byte 1	C_3	C_2	C_1	C_0	C_3	C_2	C_1	C_0	Exponent for
Byte 2	C_3	C_2	C_1	C_0	C_3	C_2	C_1	C_0	channels 1 thru 4
Byte 3	S	Q_{-1}	Q_{-2}	Q_{-3}	Q_{-4}	Q_{-5}	Q_{-6}	Q_{-7}	Channel 1
Byte 4	Q_{-8}	Q_{-9}	Q_{-10}	Q_{-11}	Q_{-12}	Q_{-13}	Q_{-14}	0	
Byte 5	S	Q_{-1}	Q_{-2}	Q_{-3}	Q_{-4}	Q_{-5}	Q_{-6}	Q_{-7}	Channel 2
Byte 6	Q_{-8}	Q_{-9}	Q_{-10}	Q_{-11}	Q_{-12}	Q_{-13}	Q_{-14}	0	
Byte 7	S	Q_{-1}	Q_{-2}	Q_{-3}	Q_{-4}	Q_{-5}	Q_{-6}	Q_{-7}	Channel 3
Byte 8	Q_{-8}	Q_{-9}	Q_{-10}	Q_{-11}	Q_{-12}	Q_{-13}	Q_{-14}	0	
Byte 9	S	Q_{-1}	Q_{-2}	Q_{-3}	Q_{-4}	Q_{-5}	Q_{-6}	Q_{-7}	Channel 4
Byte 10	Q_{-8}	Q_{-9}	Q_{-10}	Q_{-11}	Q_{-12}	Q_{-13}	Q_{-14}	0	

En grandes rasgos se aprecian las siguientes divisiones en la grabación de un registro de adquisición sísmica (ver figura 38):

- I.R.G.: Inter Record Gap: espacio sin escritura en cinta para separar los Registros.
- Header: Encabezamiento del Registro donde se especifican los datos identificatorios: Número de Registro, Fecha, etc.
- Sample 1: primer "Scan" o primera muestra (sample) multiplexeada de cada canal de datos.
- Sync: Palabra divisoria de Muestras.
- Sample 2: segundo "Scan" o segunda muestra multiplexeada de cada canal de datos.

1 bit de Signo + 14 bits de Mantisa + 4 bits de Ganancia + Bit 0 = 20 bits = 2 ½ Bytes (20/8=2.5)

La cantidad de Bytes por Scan que se generaban con 120 canales adquiridos era:

- 1 Palabra de Sincronismo 4 Bytes
- 4 Canales Auxiliares 8 Bytes (las ganancias de los auxiliares son fijas)
- 1 Palabra de Tiempo 2 Bytes
- Palabras de Ganancia: ½ Byte *120 60 Bytes
- 120 Canales de Datos 240 Bytes

Total Bytes/Scan 314

Bibliografía consultada:

1. *Grabación magnética, Ariel Lozano y Tendela Lucas, UNR – Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, 2003.*
2. *Grabación magnética analógica del sonido, por Jorge Ignacio Andreotti, 2015.*
3. *"The Digital Signal Processing Aplications Newsletter – Analog Devices, 1990.*
4. *Vision system Capacitation Course – Halliburton – Houston – Texas – USA, 1994.*
5. *I/O System II Training Course – Input Output – Stafford – Texas – USA, 1994.*
6. *Electrónica Integrada, Jacob Millman y Christos Halkias.*
7. *Miguel Pita República Bolivariana de Venezuela. Universidad Bicentenaria de Aragua.*
8. *Ingeniería en Automática y Electrónica Industrial-Sistemas Analógicos.*
9. *S.E.G, Recommended Standard for Digital Tape Format: 1967, 1971, 1973 y 1975.*
10. *Diagramas en bloques e interpretación del instrumental sísmico, P.R. Concetti*
11. *GO_2 Concepts.*
12. *Imágenes de Google.*

CAPÍTULO 7: EL INSTRUMENTAL DE ADQUISICIÓN TELEMÉTRICO Y NODAL

Introducción a la Telemetría:

La palabra *telemetría* procede de las palabras griegas τῆλε (tele), que quiere decir: "a distancia", y la palabra μετρον (metron), que quiere decir: "medida", es decir: "medir a distancia".

La adquisición remota de la señal sísmica y el envío, en un tiempo cercano al real, de dicha información hacia una Central Electrónica, caracterizan a la aplicación de la telemetría en nuestra industria.

El envío de información hacia el operador en un sistema de telemetría se realiza típicamente mediante comunicación por cable eléctrico (alámbrica) o por radio (inalámbrica), aunque también se puede realizar por otros medios (ejemplo: enlace de fibra óptica).

En Instrumental de Adquisición Sísmica No Telemétrico, habíamos dicho que la Sísmica 3D se logró llevar a cabo gracias a los Sistemas de Adquisición Telemétricos que acercaron la electrónica a los geófonos del campo.

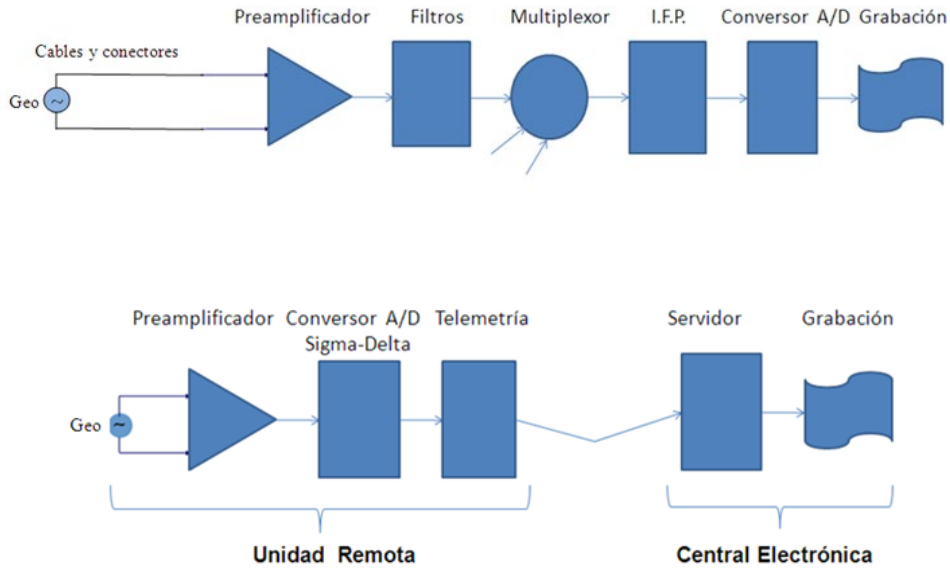


Figura 1, comparación entre sistemas no-telemétricos y telemétricos [9]

En los sistemas no-telemétricos el voltaje generado en la estación receptora, debía recorrer un largo viaje utilizando conductores eléctricos, la señal se iba atenuando en el camino y se cargaba de ruidos. El avance en la electrónica permitió distribuir parte del instrumental electrónico en la línea de registración y aparecieron las: "unidades remotas". Las cajas que contenían la electrónica recibían las señales de hasta 8 estaciones receptoras cercanas, por lo tanto todavía la señal recorría un camino por un cable de registración, pero este era mucho más corto y compartido con menos canales.
Por lo tanto en la primera parte de la era telemétrica, los procesos de adquisición no eran muy diferentes a los que se realizaban con los sismógrafos no-telemétricos: Preamplificación, Filtrado Analógico Muestreo-

Multiplexeo, Amplificación Instantánea de Punto Flotante, Conversión AD de 14 bits y Telemetría. El consumo eléctrico era elevado y las pesadas baterías de 12 V que alimentaban a las unidades remotas, debían ser recargadas con mucha frecuencia y el proceso de transportarlas dificultaba las operaciones. Por lo tanto no podían desarrollarse proyectos 3D con los canales que la teoría y energía sísmica permitía. Los datos digitalizados eran transmitidos telemétricamente vía cable o vía radio hacia la Central Electrónica.
Entre los Sismógrafos que pertenecieron a esta camada los más conocidos en Argentina fueron: MDS-14/16/18 de Geosource-Halliburton, DFS-VII de Texas Instruments, Sercel 368 y el System I de I/O.

La verdadera revolución telemétrica en la sísmica se produjo con el lanzamiento del Conversor Analógico Digital "Sigma Delta".

EL CONVERSOR ANALÓGICO-DIGITAL SIGMA DELTA

El Conversor A/D Sigma-Delta, no perteneció a un nuevo logro de la ingeniería electrónica, ya que había sido utilizado anteriormente como parte de varios circuitos electrónicos. La nueva escala de integración y tecnología, hicieron que sea posible su aplicación en el Instrumental Sísmico.
La tecnología "Sigma-Delta" en Conversores A/D de 24 bits, es empleada en todos los sistemas de adquisición actuales.
Existen varias razones para que el Conversor Sigma-Delta de 24 bits, haya sido adoptado:

- Elimina el uso del Amplificador I.F.P.
- Elimina el Filtrado Analógico (Lo-Cut, Hi-Cut, Anti-alias y Notch Filter).
- Disminuye los Ruidos de Conversión A/D.
- Eleva el Rango Dinámico de 84 a 140 dB (ΔdB ~ 60 dB = 1000 veces)

Ruidos del Sistema – Ruido de Conversión A/D

Aquí nos referimos a la manipulación de ruidos no generados por la fuente sísmica. Se trata de ruidos eléctricos generados en el Sistema de Adquisición (System Noise). Una de las mayores ventajas de usar el Conversor Sigma-Delta, es que se hace prácticamente despreciable el "Ruido de Conversión".

Como hemos visto para convertir la muestra analógica en un número, es necesario compararla con discretos valores de voltajes analógicos, dependiendo de la cantidad de "bits" que posee el Conversor A/D, a este proceso se lo suele llamar: "Cuantificación"

La cuantificación de amplitud contribuye a la generación de "Ruido Blanco" en el Sistema. Como los valores de cuantificación son discretos, existirá una "zona de incertidumbre" entre dos niveles contiguos de comparación. Una muestra analógica estará comprendida entre dos valores de voltajes de

comparación y la diferencia de voltajes entre estos dos valores es un "LSB" (LSB: bit menos significativo).

Podemos decir que la "zona de incertidumbre" se extiende entre" -1/2 LSB y + 1/2 LSB y que cualquier voltaje analógico, dentro de esta banda, será representado por un único valor de conversión (que será uno de los dos extremos). Por esto el valor convertido poseerá un "Error de Cuantificación".

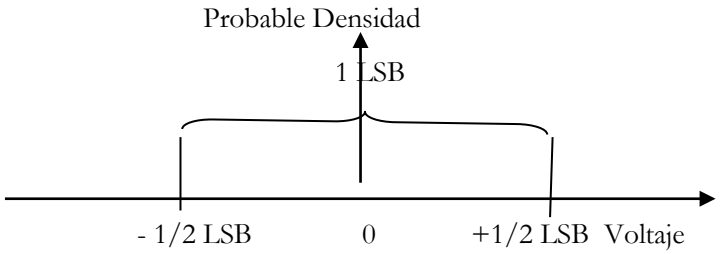


Figura 2: Zona de Incertidumbre en la Conversión [10]

En el dominio de la frecuencia, este "Error" es considerado: "Ruido Blanco" o sea: un ruido de espectro infinito y de igual amplitud, que es generado durante la Conversión A/D. La amplitud del Espectro es directamente proporcional a la cantidad de bits utilizados en la cuantificación e inversamente proporcional a la frecuencia de muestreo.

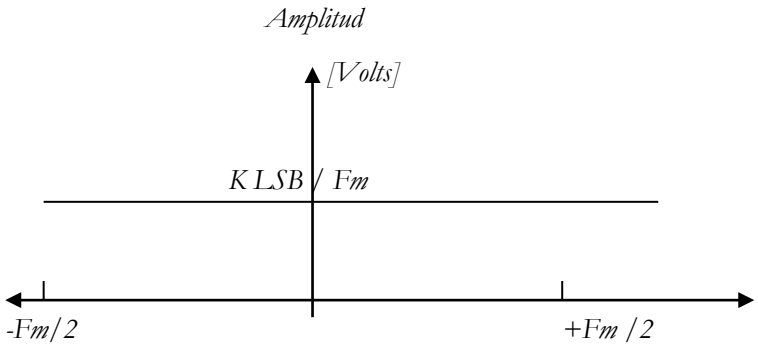


Figura 3: Contenido Espectral de la Cuantificación [10]

En la Figura 3 vemos que la amplitud del espectro de "ruido blanco" es mayor cuando mayor es la cantidad de bits "K" y menor cuanto mayor sea la frecuencia de muestreo "Fm".

Para un Conversor A/D Convencional (15 bits; LSB = 0,6 mV) que recibe muestras cada 2 ms, esta amplitud será de:

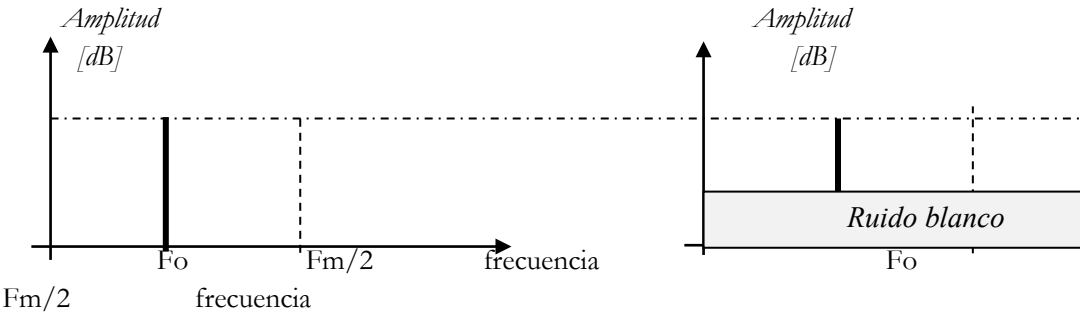
$$\text{Amplitud del Espectro: } \frac{15 * 0{,}6 \text{ mV}}{500 \text{ Hz}} = 18 \text{ micro-Voltios}$$

En cambio el Conversor Sigma-Delta utiliza "un solo bit" para la cuantificación inicial, su frecuencia inicial de muestreo es muy elevada (256 KHz.). Si se trata de un solo bit, su valor de voltaje debe ser igual al voltaje máximo del Conversor, si consideramos que este es de 2,5 Voltios como en el Sercel 408:

Amplitud del espectro: $\frac{1 * 2{,}5\ V}{256.000\ Hz.} = 10$ micro-Voltios

Como vemos los ruidos de cuantificación son equivalentes, pero vamos a comprobar cómo los ruidos del Conversor Sigma Delta se producen fuera del espectro sísmico útil.

Para tener una idea gráfica de lo anterior, supongamos que poseemos una señal de frecuencia fija "Fo" muestreada a una frecuencia "Fm" (Fm/2: frecuencia de Nyquist, figura 4a). Al espectro de la señal "Fo", el Conversor le agrega la amplitud del "ruido blanco", tal como se ve en la Figura 4b.



(a) Espectro de Entrada al Conversor A/D (b) Espectro de Salida al Conversor A/D

Figura 4, ruido de Cuantificación [10]

Si posteriormente al Conversor A/D le colocamos un Filtro Digital Corta Altos de frecuencia de corte "Fb" (Fb < Fm/2), eliminaríamos las frecuencias de Ruido Blanco y la posibilidad de aliasing con la banda inferior de las frecuencia producidas durante el muestreo cuyo límite es "Fm/2", que se encuentran más allá de "Fb".

La Figura 5, muestra que la Banda Pasante sigue teniendo un ruido de amplitud constante.

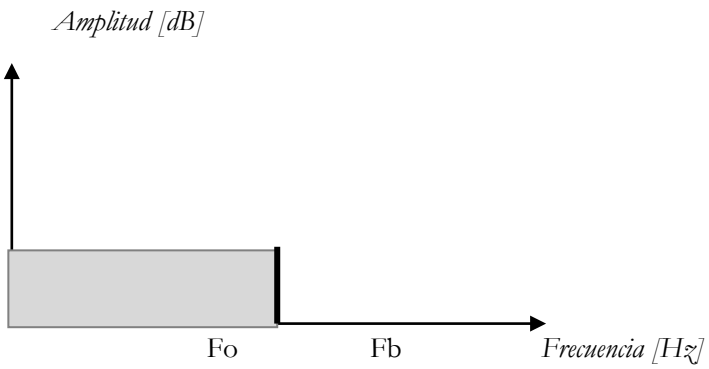


Figura 5: Banda Pasante luego del "Hi-Cut Filter" de frecuencia de corte "Fb" [10]

Veremos más adelante que la cuantificación del ruido es disminuida en el Conversor Sigma-Delta, dentro de la banda pasante sísmica, por un proceso denominado "Shapping Filter" (Filtro Modelador). La acción de "modelado" del filtro permite desplazar la energía de ruido, fuera del área de nuestro espectro sísmico, aunque la energía promedio de ruido se sigue mantiendo similar a la de los conversores tradicionales. Entonces no quedará prácticamente ruido en nuestra banda de interés.

Funcionamiento del Conversor Sigma Delta

El Conversor sigma Delta convierte una señal analógica en otra digital de muy baja resolución, 1 bit, a una muy alta frecuencia de muestreo: 256 KHz.

En el conversor Sigma Delta podemos identificar dos diferentes etapas en el proceso de conversión:

a) Modulador Sigma Delta.
b) Filtrado Digital (Decimation Filters).

Usando técnicas de sucesivos muestreos posteriores (oversampling) y filtrado digital, el muestreo final es reducido (1 KHz., 500 Hz., etc.) y la resolución es aumentada a 24 bits.

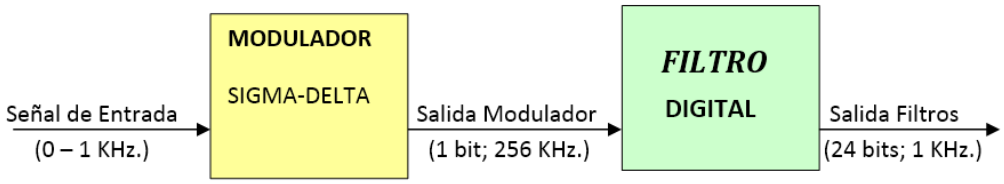


Figura 6: Diagrama en Bloques del Conversor Sigma Delta [10]

El Modulador Sigma Delta

El Modulador es el responsable de realizar la función de "Noise Shapping" ya adelantada.

La Figura 43, corresponde al diagrama en bloques del Modulador.
En la Figura 44 se muestran las distintas señales que se producen en las distintas etapas del modulador para una determinada señal de entrada analógica.

[A]: Señal de Entrada analógica.
[B]: Señal de Salida del Sumador, suma de la Señal Analógica y las Señales de Referencia.
[C]: Señal a la Entrada Inversora del Comparador.
[D]: Señal de Salida del Modulador (bit de salida).

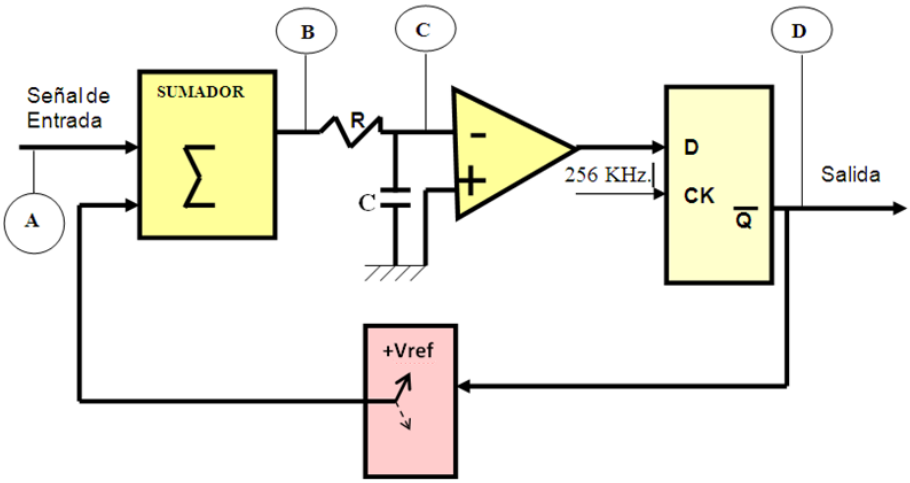


Figura 7: Diagrama en Bloques del Modulador [9]

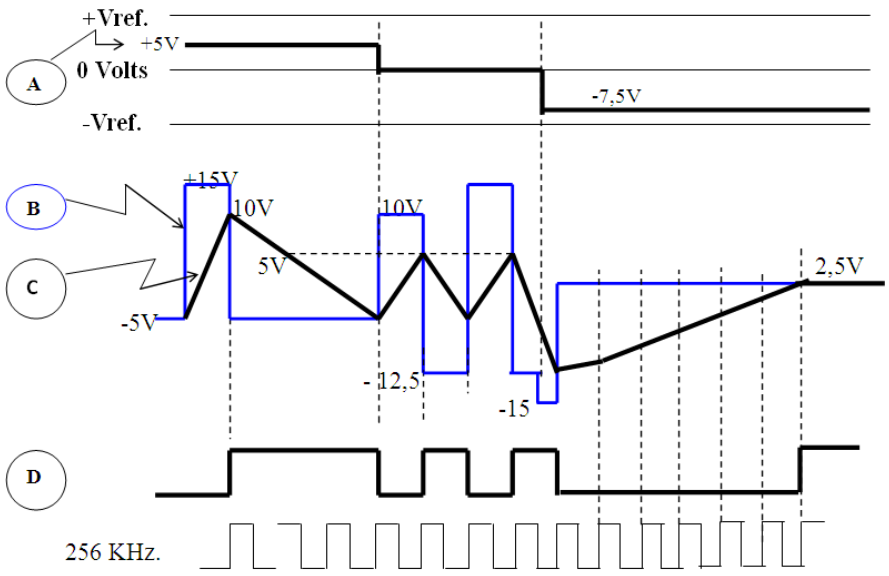


Figura 8: Ejemplo de funcionamiento del Modulador [10]

En las figuras anteriores, se describe el funcionamiento básico del Modulador:

- Una señal analógica **"A",** se encuentra presente a la entrada del Modulador, esta posee tres niveles de voltajes diferentes (+5 V, 0 V y 7,5 Voltios, respectivamente).
- La señal "A" es sumada en la Primera Etapa del Modulador con uno (entre dos) Voltajes de Referencia (+/-**Vref** = +/- 10 Voltios).
- La señal **"B"** = señal "A" +/- "Vref". Esta señal suma **"B"**, modificará la carga del Integrador formado por la Resistencia R y el Condensador C.

- La señal **"C",** corresponde al Voltaje sobre el Capacitor integrador C.
- La señal "C" se aplica a la entrada negativa de un Circuito Comparador. Dicho comparador compara el Voltaje "C" con "Cero Voltios". La relación Entrada/Salida del Comparador será:

Entrada Comparador	Salida Comparador
Señal "C" > 0 Voltios	0 Voltios
Señal "C" < 0 Voltios	5 Voltios

- La salida del Comparador (ya representa Voltajes Digitales) se aplica a la entrada de un "D-Flip-Flop" el cual es "cloqueado" por un Reloj de 256 KHz. La Salida **"-Q"** es la copia invertida de la "Entrada D" al momento de recibirse un "Pulso Positivo" sobre la entrada del reloj "CK" en el D-Flip-Flop.
- La señal **"D"** es el único bit inicial con que se representa la Señal analógica propuesta. Como se observa, es la salida "-Q" del Flip/Flop.
- También la señal "D" se utiliza como realimentación del Modulador para excitar a un Conversor D/A (Digital/Analógico) que oficiará de conmutador entre los dos Voltajes de Referencia (+/-Vref.)

En la Figura 9, se muestra la Salida del Modulador para una señal de entrada del tipo "Sinusoidal". La densidad de "bits" que están en estado lógico "1" (+5 Voltios), es mayor en los picos positivos de la sinusoide, en cambio la densidad de los bits en estado lógico "0" (-5 Voltios), es mayor en los picos negativos de la sinusoide. La densidad mínima de "bits" (de ambos estados lógicos) se obtiene en los picos de voltaje opuestos.

En resumen: "La Señal Analógica se ha convertido en Digital, mediante una variación de densidad de estados lógicos "0" y "1" (bits Stream)".

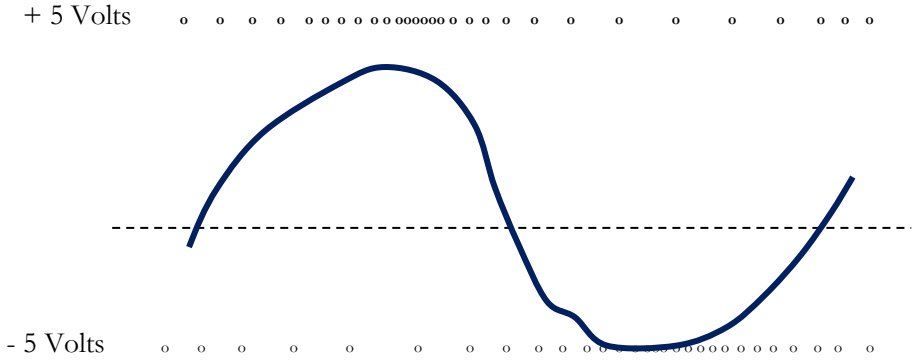
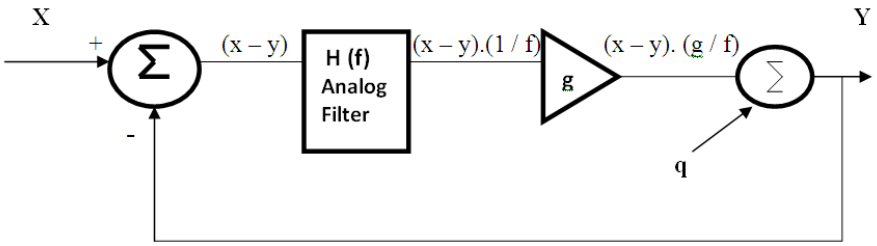


Figura 9: Salida del Modulador para una señal tipo sinusoidal [10]

El Modulador también es el responsable de realizar la función de "Noise Shaping" (modulador del ruido), tal como lo hemos adelantado. Para realizar el análisis correspondiente, pasaremos al "dominio de la frecuencia", donde el "ruido blanco" es representado por un nivel de amplitud constante para todas las frecuencias. Con esto nos ahorraremos de trabajar con ecuaciones diferenciales que entorpecerían la llegada a la conclusión deseada, utilizando en su lugar expresiones algebraicas elementales. Para tal fin, el diagrama en bloques del Modulador Sigma Delta (mostrado en la Figura 7), lo sustituiremos por un modelo linearizado en el dominio de la frecuencia.



$$Y = (x - y) \cdot (g / f) + q$$

Figura 10: Modelo linearizado del Modulador [10]

En la Figura 10, se observa que a la señal de entrada X(f) se le resta la Salida Y(f).

La "Función Transferencia" del Integrador (o filtro pasa bajos), es inversamente proporcional a la frecuencia (1 / f). Si bien en el diseño de este integrador radica la bondad de la performance del Modulador Sigma Delta, simplificaremos su función transferencia por la expresión: "**1 / f**".

El Cuantificador del Modulador está representado por la Etapa de Ganancia "**g**", seguido por la adición del Ruido Cuantificado "**q**". Para simplificar aún más, supondremos que la Ganancia "g = 1".

Operando matemáticamente sobre este modelo:

$$y = \frac{(x - y)}{f} + q = \frac{x}{f} - \frac{y}{f} + q$$

$$y \cdot (1 + 1 / f) = x / f + q$$

$$y = \frac{x / f}{(1 + 1/f)} + \frac{q}{(1 + 1/f)} = \frac{x}{(f + 1)} + \frac{q \cdot f}{(f + 1)}$$

- Si la frecuencia $f \rightarrow 0$ entonces: $y \rightarrow x$

"Para f=0 la Salida "Y" es igual a la Entrada "X", desapareciendo el Ruido "q"".

- Si la frecuencia $f \rightarrow \infty$ entonces: $y \rightarrow q$

"Para frecuencias muy altas la Salida "Y" contendrá solamente Ruido".

De lo anterior se aprecia que el Modulador tiene un efecto de "Filtro Pasa Bajos" para la señal de Entrada "X" y de "Filtro Pasa Altos" a los efectos del Ruido "q". Esto se debe a que la señal "X" se inyecta a la entrada del Modulador, en cambio el ruido "q" se introduce recién antes del lazo de realimentación.

En resumen, podemos decir que el filtro analógico del Modulador se comporta como un "Filtro Modelador de Ruido" (Shapping Filter), donde el ruido es atenuado en la banda pasante de nuestra señal sísmica y es empujado fuera de dicha banda hacia la región de las altas frecuencias.

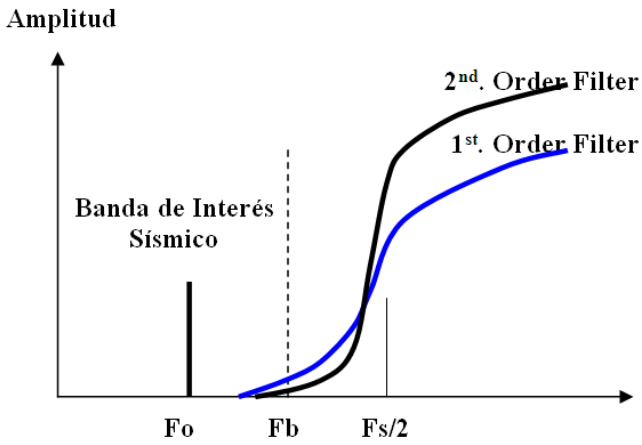


Figura 11: Acción de modelación del ruido (Shapping Filter) [10]

En la Figura 11, se muestra la acción de modelado de ruido en función de la complejidad del filtro utilizado. El conversor Sigma Delta utiliza en su Modulador "Filtros de Cuarto Orden" para obtener un mayor modelado de ruido, de tal manera que el "Filtro Digital Pasa Bajos", de frecuencia de corte "Fb" puede cancelar mayor cantidad de componentes de ruido.

Filtrado Digital (Segunda Etapa del Conversor)

Tal como se aprecia en las Figuras 7 y 8, la salida del Modulador: "Y", resulta prácticamente inentendible tal como se presenta. Por lo tanto para lograr su esclarecimiento deberemos:

- Obtener promedios de muestreos de "1 bit" para producir datos de mayor resolución (Averaging).

- Filtrar las frecuencias de ruido cuantificado y modelado. Como posteriormente el muestreo se va a reducir a los valores convencionales (1,2 o 4 milisegundos), deberemos colocar un filtro Anti-Alias (Pasa Bajos = Corta Altos) de frecuencia de corte "Fb" (Figura 12). Como ahora el filtrado es digital, "Fb" podrá acercarse más a la frecuencia de Nyquist (hasta ¾ de Fnyq; podríamos elegir también en el I/O System II: "Fb = ½ Nyquist"). A su vez el Filtro Anti-alias podrá ser de "Fase Mínima o de "Fase Lineal" (Filtering with Quantization Noise Removal).

- Reducir la frecuencia de muestreo (Decimation).

La Figura 12, corresponde a un diagrama en bloques de esta segunda etapa del Conversor Sigma Delta (Filtrado Digital). Como se ve, cada una de las etapas corresponde a c/u de las necesidades mencionadas más arriba (Averaging, Filtering and Decimation).

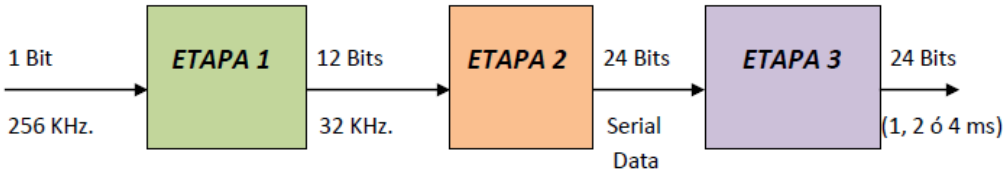


Figura 12, Segunda Etapa del Conversor Sigma Delta [10]

Etapa 1: Averaging:

Esta etapa, en el I/O System II, está incluida físicamente dentro del mismo "chip" que contiene al Modulador. Cada Caja Telemétrica dispone "un Modulador por cada Canal Sísmico".

La etapa consiste en acomodar 12 bits del "bit stream", que ingresan en serie a una velocidad de 256 KHz, para luego sacarlos en "paralelo" a una velocidad de 32 KHz.

Etapa 2 y 3: Filter & Decimation:

Estas etapas son realizadas en el I/O System II, por intermedio de "dos DSP" (Digital Signal Processors), los cuales se arreglan para combinar las funciones de filtrado y reducción del muestreo. Estas etapas son comunes para el total de los Canales de una Caja Telemétrica.

En la Figura 13, se representa la "decimation", correspondiente a una señal discreta, donde la señal de salida "y(n)" posee una velocidad de muestreo ocho veces inferior a la entrada "x(n)". Esta situación se podría representar matemáticamente de la siguiente manera:

$$y(n) = x(n) * s(n) \quad \text{Convolución)}$$

s(n): decimation rate

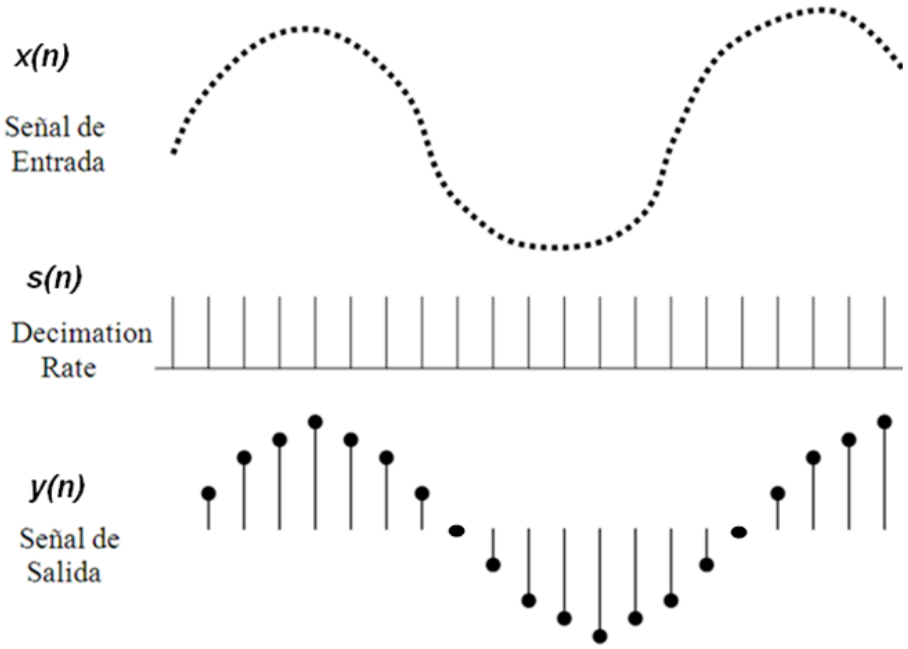


Figura 13, Reducción del Muestreo (Decimation) [10]

Aplicando Transformada de Fourier:

$$Y(w) = X(w) \cdot S(w)$$

Las funciones de "decimation" y "filtrado" pueden combinarse. Para entenderlo representamos en la Figura 14, el resultado Espectral del proceso donde:

X(w): Espectro de la Señal de Entrada al "Decimation Filter" (salida del Modulador)

H(w): Espectro de la Función transferencia.

Y(w): Espectro de la Señal de Salida

La reducción del muestreo requiere también, como hemos dicho, limitaciones en el ancho de banda para limitar la frecuencia máxima a los valores "1/2 o ¾ de FNyquist".

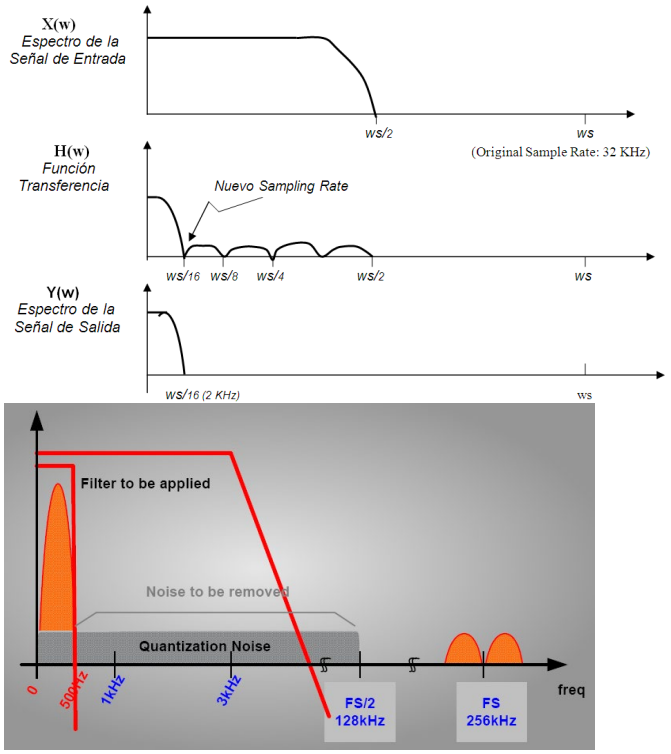


Figura 14, Interpretación Espectral del "Decimation Filter" [10]

La Función Transferencia S(w), determina los coeficientes del Filtro Digital. Estos coeficientes pueden ser seleccionados para diseñar cualquier tipo de filtros. La siguiente ecuación general, gobierna este diseño:

$$y(n) = \sum_{j=0}^{N-1} a(j) \cdot x(n-j) - \underbrace{\sum_{k=1}^{M} b(k) \cdot y(n-k)}_{\text{Realimentación}}$$

Los términos "a(j)" y "b(k)", son los coeficientes que determinan la Función Transferencia S(w).

Si en la ecuación anterior, el término correspondiente a la realimentación es "cero", el filtro se denomina: "Filtro de **R**espuesta **I**mpulsiva **F**inita (FIR)".

Si el término que expresa la Realimentación no es "cero", se trata entonces de un: "Filtro de **R**espuesta **I**mpulsiva **I**nfinita (IIR)

El Sismógrafo I/O System II emplea en su Etapa de Filtrado del A/D Converter Sigma Delta (DSP #2), un filtro FIR y tres filtros IIR.

Los filtros de respuesta infinita (IIR), poseen mejor performance con menores desarrollos de cálculos matemáticos, debido a su realimentación característica. También estos filtros permiten generar funciones sintetizadas

en forma eficiente. Pero los "IIR" son más difíciles de implementar técnicamente, para que funcionen en forma estable, y a su vez, controlando adecuadamente la fase de su respuesta.

Todo lo visto hasta aquí, para Conversores A/D Sigma Delta, puede ser usado para entender el funcionamiento de los Conversores D/A Sigma Delta, con solo invertir el orden secuencial de las etapas.

El SISTEMA TELEMÉTRICO: I/O System II

Varios sistemas de adquisición casi simultáneamente, adoptaron al Conversor Sigma Delta y hasta hoy día todos los sistemas lo continúan empleando. Lograron con esto aumentar: la cantidad de canales adquiridos simultáneamente por reducción de consumo de energía en sus unidades remotas. Entre los primeros sistemas que lo emplearon se encuentran: Sercel 388, I/O System II y Visión de Halliburton.

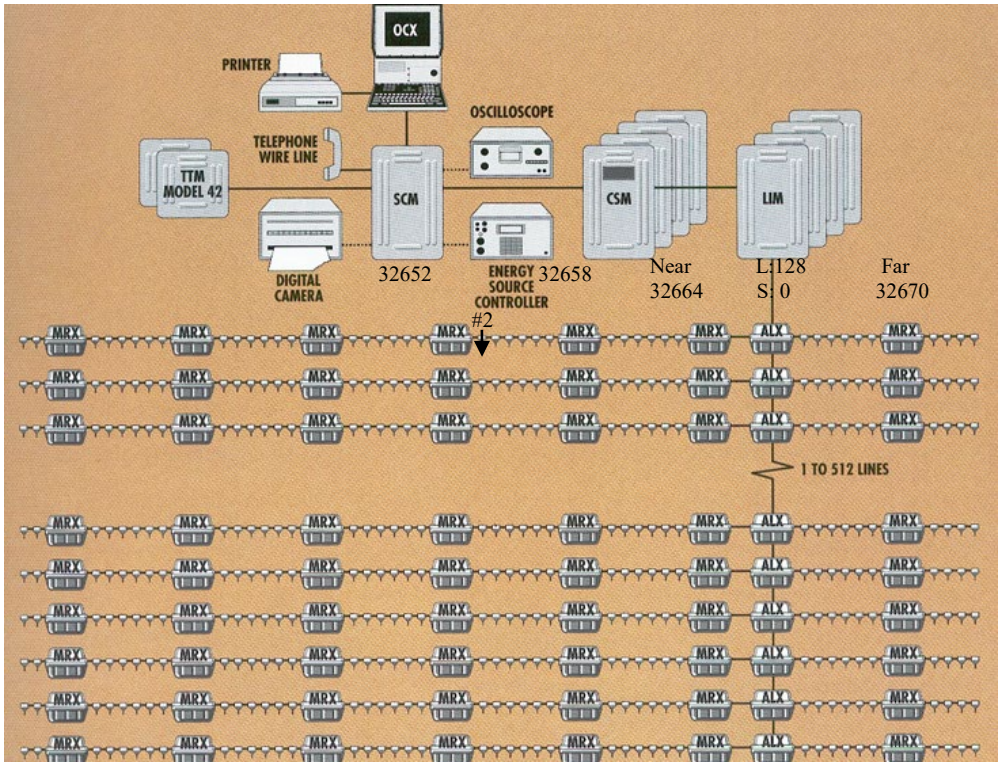


Figura 15, I/O System II: unidades remotas y Central electrónica [3]

En la figura 15 se muestra un diagrama del I/O System II que fue muy utilizado en la Argentina por varias compañías de servicio sísmico a partir de 1990 y al cual nos vamos a referir.

Las unidades remotas MRXs (Miniaturized Remote eXtended Units), poseían 6 canales individuales y se interconectaban por cable con las estaciones receptoras y con sus MRXs vecinas.
En la Figura 16, se muestra un cable de registración del I/O 2, donde se observan los 3 pares de conductores pertenecientes a las estaciones

receptoras más cercanas a cada lado de la unidad, un par de conductores de transmisión telemétrica de Comando (CW: Command Word, proveniente de la Central electrónica) y 3 pares conductores de retorno digital telemétrico de datos (RD: Return Data).

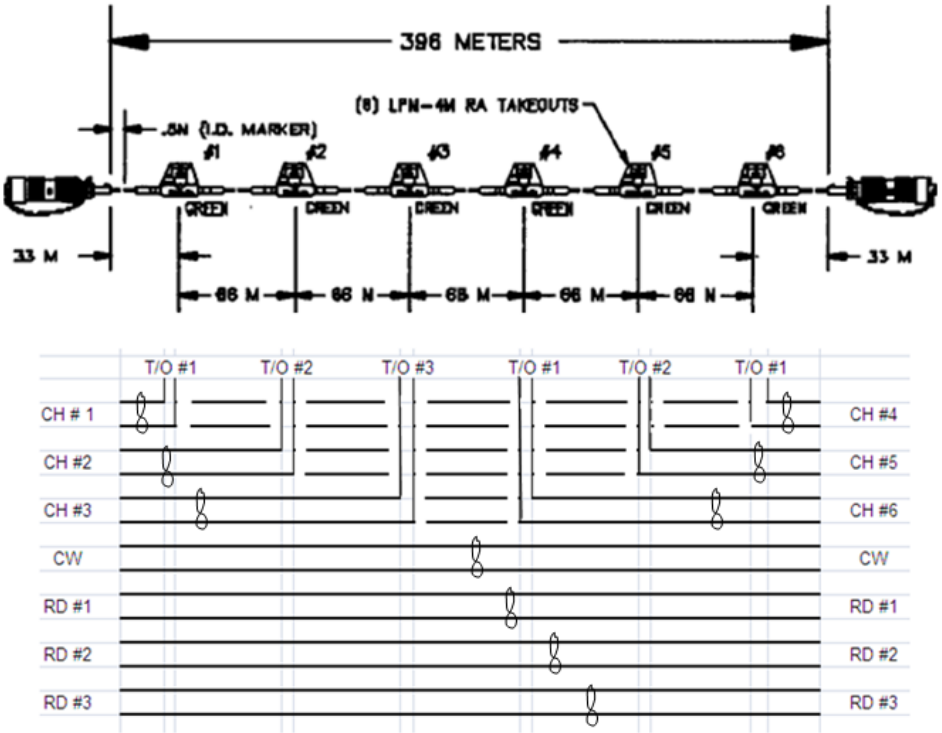


Figura 16, Cable de Registración del I/O System II [3]

Proceso telemétrico de "wake up" en el I/O 2 (ver figura 15):

1. Iniciando el proceso de encendido (wake up), el módulo LIM (Line Interface Module) de la Central Electrónica, envía una onda portadora de 256 KHz por el par CW.

2. La primer ALX (Advanced Line Tap ó Caja de Cruce) que detecta la onda portadora, conecta su alimentación principal, memoriza el puerto de entrada de la portadora, se adjudica la dirección eléctrica "0" y comienza a realizar un auto-test (o wake up test), a su vez repite la señal a las MRXs de su línea y a la próxima ALX.

3. El proceso de "wake up" se repite en cadena y cada unidad "despertada": detecta el puerto de entrada de la portadora, se conecta con la dirección "0", comienza a realizar su auto-test y repite el "wake up" a su unidad contigua.

4. La LIM, mediante el par conductor RD #1(si este se encuentra cortado pasa al RD #2), recibe señales de error durante el proceso de "wakeup", cuando las unidades del tendido terminaron de encenderse, los errores finalizan y la LIM se anoticia.

5. La LIM le asigna a la primer ALX la dirección: "Línea 1, Estación 0" y le pide que reporte el resultado del auto-test.

6. La LIM recibe el resultado del test de la primera ALX del tendido y le ordena que ahora su dirección es: "Línea 128, Estación 0". A este direccionamiento, que depende de la ubicación de cada unidad en la conexión eléctrica a la LIM, se denomina: "**dirección eléctrica**". Las restantes ALXs conectadas para el "Low side", recibirán direcciones de líneas decrecientes a 128 y las ALXs conectadas al "Hi side", recibirán direcciones de líneas crecientes a 128, pero el número de Estación será 0 para todas las ALXs.

7. Las unidades MRXs que se encuentren al lado de las ALXs (Near MRXs), recibirán direcciones de Líneas ídem que las ALXs al que están conectadas pero el número de Estación será: 32764. Las MRXs que se encuentre al otro lado de la ALXs (Far RSXs) recibirán iguales direcciones de Línea que la ALX pero el número eléctrico de Estación será: 32770.

8. Las unidades RSXs que se encuentran hacia el lado de la "Near RSX" recibirán número de estaciones decrecientes en "6" (pues poseen 6 canales cada una). y las que se encuentren hacia el lado de la "Far MRX" número de estaciones crecientes en "6".

9. Con estas direcciones eléctricas el módulo LIM armó un "**mapeo electrónico**" de las estaciones sísmicas tendidas en el campo, que asocia con el "**mapeo de Línea y Estación**" que el Observador ha suministrado al sistema en el OCM (Operator control Module). El LIM transmite esos datos al SCM (System Control Module).

Proceso telemétrico de "adquisición sísmica" en el I/O 2

1. El OCM inicia el proceso de disparo de la fuente de energía y produce una señal de "Time Break" (TB), que se propaga por el par CW.

2. Cuando una MRX recibe la señal TB, sincroniza su reloj con el TB re-comenzando la adquisición de datos a una velocidad de muestreo de ½ milisegundo. Como la propagación del TB en el cable sufre retraso debido a las capacidades parasitas de este y porque la señal es recompuesta cuando atraviesa una MRX, que oficia de repetidora introduciendo un "delay", cada MRX trata de compensarlo seleccionando la muestra que obtuvo anticipada al TB en función de su posición (número de estación eléctrica).

3. La última unidad activa MRX en el tendido, comienza a enviar los datos de sus canales que intervienen en el "spread" (ejemplo: sus 6 canales), utilizando una portadora de 5 MHz. Los datos son enviados en serie (bit por bit) y cada muestreo es precedido por una palabra de 24 bits denominada "Scan Word". Los 24 bits de cada muestra de cada canal, se codifican telemétricamente en dos bytes de 14 bits cada

uno que siguen en serie a la "Scan Word". Para finalizar se transmite una palabra de fin de datos de esa RSX (EOD: End of Data).

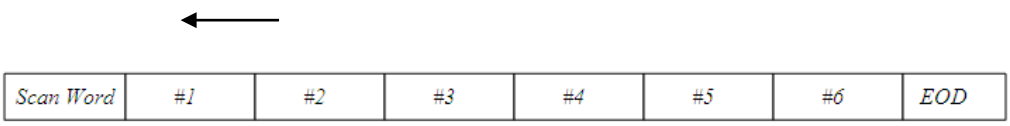


Figura 17, transmisión de la última RSX activa en una línea sísmica [9]

4. Existe una analogía ferroviaria que bien explica el resto del proceso. Suponemos que la última MRX activa aporta la "locomotora" de un tren de datos, los vagones lo constituyen las muestras de los canales que participan en el spread de esa MRX, el EOD es el furgón de cola. El tren viaja hacia la ALX de su línea sísmica y al pasar por la próxima estación o MRX: desengancha el EOD e introduce los vagones que aporta esa MRX (las muestras de los canales de esa MRX), luego vuelve a enganchar el EOD. Este proceso continua desenganchando el EOD, colocando los vagones de cada una de las MRXs, volviendo a enganchar al final al EOD hasta llegar a la estación ALX.

5. La ALX coloca en la Scan Word el número eléctrico de línea (ejemplo: 128) y direcciona el "stream de datos" en uno de los pares de conductores del "Cable Entre Líneas" (Line Tap Cable), que oficia como una autopista hacia la estación central, colectando todas las ALXs colocadas hacia ese lado de la Central Electrónica. Así llega el tren a la estación terminal que es el módulo LIM de la Central electrónica I/O System II.

Memoria Mapa y Memoria Buffer

Habíamos explicado que el módulo LIM, asociaba el "mapeo eléctrico" con el "mapeo línea-estación", este último proporcionado por el SCRIPT que contiene todos los datos del "spread" (estaciones receptoras a utilizar en cada disparo).

1. Previamente a cada disparo o adquisición, la "Memoria Mapa" es direccionada con la "dirección eléctrica de las unidades remotas" y en cada celda direccionada se escribe el canal sísmico que le corresponde en el Scan de Datos (muestra de todos los canales obtenida en el mismo instante de tiempo que intervienen en el spread).

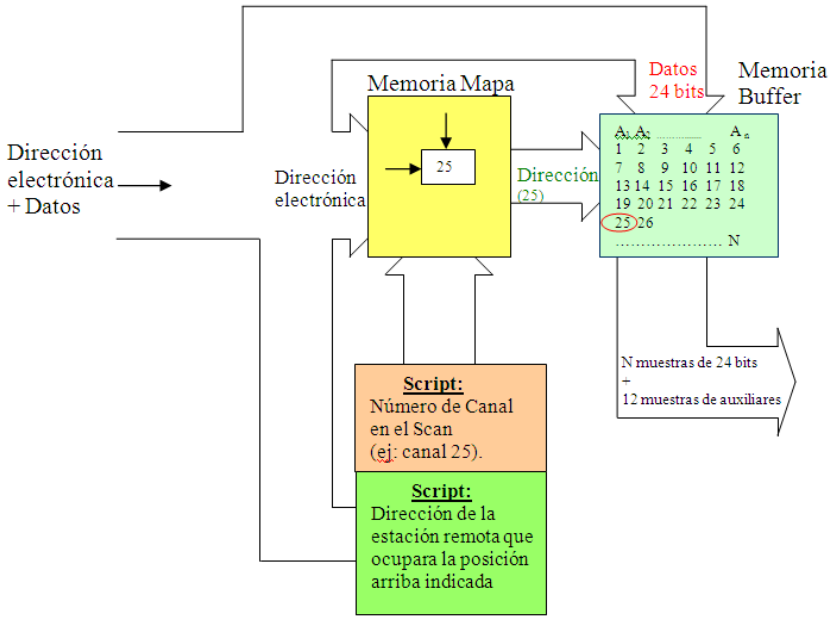


Figura 18, proceso de interpretación y ordenamiento de la adquisición telemétrica [9]

Por ejemplo: consideremos que el Canal #3 de la Estación 32652 de la Línea 128 (dirección eléctrica), le corresponde el Canal #25 en el Scan de Datos para esa secuencia (ver figura 15 y 18).

2. La LIM recibe el tren de datos en forma caótica pero la "Scan Word" posee la información suficiente para: conocer la línea de la cual proviene, a que muestreo después del TB corresponden las muestras que le siguen en tándem. El número de Estación lo determina la ubicación de la posición en el tren análogo.

En nuestro ejemplo la dirección eléctrica es 32652 -2-128 y lee el valor "25" previamente grabada en la memoria.

3. La lectura de la Memoria Mapa se aplica para direccionar a la Memoria Buffer, la cual debe acomodar a las muestras recibidas en función de su posición en el scan de datos. Sobre las entradas de escritura de la Memoria Buffer se encuentran en ese momento los 24 bits correspondientes a la estación sísmica.

La dirección "25" es la posición que le corresponde a las muestra de la estación 32652-2-128 en el actual "spread" o Scan de Datos.

4. Cuando la Memoria Buffer posee cargada todas las muestras correspondientes al Scan, esta es descargada para pasar al próximo proceso. Los Canales Auxiliares se cargaron previamente y ocupan las primeras posiciones de memoria

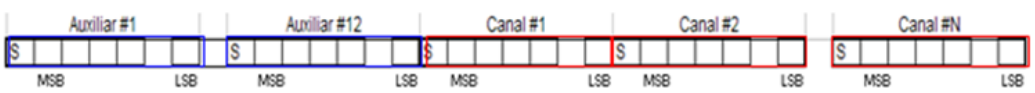


Figura 19, Scan de Datos saliendo de la Memoria Buffer [9]

Reformateo a IEEE

Para un proceso más preciso y eficiente, las muestras son convertidas en una palabra de 32 bits, con Mantisa y Exponente, que se denomina: "expresión en punto flotante" (floating point) y de esta forma se escriben las muestras sísmicas en la cinta.

	Valor Absoluto	Mantisa	Exponente
Ejemplo:	13,56	= 1356	x 10^{-2}

La diferencia con el ejemplo, es que estamos operando con algebra binaria (la base es 2 y no 10) y que tenemos 24 bits fijos.

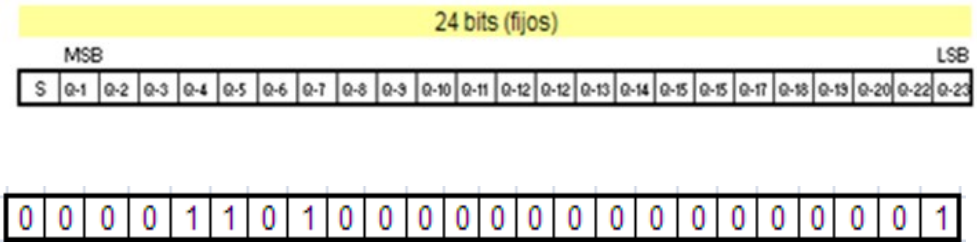


Figura 20, digitalización de un voltaje de 1015 mV en el I/O System II [9]

En la figura 20 se expresa en 24 bits el voltaje de +1,0156 Voltios a la entrada del Conversor AD del I/O System II, cuyo voltaje máximo de digitalización es de es ± 10 V.

El proceso de convertir una muestra de 24 bits en otra de 32 bits con Mantisa y Exponente es la siguiente:

1. Se moverán los bits hacia la izquierda (shift left) hasta que el "bit más significativo" (MSB), sea un "1".
2. De acuerdo a nuestro ejemplo debemos desplazar tres posiciones hacia la izquierda para que el "1" ocupe el MSB.
3. En algebra binaria cada desplazamiento hacia la izquierda significa una multiplicación por 2, es decir que hemos aumentado el número original 8 veces (2 x 2 x 2). En números binarios y en formato SEG 4D-8058, el decimal "8" se representa como: "00000100".

El resultado no se altera ya que el aumento del valor de mantis es memorizado con los exponentes.

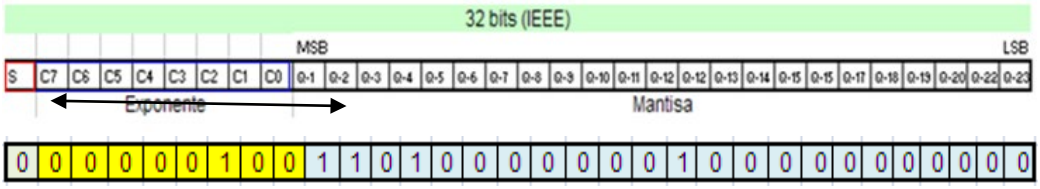


Figura 21, conversión a IEEE de 32 bits [9]

Formato de Grabación SEG D – 4 Bytes (8058)

Si los datos no van a ser procesados: por sumas, correlación o por reducción de ruidos, el último paso antes de la grabación en algún medio (cinta, disco duro, CD), es el "formateo", es decir el agrupamiento de los bits de cada muestra en "Bytes", de acuerdo a lo establecido en la Norma SEG D – 4 Bytes (8058).

Tracks	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Byte									
N°	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	S	C 7	C 6	C 5	C 4	C 3	C 2	C 1	P
2	C 0	Q –1	Q -2	Q -3	Q -4	Q -5	Q -6	Q -7	P
3	Q -8	Q –9	Q -10	Q -11	Q -12	Q -13	Q -14	Q -15	P
4	Q -16	Q –17	Q -18	Q -19	Q -20	Q -21	Q -22	Q -23	P

Figura 22, Formato de grabación utilizado por casi todos los equipos de adquisición sísmica [SEG]

NOTA: Completaremos la explicación del Formato cuando analicemos sistemas de adquisición más modernos que el I/O II.

SISTEMAS TELEMETRICOS CON PROTOCOLOS DE RED

Internet revolucionó las telecomunicaciones tanto como la vida de todo ser humano. Rápidamente la industria sísmica utilizó redes en la telemetría y la adquisición se hizo más segura y más práctica.

Sercel fue una gran protagonista de esta era y sus sistemas 408 y 428, utilizando Protocolos de Internet TCP/IP, fueron los más utilizados en la telemetría por cable. Las Unidades Remotas del 408 y del 428 pueden ser mezcladas en el tendido, con la sola condición que se trabaje a una velocidad de red de 8 Mbps (8 megabits por segundo).

Las principales características de estos sistemas en red son:

1. Cada estación receptora se comporta como un "usuario de la red" y tiene una dirección física (MAC) y otra electrónica (IP).

2. Las cajas de cruce funcionan como "enrutadores" (router) para encaminar paquetes de datos de una red a otra y conectarse con el Servidor del Sistema.
3. El "Servidor de la Red" lo constituye "la Central electrónica", encargada de suministrar información a una serie de usuarios y de recibir y procesar los datos recibidos de ellos.

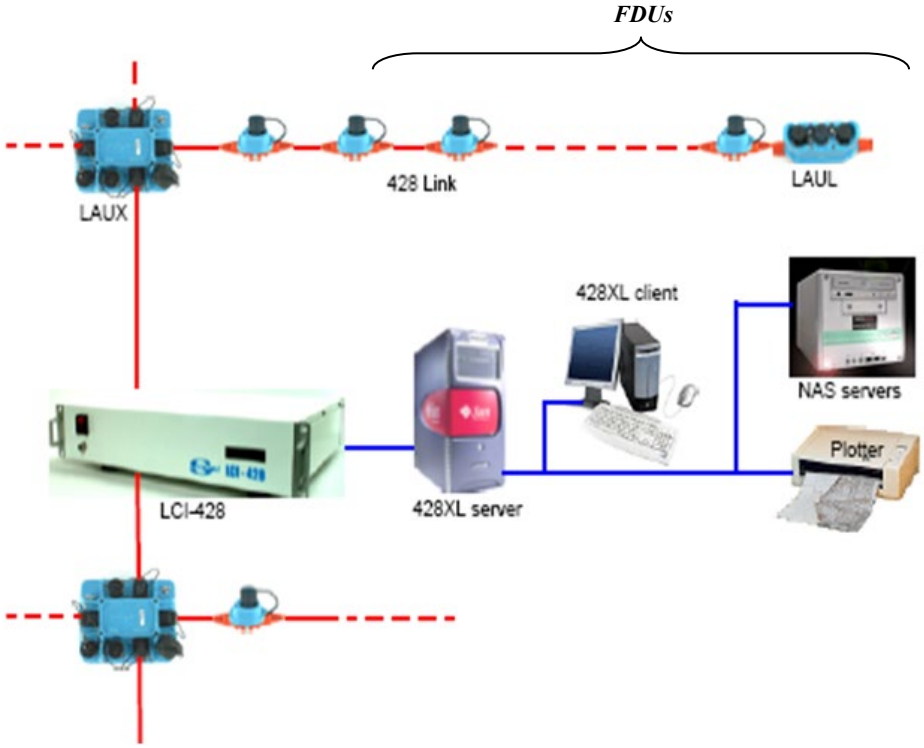


Figura 23, Sercel 428, unidades remotas y Central Electrónica [4]

La Central Electrónica del Sercel 428

La Central del Sercel 428 tiene una concepción muy distinta a la del Sercel 408, ya que el Sercel 428 utiliza una Workstation como Servidor de la red y soluciona por software lo que antes se procesaba por hardware.

- **El Módulo LCI (Line Control Interface)** es en el Sercel 428, el que vincula a la Central Electrónica con las Unidades Remotas de la Red, oficiando de Nodo de Registración (Recorder Node).
- **El 408 XL Server** es el que contiene el programa de Aplicación de la Red y el software de procesamiento de los datos sísmicos adquiridos (suma, correlación, diversity stack, grabación, etc).
- **El 408 Client** es un segundo servidor que permite realizar operaciones simultáneas de chequeos de línea y procesos mientras las operaciones principales de registración se encuentran también en proceso.

Las Unidades Remotas del Sercel 428 y 408

- **FDU (Field Digitizing Unit)**

  En el Sercel 408/428, las Estaciones Receptoras (FDUs) son monocanales, es decir no comparten el cable con ninguna otra estación evitando posibilidades de "crossfeed". Posee un conector KCK-2 que permite que la ristra de geófonos se conecte directamente a la unidad.

  Las FDUs, amplifican (ídem amplificador diferencial mostrada en el capítulo anterior) y convierten la señal analógica en palabras de 24 bits a un periodo de muestreo de 0,25 ms (ídem Conversión Sigma Delta AD explicada anteriormente).

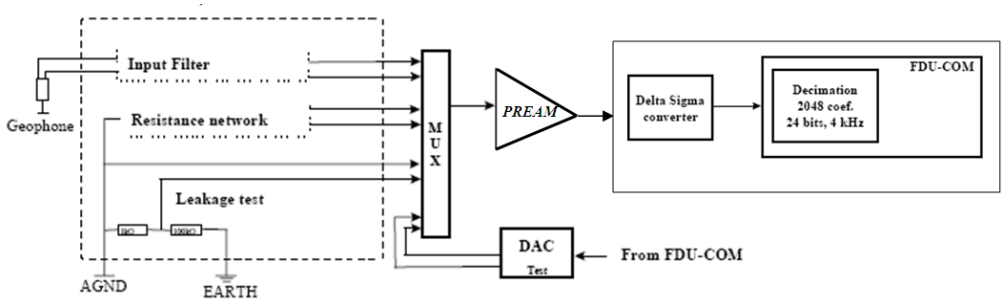


Figura 24, procesamiento de la señal sísmica en la FDU [4]

- **LAUs (LAULs y LAUXs: Line Acquisition Unit Line/Crossline)**

  Estas unidades completan el proceso de muestreo de las FDUs que se encuentran en su segmento, ejecutando: la decimación final al muestreo seleccionado, filtrando digitalmente a la señal (Fase Mínima o Fase Lineal) y agrupando en paquetes las muestras que recibe de su Segmento* para ser colocadas en la red (network).

Se denomina "segmento**" a las unidades FDUs y cables que se encuentran entre dos LAULs.*

Las LAULs y las LAUXs se conectan a baterías de 12 Voltios y generan voltajes eléctricos de ±24 voltios con los cuales se alimentan las FDUs de sus segmentos, utilizando los mismos conductores del cable que las interconecta.

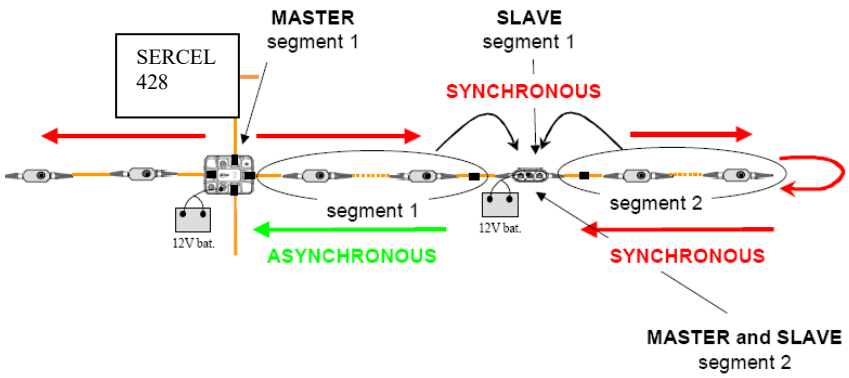


Figura 25, activación, control y procesamiento de los segmentos [4]

La figura 25 muestra varias características de las operaciones desarrolladas en un segmento:

1. Se denomina unidad "master" (maestra), a la LAUL o LAUX que activa a las FDUs de su segmento y controla la adquisición de las mismas, iniciando un registro de datos o de test. En la figura 25 la LAUX que se encuentra como caja de cruce de línea y la LAUL conectada al segmento 2, ofician de "masters".

2. Se denomina unidad "slave" (esclava), a la LAUL o LAUX que recibe los datos adquiridos de las FDUs de su segmento, los procesan y compactan en "paquetes" para ser enviados por la red. En la figura 25, la LAUL que interconecta al segmento 1 con el 2, oficia de "slave" para el segmento 1 y como "master" y "slave" para el segmento 2 ya que es la última LAUL de esa línea.

3. Los comandos desde la Central Electrónica y las Unidades remotas son "Sincrónicos" (Synchronous), porque todo el tendido activo tiene que responder sincronizadamente, por ejemplo: al "Time Break" para iniciar la adquisición.

4. El camino de regreso de las unidades remotas a la Central es "Asincrónico" (Asynchronous), ya que los paquetes de datos son regidos por los protocolos de red TCP/IP.

5. Las LAUXs son Cajas de Cruce y ofician de "Routers" en la red y debe existir una por línea de registración, pueden oficiar de repetidoras y también permiten que existan conexiones redundantes entrelineas que, ante un eventual corte en el tendido de registración, la información y control se re-encamine por otro tramo de red. Además posee los mismos atributos que las LAULs.

Cables Telemétricos del Sercel 428:

La practicidad de operar en el campo con el Sercel 408/428 constituyó por si solo otro hecho destacable en la historia de la sísmica, ya que el instrumental ahora es fácilmente transportable, simple de operar,

liviano y evita los graves problemas de conexión en cables y unidades remotas que producían grandes demoras en las operaciones. En un estudio estadístico, llegue a medir un ahorro de tiempo promedio del 20% al operar con este sistema comparado con un sistema I/O2 con 2000 canales de adquisición.

Todos los cables, los de línea y los transversos, poseen 2 pares de conductores trenzados y en sus extremos están terminados con conectores hermafroditas FM-4.

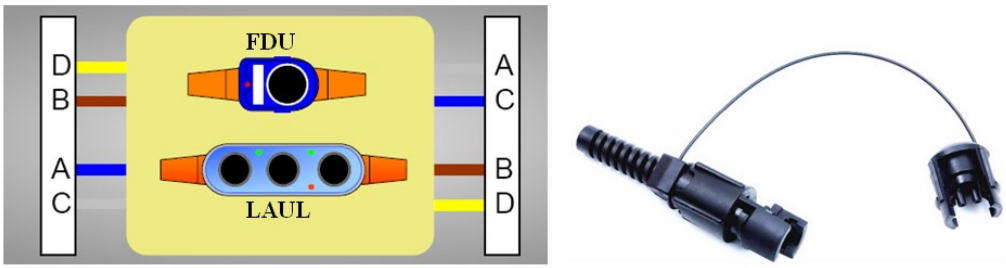


Figura 26, diagrama del cable telemétrico de 4 conductores y conector terminal FM-4 [4]

Las FDU pertenecientes a un "segmento", reciben sus voltajes de alimentación ± 24 V, generados en las LAULs o LAUXs, transportados por los conductores de transmisión de datos, los cuales son capturados por los las unidades de los denominados "ghost pairs", que se conectan a los puntos medios de los transformadores de pulso de entrada a las FDUs.

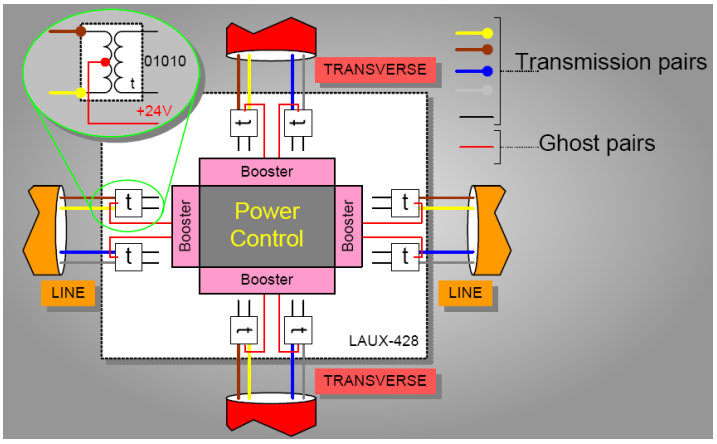


Figura 27, diagrama de una LAUX donde se observan los "ghost pairs" [4]

La cantidad de FDUs que pueden ser abastecidas en un segmento, depende del tipo de cable utilizado, de la frecuencia de portadora usada para la transmisión (8 o 16 MHz), del consumo de las unidades (408/428) y del periodo de muestreo empleado.

1. El cable ST (standard) de 6,5 mm (0.25 in) es el más liviano y por lo tanto más débil, pero que admite una mayor separación máxima entre FDUs: 110 metros para 8 Mbs y de 90 metros para 16 Mbps.

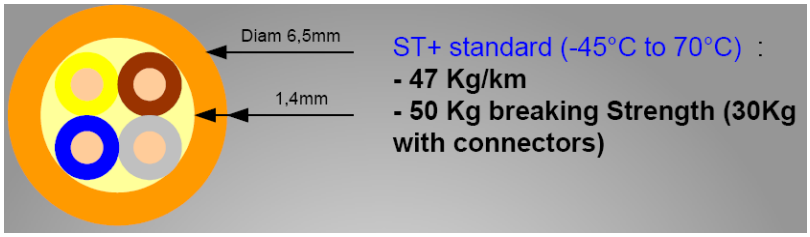


Figura 28, Cable Telemétrico Estándar ST (standard) [4]

2. El cable WPSR (waterproof and traction resistant) con alma de Keflar, de 9,5 mm (0.37 in) es el más pesado pero mejor protegido para su empleo en la línea y admite una separación máxima entre FDUs de 90 metros trabajando con una portadora de 8 Mbps, en cambio para 16 Mbps la separación máxima admitida es de 75 metros.

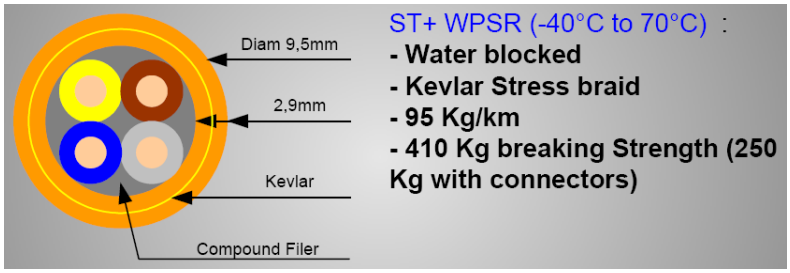


Figura 29, Cable Telemétrico WPSR [4]

3. El Protocolo TCP/IP de la red admite hasta un máximo de 120 canales por segmento para 16 Mbps y 60 canales para 8 Mbps. Por este hecho la capacidad máxima de canales adquiridos por línea es de: 2000 canales para el Sercel 428 y de 1000 canales para el Sercel 408. Resulta evidente que si mezclamos FDUs 408 y 428, debemos adoptar como limite un máximo de 1000 canales por línea de registración.

4. Las unidades 428 trabajando a 16 Mbps tienen mayor consumo (132 mW) que trabajando a 8 Mbps (120 mW). Es importante considerar la atenuación que sufre el voltaje de alimentación de las FDUs a medida que se expande la distancia al origen. Los límites del voltaje de trabajo aceptables va de 50 a 22 Volts.

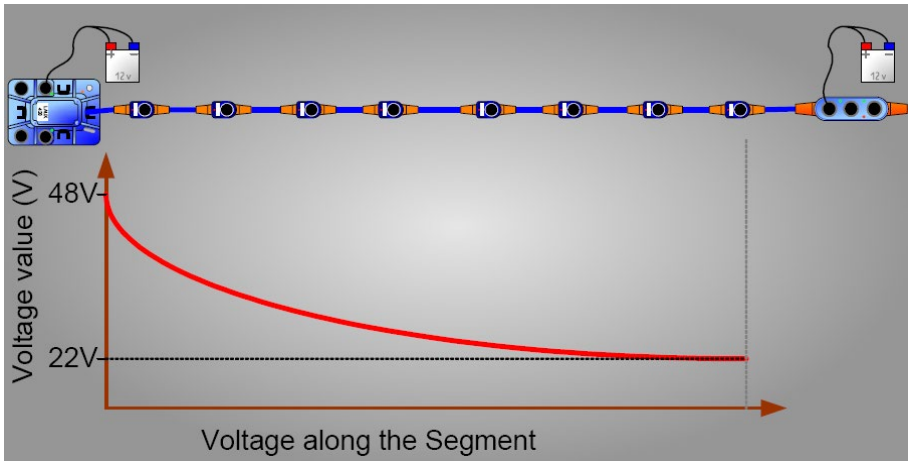


Figura 30, caída de voltaje en función de la cantidad de FDUs e intervalo de cable [4]

Los cables "Transverse" (interlineas, entre LAUXs) poseen un diámetro de 7,9 mm (0.31 in). Estos cables tienen una longitud máxima de 125 metros, para aumentar esta longitud pueden agregarse hasta 5 cables conectados por repetidoras (TREP o LAUXs). Otra opción es utilizar Cables de Fibra Óptica con los cuales pueden lograrse distancias de hasta 40 Km en un solo tramo.
Los cables interlineas (transversas o "backbones"), pueden transmitir hasta 10.000 canales en tiempo real.

En base a todo el condicionamiento anterior, Sercel aconseja utilizar la siguiente tabla para determinar el límite máximo de FDUs entre LAULs y longitudes de cables de transversas.

428XL System

MAX of FDUs and DSUs @2ms between LAUs

Cable Length Between Boxes	8 Mbps		16 Mbps	
	FDU	DSU	FDU	DSU
5m	60	20	102	40
10m	60	20	90	40
15m	60	20	81	40
20m	60	20	74	40
25m	60	20	68	40
30m	60	20	64	40
35m	60	20	60	40
40m	59	20	57	40
45m	56	20	55	39
50m	54	20	52	37
55m	52	20	50	36
60m	50	20	48	34
70m	47	20	45	32
80m	44	20	43	30
90m	42	20	40	29
100m	38	20	NA	NA
110m	37	20	NA	NA

Transverse by using Copper wire cable

InterLine	Cables	TREP-428
0-125m	1	-
125-250m	2	1
250-375m	3	2
370-500m	4	3
500-625m	5	4
625-750m	6	5 MAX

Tabla 1, máxima cantidad de FDUs vs. Longitud de cable y velocidad de transmisión [4]

Red Sísmica Areal del Sercel 428

Las partes que forman la red Sercel o "nodos", son las siguientes:

1. Control Node: Server and Human Control Interface (e428 Client software).
2. Recorder Node: LCI-428.

3. Data Buffer Node: LAUs (LAUL-428 or LAUX-428 or LAUL or LAUX or LRU).

4. Acquisition Node: FDU-428 or FDU or DSU3-428 or DSU3 or DSU1.

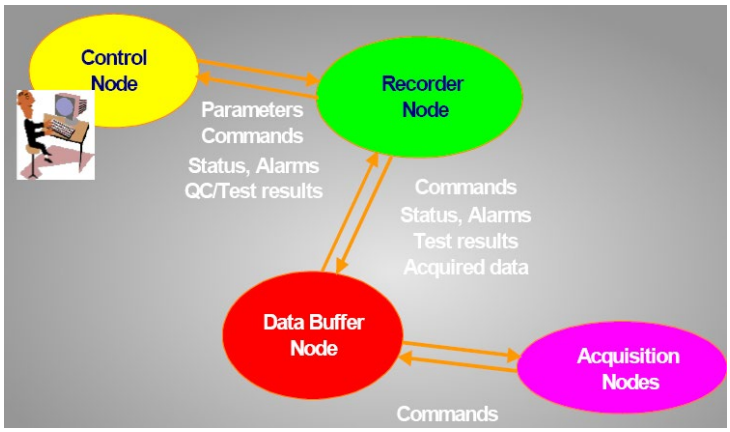


Figura 31, Red Sísmica Areal del Sercel 428 [4]

Como hemos visto, la orden de adquisición de datos y las muestras sísmicas adquiridas, son secuencias Sincrónicas establecidas entre FDUs y LAUs (Acquisition Nodes vs Data Buffer Nodes).
Las LAUs (Data Buffer Node) analizan, procesan y comprimen las muestras y las envían hacia la Central Electrónica (Control Node via Recorder Node) mediante un protocolo Asincrónico.

En informática y telecomunicaciones, se denomina "Protocolo" al conjunto de reglas y estándares que controlan la secuencia de mensajes que ocurren durante una comunicación entre entidades que forman una red.
Los protocolos que emplea la red es TCP/IP (Transmition Control Protocol / Internet Protocol), salvo en la comunicación en los cables "transversa" o interlineas que se establece a 100 mbps usando un protocolo estándar de Ethernet.

Para mejor entender y a su vez estandarizar el diseño de redes, se estableció en 1984 un modelo de referencia donde el traslado de la información entre equipos a través de un medio de red, se dividió en siete partes (capas) razonablemente independientes y más sencillas de resolver. A este modelo se lo denominó "Modelo OSI" (ISO en inglés: siglas de la "International Organization for Standardization").

OSI	TCP/IP	Función

Application	7	Application	Application	Link to Application (FTP, HTTP, Telnet)	**Acquisition**: Record Seismonitor **Tests**: Instrument Field
	6	Présentation		Data Formatting (HTML, Cryptage)	
	5	Session		Communication management (NetUse)	
Transport	4	Transport	Transport	DATA PACKETS cut out Scheduling (TCP, UDP)	
	3	Network	Internet	@, Routing (IP, IPX (Novell users), X25)	
	2	Link	Network Interface	Access methode to support, Translation of data (Eth, Token Ring, ArcNet, FDDI,...)	
	1	Physical			

Figura 32, Modelo OSI de estandarización de redes [4]

La Red Sercel utiliza el Protocolo TCP/IP que simplifica en 4 capas el modelo OSI.
La "**Capa de Aplicación**" agrupa las capas de Presentación y Sesión del OSI. Esta capa corresponde a las aplicaciones del programa e-428 que ejecuta el Sercel 428 y que son: Monitoreo de los Datos Sísmicos, Adquisición Sísmica o Test.

Las LAUs comprimen las muestras sísmicas de su segmento en "Paquetes" (frames: bloque fijo de datos transmitidos como una sola entidad). Esta función corresponde a la "**Capa de Transporte"** del modelo OSI.

1. Los paquetes (frames) están compuestos por celdas: 128 celdas de 128 bits cada celda para una transmisión de 16 Mbps o 64 celdas para 8 Mbps. Por lo tanto:

   Cantidad de bits por "frame": 128 * 128 = 16384 bits (128*64 = 8192 bits)

   Si 16384 bits en 1 ms, entonces se transmitirán 16 Megabits por segundo.
   Si 8102 bits en 1 ms, entonces de transmitirán 8 Megabits por segundo.

2. Los Frames están encabezados por un "Frame Header" (FH)

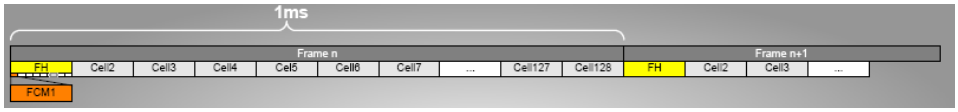


Figura 33, secuencia de transmisión en las LAU's [4]

La **"Capa de Internet"**es la que genera las direcciones IP de origen y destino a las cuales se deben dirigir los paquetes, la que incluye en el paquete, o interpreta si la dirección IP de los paquetes se refiere a su propia dirección IP.

La "**Capa Networking Interface"** contiene a la dirección física de origen y destino (MAC address). Ya habíamos visto los cables que transportan los datos, que pertenecen al trato de esta capa. Sabemos que el Protocolo

TCP/IP limita la cantidad máxima de canales a transportar en cada segmento a 120 canales.

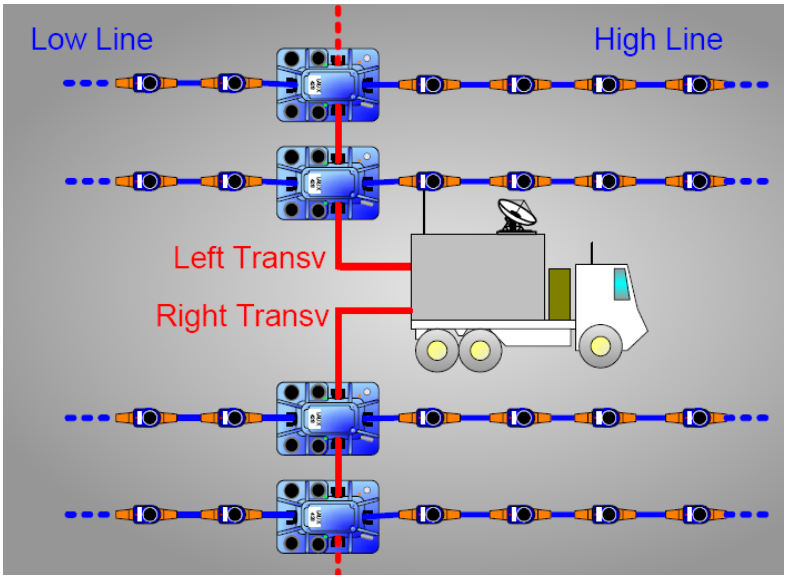


Figura 34. Conexionado de las Unidades Remotas con la Central Electrónica [4]

Consumption	140mW	120mW 8Mbps	132mW 16Mbps
Operating Voltage	27-50V DC	22-50V DC	
FDU weight	415 g	350 g	
Noise (3-200Hz)	620nV (G1)	450nV (G1)	
	170nV (G2)	145nV (G2)	
Inst. Dyn Range	130 dB		
Distortion	-110 dB		
Water Immersion	-15m (WPSR) / -1m (ST+)		

Figura 35, consumo de energía en las FDU´s del Sercel 408 y del 428 [4]

III – SISTEMAS NODALES

Generalidades:

La actividad sísmica terrestre cada día incorpora mayor cantidad de puntos receptores y la complejidad de: transportar, operar y mantener el instrumental necesario, llevó a la industria a fabricar los "Sistemas Nodales" (wireless land seismic system), eliminando total o parcialmente los cables de interconexionado.

En los sistemas nodales las unidades remotas de adquisición pueden trabajar independientemente de la Central Electrónica (Sismógrafo) y, en ese caso, sus datos deben ser recolectados (harvested) de cada unidad receptora por diferentes medios, según el sistema utilizado. Esto implica que la mayor parte del dato sísmico (en algunos sistemas: el total del dato sísmico), no es obtenido en tiempo real y las acciones de QC deben ser desarrolladas de manera muy diferentes a los sistemas convencionales. Algunos sistemas nodales permiten la conexión de sus unidades remotas a la Central vía enlace radial WiFi, y esto permite un pequeño control de la adquisición en tiempo real. Últimamente nuevos sistemas nodales, permiten la adquisición en "casi tiempo real", por conexión radial entre sus unidades remotas.

Clasificación de los sistemas nodales

Podríamos entonces clasificar a los sistemas nodales en tres categorías:

- Completamente autónomos (Blind). Es el más simple sistema nodal y no permite el QC en tiempo real ya que cada unidad receptora trabaja independientemente de la Central Electrónica y los datos adquiridos deben ser leídos con posterioridad al momento de la adquisición. El sistema ZLand de Fairfield y el SmartSolo de DTCC, pertenecen a esta categoría y serán luego analizados.

- Autónomos con capacidad de QC (QC Capable). Si bien pueden trabajar como unidades completamente autónomas, los datos sísmicos pueden ser leídos en el campo y transportados a la Central Electrónica para su QC. El sistema Unite de Sercel o Sercel 528, pertenecen a esta categoría y será analizado en este artículo.

- Adquisición en tiempo real (Real time QC). Son sistemas donde las unidades receptoras se encuentran radialmente (wi fi) conectadas con la Central Electrónica y pueden realizar el QC en tiempo real. El sistema RT-2 de Wireless Seismic pertenece a esta categoría y será analizado en este artículo.



ARU unit - ZLand Unite RAU with geophones RT-2 System WRU

Figura 36, distintos tipos de sistemas nodales

Con los sistemas nodales, se elimina un gran volumen de material a ser depositado, transportado, tendido y levantado de las líneas de recepción sísmica (principalmente los nodos "blind") y también se ahorra esfuerzo y dinero al no tener que testear y reparar cables durante la operación y/o en campamento.

Comparación de Costos:

Utilizando sistemas nodales, un proyecto sísmico debería abaratarse con respecto a utilizar instrumental sísmico convencional ya que sería necesario: menor cantidad de personal, menor cantidad de vehículos de transporte y chequeo de línea, menor volumen de repuestos y talleres de reparación de cables, etc.

La Empresa Fairchild realiza una interesante presentación donde compara los costos mensuales para un mismo proyecto 3D, adquirido con un grupo convencional (con cables) y otro con su instrumental nodal: el ZLand. Los dos grupos utilizan 10.000 canales y la fuente de energía sísmica empleada es: Vibroseis.

En el gráfico siguiente se comparan los resultados del proyecto 3D con sísmica convencional y sísmica con nodos:

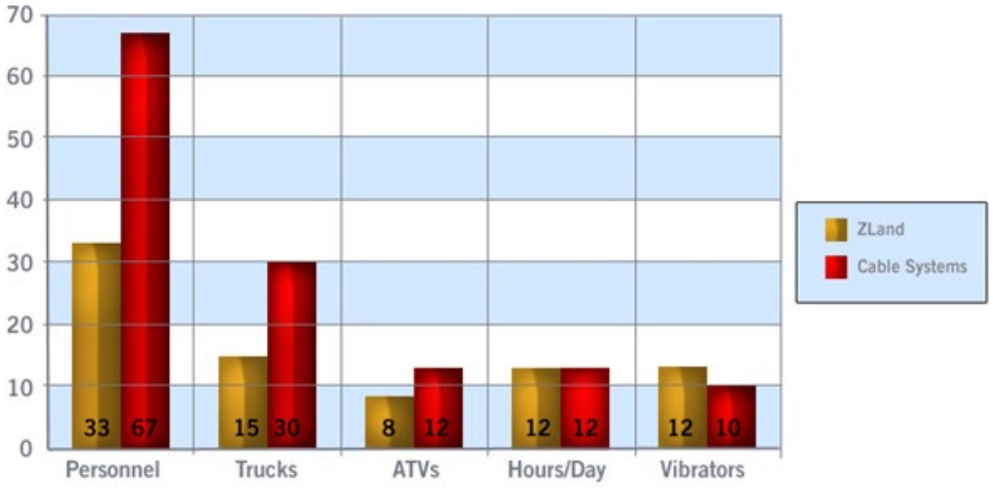


Figura 37, comaración entre sismica con cables y con ZLand [8]

- La cantidad de personal empleado por el sistema convencional (67 personas, en rojo) y por el empleado en el Zland (33 personas, en marrón). Calculan que el ahorro por el costo mensual en personal utilizando Zland es de: aproximadamente u$s170,000.

- La cantidad de vehículos se reduce a la mitad con ZLand (de 30 a 15 vehículos), con lo cual también se reduce los gastos de amortización/alquiler, repuestos y gastos de mantenimiento, combustible, etc.

- Los ATVs (all-terrain vehicule) también se reducen de 12 a 8.

- La jornada de trabajo, en los dos casos, fue de 12 horas diarias.

- Los Vibradores con ZLand pueden trabajar la jornada completa ininterrumpidamente (12 horas), ya que no es necesario parar por la reparación de la línea sísmica.

Fairfield concluye con los siguientes valores:

- Costo mensual Grupo convencional: $ 1,303,878
- Costo mensual Grupo ZLand: $ 749,939
  Diferencia de costo mensual: $ 553,939

Debemos aclarar que el instrumental convencional y el Z LAND se están considerando con similar depreciación y que el sistema Z LAND posee un geófono interno a la unidad y cuya depreciación está ya incluida en el instrumental.

Estación Receptora Nodal

Podemos reducir el funcionamiento de una estación nodal al siguiente diagrama en bloques.

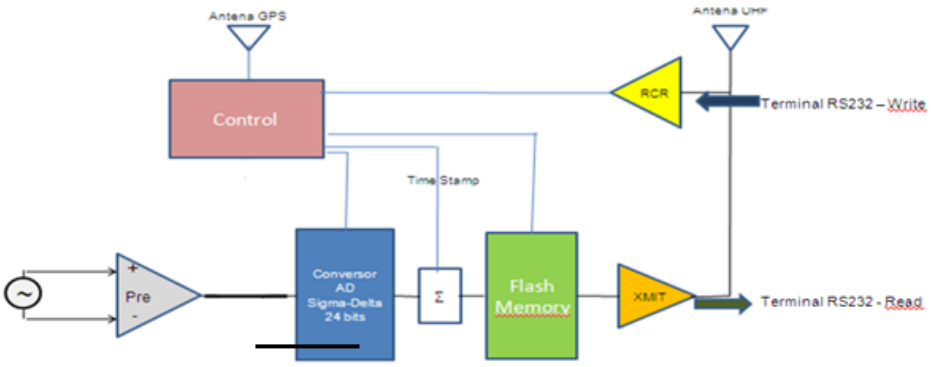


Figura 38, Diagrama en Bloques General de una Unidad Nodal [9]

- El geófono (interno o externo), se conecta al Preamplificador de entrada el cual amplifica en modo diferencial a la señal recibida.
- El Conversor Sigma Delta se encuentra sincronizado a un reloj con tiempos GPS, captados por la antena GPS de la estación y conectada a la etapa Control. El Conversor A/D muestrea la señal analógica salida del Preamplificador, al valor de muestreo previamente seleccionado (1/2, 1, 2 o 4 ms), para convertirla en palabras de 24 bits muestreadas a tiempos GPS que se adhieren a cada muestra (time stamp).
- Cada muestra de la señal y su "time stamp" se graban en una memoria "flash".

La unidad receptora trabaja ininterrumpidamente desde el tiempo que se programa su auto-encendido hasta su tiempo de auto-apagado, salvo que se agote su batería interna o externa.

Los datos acumulados en la "Flash memory" pueden ser leídos desde un conector de la unidad receptora (Terminal RSR-232), como así también mediante un HHT pueden ingresarse los parámetros de adquisición a la unidad (dB de pre-amplificación, período de muestreo, número de línea y estación). Otros sistemas también pueden ser leídos a través de una conexión WiFi en tiempo real o en cualquier momento dentro de un rango discreto de distancias.

Diferentes sistemas nodales:

Utilizaremos como ejemplos representativos, los tres sistemas nodales mencionados como representantes de cada una de las diferentes categorías, los sistemas: SmartSolo, el Sercel 528 y el RT-2 de Wireless Seismic.

Los distintos modelos se diferencian en:

- La unidad IGU-16 del SmartSolo System (**I**ntelligent **G**ephone **U**nit 2016), incluye un geófono en su interior. Las unidades Sercel 528 y las RT-2, poseen un conector de entrada para utilizar geófonos o acelerómetros externos.
- Los datos adquiridos por la unidad SmartSolo deben ser leídos desde su conector por una unidad externa (Data Harvesting Rack). La unidad Unite puede ser leída externamente en tiempo real o sus datos recolectados externamente vía radio o también por un HHT. La unidad RT-2 puede ser parte de un "stream" de datos retransmitidos por wifi hasta el sismógrafo o puede trabajar de forma autónoma.
- Los valores de Preamplificador disponibles en el modelo SmartSolo van de 0 a 24 dB en pasos de 6 dB. En el modelo Unite existen dos valores de Pre- amplificación: 0 y 12 dB y en el RT-2 de 0 a 36 dB en pasos de 12 dB.
- Los tres modelos poseen Conversores Analógico/Digitales de 24 bits (Sigma Delta A/D Converters).
- El SmartSolo y el Sercel 428 utilizan el muestreo de los datos adquiridos, sincronizados a los tiempos del reloj GPS que incluyen cada unidad. En el RT-2 el sincronismo es manejado por la Central Electrónica en su modo "tiempo real" y por el reloj de su GPS en modo "autónomo".

SISTEMA NODAL AUTÓNOMO: SISTEMA SMARTSOLO

El sistema nodal SmartSolo pertenece a los sistemas nodales clasificados como "blinds" (ciegos), pues los datos sísmicos del nodo no pueden ser transmitidos automáticamente a un servidor de datos para su control de calidad, sino que deben ser descargados manualmente del mismo nodo. Debido a esta modalidad, no se puede trabajar en tiempo real y se deben extremar las tareas logísticas para asegurar recoger la información sísmica pretendida, mucho después de haberla originado.

El Sistema Nodal SmartSolo, es distribuido por "Dynamic Technologies (DTCC)" con base en Calgary (Canada), Texas (U.S.A.) y Beijing (China), pero fabricado en Langfang y Shenzhen, China.

El IGU-16 del Sistema SmartSolo

Propagandísticamente DTCC define a su producto como: "El Primer Sensor Sísmico Inteligente del Mundo", de allí la denominación que le dan a la unidad sensora: IGU-16, que fue presentada al mercado internacional en 2016 (**I**ntelligent **G**eophone **U**nit, released at 20**16**).

Este nodo se divide en dos piezas principales:

- La parte superior contiene: un geófono y la electrónica que: amplifica la señal analógica del geófono, muestrea la misma, la digitaliza y la graba digitalmente en una memoria, conjuntamente con el tiempo GPS en que esta se ha muestreado.

- La parte inferior: contiene a la batería de Litio-Ion y a la clavija (spike) que permite acoplar al nodo a la superficie del terreno.



Figura 39, IGU-16, nodo del Sistema SmartSolo [5]

Modelo en bloques del IGU-16

La composición básica del IGU-16 es la que se muestra y explica a continuación:

- Un geófono de alta sensibilidad (76,7 V/m/s), se conecta a un Preamplificador de ganancia variable (0 a 24 dB en pasos de 6 dB).
- El Conversor Analógico-Digital Sigma Delta, muestrea, digitaliza y filtra el voltaje analógico, generando un numero binario de 24 bits cada 2 milisegundos.
- A la muestra convertida se le suma el "tiempo GPS" en el cual se generó (time stamp).
- Los "time stamps" y las muestras se graban en una memoria de 8 Gigabytes de capacidad, la cual será más tarde descargada en la DHR (Data Harvesting Rack).

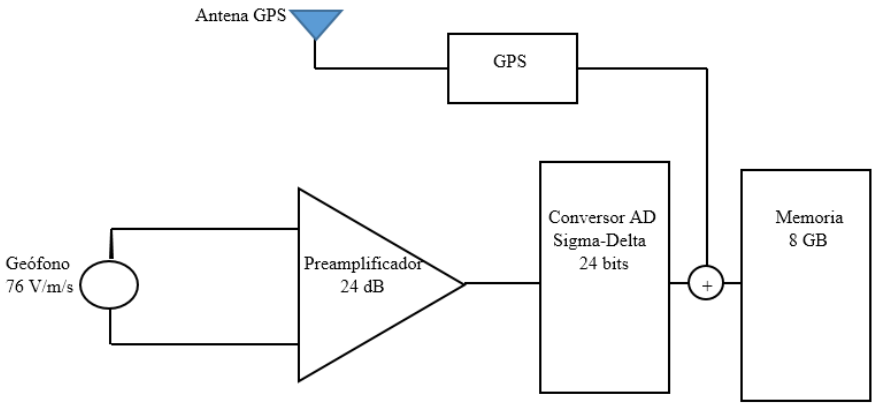


Figura 40, Diagrama en bloques del nodo IGU-16 [10]

El Geófono DT-SOLO



Figura 41, Ubicación del Geófono DT-SOLO de 5 Hz dentro del nodo [5]

De las especificaciones de DTCC, se destaca la gran Sensibilidad del único geófono que cuenta el IGU-16: 76.7 V/m/s. Para comparar con los sensores convencionales: el valor de sensibilidad total de una ristra de 6 geófonos en serie SM24, es de 125 V/m/s.
De lo anterior se deduce que el voltaje generado en el IGU-16 es 1,6 veces inferior al que generaría la ristra anterior ante igual evento.

B - Acquisition Performance

(5Hz@22°C,10Hz@25°C, unless otherwise indicated)

Parameters	Specification	
Natural Frequency	5Hz±7.5%	10Hz±3.5%
Resistance	1773ohm±7.5%	1651ohm±7.5%
Distortion	<0.1%@12Hz,17.78mm/s (0.7in/s) p-p, (0°~10°) tilt	<0.15%@12Hz, 17.78mm/s (0.7in/s)p-p,(10°~15°) tilt
Damping	0.7±7.5%	0.7±10%
Sensitivity	76.7V/m/s (1.95 V/in/s) ±7.5%	78.7V/m/s (2.0 V/in/s) ±3.5%

Figura 42, Especificaciones de fábrica del geófono DT-SOLO de 5 Hz [5]

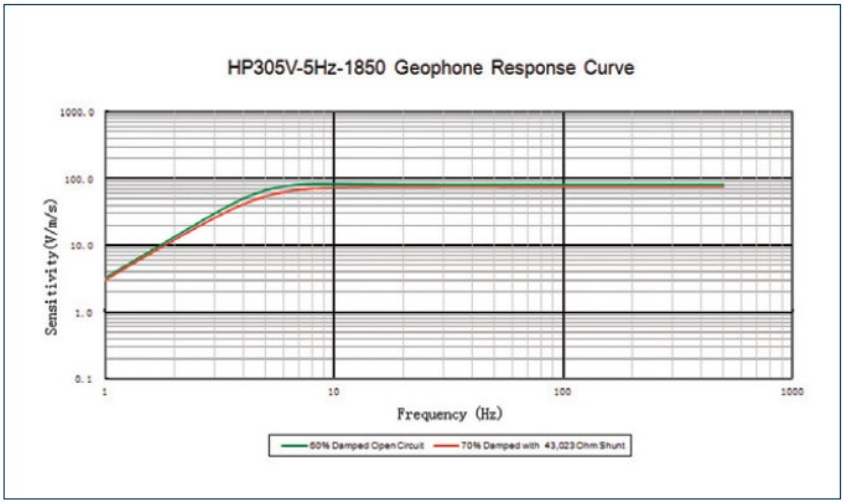


Figura 43, Espectro de amplitud del geófono DT-SOLO [5]

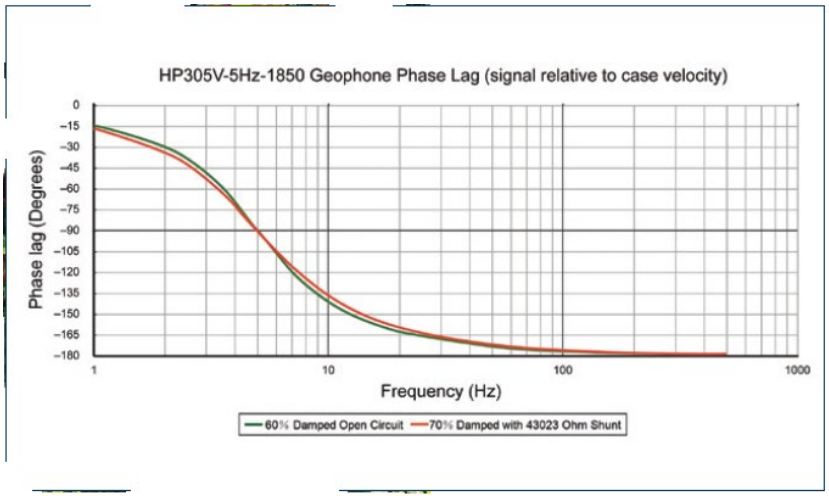


Figura 44, Espectro de Fase del geófono DT-SOLO [5]

El Preamplificador del IGU-16

El Preamplificador del IGU-16, es un Amplificador Diferencial que tiene la misión de elevar el valor de voltaje analógico generado en el geófono y rechazar los voltajes inducidos en modo común (CMMR: Common Mode Reyection, igual magnitud y polaridad en ambos conductores del par del geófono).

Posee varias opciones de amplificación: 0 (no amplificación), 6, 12, 18 y 24 dB.

El voltaje máximo que maneja el Conversor A/D es: ±2.5 Voltios, todo valor superior a este es recortado (clipping). Los valores máximos de voltajes de entrada al preamplificador, que producirían la saturación del Conversor, en función de la ganancia del Preamplificador, son los siguientes:

Voltaje de Entrada Máxima	Ganancia Preamp.
± 2,500 Vp	0 dB
± 1,250 Vp	6 dB
± 0,625 Vp	12 dB
± 0,312 Vp	18 dB
± 0,156 Vp	24 dB

El Conversor A/D Sigma Delta

Como todo equipamiento moderno, el IGU-16 utiliza un conversor analógico-digital Sigma Delta de 24 bits.

El dato digital entonces es filtrado a 0,86 de la Frecuencia de Nyquist (250 Hz) con filtros seleccionables de: Fase Mínima (Minimum Phase) o de Fase Lineal (Lineal Phase).

Cada muestra analógica convertida en 24 bits, ocupará 3 Bytes en la memoria y recién será formateada a IEEE (8 bits de exponente y 24 bits de mantisa), cuando sea leída en las consolas del sistema.

Memoria de 8 Gigabytes

La memoria graba la siguiente información:

- Resultados del "self-test" cada vez que se enciende el nodo (ejemplo: todos los días a las 06:00 hs).
- Las palabras de 24 bits de cada muestra digitalizada (salida del conversor A/D).

- El Reloj GPS o Palabra de Tiempo que representa al tiempo GPS de la toma de la muestra. El IGU-16 graba en la memoria una palabra de 70 bits cada 1000 muestreos (en nuestro caso: 2 ms * 1000 = 2 segundos). Cuando el IGU-16 es descargado, el DCM (Data Console Manager), interpola entre dos "time stamps" consecutivos y asigna tiempos a los muestreos intermedios completando el proceso.
- El número de serie del nodo.
- Las coordenadas del nodo.

La identificación por tiempo de cada muestra, permitirá luego clasificarla en el "Scan de datos", de acuerdo al tiempo de origen del barrido sísmico (time break) que inició el evento que la involucra.

La utilización del GPS en el IGU-16

El IGU-16 recibe la señal GPS mediante la antena que tiene montada sobre la parte superior de la electrónica (ver foto). El reloj del GPS le permite sincronizar su reloj interno manteniendo una diferencia máxima de tiempo de ±10 μs con el reloj GPS; si este tiempo es excedido el IGU-16 se apaga.

En la figura inferior se observa la variación (drift) del reloj interno del nodo durante 4 días. Los nodos durante el tiempo de encendido, cada 2 segundos sincronizan su reloj interno y graban el tiempo UTC en la memoria (time stamp: 70 bits).

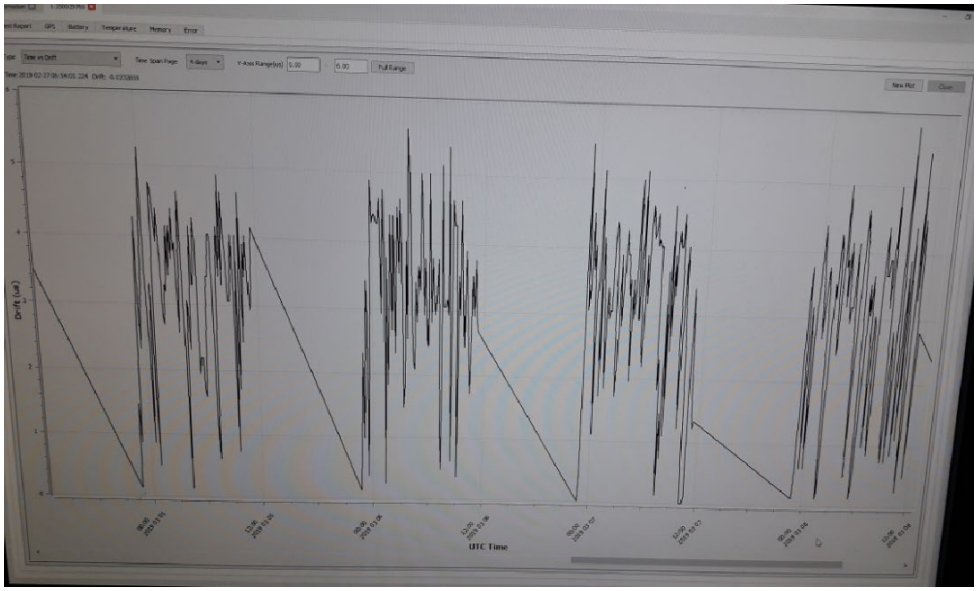
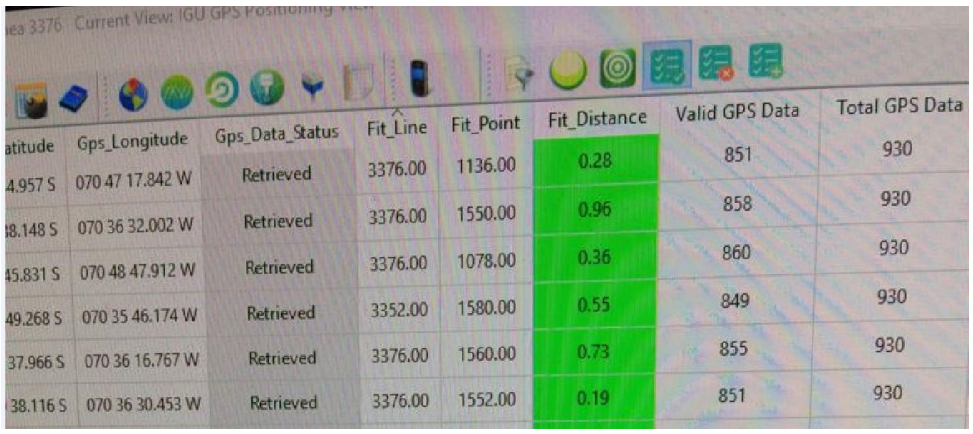


Figura 45, Gráfico "Drift vs Tiempo" correspondientes a 4 días consecutivos [5]

Las coordenadas de la estación receptora también son calculadas con el GPS Receiver del nodo, aunque las coordenadas definitivas del "postplot" deben corresponder a las medidas por Topografía mediante GPS RTX.
En la pantalla que sigue se observan los valores de las coordenadas calculadas por los nodos correspondientes a la Línea Receptora 3376 y la diferencia en metros que poseen con las coordenadas correspondientes al SP1 de topografía.



atitude	Gps_Longitude	Gps_Data_Status	Fit_Line	Fit_Point	Fit_Distance	Valid GPS Data	Total GPS Data
4.957 S	070 47 17.842 W	Retrieved	3376.00	1136.00	0.28	851	930
8.148 S	070 36 32.002 W	Retrieved	3376.00	1550.00	0.96	858	930
45.831 S	070 48 47.912 W	Retrieved	3376.00	1078.00	0.36	860	930
49.268 S	070 35 46.174 W	Retrieved	3352.00	1580.00	0.55	849	930
37.966 S	070 36 16.767 W	Retrieved	3376.00	1560.00	0.73	855	930
38.116 S	070 36 30.453 W	Retrieved	3376.00	1552.00	0.19	851	930

Figura 46, Monitor del Manager mostrando las coordenadas del nodo y la diferencia con Topo [5]



Plaqueta del IGU-16 *Antena GPS del IGU-16*

Figura 47, plaqueta electrónica interna al IGU-16 [5]

Batería Li-ion

El IGU-16 utiliza baterías de iones de litio, llamadas habitualmente baterías li-ion. Estas baterías poseen una elevada capacidad energética, resistencia a la descarga, poco efecto memoria y pequeño volumen.

El voltaje de trabajo del nodo es de 6 V. La batería posee un voltaje nominal de 7,4 V y está constituida por dos celdas de 3,7 voltios c/u. Sin embargo el voltaje a plena carga se encuentra en el orden de los 8,4 V y como la descarga es lineal, existe una variación importante de la tensión a través de los días. El voltaje mínimo recomendado para la batería es de 7 V para evitar su descarga profunda y la reducción de su vida útil. Esto significa que la variación del voltaje de la batería con respecto al consumo de energía es constante. El consumo nominal de las IGU-16 es de 49 mW/h.

La curva mostrada más abajo, corresponde a una curva de descarga real donde la variación del voltaje de una IGU-16 trabajando las 24 horas del día, resulta una línea recta aproximada de relación:

$$\frac{\Delta \text{Voltios}}{\Delta \text{ días}} = \text{Constante}$$

Vemos que a los 30 días, el voltaje descendió por debajo de 7 voltios y se apagó.

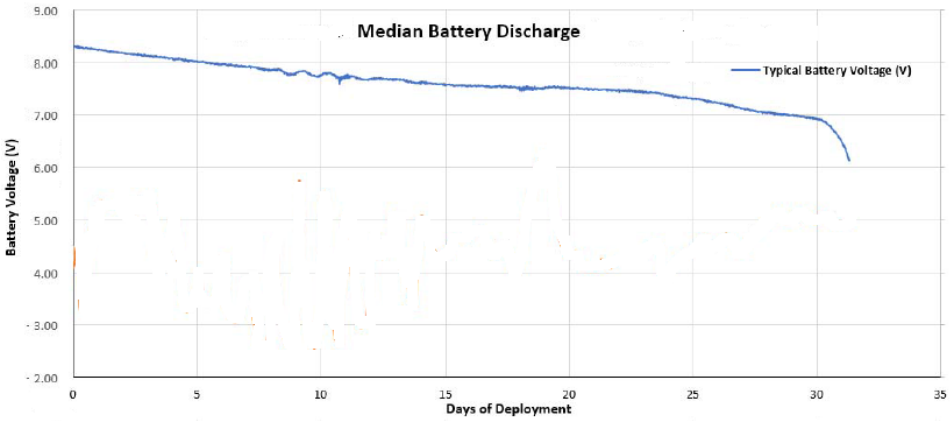


Figura 48, Curva de descarga de la batería del IGU-16 a baja temperatura (ETE 3D) [5]

Por su composición química, las baterías Li-ion no admiten ser usadas a altas temperaturas. Cuando se las debe acumular por un tiempo mayor a tres meses consecutivos, conviene hacerlo a una temperatura cercana a 15 ºC y con 40 % de carga y nunca a mayor temperatura que 25 ºC y tampoco a carga completa.

Las baterías son cargadas en los denominados Battery Charger Racks. Cada rack contiene 48 cargadores individuales. El proceso de carga completa de cada batería es de 3:25 hs.



Figura 49, Cargadores de Bacterias (10) de IGU-16 [5]

Regado de nodos

Establecido el pre-plot y luego que Topografía ubica el nodo en sus coordenadas mediante GPS RTX, con la ayuda del FDT (Field Deployment Tool or Hanheld Terminal), se escanea el número de serie de cada IGU-16 y se establece la relación entre "*coordenadas geográficas - número de línea receptora - número de estaca receptora- número de serie del nodo*". Luego los datos obtenidos y grabados en el FDT son descargados en la central del sistema SmartSolo (Data Manager) via wifi, para establecer la futura descarga del dato sísmico.



Figura 50, Field Data Deployment Tool (FDT) [5]

Cada nodo colocado en su estación receptora, fue previamente programado de acuerdo a los parámetros del proyecto en curso. También se ha programado el tiempo que diariamente cada nodo se encenderá, y comenzará a adquirir datos, como también el tiempo en que deberá apagarse, dejando de adquirir datos.

Inicialmente los nodos son regados en las líneas receptoras, pero no se habilita su encendido programado para no gastar batería innecesariamente, ya que se necesita una cantidad muy grande de nodos regados antes de comenzar con la adquisición de un proyecto. Para habilitar el encendido de los nodos hace falta aplicarle un imán sobre la parte superior del IGU-16 (cercano al led de estado)...



Figura 51, Llave magnética para habilitar la alimentación del IGU-16 [5]

Levantado y lectura de nodos

Generalmente los nodos son levantados por línea receptora completa, cuando todas sus unidades dejaban de intervenir en algún "patch".

Los nodos levantados ingresan a la dependencia donde se encuentran los racks de lectura y que y se siguen estos pasos:

a) Desarmado de cada unidad. Existen unidades de desarmado/armado de nodos (Automatic Disassembly & Assembly Machine). Con estas máquinas se desenroscan la parte superior electrónica de la parte inferior o batería.
b) La parte superior o electrónica del IGU-16 se coloca en uno de los racks DHR (Data Harvesting Rack). Cada rack cuenta con una capacidad de 32 unidades para ser leídas simultáneamente. Cada rack se comunica a través de dos cables de fibra óptica con sendos DCC (Data Collector Console) quienes graban y analizan la calidad de los datos leídos para su posterior acomodamiento. Si bien la lectura de los datos grabados en cada memoria de los IGU-16 es muy rápida (2 minutos aproximadamente), el desarmado y colocación de los nodos en la consola consume aproximadamente 15 minutos por cada tanda de 32 nodos.
c) La parte inferior o batería se coloca en los racks de carga de baterías BCR (Battery Charger Racks) que poseen capacidad para 48 baterías.



Figura 52, Proceso de desarmado- lectura de IGU-16 – carga de batería [5]

En la figura superior, apreciamos las distintas etapas de la descarga de datos y carga de baterías del IGU-16. Se muestra dos tipos distintos de DHR, primero un rack portátil (Portable DHR 16 slots) y luego el ya relatado.

Procesado de la lectura de los nodos

Como hemos visto cada DHR, se conecta con un Servidor DCC (Data Collector Console), que trabajan con el sistema operativo Windows Server 2016. Los datos "raw" leídos por cada DCC, son grabados en discos externos.

En la pantalla se observa la lectura de nodos del DCC que estuvieron adquiriendo durante 17 días, en el horario establecido y poseían grabados en su memoria aproximadamente 1,14 GByte de los 8 GB disponibles.

	Receiver SN	Start Time(UTC)	End Time(UTC)	Data Segments	Total Data Size(MB)	Missing Data Segments	Synchronization Time(Local)
103	350051251	2019-01-02 22:47:18.000	2019-01-19 11...	17	1,139.985	0	2019-01-19 13:05:11
104	350051799	2019-01-02 22:47:10.000	2019-01-19 11...	17	1,140.594	0	2019-01-19 11:58:26
105	350051829	2019-01-02 22:47:06.000	2019-01-19 11...	17	1,140.486	0	2019-01-19 13:03:49
106	350052062	2019-01-02 22:47:12.000	2019-01-19 11...	17	1,140.656	0	2019-01-19 11:58:17
107	350052161	2019-01-02 22:46:46.000	2019-01-19 11...	17	1,140.638	0	2019-01-19 11:58:44
108	350052215	2019-01-02 22:46:46.000	2019-01-19 11...	17	1,140.544	0	2019-01-19 13:04:19
109	350052291	2019-01-02 22:46:46.000	2019-01-19 11...	17	1,140.597	0	2019-01-19 13:04:24
110	350052526	2019-01-02 22:46:46.000	2019-01-19 11...	17	1,140.480	0	2019-01-19 12:36:51
111	350052771	2019-01-02 22:47:18.000	2019-01-19 11...	17	1,140.533	0	2019-01-19 12:35:33
112	350052972	2019-01-02 22:46:40.000	2019-01-19 11...	17	1,140.527	0	2019-01-19 11:58:49
113	350053492	2019-01-02 22:47:36.000	2019-01-19 11...	17	1,140.339	0	2019-01-19 13:05:22
114	350053911	2019-01-02 22:47:10.000	2019-01-19 11...	17	1,140.585	0	2019-01-19 13:08:52

Figura 53, Captura de pantalla del DCC durante la descarga de nodos del 19 de enero de 2019 [5]

Todo este sistema (ver figura inferior) es comandado por un único Servidor DMC (Data Manager Console) el cual: controla los parámetros del proyecto sísmico, maneja la acomodación de los datos de acuerdo al "patch" definido y al tiempo del comienzo de la aplicación de la Fuente de Energía (Timebreak), etc. También se ocupa del Control de Calidad de los datos leídos (QC). Este servidor contiene el software del sistema y trabaja con el Sistema Operativo Windows Server 2016.

El DMC se comunica con los DCCs a través de un Switch vía cables trenzados, en cambio lo hace vía cable de fibra óptica con un Router el cual recibe por wi-fi la información de los FDT o carga estos con las coordenadas de las estaciones receptoras a regar.

El DMC formatea los 24 bits de cada muestra en IEEE, convirtiéndola en una palabra de 32 bits (8 bits de exponentes y 24 bits de mantisa) descompuesta en 4 Bytes de 8 bits c/u (de acuerdo al Formato SEG D 8058). El resultado del proceso se graba en discos externos al DMC.

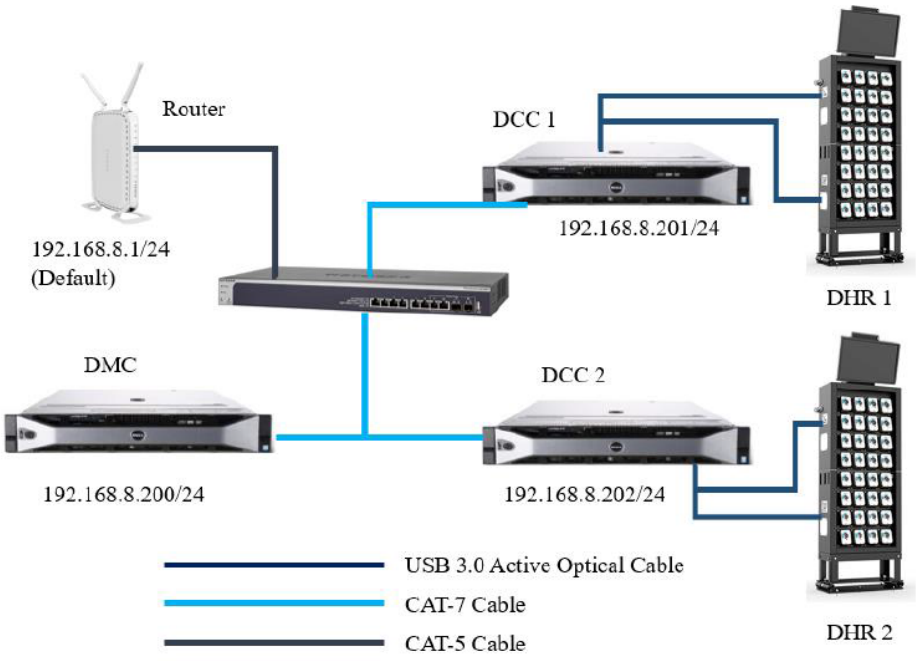


Figura 54, Conexionado de las distintas partes que componen la Central del SmartSolo [5]

Test del IGU-16

Existe un: "Instrument Test" y un "Internal Sensor Test" y son equivalentes a los que se ejecutan en cada IGU-16 al encenderse cada día y cuyo resultado graban en su memoria.

Las especificaciones del fabricante para el "Instrument Test" son las siguientes:

Smart Electronics Especificaciones
(@ 1 ms de intervalo de muestra, 31.25 Hz, 25 ° C a menos que se indique lo contrario.)

Resolución ADC	24bits
Intervalos de muestra	1,2,4 millisegundos
Preamplificador ganancia	0dB a 24 dB, en pasos de 6 dB
Filtro anti-alias	206.5 Hz @ 2ms (82.6% de la frec. Nyquist) seleccionable - fase lineal o fase mínimo
Bloqueo de DC	1Hz a 10Hz, en incrementos de 1Hz, o eliminar CD
Estándar de tiempo de GPS	1ppm
Precisión de tiempo	<20 µs, condicionado por el GPS
Señal de entrada máxima	2.5V peak, con ganancia de 0dB
Ruido de entrada equivalente	1.23µV @ 2ms con ganancia d 12dB
Rango dinámico total	116 dB @ ganancia de 0dB
Distorsión armónica total	<0.0005%
Rechazo de modo común	90dB
Gain Accuracy	<1%

Figura 55, Especificaciones a cumplir por el IGU-16 dadas por DTCC [5]

Las especificaciones para el "Internal Sensor Test" (ya vistas cuando tratamos el IGU-16), se repiten a continuación:

B - Acquisition Performance

(5Hz@22°C,10Hz@25°C, unless otherwise indicated)

Parameters	Specification	
Natural Frequency	5Hz±7.5%	10Hz±3.5%
Resistance	1773ohm±7.5%	1651ohm±7.5%
Distortion	<0.1%@12Hz,17.78mm/s (0.7in/s) p-p, (0°~10°) tilt	<0.15%@12Hz, 17.78mm/s (0.7in/s)p-p,(10°~15°) tilt
Damping	0.7±7.5%	0.7±10%
Sensitivity	76.7V/m/s (1.95 V/in/s) ±7.5%	78.7V/m/s (2.0 V/in/s) ±3.5%

Figura 56, Especificaciones de DTCC para sus geófonos de 5 y 10 Hz [5]

SYSTEMA NODAL AUTÓNOMO CON QC: Sistema Sercel UNITE

El Sistema Unite, combina unidades telemétricas por cable del Sercel 428, con unidades nodales "RAUs" (Remote Acquisition Unit).

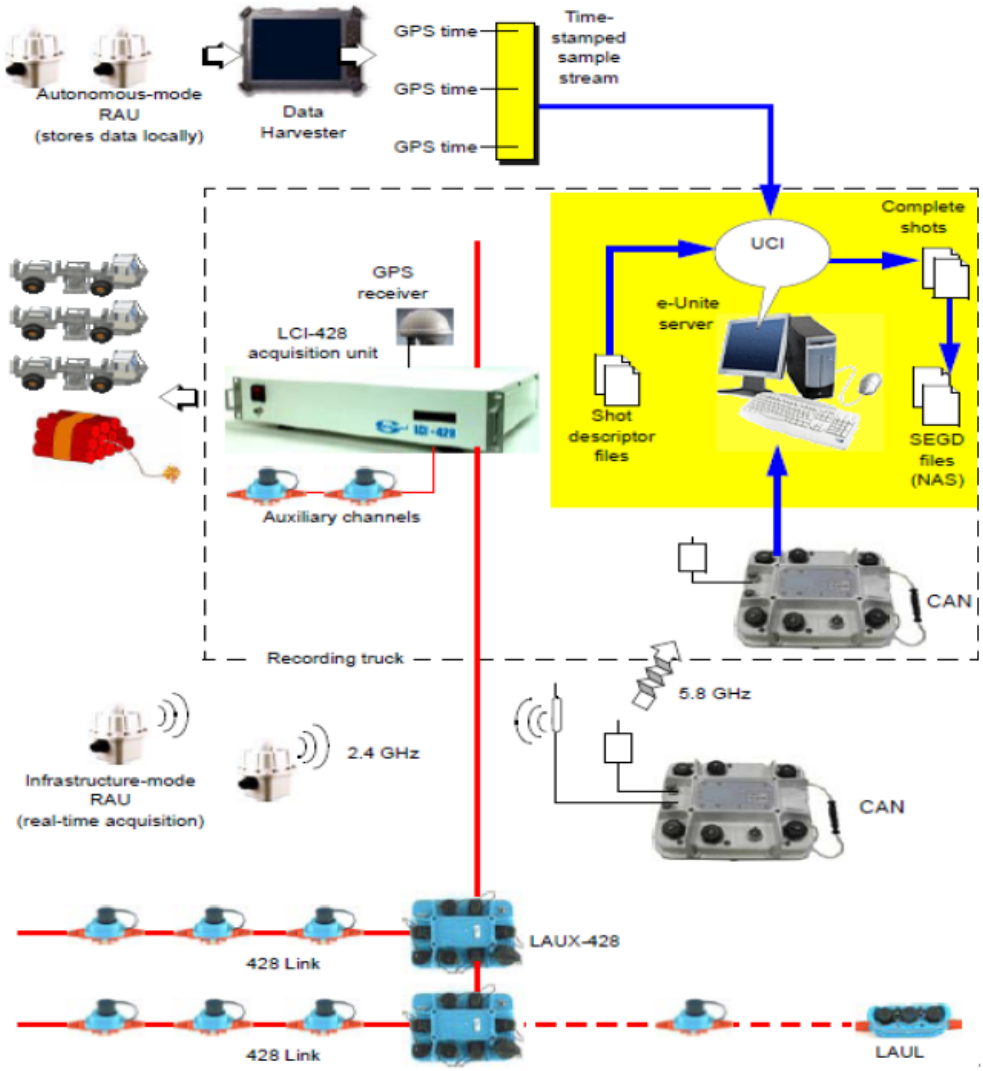


Figura 57, Sistema Sercel Unite híbrido [6]

Cada RAU, si bien conoce sus coordenadas por el GPS que tiene incorporado, desconoce en qué línea y estaca se encuentra. Por lo tanto cada RAU debe ser interrogada en la estaca donde fue depositada para indicar su número de serie interno e "IP address", esto permite asociar la RAU al "Receiver Point" (número de línea y de estaca) que le corresponde en el prospecto sísmico. La unidad manual, utilizada en esta operación es el PFT (Portable Field Terminal). Los datos del PFT luego son descargados en la Unidad Central del sistema o UCI (Unite Control Interface) que acomoda las muestras colectadas según la ubicación de su unidad receptora en el "spread" y al tiempo en que la muestra fue adquirida.

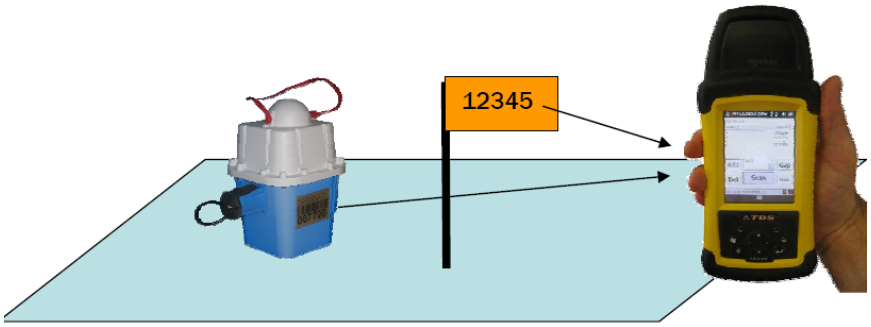
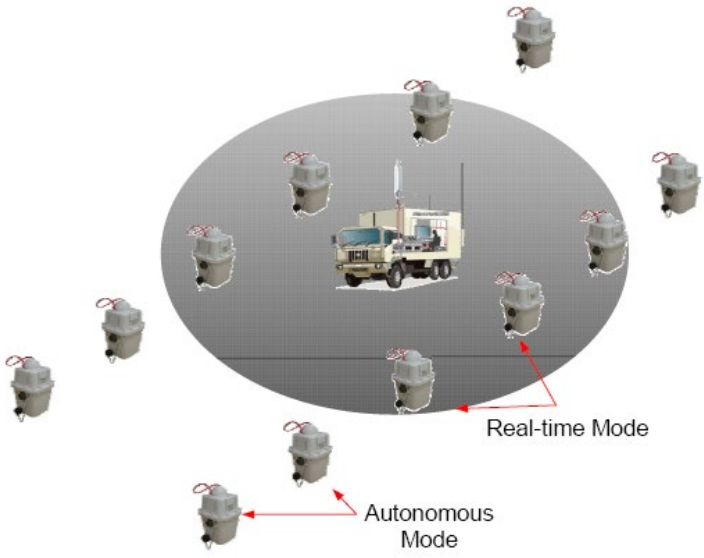


Figura 58, RAU que está siendo asociado su número de serie con la estaca Nº 12345 [6]

Cada RAU posee un receptor GPS y comienza a adquirir datos automáticamente cuando su reloj interno se sincroniza con el tiempo GPS, grabando estos datos en su memoria flash.

- Si la RAU se encuentra en el rango de distancia adecuado para que su memoria sea leída vía WiFi por el UCI (sismógrafo), los datos son recolectados inmediatamente en cada disparo (el "delay" por transmisión de los datos vía WiFi depende de la cantidad de RAUs que se estén reportando en este modo). Este modo de operación es denominado "Modo de Infraestructura" (Infrastructure mode**)** o también llamado "Real-Time mode".

- Si la RAU se encuentra fuera del rango de cobertura de comunicaciones WiFi, los datos deben ser leídos mediante un Recolector de Datos (Data Harvester). A este modo de operación se lo denomina: Modo Autónomo (Autonomous mode).



Figura, 59, Modo Infraestructura y modo Autónomo [6]

Las RAUs que trabajan en modo autónomo, utilizando un muestreo de 2 ms, la capacidad de su memoria es de 7,5 días, registrando las 24 horas del día. Estas RAUs deberán ser descargadas de datos antes que su capacidad sea superada para que la memoria no sea sobre-escrita con nuevos datos, perdiéndose los anteriores grabados.
El UCI mantiene información de cada RAU incluida en el "spread" de adquisición, colocando un listado de TBs de cada disparo donde la RAU intervino activamente, luego queda a la espera de los datos de cada RAU para ir completando cada "file".

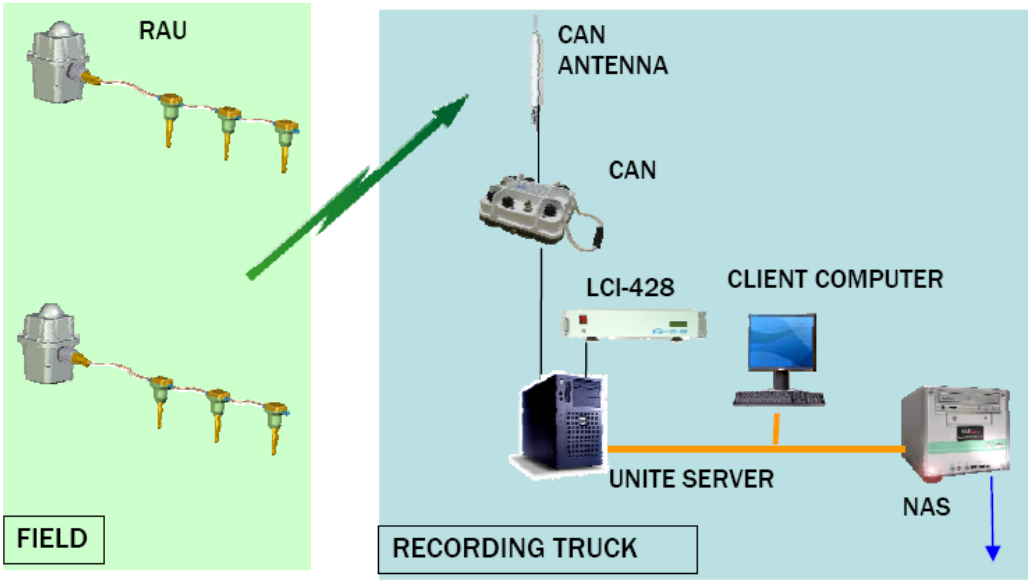


Figura 60, Sercel Unite, Modo de Infraestructura [6]

Las RAUs que se encuentran en el rango de cobertura radial, transmiten en cuasi-tiempo real sus datos que son recepcionados por una unidad CAN (Cell Access Node) en la Central electrónica. La frecuencia de portadora de la red va de 2,4 a 2,4835 GHz (1 Gigahertz = 10^9 Hertz), pudiéndose dividir en 14 canales de 5 MHz de ancho de banda cada canal. Los 3 Puntos de Acceso del CAN (AP: Access Points), permiten integrar tres grupos de antenas sintonizadas para abastecer a tres grupos de canales que sumen 25 MHz de ancho de banda (5 canales en cada grupo). Las frecuencias portadores entre las RAUs y CAN, están moduladas por Desplazamiento de Fase o PSK (Phase Shift Keying) y la velocidad de transmisión depende de la distancia entre RAUs y CAN y de la potencia utilizada en el transmisor (6 Mbits/s, 6 Megabits por segundo es la velocidad máxima alcanzada para un distanciamiento en área despejada de 200 metros y una potencia de transmisión de 100 mW).
En cambio la comunicación entre CAN y CAN se realiza a una frecuencia portadora de 5,8 GHz que se modula en QPSK (Quadrature Phase Shift Keying).

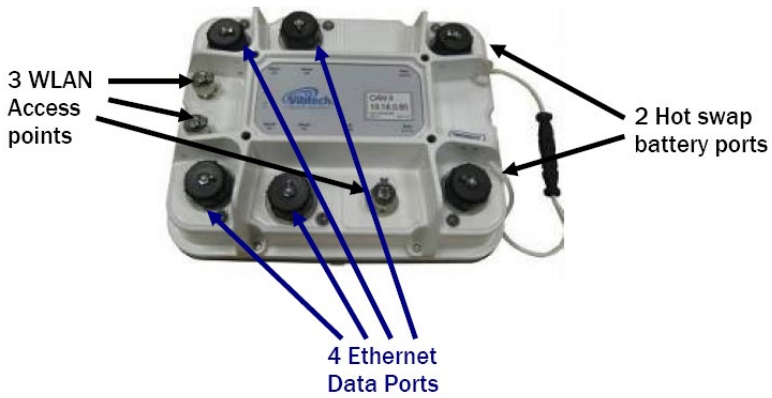


Figura 61, CAN (Cell Access Node [6]

Las funciones que puede realizar esta unidad son:

- Conexión con el UCI (sismógrafo) a través de cables (4 Ethernet Data Ports).
- Conexión WiFi con las RAUs en un radio no mayor a 1000 metros.
- Conexión WiFi con los PFT (Portable Field Terminal) que se encuentren en las inmediaciones.
- Conexión WiFi con los DH (Data Harvester) que se encuentren en las inmediaciones.
- Formando una red WiFi con otros CAN en el rango de 1000 metros máximo de distancia.

Adquisición y grabación de un registro sísmico (file)

Realizaremos una secuencia de eventos que involucra la combinación más compleja de modos que el Sercel Unite puede trabajar y que denominan: "Infill Unite Mode". En esta diferente suma de modos de operación, la adquisición por nodos (Modo Infraestructura y Modo autónomo), se combina con la adquisición convencional por cable.

La Central del Unite (Sismógrafo), trabaja con un software adaptado del Sercel 428 para organizar y controlar cada registro adquirido. Para ello cuenta con el módulo LCI (Line Control Interface). Al conjunto de LCI, PC y software asociado se lo denomina: e-428 para diferenciarlo de la unidad UCI que tiene su propio software en el mismo Servidor. El e-428 maneja la adquisición y la normal operación y el UCI se ocupa de los datos de las RAUs faltantes (en modo autónomo) para completar cada registro o "File".

En general el e-428 se ocupa de:

- Controlar el disparo de la fuente de energía mediante el LCI.
- Ingresar, pre-amplificar, muestrear y filtrar los datos de los canales auxiliares mediante el LCI.
- Generar el orden de ubicación de los datos de los diferentes canales que intervienen en cada registro sísmico o "Shot Descriptor File**"**.

Cada "Shot Descriptor File" contiene: al Encabezamiento (Header) del registro en ejecución, las muestras de los canales auxiliares y las muestras de los canales de las FDUs que se encuentran conectadas vía cable al sistema (caso especial de "Infill Unite configuration").
Los canales faltantes del "Shot Descriptor" deben ser agregados por la UCI:

- Los canales que se encuentren dentro del rango de lectura vía WiFi (infraestructure mode), son incorporados en tiempo real utilizando unidades CAN (Cell Access Node) cuyo alcance máximo puede llegar a un radio de 1000 metros.
- Los canales que operan en "Autonomous Mode", serán incorporados cuando los datos de las RAUs sean leídos por los Recolectores de Datos (**Data Harvester Tablet PC**) y descargados en el UCI. Los datos de las RAUs son ordenados en el "Shot Descriptor" correspondiente mediante la lectura del "time stamp" que identifica a cada muestra de dicho canal de datos.

- Cuando el "Shot Descriptor" haya completado todas las muestras de los canales definidos, este registro se transfiere al subsistema e-428, para ejecutar el proceso que corresponda (suma, correlación, etc.) y grabar en formato SEGD el registro así completado.

Recolección (harvest) de datos con el DH

El observador al comienzo del día de operaciones, generalmente reúne al grupo de recolectores y con todos los DH disponibles carga desde el UCI la lista de TBs que identifican los eventos registrados el día anterior; este listado contiene el número de serie y la ubicación (línea y estaca) de cada RAU que participó de dichos eventos. Esto se produce conectando cada colectora de datos (DH) a un puerto Ethernet del "switch" que se comunica con el Servidor del e-UNITE y automáticamente el DH recibe la lista de las RAUs que necesitan ser recolectadas.



Figura 62, RAU Field Terminal (or DH: Data Harvester) [6]

El DH es una PC-Tablet que posee las siguientes funciones:

- Se conecta vía cable o WiFi en las RAUs (hasta 4 conexiones simultaneas son posibles) para:
  - Descargar en las RAUs los TB (Time Breaks) que definen los tiempos de inicio de cada registro sísmico memorizados en las memorias de las RAUs.
  - Colecta los datos acumulados en las RAUs de acuerdo a los TB previamente descargados y los transfiere a su disco interno.
  - Muestra en pantalla el estado del GPS, batería y geófonos de las RAUs conectadas.
- Descarga en el UCI, vía cable o WiFi, los datos "cosechados" (harvest data).
- Para extender el área de operaciones de carga y descarga de las RAUs por WiFi, se puede conectar a una CAN (Cell Access Node, hasta 1000 metros de alcance) o a una WDI (Wireless Data interface, hasta 200 metros de alcance).

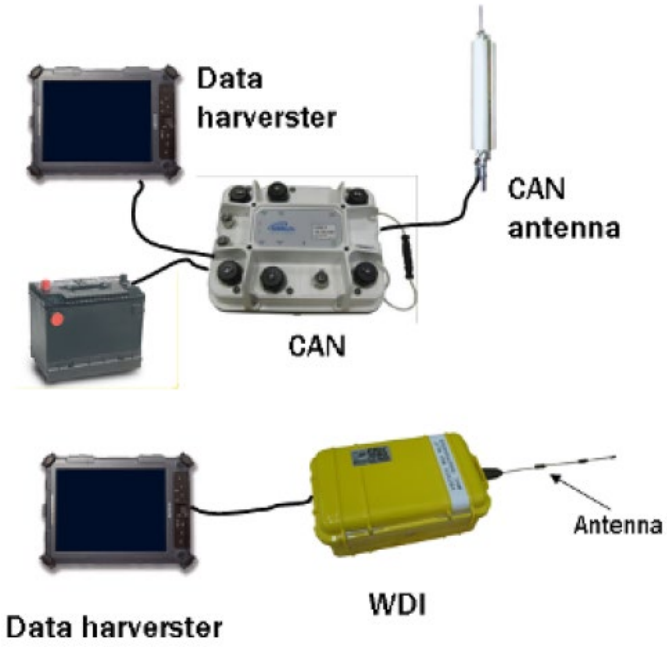


Figura 63, conexiones posibles del DH [6]

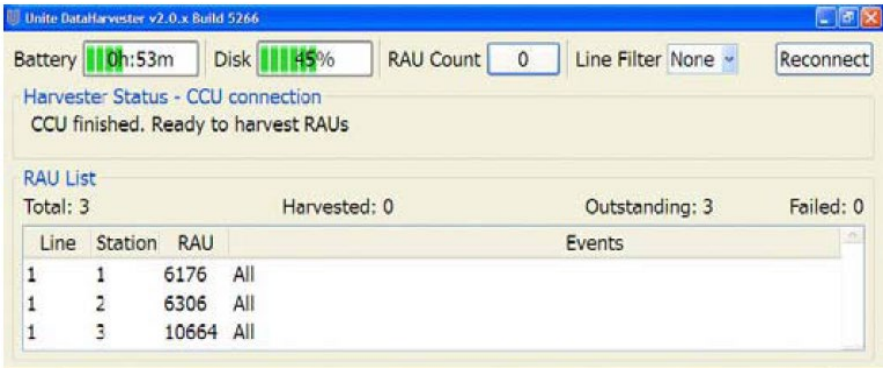


Figura 64, Pantalla del DH durante la descarga de la lista de RAUs a ser recolectadas [6]

Recuérdese que las RAUs se encuentran permanentemente adquiriendo datos, pero solamente el DH recolectará los datos de cada evento cuyos tiempos de inicio correspondan al TB (comienzo de la toma de datos de un evento), y no recolectara aquellos datos adquiridos fuera de esos tiempos. Mientras el observador se ocupa de adquirir nuevos eventos, los grupos "recolectores" van bajando los datos anteriores sin interferir en la operación de adquisición.

El DH podrá recolectar los datos de las RAUs conectándose a estas a través de un cable Ethernet o vía WiFi utilizando un CAN o un WDI. Una vez conectado el DH a la RAU esta inmediatamente descargará los datos requeridos acumulados y aparecerá en la lista de la pantalla del DH como "RAUs being harvested" (RAUs que están siendo recolectadas).

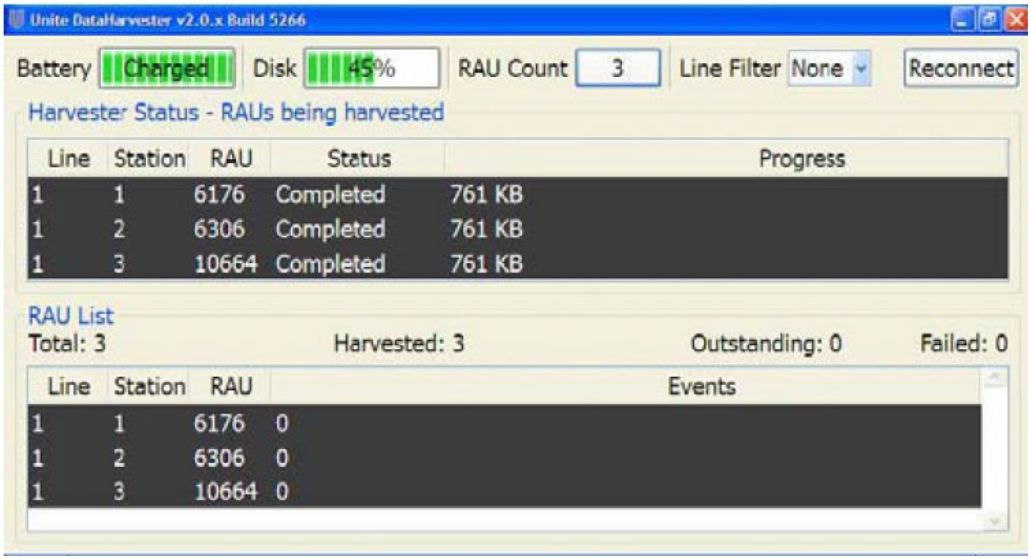


Figura 65, Pantalla del DH durante la recolección de datos de RAUs [6]

Cuando regresa cada recolector con sus DHs cargados de datos, se conectan nuevamente vía cable Ethernet a un puerto del Switch del UCI y descarga los datos recolectados en el Servidor del e-UNITE.

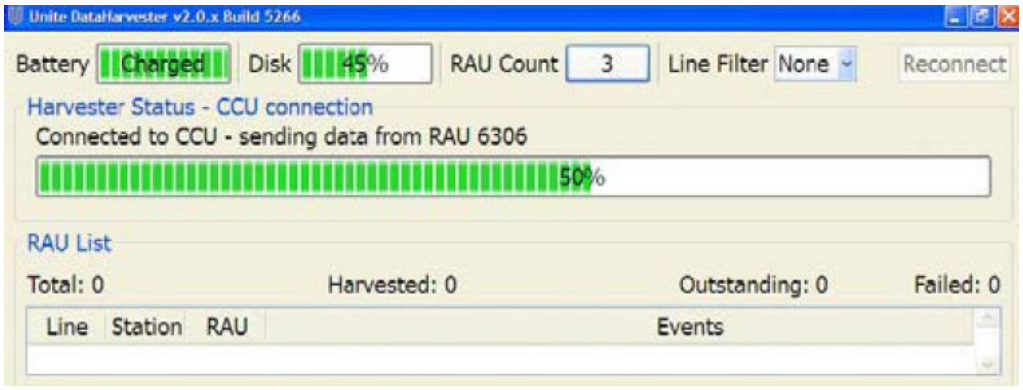


Figura 66, Pantalla del DH durante la descarga de datos en el UCI [6]

NODAL CON ADQUISIÓN EN TIEMPO REAL: RT System 2 with Hybrid Radio Telemetry

Este sistema, fabricado por wireless SEISMIC, opera también sin cables (wireless) pero con la misma estructura, vía radio, de la retransmisión de datos en cadena en tiempo real (Real Time Mode) casi real (Near Real Time). Este sistema permite realizar el QC de datos/ruidos como si se tratara de un sistema convencional por cables. También este sistema puede ser operado parcial o totalmente en modo autónomo: "Autonomously Mode", ya que cada unidad (WRU) posee una "flash memory" que graba los datos para luego ser recolectados (modo autónomo) o ser enviado posteriormente cuando se haya interrumpido su conexión radial (modo real).

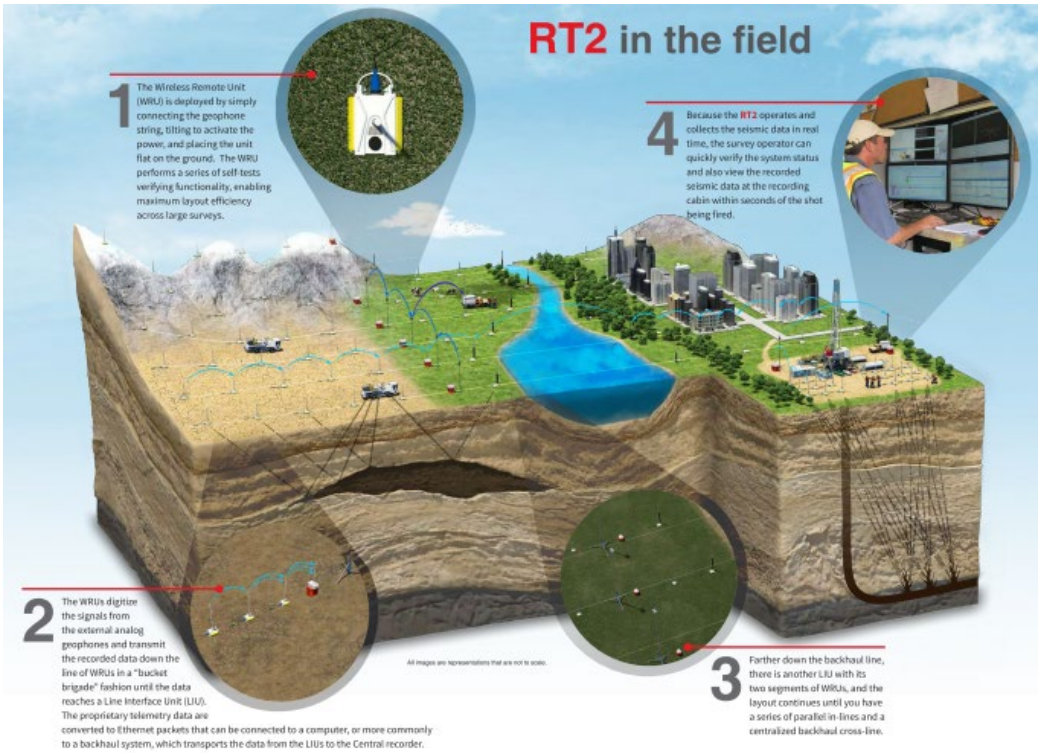


Figura 67, Presentación del Sistema RT-2 [7]

Las unidades receptoras WRU (Wireless Remote Unit), poseen: un conector para la entrada de una ristra de geófonos externos a la unidad y dos receptáculos para colocar dos baterías recargables de litio-ion de suficiente capacidad para recargarlas una vez levantada la unidad del "patch" registrado (hasta 15 días de operación continuada).



(a) *(b)*

Figura 68, (a) Unidad WRU (Wireless Remote Unit); (b) Unidad LIU (Line Interface Unit) [7]

El preamplificador de la WRU permite la elección de 4 ganancias:

0 dB:	máximo	voltaje	de	entrada:	1768	mVrms
12 dB:	“	“	“	“	: 442	“
24 dB:	“	“	“	“	: 110	“
36 dB:	“	“	“	“	: 27.6	mVrms.

Las LIUs (Line Interface Unit), se colocan estratégicamente para gobernar cada línea receptora y recibe la transmisión telemétrica radial de las WRU de su línea, con una frecuencia portadora de 2,4 GHz, y retransmite por Internet (vía radio o cable de fibra óptica) hacia la Central Electrónica con una portadora de 5,6 a 5,8 GHz, los datos recibidos. Soporta 2000 WRU (1000 a cada lado) si se trabaja en “near real time” (cuasi tiempo real) o 400 canales si se requiere “real time continuos data”.

Bibliografía consultada:

1. *The Digital Signal Processing Aplications Newsletter – Analog Devices, 1990.*
2. *Vision system Capacitation Course – Halliburton – Houston – Texas – USA, 1994.*
3. *I/O System II Training Course – Input Output – Stafford – Texas – USA, 1994.*
4. *Sercel 428 Training Course- Hiouston – Texas. Supervisión de proyectos de Adquisición Sísmica.*
5. *SmartSolo Nodal System – Manuales y supervisión de Proyecto de Adquisición Sísmica.*
6. *Sercel Unite System – Manuales del Sistema.*
7. *RT-2 manual*
8. *Z Land Nodal Manual, Fairchild*
9. *Diagramas en bloques e interpretación del instrumental sísmico, P.R. Concetti*
10. *El Conversor Sigma Delta, P.R.Concetti 1995, Western Geophysical*
11. *Q-Land Trainee Gatwick England at Westerngeco base, 2003.*

CAPITULO 8: FUENTES DE ENERGIA SÍSMICA IMPULSIVAS

Introducción

Los explosivos, golpeadores (thumpers) y cañones de aire comprimido (air guns), son fuentes de energía sísmica impulsivas, ya que generan su máxima fuerza de reacción con un pequeño retardo de tiempo con respecto a su iniciación. Las respuestas de estas fuentes de energía se aproximan a la de la "función matemática: impulso" y por dicha razón se denominan: "fuentes impulsivas"

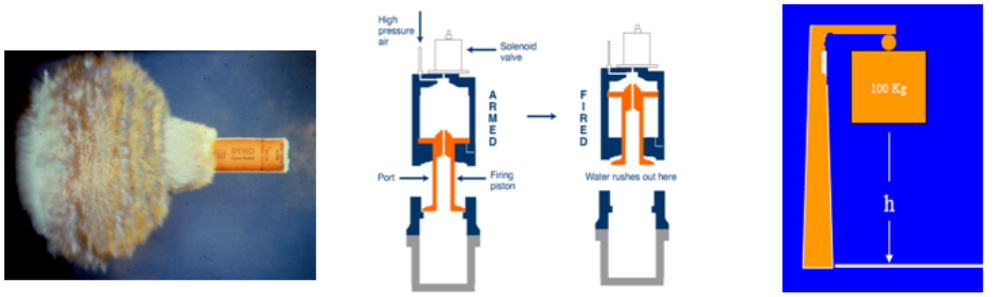


Figura 1, fuentes de energía sísmicas impulsivas

La función matemática impulso (ó Delta de Dirac), es solamente teórica ya que se inicia y se desarrolla en un tiempo cero. Si esta energía pudiese ser generada tal cual, provocaría una onda sísmica con todas las componentes de frecuencia emitidas con igual amplitud y fase; la respuesta recibida del subsuelo nos ahorraría simulaciones ya que conoceríamos perfectamente la Ondícula generada. Los perfiles acústicos son los que más se aproximan a esta función teórica*.

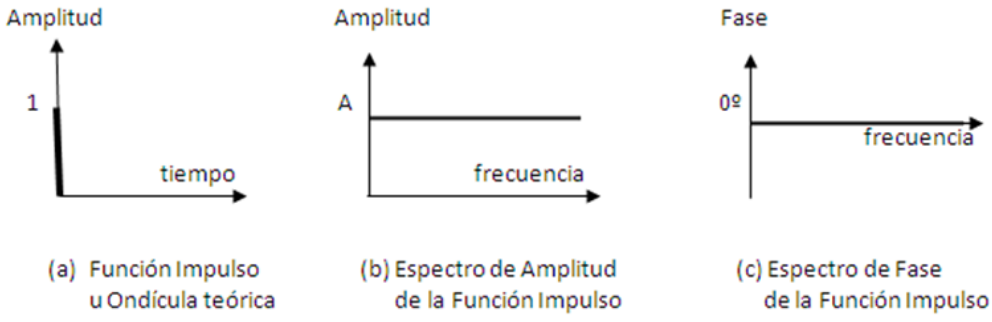
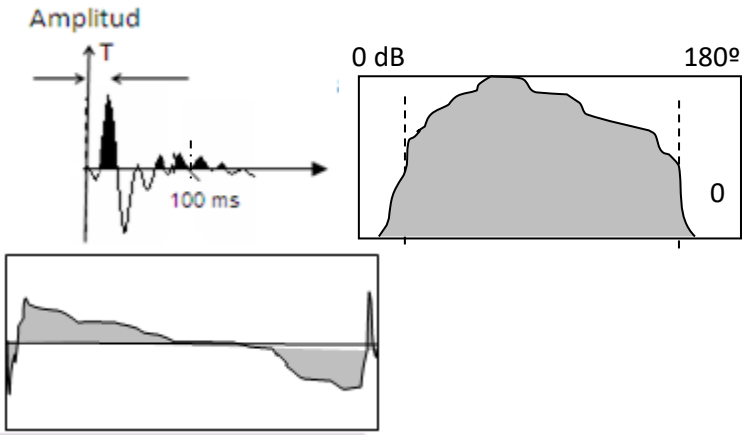


Figura 2, Función Impulso y sus Espectros de Amplitud y Fase

La Ondícula real que genera en el terreno la acción de una fuente impulsiva es causal. El lóbulo frontal muestra la amplitud de la reacción con un retardo "T" (de algunos milisegundos) con respecto al inicio del evento, por eso se denomina "Ondícula de Fase Mínima" (figura 3a).

* NOTA: Se ha desarrollado este tema en el Capitulo 3 de Introducción a la Sísmica.



(a) Ondícula real (b) Espectro de Amplitud (c) Espectro de Fase

Figura 3: Ondícula y espectros reales de una fuente impulsiva

La figura 3b corresponde al espectro de amplitud de la Ondícula emitida y muestra que las frecuencias más bajas, se encuentran muy atenuadas: por el acoplamiento imperfecto de la fuente, por la respuesta elástica-plástica del medio y porque los sensores, como la mayoría del instrumental sísmico, atenúan estas frecuencias cercanas a DC. También las frecuencias más altas del espectro son atenuadas cuanto más se aparten de la función impulso, luego también son atenuadas por el efecto "filtro pasa-bajos" del subsuelo y por el instrumental de adquisición, para evitar el "aliasing temporal" del dato sísmico.

La figura 3c muestra que la variación de fase en función de la frecuencia no es lineal ya que todo efecto causal genera respuesta en fase mínima.

Fase Mínima de la Energía Impulsiva

Para tener una muestra del tipo de Ondícula generada por las fuentes impulsivas, podríamos recurrir a una analogía eléctrica: obteniendo la salida de un filtro corta–altos (pasabajos) a un pulso de entrada ó de manera más gráfica y geofísica: utilizando como fuente Impulsiva la caída de un peso "W" desde una determinada altura "h", registrando este ensayo con un geófono (sensor de velocidad) cercano al lugar en donde el peso impacta al suelo.
Utilizando este último método, las consecuencias serán las siguientes:

El Geófono se hundirá la misma cantidad que se hundió ó desplazó el terreno impactado por el peso "W" y lo hará en un tiempo finito que será función de las propiedades elásticas superficiales del terreno y de la fuerza del impacto (ver Figura 4(a) durante el período de tiempo "A-B")

Luego de alcanzar su máximo desplazamiento ("Zo" en el tiempo "B"), el terreno y el Geófono se moverán hacia arriba tendiendo a volver al mismo lugar de reposo (siempre y cuando no se haya vencido el límite de elasticidad

del terreno). Esta acción insumirá un tiempo que generalmente es más largo que el anterior, pues dependerá únicamente de las propiedades elásticas del terreno (ver Figura 4(a), período "B-C").

El Geófono cercano al centro de impacto, es un Sensor de Velocidad por lo tanto producirá un voltaje eléctrico análogo al desplazamiento del terreno por unidad de tiempo:

$$V = \Delta Z / \Delta T$$

En los tiempos "A", "B" y "C" no existe desplazamiento ($\Delta Z = 0$) por lo tanto para esos tiempos la velocidad deberá ser también "cero". Uniendo los puntos mencionados, obtenemos la "Ondícula de Fase Mínima".

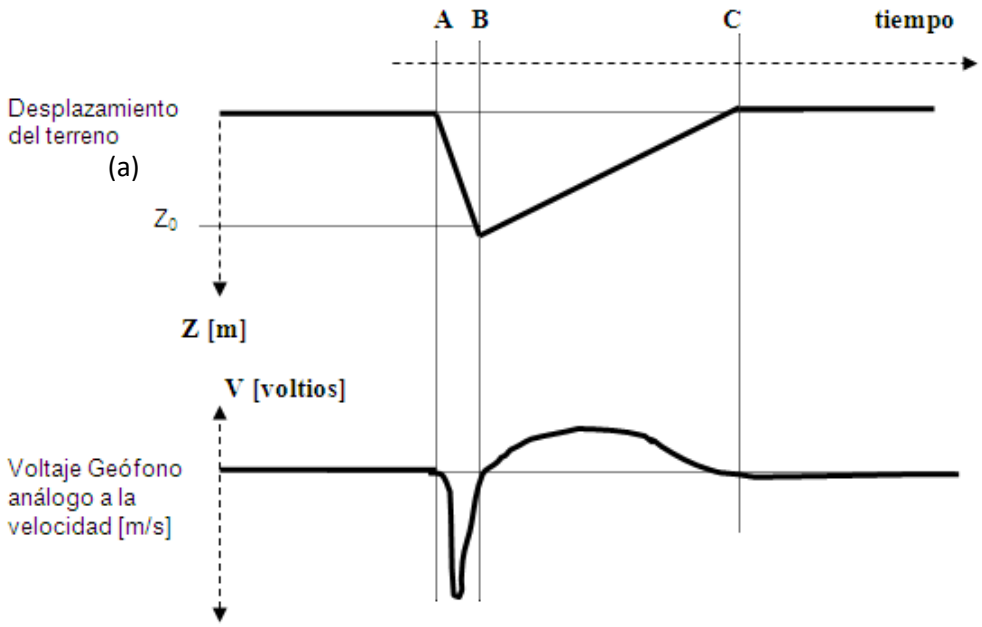


Figura 4: Respuesta del Geófono a la caída de un Cuerpo

El terreno en su reacción a la caída del peso, modifica la originaria acción impulsiva, de la manera mostrada en la Figura 4, retardando su manifestación. La Ondícula producida por el Geófono como respuesta análoga a la velocidad del fenómeno impulsivo, no ocurre en el origen de tiempo, sino que el máximo voltaje generado se produce con un pequeño retardo de tiempo respecto a su origen. Este tipo de ondícula se denomina: de **"Fase Mínima",** pues el máximo de la energía se concentra cerca del tiempo origen del fenómeno que la provoca, como todo fenómeno físico.

Como vemos es mucho más sencillo identificar el pico de mayor amplitud (que no es el verdadero instante de ocurrencia cuando se trata de Fuentes impulsivas) que hacerlo en el origen, donde las amplitudes de señal / ruido son confusas.

También es interesante destacar que el pico de velocidad ocurre antes que el pico de máximo desplazamiento del geófono, recordando que la velocidad adelanta 90º trigonométricos al desplazamiento que le dio origen.

En definitiva decimos que la Ondícula de las Fuentes Impulsivas es de "Fase Mínima" y la Ondícula de Fuentes Vibracionales es de "Fase Cero", como se verá cuando tratemos las fuentes vibracionales.

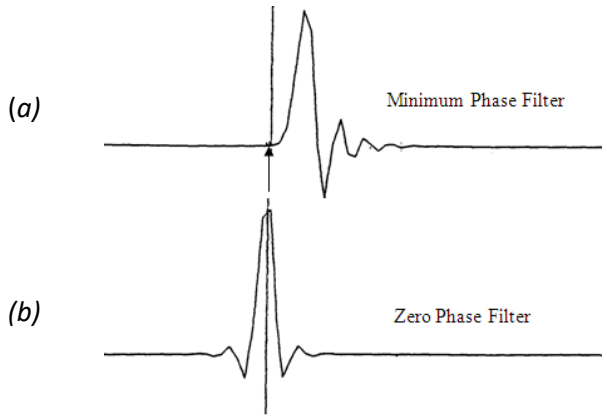


Figura 5, "Spike" después de pasar: (a) por un filtro de Fase Mínima; (b) por un filtro de Fase Cero [13]

La Ondícula Impulsiva

En Introducción a la Sísmica, habíamos hablado del Perfil Sónico, donde podíamos aproximarnos a la función impulso al introducir en un pozo un transmisor-receptor que midiera la velocidad de las paredes del mismo. Con este procedimiento deducíamos los Coeficientes de Reflexión en función del tiempo. Como vimos, esta Respuesta Impulsiva es equivalente a la "Función Transferencia h(t)".
Cuando la Fuente de Energía Sísmica no es impulsiva (Vibracional por ejemplo), deberemos utilizar la "Convolución" de la Respuesta Impulsiva con la Función de la Fuente "x(t)".

Pero el "spike" obtenido no es representativo de la ondícula de fase mínima, como también hemos visto, así que para tener una parecida representación de sísmica horizontal deberemos reemplazar los impulsos obtenidos por la "ondícula de la fuente", tal como se muestra en la figura 6.

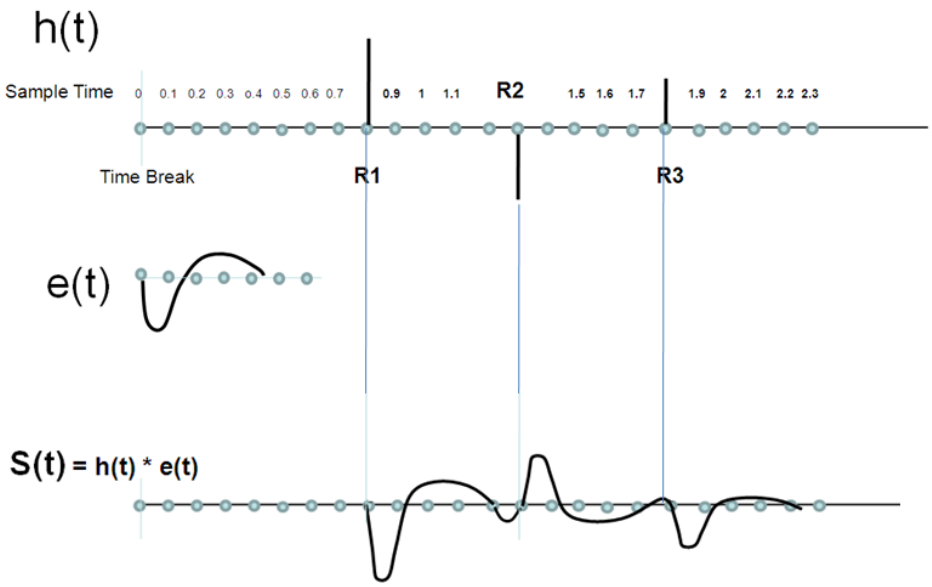


Figura 6, ondícula de fase mínima reemplaza a impulso

La "Ondícula de Fase Mínima" que reemplaza al impulso teórico en la figura anterior, es la respuesta del geófono de velocidad que la transforma (o transduce) en señal eléctrica análoga. Esta ondícula fue obtenida muy cercana al centro emisor del impulso, pero cuanto más se aleja la Fuente de Energía del Geófono Receptor, más se manifiesta el efecto de "Filtro de Fase Mínima" que produce el terreno debido al fenómeno de propagación elástica, modificando la forma de esta Ondícula.

Como se ve en la Figura 7, finalmente la Ondícula de Fase Mínima llegará, incluso a parecerse a la Ondícula de Fase Cero, con la salvedad que en caso de tratarse de Fuentes Impulsivas, debería elegirse al primer lóbulo como tiempo de respuesta (sigue siendo de fase mínima).

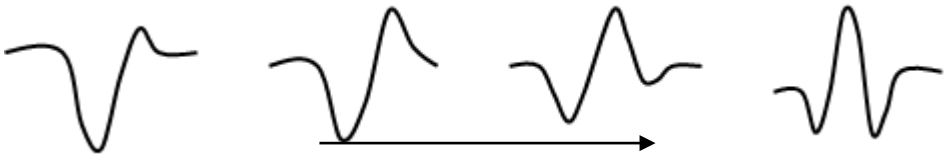


Figura 7, Ondícula de Fase Mínima deformada por transito en el subsuelo

I - EL EXPLOSIVO

Un explosivo es una mezcla de componentes químicos que pueden ser iniciados por acción de: calor, golpe, impacto, fricción ó una combinación de estas acciones. Cuando un explosivo es iniciado, este se descompone

rápidamente en una "explosión" la cual consiste en una liberación muy rápida de calor y gases que se expande con una sustancial fuerza.

Usamos el nombre genérico de "explosión" para dos diferentes fenómenos: la "deflagración" y la "detonación". Conviene distinguir sus diferencias:

(a) En una detonación la reacción química es más violenta pues su velocidad de desplazamiento es mayor que la velocidad del sonido sobre ese mismo material. Los gases generados en una detonación constituyen un violento frente de ondas que se propaga a velocidades mucho mayores a 900 m/s (900 m/s se considera el valor de velocidad límite entre deflagración y detonación).

(b) En una "deflagración" la reacción química es menos violenta pues esta se mueve a una menor velocidad (la velocidad de la reacción es menor a la velocidad de propagación del sonido por dicho material). La "pólvora" es el explosivo mas conocido dentro de esta reacción.

En general: cuanto mayor es la velocidad de la explosión mayor es la fuerza que se genera por acción del frente de onda de los gases desarrollados en esa reacción.. Actualmente los explosivos usados en sísmica poseen una velocidad de reacción de 7000-8000 m/s.

Historia del explosivo

El primer explosivo se cree que fue traído desde China al Continente Occidental, por el navegante veneciano Marco Polo alrededor del año 1300 DC. Este explosivo fue conocido con el nombre de "pólvora" ("Black Powder") que es una mezcla química de compuestos combustibles, como lo son el Carbón de Leña (charcoal) y el Azufre (S), y compuestos oxidantes, como lo son el "Nitrato de Potasio" (KNO_3) ó el Nitrato de Calcio (CaNO3). Antiguamente se empleaba como elemento oxidante, el estiércol de aves o "salitre", también denominada en ingles: "Saltpeter".

Blackpowder compounds: 15% Charcoal + 10% Sulfur + 75% Saltpeter

En 1800 la industria de la Pólvora alcanzó su máximo esplendor y esta era usada masivamente por la industria minera y la militar.

La industria del explosivo se ha desarrollado desde entonces y nuevos componentes químicos más potentes y seguros fueron creados.

En 1846 el italiano Ascanio Sobrero descubrió la Nitroglicerina mezclando soluciones de acido sulfúrico y acido nítrico con Glicerina (glycerol), en un accidente que casi le costó la vida.

Composición de la Nitroglicerina: C3H5O3(NO2)3

En 1863 el químico sueco Immanuel Nóbel comenzó a fabricar comercialmente la inestable nitroglicerina utilizando agua congelada para enfriar la mezcla y hacerla medianamente transportable. Para iniciar la Nitroglicerina era necesario producir un impacto mecánico ya que el calor no logra (como lo hacía con la Pólvora) iniciarla.

Dos años después, Alfred Nobel (hijo de Immanuel) inventa el primer detonador para iniciar la Nitroglicerina que consistía en un Fulminante de Mercurio conectado con una mecha (fuze). La Nitroglicerina es un liquido muy peligroso para manipular si no está congelado, tal es así que Emile Nobel, hermano de Alfred, falleció debido a un accidente manipulando nitroglicerina, lo que llevo a Alfred a intentar insensibilizar dicho liquido que al fin logró mezclando arcillas marinas con restos orgánicos (esqueletos de pescados, conchas). A esta mezcla solida la denominó: Dinamita y resultó mucho más potente que la nitroglicerina y más segura en su manipulación que la misma Pólvora. Pero la Dinamita cuando es almacenada o transportada, comienza a transpirar y esa agua la sensibiliza aun mas volviéndose inestable y peligrosa. Otro factor en contra la dinamita, es que esta, durante su manipuleo es absorbida por la piel humana produciendo una reacción vaso-dilatadora de la sangre que como mínimo origina dolor de cabeza agudo (remedios vasos dilatadores son usados en base a dinamita, ejemplo: Cintrón). A pesar de las contras la dinamita fue universalmente empleada hasta 1950.

En 1875 Alfred Nobel logra mezclar nitroglicerina con nitrocelulosa (aserrín de madera) creando una especie de gelatina mucho más estable que la dinamita: el Nitrato de amonio: NH_4NO_3. El Nitrato de Amonio o AN, debe luego ser mezclado con un elemento combustible para hacerlo más eficaz, Noble mezclo el AN (que provee el oxigeno) con Diesel (combustible) desarrollando el ANFO (Nitrato de amonio y Fuel Oil).

El primer explosivo militar, utilizado durante la Primer Guerra Mundial, descubierto en 1860, fue el TNT (Trinitrotolueno: $C_7H_5N_3O_6$) que es relativamente fácil de moldear y almacenar. Los británicos, luego de la Primera Guerra Mundial, descubrieron otro explosivo más poderoso que el TNT que denominaron: Research Department Explosive (RDX: $C_3H_6N_6O_6$) mejor conocido como "Exógeno" (cyclonite).

Otros explosivos militares en uso son:

- "Explosivo D" o AKA (Ammonium picrate) que posee menos campo de acción que el TNT pero es mucho más seguro en su uso y transporte.
- "Pentaerythritol tetranitrate" (PETN: $C_5H_8N_4O_{12}$), que es empleado en sísmica, conjuntamente con el TNT formando el compuesto: PENTOLITA (50% PETN y 50% TNT).
- "Octogeno" (HMX), que es un 75% más potente que el TNT, que fue desarrollado durante la Segunda Guerra Mundial.

- Explosivos Plásticos (Polymer Bonded Explosives: PBX) donde se relaciona (bond) una matriz polímera (puede ser: teflón, nylon, poliuretano) con cristales de materiales explosivos (como: HMX, PETN y RDX).
- "Octaninitrocubane" es el más moderno de los explosivos que se encuentra en estado experimental. Se encuentra compuesto de un núcleo de átomos de carbono con un grupo de NO2 en cada esquina del núcleo cubico. Se estima que posee el doble de poder que el TNT, que posee mucha más estabilidad y que su descomposición no produce toxicidad al medio ambiente.

Ahora el explosivo, aparte de ser económico, es: seguro de transportar y manipular (ya que se lo ha insensibilizado contra golpes ó impactos, no producen gases tóxicos que ocasionaban fuertes dolores de cabeza y son resistentes a la acción del agua.

Los explosivos son permanentemente usados en la actividad sísmica cuando la fuente de energía es impulsiva y debemos centrarnos, por razones de seguridad y calidad en el Detonador sin el cual el Explosivo no puede ser iniciado.

Operando con explosivos

Algunas condiciones a seleccionar para mejor utilizar el explosivo:

- Si queremos que la explosión sea lo más aproximado a un fenómeno impulsivo, tendremos que usar un explosivo cuya detonación se propague por su material lo más rápido posible. El explosivo más rápido es la Pentolita que llega a valores cercanos a los 9000 m/s.

  La siguiente fotograía fue obtenida por Dyno Nobel Explosives, sobre una carga de Pentolita, apenas esta fue iniciada. El frente de la detonación (especie de cuña blanca) avanza a una velocidad de 7600 m/s, mientras los gases traseros (en forma de esfera) se dispersan a diferente velocidad y representan pérdida de energía en calor y presión.

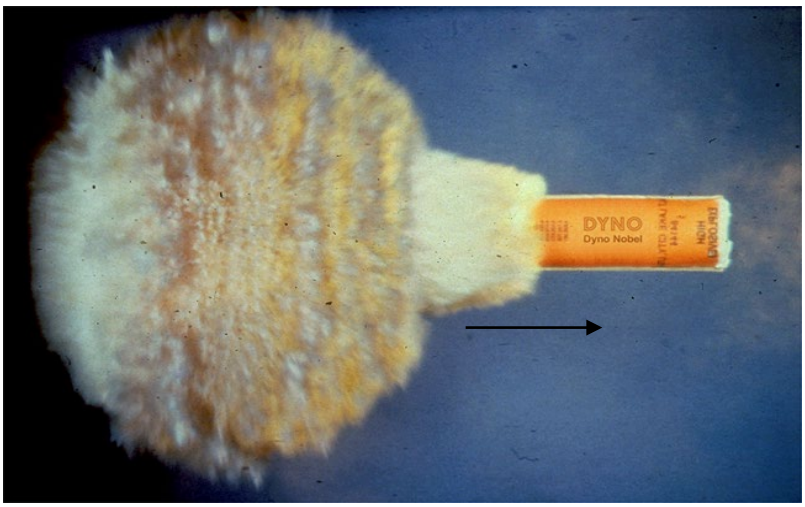


Figura 8, detonación en progreso de una carga de Pentolita [5]

- Para un mayor rendimiento de la energía, deberemos enterrar la carga a una profundidad que contenga un terreno más sólido que la capa superficial y genere un mejor acoplamiento carga-terreno.

- Conviene también taponar la carga en el fondo del pozo para que no sople hacia la superficie y se pierda energía, pero sobre todo: para que no se generen ruido debido al material arrojado en la soplada, no solo por la onda aérea generada sino por las piedras y agua que golpean cercano a los receptores (también se han producido accidentes importantes en personas e instrumental debido a la sopladura de los pozos).

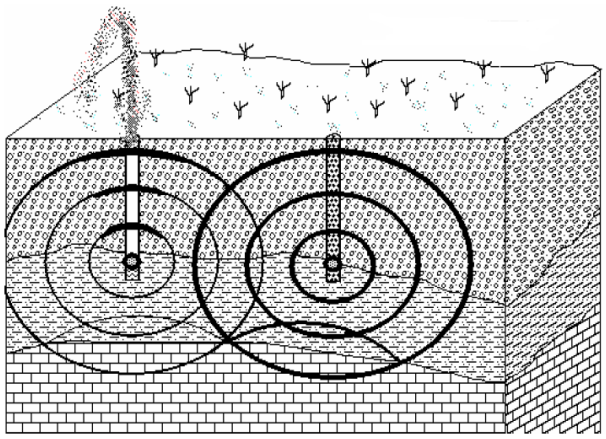


Figura 9, cargas de explosivo enterradas en pozos [14]

- Se debe colocar la carga más chica que permita obtener buenas reflexiones, debido a que el área más cercana al explosivo será fracturada absorbiendo energía plástica (zona inelástica). La zona inelástica será mayor cuanto mayor sea la carga explosiva. También las cargas más chicas generarán componentes elásticas de mayor frecuencia que las más grandes.

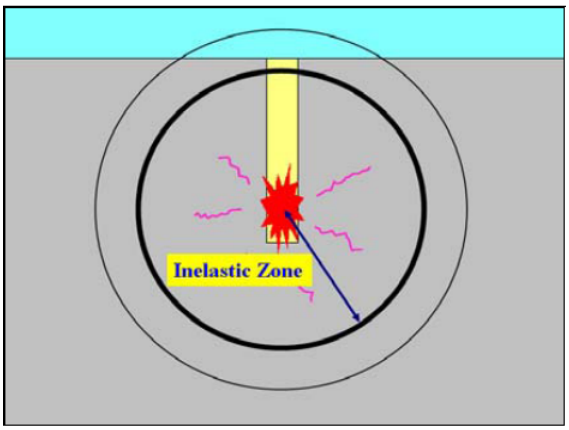


Figura 10, zona de fractura alrededor de la carga explosiva al explotar [14]

NOTA: En el artículo dedicado a la comparación de fuentes de energía, se verá que las variaciones de terreno (tanto en su textura como espesor), no permiten homogeneidad entre los registros adquiridos con explosivos (SP: Shot Points), siendo más parejos los registros generados con la fuente de energía sísmica en superficie: vibradores y/ o golpeadores.

Reflexiones Fantasmas

Al estar la carga explosiva enterrada, el frente de onda que es esférico tendrá componentes que incidirán en la interface terreno-aire, cuyo contraste de impedancias es muy grande:

V2 = V_{aire} = 330 m/s;
V1 = 1500 m/s (estimado)
Densidad aire ~ Densidad agua o roca / 800
R = - 1

No solo que se reflejará en la interface tierra-aire el 100 % de la energía sino que se invertirán las fases de las componentes de las ondas.

Si suponemos que la carga se encuentra enterrada a 12 metros de profundidad, la onda fantasma demorará un tiempo de:

$$\text{Demora} = \frac{2 * 12}{1500} = 16 \text{ ms}$$

Para el ejemplo, la onda fantasma se propagará con una demora de 16 ms para offsets cercanos y aumentará con mayores offsets tal como se observa en la siguiente figura, donde la reflexión en el horizonte se verticalizó para mostrar la pendiente de la onda fantasma.

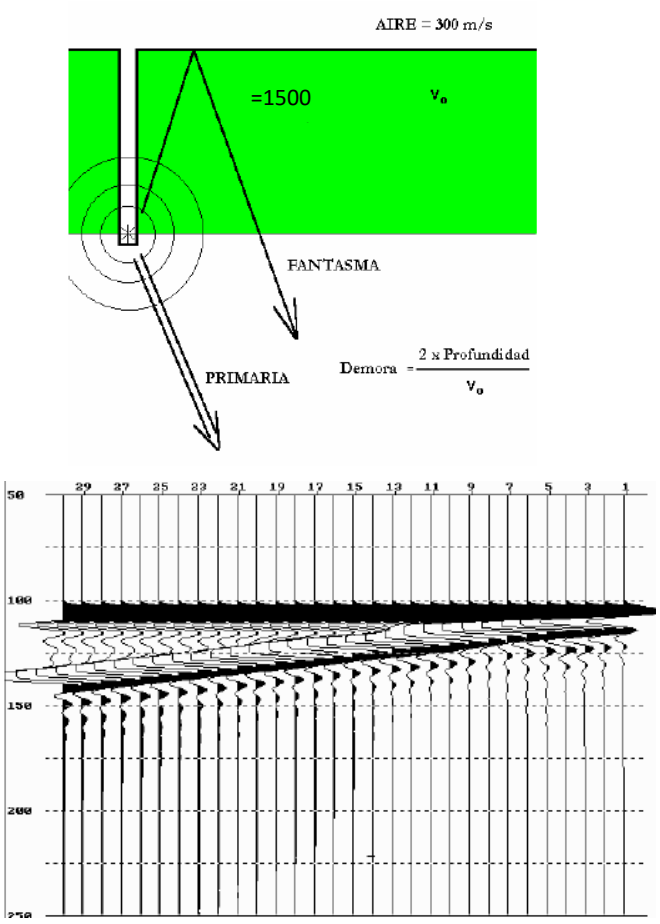


Figura 11 , fantasma por reflexión en la interface tierra-aire [14]

II. LOS DETONADORES ELÉCTRICOS

La exploración sísmica con explosivos utiliza "Detonadores Eléctricos ó Electrónicos Especiales" para iniciar adecuadamente a las cargas Explosivas.

El detonador también es un explosivo, el cual combina ambos fenómenos: la "deflagración" y la "detonación".

Los "Detonadores Eléctricos-Sísmicos", además de tener que garantizar seguridad en su uso y poseer suficiente fuerza para iniciar una amplia gama de explosivos, deben también garantizar: "retardos de tiempo" aceptables para la actividad (menores a un milisegundo).

Cuanto más insensible sea el detonador, más seguro será manipularlo pero mayor será la energía a suministrarle para lograr "retardos de detonación" aceptables.

El Detonador Eléctrico Sísmico

El Detonador Eléctrico Sísmico, también denominado: "Detonador de Potencia Nº. 8" ó "SSS" (Special Seismograph Strength Cap), se encuentra contenido en una cápsula de aluminio (cap shell) y se conecta con la Fuente de Energía Externa (Blaster), por intermedio de un par de cables de cobre (lead wires), convenientemente protegidos por una cubierta plástica semiconductora (protección física y anti-estática de los cables de cobre).

En la figura 12 podemos observar un esquema del "Electrical Super Cap" (by Dyno Nobel U.S.A.) y explicaremos cada uno de los elementos que lo componen.

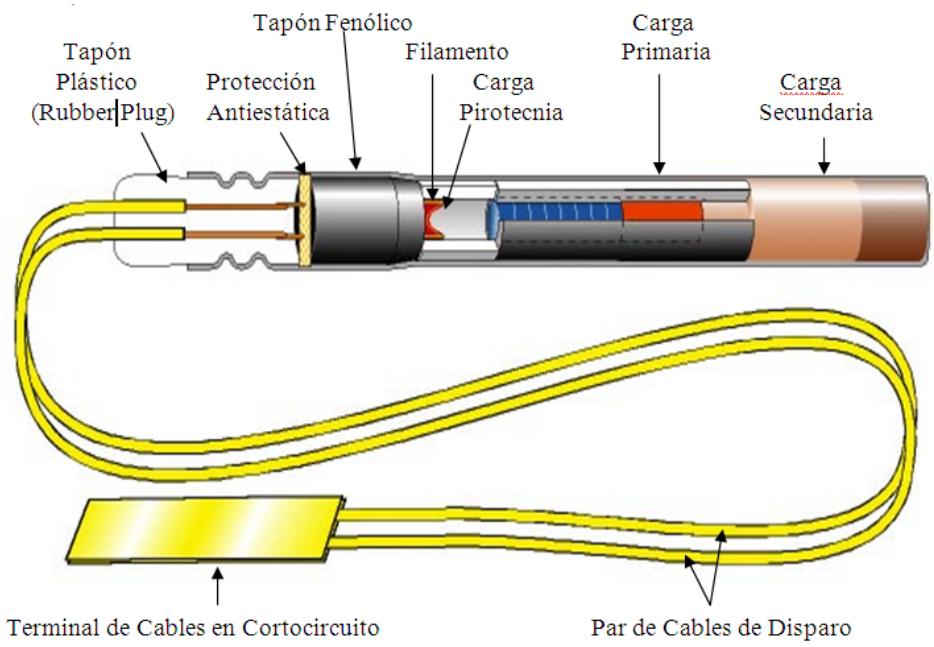


Figura 12: Diagrama de un Detonador Eléctrico Sísmico Super Seismic [4]

- **Resistencia Eléctrica ó "Filamento"** (bridge wires ó filament): Se encuenttra en contacto con una mezcla explosiva (Carga Pirotécnica). La Energía liberada en Calor por el Filamento, hace explotar la carga explosiva, dando comienzo a la cadena de detonación. Este Filamento se encuentra conectado al par de cables de cobre externo por medio de los cuales recibe la energía eléctrica necesaria (generalmente desde el Blaster). Los extremos del cable del detonador deberán permanecer cortocircuitados para reducir las posibilidades de que "voltajes estáticos" inicien la detonación.

- **Protección Antiestática.** En las figura 12 y 13 vemos como dentro de la cápsula del detonador y previo al Filamento (en un sándwich entre el "rubber plug" y el "phenolic plug" para el modelo "SuperSeismic"), los cables eléctricos pasan entre dos pequeños

orificios de una placa metálica que se encuentra en contacto con la cápsula de aluminio. La distancia entre c/ cable y la lámina conductora es tan pequeña que si se presenta un alto voltaje eléctrico estático instantáneo (inducido externamente sobre los cables con respecto a tierra), se producirá un arco eléctrico entre el cable y la placa metálica solidaria a la cápsula depositada sobre la tierra (descarga corona), evitando la descarga sobre el Filamento. Es decir "la protección antiestática ha generado un camino de baja impedancia eléctrica por donde se podrá derivar a tierra, la corriente eléctrica generada por altos voltajes inducidos".

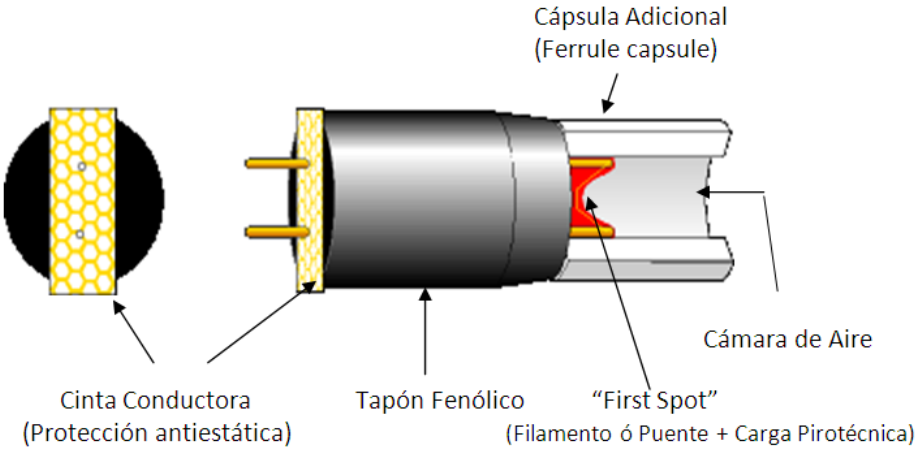


Figura 13: Filamento y Protección Antiestática de un Detonador SuperSeismic [4]

En la Figura 13 se aprecia mejor la existencia de la "cámara de aire" que se deja entre el denominado "first spot" (Filamento + Carga Pirotécnica) y la "Carga Primaria", para que la reacción pirotécnica (calor y llama) no produzca una acción de tostado sobre la carga primaria. También se aprecia mejor la cápsula adicional (ferrule capsule) para proteger físicamente al elemento más sensibles del detonador a ser iniciadas por impacto ó golpe de un objeto sobre la cápsula externa del detonador.

- **Explosivo Pirotécnico** (Pyrotechnic Charge). Es la carga explosiva más sensible de las tres y se encuentra en contacto con el filamento incandescente (forma con el filamento la denominada "Gota Sísmica"). Una determinada cantidad de calor generado en el Filamento inicia la reacción de "deflagración" en la carga pirotécnica dando comienzo a la cadena de detonación (por ejemplo: para iniciar una carga pirotécnica de 25 miligramos de Trinitroresorcinato de Plomo es necesario elevar su temperatura hasta 260 ºC). Si bien la "deflagración es una reacción lenta (su velocidad es menor a 900 m/s), esta libera gases y llamas a no muy alta presión pero sí a altas temperaturas (Temperaturas mayores a 1000 ºC).

NOTA: La primera etapa constituida por el Filamento, la Protección Antiestática y la Carga Pirotécnica, definen la mayoría de las características del "detonador sísmico": Sensibilidad, Corriente de seguridad, Corriente Mínima de Inicio, Grado de Protección Estática, Hermeticidad, Retardo de Tiempo.

- **Carga primaria**, se inicia por la energía proporcionada por la deflagración anterior y su reacción es mucho más violenta. La carga primaria es mucho más insensible que la pirotécnica y su velocidad de reacción es mucho mayor que 900 m/s. El frente de onda de choque, generado por la expansión de los gases producidos por la reacción, ejerce una gran presión sobre el medio que lo rodea (que es la carga base o secundaria) Observar que en el fenómeno de la explosión, existe una relación directa entre "velocidad de la reacción" y "el poder energético del frente de choque".

La composición química utilizada para la carga Primaria de los detonadores es generalmente de 115 mg de "Azide de Plomo" modificado.

- **Carga Secundaria ó Carga Base:** Esta es la última carga explosiva del detonador y la más insensible a ser iniciada (por eso necesita de las dos cargas anteriores), pero es la de mayor poder para iniciar una amplia gama de explosivos a los cuales se acoplará el detonador. Esta carga define el grado de "Fuerza" del detonador (strength). Nuestros detonadores son de Fuerza 8 (Nº8) ó mayor.

La composición química de la carga secundaria de los detonadores generalmente es: PETN (Pentaerythritol Tetranite) y su velocidad de reacción es del orden de 7000 a 8000 m/s lo que expresa la fuerza de su frente de ondas de choque generada por la expansión del gas liberado.

Clasificación del Detonador en función de su Energía de Iniciación

El Filamento y la Carga Pirotécnica, definen, desde el punto de vista de la seguridad, las más importantes características de un Detonador Sísmico. El Fabricante generalmente ofrece tres diferentes tipos de Detonadores Eléctricos Instantáneos Sísmicos:

Detonadores Sensibles
Detonadores Insensibles
Detonadores Altamente Insensibles

Detonadores Eléctricos Características	Tipo de Detonador		
	Normal (ó Sensible)	Insensible	Altamente Insensible
Filamento (Puente) Resistencia	1,15 +/- 0,10 Ω	0,30 +/- 0,05 Ω	0,045 +/- 0,005 Ω
Energía Mínima de Iniciación	2 +/- 0.3 mJ/Ω	31 +/- 10 mJ/Ω	1900 +/- 600 mJ/Ω
Corriente de Seguridad (Máxima Corriente de no Inicio)	0.25 A	0,85 A (5 min.)	4 A (2 min.)
Mínima Corriente de Inicio	0.5 A	1,5 A	10 A

Tabla 1: Diferentes tipos de Detonadores, Especificaciones de cada Filamento [3]

La diferencia en los distintos tipos de Detonadores se basa en: "la cantidad de energía que es necesaria para iniciarlos". En general, deberemos elegir los detonadores más insensibles que podamos detonar dentro de tiempos aceptables sismicamente (por debajo de 1 milisegundo de retardo), ya que ellos presentarán mas dificultad para ser disparados accidentalmente (mejores condiciones de seguridad para manipularlos).

NOTA: Cuanto más Insensible es el Detonador, mas Energía Eléctrica será necesaria para detonarlo (implica: mayor corriente eléctrica, mayores voltajes estáticos y otras inducciones eléctricas). Queremos el detonador más insensible posible, por razones de seguridad, pero que pueda ser detonado con retardos de tiempo menores a un milisegundo.

En la Tabla 1, vemos las Especificaciones Técnicas del Filamento ó Puente entregado por la Fábrica de Explosivos TEC Harseim. (luego: Dyno Nobel Chile, actualmente: Orica))

- **Resistencia del Filamento:**
  Es el valor (en Ohmios) de la Resistencia Eléctrica del Filamento ó Puente. La tolerancia dada a este valor es la dispersión de las resistencias medidas entre los detonadores de un lote.

- **Energía Mínima por Unidad de Resistencia:**
  Es el valor de la energía eléctrica mínima necesaria para iniciar uno ó más detonadores, cuando este valor se multiplica por la resistencia eléctrica de los detonadores conectados para ser explotados.

- **Corriente Eléctrica de Seguridad:**
  Es la máxima corriente eléctrica aplicada sobre el Filamento del Detonador que no producirá su iniciación, en el transcurso del tiempo especificado. Ejemplo: 0.85 A durante 5 minutos para Detonadores Insensibles.

NOTA: Cuando se mide la continuidad de un Detonador, siempre se deberá emplear un Multímetro Especial de Seguridad (Galvanómetro), para asegurar que la Corriente Eléctrica que circulará por el filamento en su medida, sea mucho más baja que la Corriente de Seguridad.

- **Corriente Eléctrica Mínima de Iniciación:**
  Es el valor que el fabricante asegura que el detonador explota al ser circulado por dicha corriente (es un valor eficaz de corriente correspondiente a una descarga capacitiva). Ejemplo: *1,5 A para Detonadores Insensibles.*

Ejemplo: En el Detonador "Insensible" del ejemplo, la energía Mínima por Unidad de Resistencia es: (31 +/- 10) mJ/Ω [mJ = 10^{-3} Julios]

Si solamente empleamos un Detonador, el valor de la Resistencia Eléctrica será: R= 0.3 Ω entonces:

Energía Mínima(máx.) = (31 + 10)mJ/ Ω * 0,30 Ω = 12.3 mJ
" " (mín.) = (31 – 10)mJ/ Ω x 0,30 Ω= 6.3 mJ

NOTA: Como se puede apreciar, existe una importante dispersión en las características dadas por el fabricante. Para nuestros cálculos, deberemos utilizar el valor máximo de energía para calcular cuanta necesitaremos para disparar un "arreglo" de detonadores. Si más de un detonador va a ser conectado en "serie", debemos sumar el valor de todas las Resistencias de los Filamentos conectados y con este valor multiplicar a la Energía Mínima (máxima) por Unidad de Resistencia. La conexión en "paralelo" de detonadores no es conveniente, pues no se puede garantizar la misma cantidad de corriente eléctrica circulando en c/ rama de un circuito paralelo.

Voltajes y Corrientes Vagabundas (stray Currents/voltages)

Los cables de alimentación de un Detonador, pueden ser eléctricamente considerados como un Capacitor, capaz de acumular cargas eléctricas ante la presencia de un Campo Eléctrico, también pueden servir como antena de radio frecuencias y en dicho caso los cables podrían ser considerados como un Inductancia Magnética. La Capacidad "C" o la Inductancia "L", dependen de las dimensiones del cable: longitud, diámetro de los conductores, distancia entre los mismos, cobertura de los conductores, etc. Esencialmente el valor de "C" o "L" es drásticamente disminuido por el solo hecho de poner en corto el extremo de los cables de alimentación del detonador.
Todos los detonadores poseen algún tipo de protección anti-estática para prevenir que voltajes estáticos inducidos sobre el detonador (hasta ciertos

límites), puedan hacer detonar los mismos. Desgraciadamente no se posee otro antídoto para efectos electromagnéticos que el de "desplazar el generador ó el detonador del lugar".

Efecto Antena para Frecuencias de Radio elevadas (RF)

El efecto antena (por transmisión de ondas de RF) debe ser evitado mediante estrictos procedimientos. Solamente "shooters" y "cargadores de pozos" bien entrenados deben realizar dichas operaciones. Como finalmente la carga explosiva será disparada telemetricamente mediante una señal de RF, solamente y en ese momento (con la carga en el interior del pozo) se podrá permitir el uso de un tranceptor de radio, todas las otras emisiones radiales no serán permitidas en las cercanías de explosivos en superficie ó sobre pozos cargados.

Ensayos realizados por las Fuerzas Armadas de Alemania, irradiando Ondas de Radio Frecuencia (desde frecuencias de 100 kHz hasta 18 gHz), probaron que un Detonador puede llegar a explotar por inducción electromagnética de RF cuando este se encuentre en medio de un Campo Eléctrico (medido en Voltios por metro: V/m) de valor superior a 20 V/m. Para ello, la longitud de los cables de los detonadores ensayados, fue sintonizada con la longitud de onda eléctrica emitida, para obtener el máximo efecto "antena".

En la Figura 15 observamos, por ejemplo, el Campo Eléctrico creado durante la transmisión de una señal radioeléctrica de 1 kiloWatts de potencia. En dicha figura vemos que hasta 20 metros de distancia del transmisor de RF, existe un Campo superior a 20 V/m y que a 1 metro de distancia dicho campo es de 400 V/m. En nuestras tareas sísmicas es más probable el empleo de Radios VHF (frecuencias del orden de los 150 Mhz.) de, aproximadamente, 50 W de potencia de transmisión, igualmente, vemos que esta RF genera una Campo superior a 20 V/m hasta aproximadamente 4 metros de distancia del transmisor.

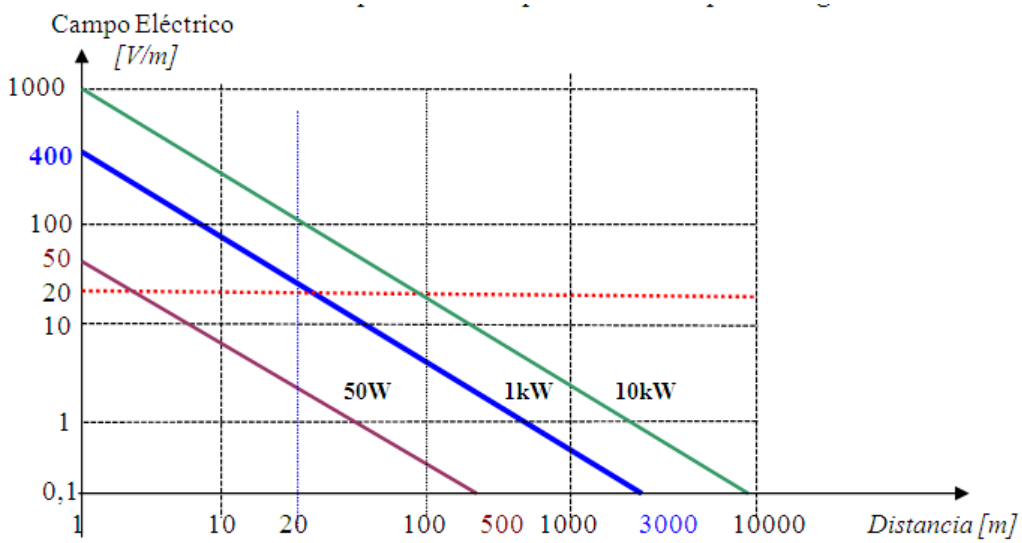


Figura 14: Campo Eléctrico creado por la emisión de RF [1]

Veremos luego, como los "Detonadores Electrónicos" son insensibles a la emisión de RF.

Ensayo de Voltajes y Corrientes Estáticas

Como vimos en los ensayos anteriores, los mismos producían la detonación (y desaparición) de c/ detonador bajo ensayo. Por lo tanto este ensayo utilizará, detonadores pertenecientes al mismo lote del muestreo de detonadores realizados, previamente apartados para obtener una evaluación total de la performance de c/ lote.
El objeto de este ensayo, es el de evaluar la capacidad de evitar detonación por Voltajes Estáticos de un tipo y lote de detonadores.

La envoltura plástica que cubre a los dos conductores de cobre del cable del detonador, no es una cubierta perfectamente "aisladora", es mas, esta fue construida empleando una composición de PVC semiconductora para que, ante la presencia de un alto voltaje entre conductores del cable y tierra ó entre conductores entre sí, se produzca un drenaje de corriente sin alcanzar totalmente al filamento del detonador (Tec Harseim nos informa que su producto generará una conducción de 5 mA entre los conductores del cable, sí sobre los mismos se genera una diferencia de voltaje de 1000 Voltios)

Los ensayos realizados en el Laboratorio de Y.P.F. consistían en aplicar Altos Voltajes Eléctricos a los tres conexionados físicamente posibles de formarse entre los cables y la carcaza del detonador, con la eventual posibilidad de detonación (no pretendida) por culpa de altos voltajes inducidos entre sus cables y carcaza metálica:

a) Entre los dos conductores cortocircuitados (como un solo terminal) y la carcaza del detonador (que representa al otro polo del circuito)

b) Entre uno de los conductores del cable (ahora no se encuentran en cortocircuito) y la carcaza del detonador.

c) Entre el otro conductor y la carcaza del detonador.

En la Figura 15, podemos ver las tres conexiones diferentes de un detonador a un Capacitor (que representa el medio acumulador de Potencial Eléctrico). Los peores casos son él (b) y él (c) donde uno de los dos conductores del cable se encuentra abierto y entonces un voltaje diferencial entre ambos conductores es más fácil de ser creado.

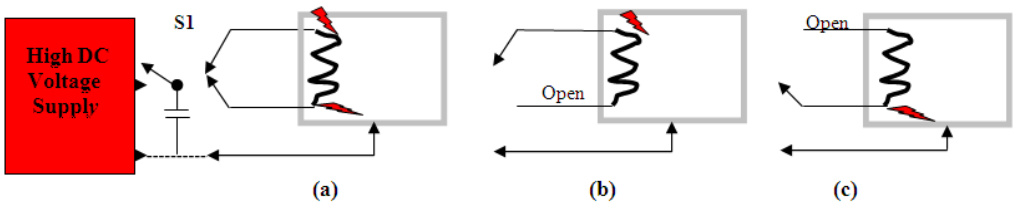


Figura 15: Tests de antiestaticidad [1]

La Fuente de alto Voltaje es la que carga al Capacitor (de capacidad "C") cuando la llave "S1" lo habilita . La Energía Eléctrica acumulada en "C" es como hemos visto: "E = ½ V²C". "C" generalmente representa a la máxima capacidad eléctrica que algún cuerpo cercano al detonador puede presentar, acumulando energía que luego podría liberarse sobre el filamento del detonador. Se estima que el máximo valor de "C" que puede presentar un cuerpo físico real (por ejemplo un camión perforador), es de aproximadamente:

$$C = 2000 \text{ pF} = 2000 \times 10^{-12} \text{ Faradios.}$$

La Protección Anti Estática que se coloca dentro del detonador, permite construir un circuito eléctrico de "baja Impedancia" para que las corrientes generadas por altos voltajes estáticos se deriven a tierra (carcaza metálica del detonador), evitando que esta circule por el Filamento e iniciando al detonador. La protección tiene sus límites, y si los voltajes (energía) son excedidos de esos límites, la iniciación del detonador será inevitable. En otras palabras, el alto voltaje "HV" estáticamente inducido (no directamente aplicado al filamento del detonador), tiene dentro del detonador un camino para drenar la corriente generada, diferente al del filamento. Pero como no existe una aislamiento perfecto, cuanto mayor es el potencial eléctrico mayor es la posibilidad de superar la llamada "rigidez eléctrica" de cada material /aire.

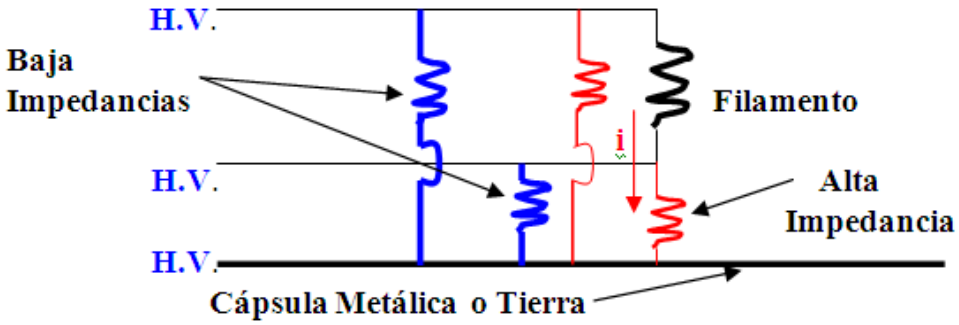


Figure 16: Impedancias eléctricas equivalentes en un Detonador [1]

La Figura 16, muestra los diferentes circuitos eléctricos creados: uno de "baja impedancia" creado por el elemento de protección estática, (representado por Resistencias azules), y otro de "relativamente alta impedancia" (Resistencias rojas) que físicamente existen entre los extremos del filamento y la cápsula del detonador (leakage entre el filamento y la cápsula). Si la corriente "i" es suficiente para iniciar el detonador, este habrá detonado inesperadamente por Energía Estática.

Ensayo de Hermeticidad de los Detonadores

Este Test determinará cuan hermético es un detonador. Realmente estamos ensayando la calidad del tapón de goma de entrada al detonador (rubber plug) y cuan bien se encuentra este "crimpeado" a la cápsula metálica, aislando al interior del detonador con el exterior (considerar que el detonador deberá permanecer en el fondo de un pozo profundo a la presión de una columna de agua-barro de no muy baja densidad).
El "Tapón de Goma" (Rubber Plug), es una pieza de goma, que se "engrampa" con la cápsula de aluminio solidariamente, en el extremo por donde sale el par de cables de alimentación del Detonador al exterior. Este tapón determina las características ó grado de hermeticidad del detonador, que será ensayado en una prueba: "Water Proof."

Si dentro de un detonador, se introduce humedad o agua, el filamento eléctrico podrá llegar a cortocircuitarse y por lo tanto a no iniciar al detonador; también puede ocurrir que algo de humedad en su interior altere la disipación de calor del filamento. En todos los casos, el Punto de Explosión Sísmico deberá nuevamente ser perforado para enterrar una nueva carga explosiva e inhibir la anterior (si esta no fue explotada fuera de especificaciones), etc.

Ensayo de Impacto, Seguridad al Golpe-Impacto de un Detonador

Todos los detonadores sísmicos, poseen alguna protección adicional sobre el área de la cápsula de aluminio que encierra al explosivo más sensible a ser explotado por "golpe o impacto físico", dicho explosivo es: la Carga Primaria de Azide de Plomo (Lead Azide)

En los detonadores "Dyno Nobel Super", la denominada: "Ferrule Capsule", es una cápsula interna que permite incrementar la resistencia mecánica sobre el "First Spot" (filamento + Carga Pirotécnica) y la Carga Primaria. Sin esta protección adicional, la energía de impacto para iniciar al compuesto "lead azide" es menor a 5 Julios pero con el "ferrule capsule" esta energía de iniciación se incrementa hasta aproximadamente 70 Julios.

El Test de Impacto consiste en hacer caer un cuerpo sólido de peso: "W", desde una altura "h" para que impacte sobre el cuerpo del detonador (tratando de que no dañe al "First Spot" para que este detonador luego pueda ser explotado eléctricamente) El ensayo presupone que el detonador será colocado fuera del tacho de seguridad que lo contenía en los anteriores ensayos, por lo tanto el área de ensayo deberá ser convenientemente condicionada para proteger personas y objetos ya que fragmentos del detonador podrán ser esparcidos durante el impacto, ya sea por simple rotura o por la explosión no pretendida debido a la iniciación por impacto. También el área debe ser condicionada y protectores auditivos deberán ser provistos al personal que se encuentre expuesto al fuerte ruido generado en una probable detonación.

El detonador es colocado sobre una plataforma plana y rígida como se muestra en la Figura 18. La prueba que realiza Tec Harseim, emplea una pesa de 2Kg cayendo desde una altura de 90 centímetros sobre el detonador.

La energía del impacto de ensayo es:

$$E = 20\ Kg * 9{,}81 \frac{m}{seg^2} * 0{,}9\ m = 18\ J$$

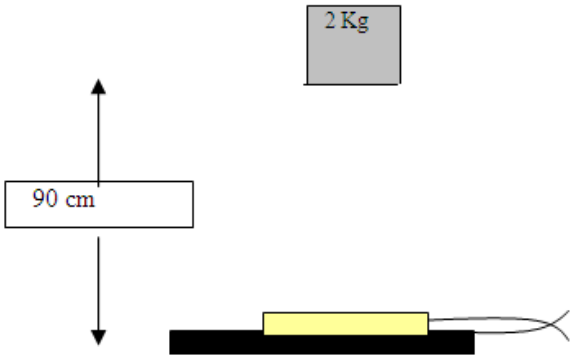


Figure 17: Test de Impacto [1]

Especificación: "El Detonador no deberá iniciarse al recibir el primer impacto" (la superficie impactada del detonador lucirá chata como una moneda).

Ensayo de la Fuerza del Detonador (Cap Strength)

Este Test determina la fuerza ejercida por el "frente de onda de impacto" de la Carga Base, al detonar sobre una placa de Plomo de 4mm de espesor (para el ensayo de Tec Harseim).

En un detonador, la Carga Base es la que deberá hacer detonar la carga explosiva a la cual se encuentra acoplada. El fabricante del Explosivo, generalmente especifica la fuerza necesaria para iniciar su producto.
Generalmente un Detonador de "Fuerza 8" es suficiente para iniciar la mayoría de los explosivos usados en sísmica.
La fuerza depende de la cantidad de Carga Secundaria o Base. Dyno Nobel Chile ofrece dos tipos de detonadores respecto a fuerzas: Fuerza 10 y Fuerza 12.

El ensayo consiste en medir el diámetro del agujero de la placa de plomo producido por el detonador, las especificaciones son las siguientes:

	Fuerza 10	**Fuerza 12**
Longitud de Carga	50 mm	60 mm
Carga	775 mg	885 mg
Diámetro in la Placa	9 mm mínimo	11 mm mínimo

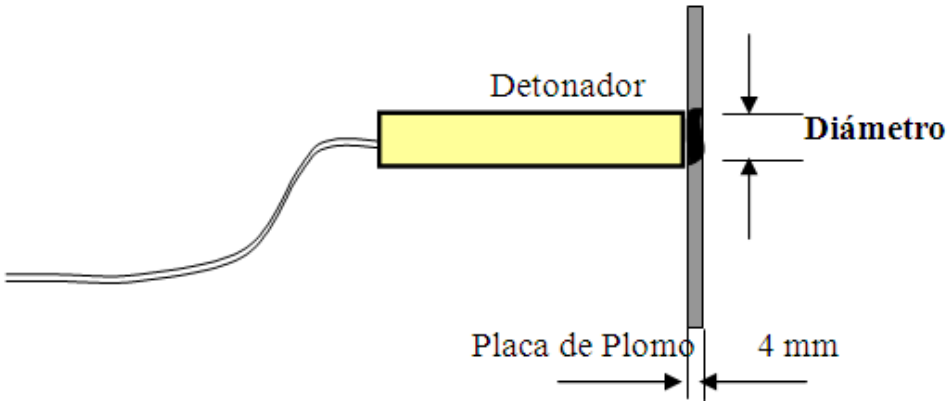


Figura 18: Test de Fuerza [1]

NOTA: Se le debe exigir al proveedor de los detonadores sísmicos, el total de las especificaciones técnicas de sus productos entregados y el listado de ensayos practicados sobre cada lote de detonadores entregados.

Certificado de Entrega de los Detonadores

Debería ser norma de toda Empresa Petrolera o de Servicios, exigir un Certificado de Calidad de los detonadores recibidos, para conocer:

(a)Tipo de Detonador (sensible o insensible o altamente insensible).

(b) Cuantas muestras de los lotes de detonadores se han ensayado previamente.

(c) A que ensayos se han sometido y cuales fueron los resultados.

HARSEIM	CERTIFICADO DE CALIDAD	DYNO Dyno Nobel
Nombre del producto : DETONADOR ELÉCTRICO SISMICO Tipo : Insensible Lote : 1 – 7, 9, 12, 13, 15 / Noviembre / 2001		Número Pedido 9214-01

CARACTERÍSTICAS	ESPECIFICACIONES	RESULTADOS
Tiempo	Menor a 1 ms	Media 0.865 ms Desviación : 0.032 ms
Cantidad de muestras ensayadas	135 u	
Casquillo aluminio	50 mm	CUMPLE
Largo del alambre	17.0 m	CUMPLE
Resistencia del filamento	0.30 ± 0.02 Ω	CUMPLE
Energía mínima de inicio	31 + 19 mJ/ohm	CUMPLE
Corriente máxima de no detonación	0.85 A (5 min.)	CUMPLE
Corriente mínima de detonación	1.5 A	CUMPLE
Resistencia eléctrica alambre de Cu	0.0549 ohm/m (22 AWG)	CUMPLE
Cargas explosivas	PETN 725 ± 25 mg	CUMPLE
	PTB 115 ± 15 mg	CUMPLE
Insensibilidad al impacto	2 kg a 0.9 m (no detona)	CUMPLE
Resistencia a la presión (1 hr)	11 kg/cm^2	CUMPLE
Embalaje Interno	Caja cartón 85 x 320 x 125 mm	CUMPLE
Embalaje Externo	Caja cartón 682 x 345 x 220 mm	CUMPLE
Cantidad	7.000 u	CUMPLE

INFORMACIÓN GENERAL	
Clasificación	1.4
Grupo de Compatibilidad	B
Número ONU	0255

SANTIAGO (CHILE), noviembre de 2001

LUIS BENAVIDES R.
Jefe Depto. Gestión de Calidad

Figura 19, Certificado de Calidad del lote de Detonadores suministrados [3]

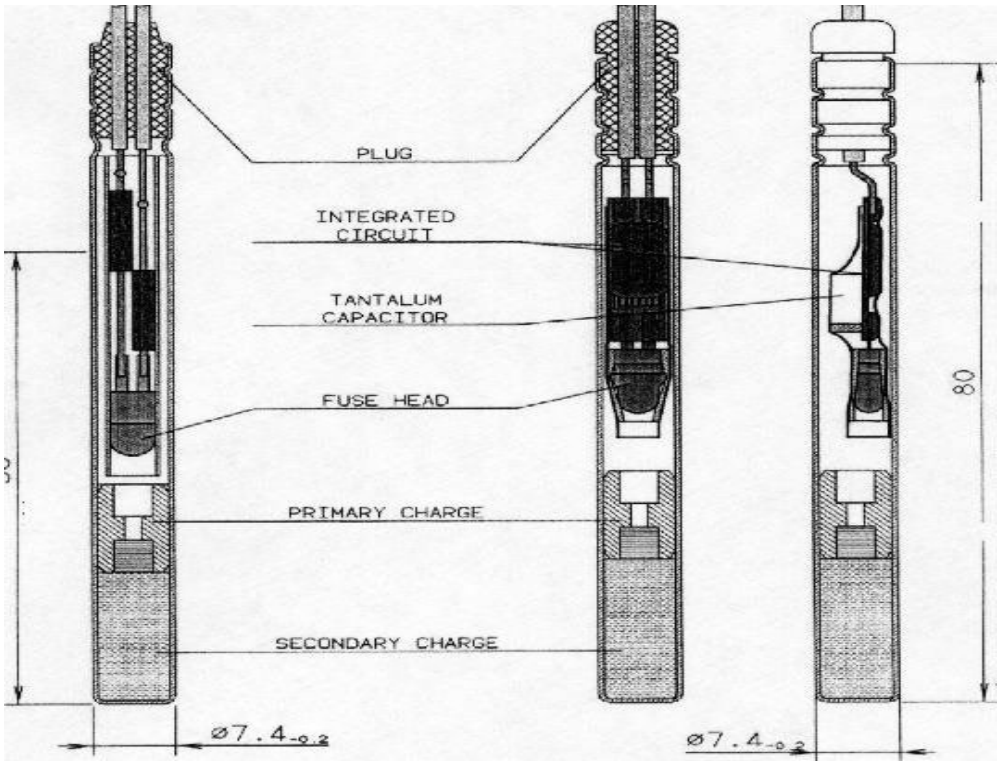
III - EL DETONADOR ELECTRONICO

Dynamit Nobel RF en Alemania, ha desarrollado un Detonador "inteligente", que bautizaron como: "Seismotronic". Al detonador "clásico" se le agregaron minúsculos elementos electrónicos, de tal manera que, cada detonador solamente se iniciará, solo y solo cuando, este reciba una precisa y exclusiva secuencia de datos digitales sobre sus cables conductores, volviéndolo prácticamente insensible a toda iniciación externa al sistema.

El Detonador electrónico, también tiene incorporado en su interior, el Capacitor acumulador de cargas eléctricas, el cual es cargado desde el exterior, mediante una corriente eléctrica de muy bajo valor (del orden de unos pocos miliamperes)

La carga del Capacitor y el disparo del detonador, es controlada por la electrónica misma del detonador, bajo el comando (vía cables de alimentación) de un Módulo Electrónico Externo denominado: "Firing Panel".

Detonador Eléctrico ó "Clásico"



Detonador "Electrónico"

Figura 20, Detonador Eléctrico y Electrónico de Dynamit Nobel [1]

En la Figura 20, se puede observar y comparar un Detonador convencional con el Detonador Electrónico. En principio el "Seismotronic" (detonador electrónico) posee el mismo diámetro que el convencional (7,4 mm) pero es bastante más largo (81,75 mm contra 56,5 mm) La "gota" ó "fuse head" (filamento + carga pirotécnica) no difiere conceptualmente una de otra salvo en que ahora, no se necesita (por seguridad) insensibilizar el filamento para que la iniciación se produzca con gasto de energía, por lo tanto la resistencia

del filamento es mucho mayor que el del convencional. Las cargas Primarias y de Base son las mismas.
El costo de un Detonador Eléctrico Insensible es de u$s 5, en cambio el de un Detonador Electrónico es de u$s 25, según información recibida. Por lo tanto se deberá esperar unos años más para que este último detonador suplante definitivamente al convencional.

Diagrama en Bloques y Operación del Detonador Electrónico

La Figura 21, muestra el diagrama en bloques del sistema electrónico incorporado al detonador. En grandes detalles: Cuando los cables del detonador se conectan al "Firing Panel", el Capacitor se carga a un voltaje de 2 Voltios con un régimen de corriente de carga entre 1 a 2 mili-amperes. Este voltaje es suficiente para alimentar al circuito electrónico del detonador pero no así para iniciarlo. La electrónica del detonador queda, en su entrada, a la espera de una secuencia ordenada de pulsos para iniciar el resto del proceso de disparo. El "Firing Panel" envía los comandos de disparo, por intermedio de una serie codificada de pulsos eléctricos que el circuito electrónico del Detonador reconoce. La secuencia finaliza con el cierre de la "Llave 3" permitiendo la descarga del Condensador sobre el "Fuse Head".

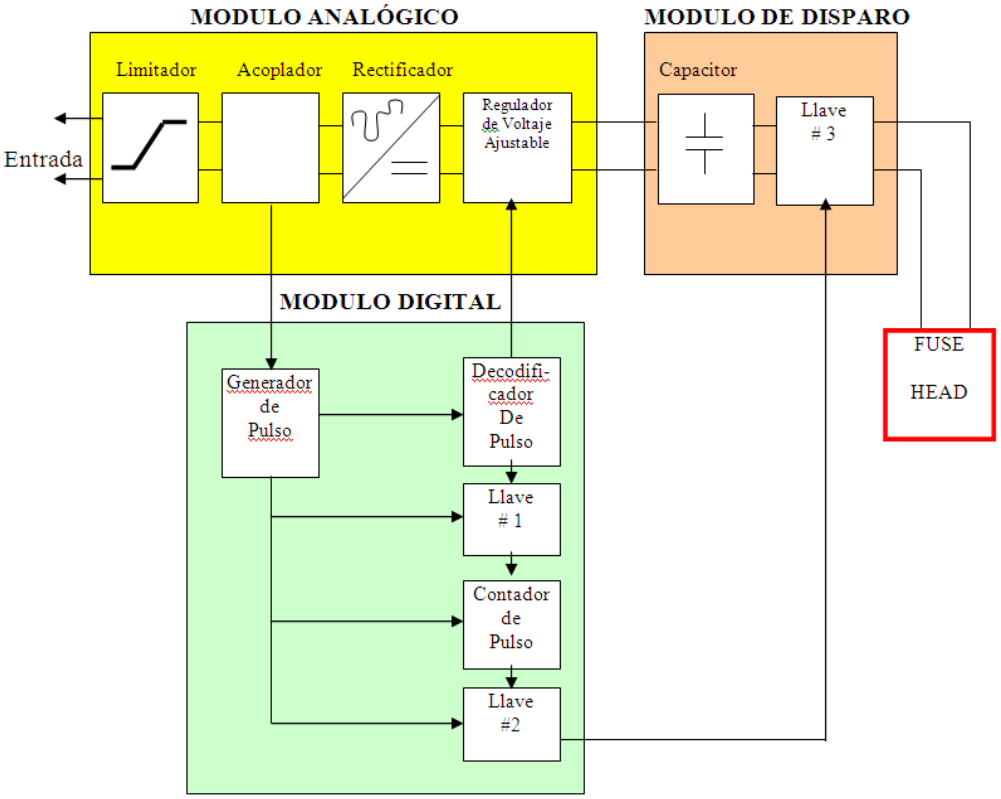


Figura 21, Circuito electrónico del Detonador Seismotronic [1]

- **Módulo Analógico**

Los pulsos de entrada son recibidos por el "Circuito Limitador" del módulo analógico, que recorta los voltajes mayores a

20 Voltios para que no puedan ser aplicados al resto del circuito. De esta manera los voltajes / corrientes vagabundos son prácticamente imposibles de generar la iniciación del Detonador Electrónico.
Para limitar el voltaje de entrada el "Circuito Limitador" utiliza un Diodo Zener, el cual impone el valor de la Resistencia de entrada al Detonador. Para un voltaje de alimentación de 12 Voltios, la resistencia ofrecida es de: 12.700 ohmios, con lo cual la Corriente Eléctrica provista y **Medida** por el "Firing Panel" es de aproximadamente: 1 mA.
El "Acoplador de Señal" permite aislar eléctricamente al resto del circuito electrónico del exterior al detonador.
Los pulsos de voltajes se aplican sobre el circuito Rectificador y también son derivados al Módulo Digital. El Rectificador del Módulo Analógico convierte voltajes alternados (pulsos) en valores continuos de voltajes, que son aplicados para controlar el Regulador de Voltaje Ajustable. Al iniciarse la secuencia el Regulador de Voltaje genera una salida de 2 Voltios con la cual carga al Capacitor del Módulo de Disparo. El voltaje de salida del Regulador será modificado por control del Módulo Digital.

- **Módulo Digital**

Los cambios de polaridad en la señal de salida del Acoplador de Señal del Módulo Analógico, son recibidos en el "Generador de Pulsos" del Módulo Digital, que conforma esta señal en pulsos que luego aplica sobre el "Decodificador de Pulsos", "Llave #1" y "Llave #2" (las llaves originalmente de encuentran: abiertas)
Si el "Decodificador de Pulsos" reconoce la correcta secuencia de pulsos, enviada por el Firing Panel, entonces genera la habilitación de la "Llave #1" y el "Regulador de Voltaje" (del Módulo analógico) El "Regulador de Voltaje" carga en 3 segundos al "Capacitor" del Módulo de Disparo, al valor indicado en la secuencia de pulsos a la entrada del "Rectificador".
La "Llave #1" habilita a que el "Contador de Pulsos" comience a contar "64 pulsos" al cabo de los cuales produce la habilitación de la "Llave #2".
Con la "Llave #2" habilitada, el próximo pulso de salida del "Generador de Pulsos", pasa directamente hasta el Módulo Digital habilitando a la "Llave #3".

- **Módulo de Disparo**

La "Llave #3" al cerrarse produce la descarga del "Capacitor" sobre el "Fuse Head" (Filamento del Detonador) iniciándose la detonación.
Si la secuencia de pulsos es interrumpida por alguna razón (por interrupción del disparo desde el "Firing Panel"), el "Capacitor" es

descargado en un término de 2 minutos. El detonador podrá ser usado posteriormente, previo reseteo desde el "Firing Panel".

- **Firing Panel**

El "Firing Panel" es un módulo externo que comanda toda la secuencia del Detonador Electrónico. Este módulo podrá ser conectado a un Sistema de Disparo comercial (Pelton estudia esta posibilidad) para sincronizar el disparo con un Registrador Sísmico.

Este panel controla la secuencia de pulsos que gobiernan al detonador Seismotronic.

Al encenderse el "Firing Panel", este realiza un auto-test, controlando el estado de su batería externa y su propia circuitería. Si el test anterior resultó satisfactorio, entonces el panel pregunta si desea armar al Detonador: **ARM?**

Si Ud. acepta entonces el "Firing Panel" coloca sobre el par de cables de alimentación del detonador un voltaje continuo de aproximadamente 12 Voltios (Power On Line: 7 Voltios mínimo) El Detonador carga su "Condensador" a un voltaje de 2 Voltios. Luego 5 segundos de la habilitación de armado, el "Firing Panel" muestra el mensaje: "**READY TO FIRE".**

El disparo podrá realizarse:

- Manualmente: mediante la presión de 2 llaves distintas desde el "Firing Panel".
- Mediante un comando externo (recibido por radio por ejemplo) conectado a una entrada del Panel.

En cualquiera de los casos anteriores, el Panel envía una secuencia de pulsos por medio de los cables del detonador. Desde el comienzo de la acción de disparo (Firing) y la detonación, transcurre un tiempo de: 10,4 ms +/- 0,1 ms.

- **Características de Seguridad del Detonador Electrónico**

El Detonador Electrónico, como puede apreciarse, es extremadamente seguro con respecto a la iniciación del mismo por inadvertidos y extraños fenómenos de electricidad. A lo sumo, la presencia de algunos de estos fenómenos, ocasionará la inutilización del detonador pero no su iniciación. Por ejemplo:

  - Corrientes vagabundas: Si voltajes mayores a 15 Voltios son erróneamente aplicados sobre los conductores de alimentación del detonador, una corriente de 100 mA podrá circular, como máximo durante 5 segundos antes que algunos de los chips del detonador se dañe (2 segundos circulando 180 mA y 0,25 segundos circulando 1 A)

- Voltajes Estáticos: La secuencia de pulsos que envía el "Firing Panel" (para un voltaje de 12 Voltios) puede producir una energía de aproximadamente: 0,2 mJ/Ω. Si comparamos esta energía con la que es capaz de generar el cuerpo humano (25 kilovoltios en 2500 microfaradios): 0,05mJ/Ω, podemos afirmar que el Detonador Electrónico no será dañado por electricidad estática y todavía más: **"El Detonador Electrónico no podrá ser iniciado por la descarga de un condensador de 2500 pF con una carga de 30 kV".**

- El Detonador Electrónico tampoco podría ser iniciado por la energía generada por un "rayo" (lighting strike), aunque dicha energía podría iniciar el explosivo acoplado al detonador (aunque el detonador no se inicie) Por lo tanto la no iniciación por "lighting strike" deberá solamente ser considerada cuando el explosivo se encuentre dentro del pozo y su única vinculación con el exterior sea el cable del detonador (ya que el explosivo debe tener el cuerpo del detonador acoplado al mismo)

- Las señales de RF tampoco iniciarán al Detonador Electrónico. Los ensayos de RF relatados en la sección 4.2, determinaron que los Detonadores Electrónicos no se iniciaron, sometidos aún, con campos eléctricos de 100 V/m, luego de este test los detonadores quedaron operativos. Para Campos Eléctricos superiores a 150 V/m tampoco se logró la iniciación del detonador pero, en algunos casos, algún "chip" se dañó y el detonador quedo "no perativo".

- Con respecto a la seguridad por impacto, las restricciones siguen siendo las mismas que las establecidas en el detonador convencional, ya que la Carga Primaria (la más sensible al impacto) se encuentra protegida por un "steel tube" (ver Figura 17) aumentando la resistencia al impacto de 5 Julios (sin protección) a 70 Julios con protección.

NOTA: La experiencia indica que la mayoría de los accidentes fatales con explosivos fueron debido a errores humanos, al conectar la carga explosiva equivocada y en superficie en el Blaster, o en disparar la carga sin despejar el área cercana al explosivo.
Desgraciadamente el Detonador Electrónico tampoco podrá detectar esta condición y podrá dispararse. Como veremos a continuacion, solamente un método (denominado Cut to Fit) puede garantizar absoluta seguridad en la operación con explosivos, aunque tiene algunas limitaciones técnicas.

IV- PRUEBA DE DIFERENTES EXPLOSIVOS

A continuación copiaré un artículo que escribí de una experiencia donde participé, que ha sido publicado por el IAPG en 2005, donde se probaron tres tipos de explosivos y que servirá para mejor entender a los explosivos.

Se han desarrollado diferentes tipos de explosivos que ofrecen ventajas en varios aspectos del método. Un primer aspecto es la necesidad de hacer más segura la operación y reducir por ejemplo el riesgo que representan las cargas que por no haber sido explotadas quedan en el terreno como un pasivo ambiental. Un segundo aspecto es mejorar la calidad de información sísmica, esto es lograr una mejor relación señal ruido. Por último todo esto debe de hacerse a un costo que sea razonable sobre todo teniendo en cuenta que las operaciones sísmicas empleando explosivos son usualmente más onerosas que las realizadas con otro tipo de fuente. En este sentido Repsol-YPF, WesternGeco Argentina y Dyno Nobel realizaron en la provincia de Neuquén un ensayo de diferentes tipos de explosivos sobre una mini línea 2D que permitió comparar a los mismos desde el punto de vista de la operación en general, la seguridad, la calidad del dato y el costo. El presente trabajo describe los resultados de la comparación efectuada desde los puntos de vista antes mencionados.

Explosivos a comparar

Se trata del: 1) dBX, 2) Cut to Fit y 3) I-1000. Las características principales de los explosivos empleados se describen a continuación:

1. dBX®

Este explosivo es producto de un desarrollo conjunto de WesternGeco y Dyno Nobel y posiblemente es el único explosivo diseñado específicamente para satisfacer las necesidades sísmicas.

La experiencia de WesternGeco en esta actividad y Dyno Nobel en la fabricación de explosivos, se juntaron para obtener una composición química explosiva, sensible al detonador sísmico que además posee una alta densidad, alta energía, de buena velocidad de detonación y un volumen de gas extraordinariamente bajo. Con esto el dBX® produce una mayor transferencia de energía sísmica por unidad de volumen que cualquier otro explosivo, mejorando considerablemente la relación señal / ruido.

El conocimiento en la naturaleza de la detonación en el dBX® y su reacción sobre las partículas del terreno al cual se acopla, permitió predecir y luego medir la respuesta sísmica sobre partículas del terreno lejanas (far-field reaction).

A diferencia de otros productos explosivos sísmicos, el dBX® está compuesto por sales explosivas higroscópicas por lo que en presencia de agua se diluyen y disocian. Esta composición única (Etileno Glicol) y su envase especialmente diseñado (disco de auto-desarmado) proveen de un mecanismo que finalmente desensibilizará la carga en pozos con agua.

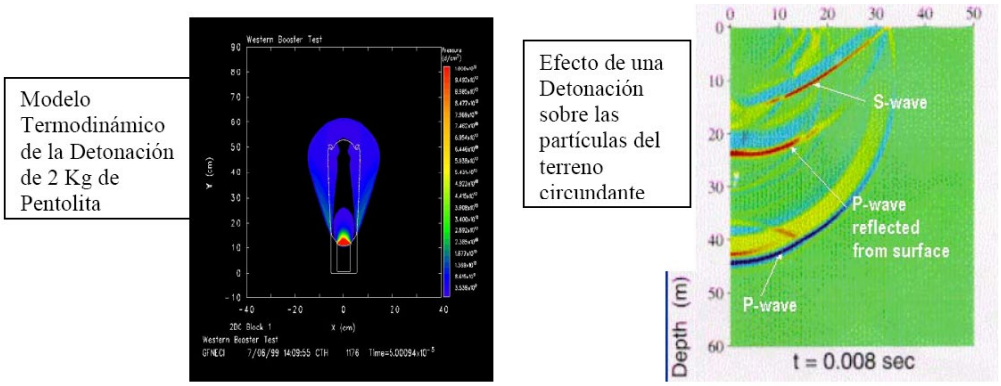


Figura 22, estudios previos realizados por WesternGeco y Dyno Nobel para desarrollar el dBX® [7]

El mecanismo de auto-desarmado consiste en la corrosión de un disco metálico, ubicado en un extremo del cartucho. Una vez roto el disco, el agua ingresa y el material explosivo comienza el proceso de dilución en forma progresiva hasta dejar la carga inerte. Solo quedará el fulminante como "carga viva" en el pozo. El proceso de oxidación del disco metálico puede llevar de 20 a 24 meses dependiendo de la calidad del agua a la cual este expuesto, la salinidad ayuda a la oxidación y al proceso de auto desarmado.

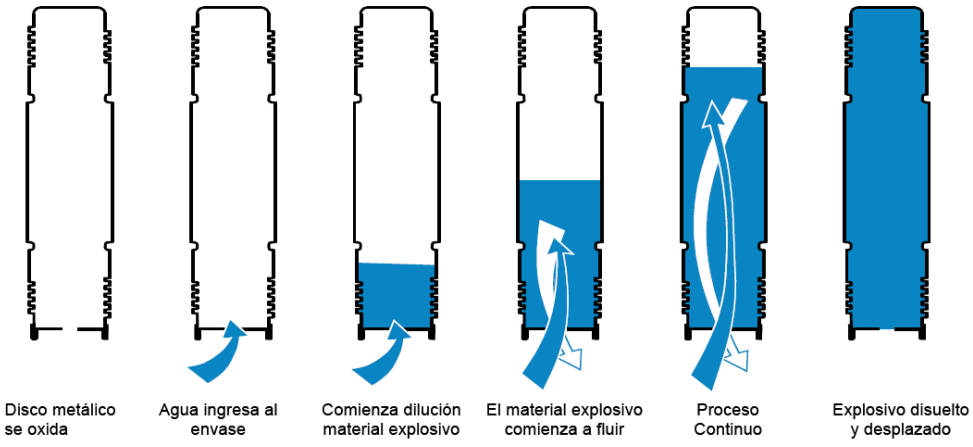


Figura 23, Secuencia de auto-desarmado del dBX® [7]

El auto-desarmado por dilución es un proceso efectivo, pero tiene el inconveniente de que los compuestos químicos son biodegradables solamente en presencia de agua y por lo tanto no se transforman en ausencia de la misma y se mezclan con el terreno.

2. Cut to Fit (CTF)

A diferencia del dBX®, el CTF es un sistema de disparo desarrollado para utilizar en trabajos de exploración Sísmica.

Una carga de Pentolita GEOprime® debidamente adaptada para ser disparada por un Cordón Detonante GEOSEIS®, al cual se conecta mediante un Ancla especial. El Ancla no solo permite conectar la cantidad de Cordón necesaria para iniciar al GEOprime®, sino que permite a su vez que el Cordón sostenga y permita introducir la Pentolita dentro del pozo. Sus cuatro componentes se muestran en las siguientes figuras.



Pentolita Geoprime *Ancla Plástica* *Cordón Detonante* *Detonador de Superficie*

Figura 24, Componentes del sistema CTF [7]

Los cartuchos de GEOprime® están compuestos por Pentolita nutrientes y microorganismos naturales que son directamente colocados en el Booster sísmico GEOprime® durante el proceso de fabricación.

Cuando el cartucho es sumergido en agua, los microorganismos se vuelven activos y comienzan una biodegradación lenta de la Pentolita. Con este proceso los componentes del cartucho perderán su calidad de explosivos y con el paso del tiempo se mineralizan.
Biotransformación es el proceso que utiliza microorganismos naturales que son capaces de transformar los elementos de un compuesto explosivo en compuestos NO explosivos.
Mineralización es el proceso que toma los compuestos NO explosivos y los transforma en compuestos básicos posteriores como CO2, H2O y N.

A diferencia del dBX® los cartuchos de GEOprime® no son sellados para permitir el ingreso de agua y con ello se activa el proceso de biodegradación. Este proceso dependerá de las condiciones del pozo en que se encuentre colocado el cartucho ya que el proceso puede acelerarse o retrasarse en su efectividad con salinidad, temperatura, alcalinidad, etc.

La Pentolita GEOprime®, cuenta con un alojamiento debidamente adaptado para recibir el ancla plástica.
El Ancla Plástica GEOSEIS®: Es un diseño especial, que aglomera la cantidad de cordón detonante necesario para producir la energía suficiente y asegurar la iniciación de la Pentolita GEOprime®.
El diseño especial del ancla no solo introduce la cantidad necesaria de cordón para iniciar el Booster, sino que además permite asegurar que el cordón sostenga la carga al introducirla dentro del pozo.

Cordón Detonante GEOSEIS®: Es fuerte, flexible, resistente a la abrasión, calor y frío extremo. El cordón detonante tiene una resistencia superior a la tensión y fricción que el cable eléctrico duplex que se utiliza en los detonadores (resistencia nominal del Cordón a la tensión: 54 Kg). Este cordón tiene la función de transmitir la señal de iniciación del detonador al cartucho explosivo a través de un pequeño núcleo explosivo. Su velocidad de detonación es de 6,400 m/seg, lo que significaría una retraso en la detonación del cartucho explosivo de 1 ms cada 6.4 metros. Este retraso es uniforme y constante en el cordón detonante por lo que puede ser identificado y corregido.

Detonador de Superficie GEOSEIS®: El detonador de superficie GEOSEIS® es un iniciador de Fuerza Grado 2 (los detonadores convencionales son de Fuerza Grado 8-12) el cual fue diseñado específicamente para utilizarse en el sistema CTF. Este detonador tiene la potencia suficiente para iniciar el cordón detonante mas, por seguridad, no tiene potencia para iniciar un explosivo comercial sensible a fulminante # 6. El detonador se conecta al cordón solo cuando el pozo va a ser detonado, por lo que en esta operación solo se ven involucrados un tramo muy pequeño de cordón y el fulminante de baja potencia

La principal característica del sistema CTF es que al momento de cargar no se manejan explosivos e iniciadores al mismo tiempo, lo cual disminuye casi por completo los posibles daños a un operador en caso de una detonación accidental.

El Personal que carga los pozos, simplemente aglomera el cordón detonante GEOSEIS® en el acumulador de cordón del ancla GEOSEIS® y esta es insertada en el Booster GEOprime®.

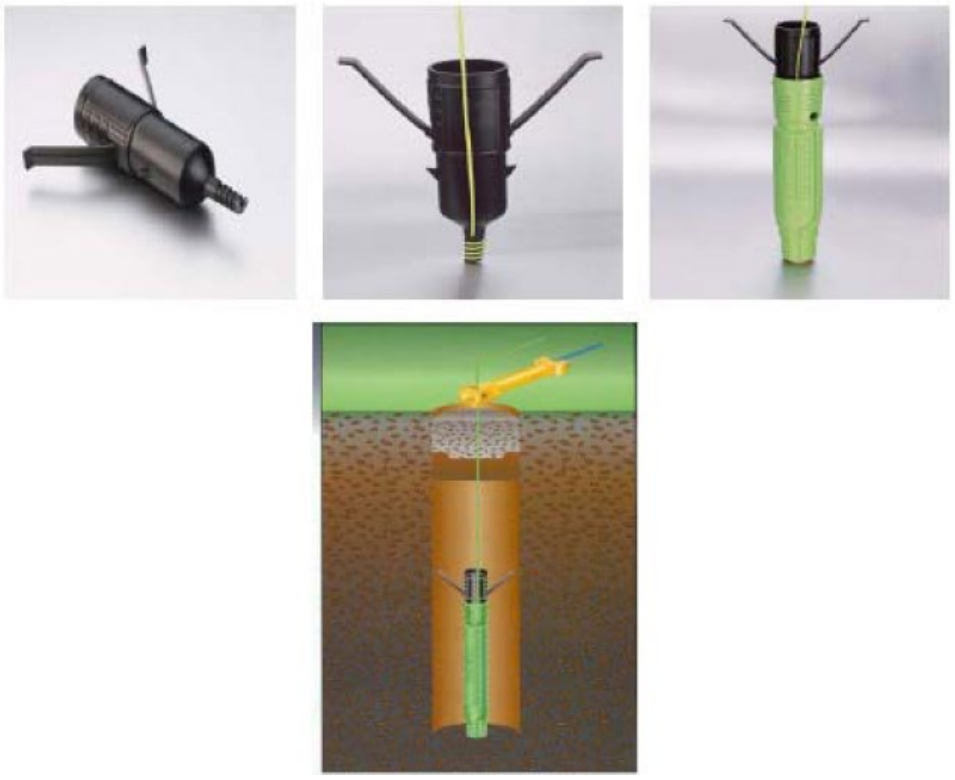


Figura 25, Proceso de armado del sistema CTF [7]

Después el Booster es colocado en el fondo del pozo y el cordón detonante es cortado en superficie. El pozo es tapado y el cordón es enterrado en el terreno (la carga quedó enterrada en el fondo del pozo, sin haber sido cebada con un detonador eléctrico, evitando todo riesgo de accidente).
Cuando es tiempo para el disparo, el Disparador recupera el cordón y conecta el detonador de superficie GEOSEIS®. Los cables del detonador son conectados a la línea de disparo y esta al Blaster. Si el cordón detonante no se inicia, el Disparador tiene la oportunidad de conectar otro detonador GEOSEIS® a la línea descendente del cordón y re disparar el pozo. Esto reduce considerablemente la posibilidad de dejar pozos vivos o fallados.

Nombre Producto	Tipo Carga Explosiva	Presentación (grs)	Velocidad Det. (mt/seg)	Presión Det. (kbars)	Diámetro (mm)	Densidad (gr/cc)	Volumen (moles / kg)
GEOprime®	Pentolita	1000 2000	7900	250	57	1.6	29.4

Nombre Producto	Tipo Carga Explosiva	Presentación (granos / pie)	Velocidad Det. (mt / seg)	Metros por Carrete	Peso Carrete (Kg.)
GEOSEIS®	Cordón Detonante	10	6400	915	6.8

Nombre Producto	Tipo Carga Explosiva	Potencia	Velocidad Det. (mt/seg)	Metros por Carrete	Piezas Caja (Unid)
GEOSEIS®	Detonador	2	N/A	N/A	300

Figura 26, Características Físico-Químicas del CTF [7]

3. Pentolita Convencional I-1000

Básicamente se trata de un compuesto similar al Geoprime pero con mayor proporción de TNT (Trinitrotolueno y menor de PETN (Tetranitrato de Pentaeritriol)

PETN + TNT = Pentolita

Las Pentolitas con mejores resultados para la sísmica son las pentolitas puras y de proporción 62 PETN/ 38 TNT (CTF). Esta fórmula es la mejor pero también la más cara en costo (El TNT es más barato que el PETN y de menor velocidad que este). Al momento en que introducimos compuestos diferentes o diluimos esta proporción se cambian las características de sensibilidad, velocidad de detonación, densidad, volumen de gases a generar y presión de detonación.

La Pentolita I-1000 es fabricada en Argentina por Austin Powder (Rafaela, Provincia de Santa Fe) y en su composición posee una mayor proporción de TNT. Por ambas razones, fabricada en Argentina con menor proporción de PETN, su costo por Kg debería ser sensiblemente menor que el CTF. Hasta ahora es el tipo de explosivo (Booster I-1000) que más se está utilizando como fuente de energía sísmica impulsiva.

Esta Pentolita no es ni bioremediable ni biodegradable por lo tanto las cargas no explotadas dentro del pozo deben sufrir un proceso de mitigación de muy baja eficacia (explotar carga cercana a la yaciente para destruir el explosivo o tapiar con hormigón 1m² sobre la superficie del pozo).

Producto	Tipo carga explosiva	Carga (gr)	Velocidad de detonación (m/seg)	Presión hidrostática de trabajo (kg/cm²)	Diámetro (mm)	Accesorios	Almacenaje
I - 1000	Pentolita	1000	7000	20	60	Si	Ilimitado

Figura 27, Características Físico-Químicas del Booster I-1000 [7]

Este tipo de Pentolita, por su composición alta en TNT, es menos sensible a la iniciación proveniente del detonador por lo que se pueden llegar a presentar problemas de fallas en disparos, principalmente en ambientes muy complicados.

Adquisición comparativa con los tres explosivos

Una Línea 2D de receptores se disparó tres veces (una con cada tipo de explosivo). Todos los pozos fueron perforados a 10 metros de profundidad cada 75 metros y fueron cargados con 4Kg de cada explosivo. Los pozos con I-1000 se perforaron sobre el plano de la línea sísmica y los de los dBxs y Cut To Fit a ambos lados de la línea 2D en paralelo a 5 metros de esta.
La disposición en forma de línea 2D permitió además generar secciones sumadas para una mejor comparación de las respuestas obtenida.

Para la registración se empleó el mismo Sismógrafo I/O System II con los mismos parámetros. El tendido fue fijo de 201 Canales para todos los puntos de tiro. Para todos los canales se trabajo con el preamplificador K-Gain 48dB y filtro antialias ½ Nyquist (125 Hz) Minimum Phase. El sistema de disparo empleado fue el Pelton ShotPro

Días previos al inicio de las pruebas, el personal de WesternGeco del Grupo, afectado a estas operaciones, fue entrenado por personal de Dyno Nobel en el armado-cargado de pozo con dBX y especialmente con CTF contando con envases de cargas explosivas sin contenido, para una buena introducción práctica efectuada en una sala-meeting del Grupo sísmico. También Dyno Nobel supervisó las tareas de cargado y detonación de las pruebas en la línea de operación. El personal mencionado se expresó muy confortable en el empleo del CTF, comprendiendo la sustancial mitigación del riesgo en el manipuleo de explosivos que este sistema les brinda. Todos los pozos cargados explotaron durante la adquisición sísmica.
También se comprobó que el armado y cargado de CTF no presenta demoras de tiempo con respecto al sistema convencional, es más, estos tiempos se disminuyen sensiblemente al simplificarse el armado-cargado de pozos al no tener que conectar dos detonadores en serie eléctrica acoplados a la carga explosiva y tener que atar a dicha carga un cable especial para sostenerla durante su bajada al pozo (ver procedimiento de armado del CTF).

La capa superficial perforada fue muy variable, desde roca volcánica, arcillas, relleno de piedras-arena y hasta "cavernas" se encontraron en los pases de los pozos durante su perforación. Por lo tanto se esperaron obtener "tiempos de pozos" que mostraran significativas variaciones. Sin embargo, aún para similar posición topográfica, carga y profundidad, se midieron diferencias de tiempos importantes entre los tres tipos de explosivos.

Debido a esta fuerte topografía y "wheathering" se presentó una complicación para el Sistema CTF. Para que la explosión del Detonador y Cordón no afecte la medida del tiempo de pozo fue necesario separar al Geófono de Tiempo de Pozo de la boca del mismo. Esto introduce una "diferencia de altitud" entre la boca de pozo y el geófono y una trayectoria no vertical que debe ser corregida. Sin embargo aun considerando esta corrección sobre 36 pozos adquiridos con CTF, 12 de ellos no pudieron ser interpretados apropiadamente y no fue posible determinar la naturaleza de las anomalías en esta lectura en el sistema de disparo. Los registros sísmicos no mostraron retrasos en tiempo que pudieran correlacionarse con lo medido por el sistema de disparo.

Luego de un pre-procesamiento en el Grupo 1799 de WesternGeco, donde se obtuvieron las primeras apreciaciones sobre la respuesta sísmica de los explosivos bajo ensayo, se procedió a un procesamiento definitivo en el Centro de Procesamientos de WesternGeco en Buenos Aires, con el fin de obtener datos corregidos y sumados "stacks" idénticos para los 3 tipos de explosivos.

Evaluacion de los resultados

El siguiente análisis fue realizado por el Geofísico de Repsol-YPF: Daniel Lorenzo.

Las tres secciones son comparables entre si y se pueden destacar entre ellas las siguientes diferencias, utilizando el Booster I-1000 como referencia.

- El CTF parece aportar más continuidad a los horizontes que el Booster, pero este último parece aportar mayor energía a los horizontes más profundos.
- La sección final mostrada como Línea 42, fue registrada con DBX y en general muestra mayor continuidad en los horizontes sísmicos que con las cargas anteriores, tanto para horizontes someros como para horizontes profundos. Los niveles más profundos que se observaban en la línea adquirida con el Booster I-1000 se ven con mayor claridad. En la parte ruidosa en el centro de la línea la imagen obtenida por dBX es aun mejor que la de CTF.

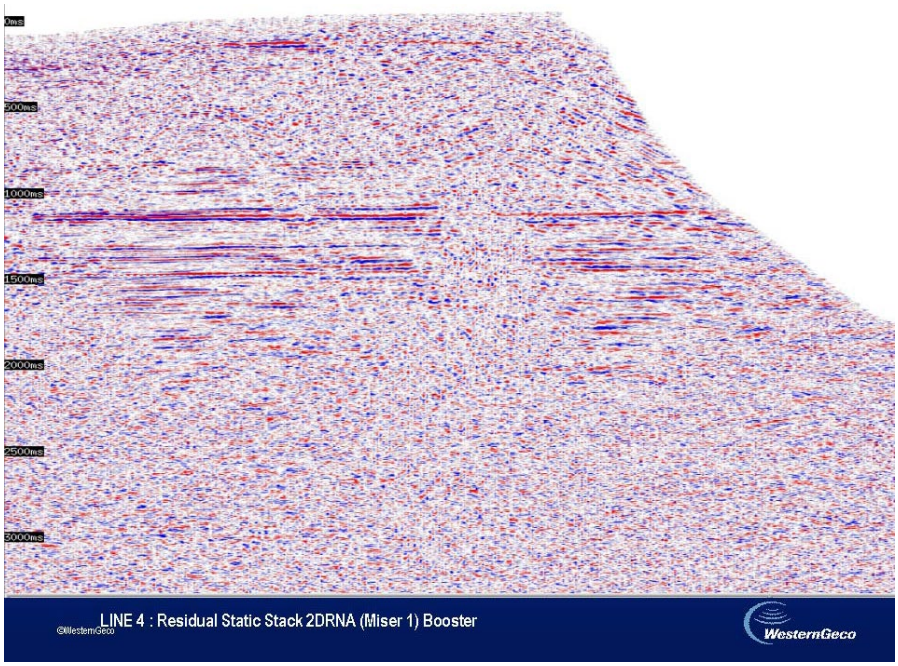


Figura 27, Sección Sísmica utilizando explosivo convencional (Booster I-1000) [7]

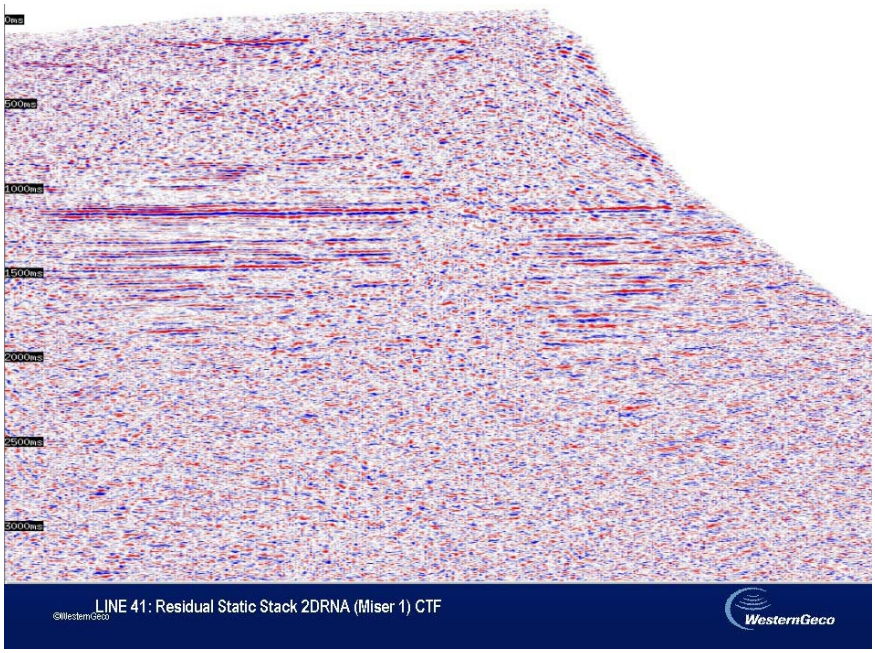


Figura 28, Sección Sísmica utilizando Cut to Fit como fuente de energía [7]

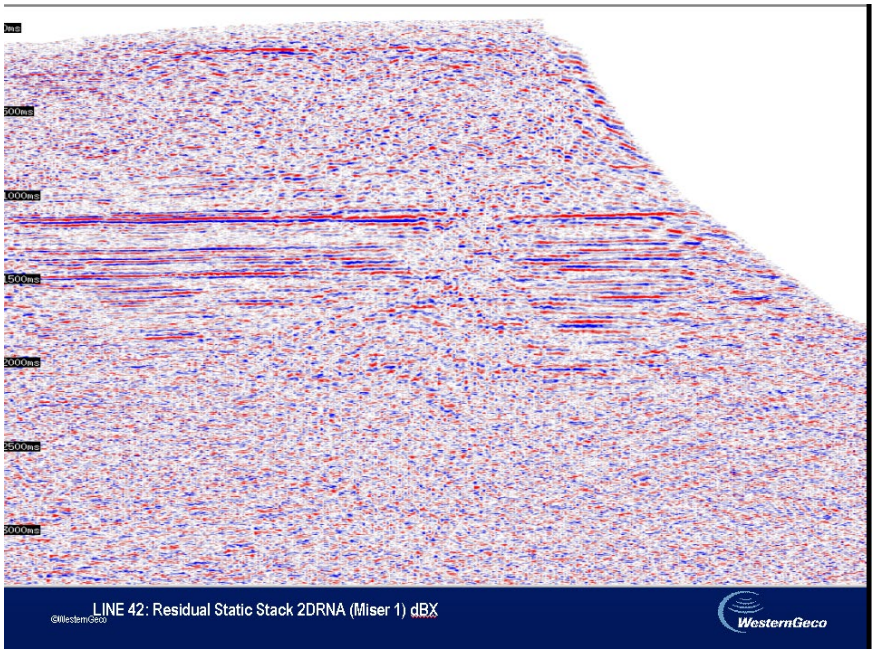


Figura 29, Sección Sísmica utilizando dBX como fuente de energía [7]

Conclusiones

- La energía sísmica aportada por el CTF, es comparable con la proporcionada por la Pentolita convencional, de tal manera que esta última podría ser suplantada por el CTF sin mayores riesgos energéticos y con un muy importante aporte a la seguridad industrial. Los riesgos de no obtener el tiempo de corrección adecuado vs. Seguridad en el manejo de explosivos, deben ser previamente evaluados en c/u de los proyectos.

- El dBX ha demostrado un incremento en la energía sísmica recibida, manteniendo al menos el mismo ancho de banda que los otros sistemas con un incremento en la relación señal/ruido de dicha energía. WesternGeco insistirá con Dyno Nobel para que desarrolle el Sistema CTF, utilizando DBX en lugar de Pentolita.

- Dyno Nobel ha adquirido una experiencia muy valiosa para la evaluación y desarrollo de sus productos con estas pruebas, y ha entendido que deberá elaborar el sistema CTF a fin de mitigar la interferencia causada por la explosión: detonador-cordón detonante en la lectura de los "tiempos de pozo", que no hemos podido superar alejando el geófono de pozo a la boca del pozo.

V - EL BLASTER

La Fuente de Energía Eléctrica, que nos suministra la energía necesaria para iniciar el detonador, se denomina en inglés: "Blaster" (explosor).

El Blaster es un instrumento eléctrico/ electrónico que descarga la energía eléctrica, acumulada en un Capacitor interno, sobre el cable de alimentación del detonador.
El Blaster o "Decoder" pertenece al Sistema de Disparo por Radio del Instrumento de Adquisicion que opera sobre la unidad "Encoder" que es la unidad que controla y dispara al Blaster.

En las figuras que siguen se muestran las fotos de los Blasters mas utilizados en la Industria Sísmica.



Figura 30, Blasters mas populares: ShotPro, SGD-S, Boom Box

Fuente de Energía de Disparo

El Blaster es un instrumento eléctrico/ electrónico que descarga la energía eléctrica, acumulada en un Capacitor interno, sobre el cable de alimentación del detonador.

El Capacitor interno al Blaster, es un elemento eléctrico pasivo, es decir: "recibe una cierta cantidad de energía que ocupa en generar un Campo Eléctrico entre sus dos placas ó terminales. Este campo eléctrico preserva la energía entregada. Cuando el Capacitor es directamente conectado al cable de alimentación del detonador, el campo eléctrico entrega la energía acumulada, mediante el drenaje de sus cargas eléctricas sobre el filamento del detonador.

La Energía Eléctrica acumulada en el Capacitor "C" se calcula así:

Energía acumulada en C = ½ CV² [Joules = Watts/sec]

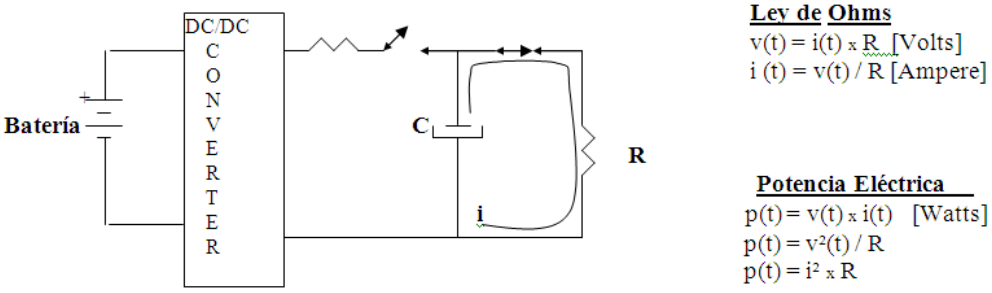


Figure 31, Circuito Eléctrico del Blaster durante la descarga de "C" [1]

"La energía eléctrica acumulada en un Capacitor, depende del tamaño de dicho Capacitor ("C" en Faradios) y del Cuadrado del Voltaje Eléctrico creado entre sus placas (V² en Voltios al cuadrado).

La energía del Blaster es entregada generalmente por una Batería de 12 Voltios la cual se asocia con un Convertidor de Continua a Continua (DC/DC Converter) para elevar el voltaje sobre el Capacitor (por ejemplo a: 400 Voltios)

Para conectar directamente las cargas eléctricas del Capacitor sobre el Filamento del Detonador, hace falta que una Llave interna al Blaster (comandada telemétricamente desde el sismógrafo), se cierre sobre los Cables de alimentación del detonador. La Cantidad de Carga Eléctrica por Segundo que circula por el circuito mencionado no es otra que la definición de "Corriente Eléctrica" ("i" medida en Amperios).
En la Figura 31, podemos ver como la Corriente Instantánea **"i"** circula sobre la Resistencia **"R"** la cual representa al Filamento del Detonador (despreciando la resistencia del cable de alimentación). Una resistencia eléctrica gasta la energía recibida en producir calor que a su vez entrega al medio que la rodea.

La Corriente Instantánea "i" que circula por el filamento del detonador, no posee un valor constante, sino que la misma varía en el tiempo durante la descarga del capacitor produciendo un voltaje sobre el filamento (i*R= voltaje instantáneo sobre C), que se calcula así:

$$v\,(t) = V * e^{-t/RC}$$

Supongamos que todavía la llave de descarga en el Blaster no se ha cerrado (o lo está haciendo en este preciso instante), entonces "t = 0 segundos" y la Formula nos proporciona el "Valor Inicial" del Voltaje sobre "C";

"$V = v\,(t_o) = v\,(0)$" (V= 400 Voltios in Pelton ShotPro)

Supongamos que la Llave se ha cerrado y ya ha transcurrido un tiempo muy largo, ejemplo: un tiempo matemático "infinito" "t = infinito". Reemplazando en el valor de "t" por un valor muy grande vemos que el resultado se aproxima a cero.

"V = v (t infinito) = v (infinito) = 0"

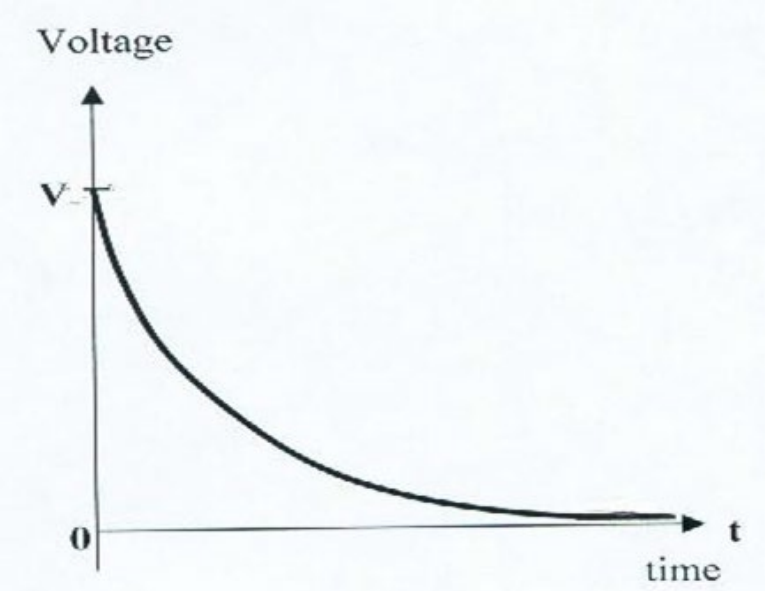


Figura 32, Curva de descarga del Capacitor del Blaster [1]

El voltaje sobre "C" será de "0 Voltios" cuando el capacitor haya entregado todas las cargas eléctricas.
Considerando otros valores para el tiempo "t", construimos la "Curva de descarga del Capacitor).

Energía Eléctrica desarrollada durante la Descarga

La Carga Pirotécnica se iniciará por el calor generado en el filamento "R" del Detonador. La Energía Calórica se asocia con la Energía Eléctrica desarrollada sobre el filamento "R":

Energía Eléctrica: [Julios] = Potencia [Watts] * Tiempo [segundos]

La "Potencia Instantánea" "p(t)": [W] = p (t) = v^2 (t) / R
Reemplazando el valor de v(t) por su equivalente:

$$p(t) = \frac{V^2}{R} * e^{-2t/RC}$$

La Fórmula de la potencia electrica intantanea desarrollada en la descarga del capacitor del Blaster, es también una función exponencial del tiempo.

La Potencia para "t = 0" es: $p(0) = V^2/R$

La Energía para "t = 0" es "cero" porque: $E(0) = V^2/R * 0 = 0$

La potencia instantánea esta graficada en la figura 34 que es muy parecida a la figura 33. En esta misma figura podemos apreciar gráficamente la "Energía Eléctrica" entregada a "R" como: "**el área encerrada por la curva de potencia dentro de un determinado tiempo"** (en este caso entre "t = 0" y "t = T).

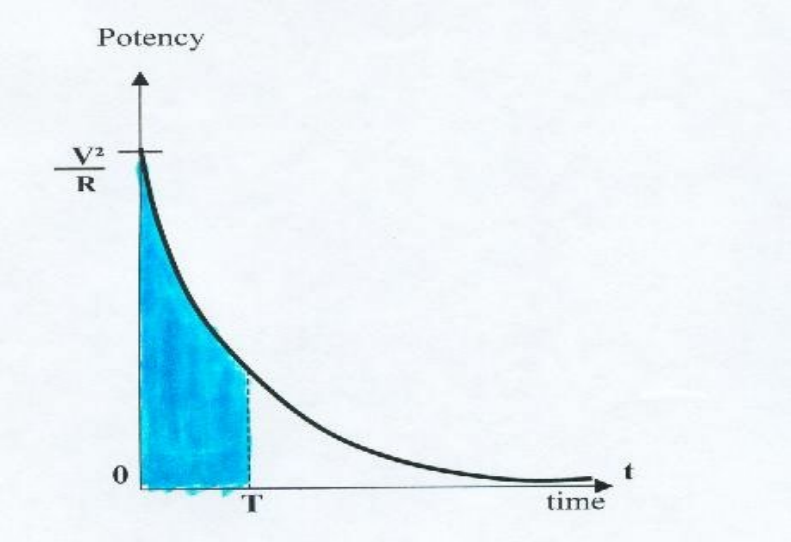


Figure 33: Potencia vs. Tiempo. Energía obtenida por integración gráfica [1]

Matemáticamente puede obtenerse el valor de la Energía para dicho periodo de tiempo integrando la Fórmula entre "t=0" y "t=T" (que no es otra cosa que el valor de la superficie sombreada en "azul" de la figura 34).

$$\text{Energía Eléctrica:} \quad E = \int_{t=0}^{t=T} p(t)\, d(t)$$

Ejemplo 1:

¿Cual es la máxima energía disponible en un Blaster: Pelton ShotPro?

La Energía Eléctrica que el Capacitor "C" puede acumular es: $E = \frac{1}{2} CV^2$, siendo

C = 112 micro Faradios

V= 400 Voltios

$$E = \frac{1}{2} [112 * 10^{-6} * 400^2] = 8{,}96 \text{ Julios}$$

Respuesta1: La energía máxima que dispone el Blaster Pelton ShotPro es de aproximadamente 9 Julios si este es preseteado a un Voltaje de 400 Voltios.

Ejemplo 2:

¿Que cantidad de energía es necesaria para iniciar el detonador cuyas caracterisitcas son las siguientes?

Material del Filamento: NiCr 80/20
Masa del Filamento: 0.033 miligramos
Calor Especifico del Material del Filamento: 0.22 calorías /gramo x temperatura (ºC)
Carga Pirotécnica: 25 miligramos de Trinitroresorcinato de Plomo
Temperatura de iniciación de la carga pirotécnica: 260ºC; T ambiente = 25ºC

Calor Aplicado = Masa Filamento * Calor Específico * Incremento de Temperatura

$$= 0{,}000033\ g \times 0.22 \frac{cal}{g \times ºC} \times (260 - 25)\ ºC = 0.0017\ cal$$

1 cal = 4.184 Julios, entonces: 0.0017 cal = 0.0071 Joules = 7.1 mJ

Respuesta2: Para iniciar el Detonador Insensible ejemplo, es necesario aproximadamente una Energía de "7.1 mJ". El valor obtenido coincide con las especificaciones del fabricante.

El Sistema de Disparo por Radio SGD-S

Sercel ha adoptado como sistema de disparo por radio oficial, el SGD-S, de la compañía rusa Sib Geophys Pribor. Este mismo sistema lo veremos trabajando más luego con las fuentes de energía electromagnéticas. Por lo tanto consideramos que es el sistema que debe ser desarrollado en este manual.
El sistema esta compuesto por:

- Encoder o "Controller SGD-SP".
- Decoder o "Synchronizer SGD–SB"



Figura 34,Encoder y Decoder del sistema SGD utilizado por la Compañía Sercel [13]

El "Controller" se encuentra conectado a la Central Electrónica de Adquisicion (Sercel 428, por ejemplo), a su vez se conecta a una radio (ejemplo: VHF Motorola GM-360). La misión del Encoder es sincronizar el disparo de la carga explosiva con el comienzo de la adquisición del dato sísmico.

La secuencia de disparo comienza cuando el Sercel 428 envía al "Controller" la señal "FO" (Firing Order: orden de disparo) y entonces:

- La radio del "Controller" conmuta de recepción a transmisión y comienza a enviar una señal para que la Decoder o "Synchronizer" sincronice su reloj y pueda leer los datos contenidos en el "FIRE command" (ver Controller Transmit en la figura 36).
- Al finalizar el "Fire Command" el "Synchronizer" conmuta su radio de recepción a transmisión, cuenta el denominado "Fire Delay" y 200ms antes que este tiempo finalice, comienza a transmitir el "Decoded Time Break" (DB).
- Al finalizar el "Fire Delay" el "Synchronizer" dispara la carga explosiva y genera el "Confirmation Time Break" (CTB), cuando la corriente en el blaster a caído a menos de 3 Amperios, significando que la carga ha detonado.
- Mientras el "Synchronizer" estuvo contando el "Fire Delay", el "Controller" estuvo contando el mismo tiempo (generalmente 500 ms), denominado "Start Delay + Radio Delay*" y genera la señal "TB" (Time Break) que a su vez genera en el Sercel 408 el SOD (Start of Data) para comenzar a grabar datos sísmicos (ver Time Break en figura 36).
- El "Controller" mide la diferencia de tiempo entre el DB (Decode Time Break), recibido del "Synchronizer" y el TB (Time Break) y muestra el "Reference Delay * 2", que es el tiempo de ida y vuelta de la señal entre el "Controller" y el "Synchronizer" que incluye la modulación y demodulación de las radios. Con este tiempo se setea el "Radio Delay" que retrasará el comienzo del "TB" para que se produzca al mismo tiempo que la detonación de la carga con un error menor a ±100 μs. Esta última operación se denomina: " 0 Time Adjust".

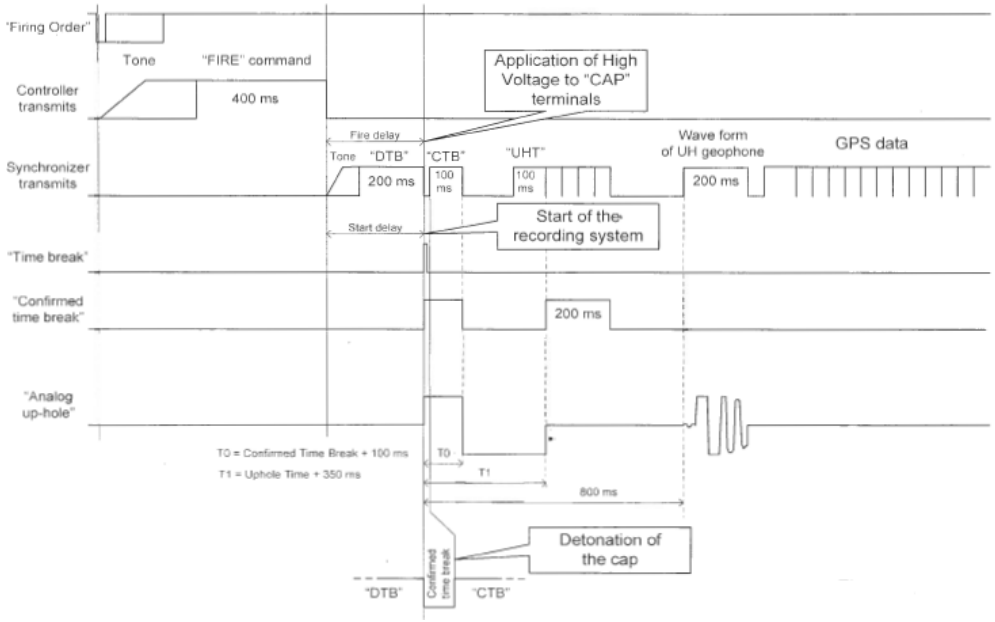


Figura 35, secuencia de tiempo en un disparo del SGD [11]

NOTA: Por lo general se trabaja con más de un "Synchronizer", por lo tanto el control del "0 Time Adjust" resulta importante porque se involucran diferentes radios y unidades SGD-SB. Tanto en Test, donde se simula una explosión sin descarga del blaster como en operación, se genera un tiempo de pozo (Uphole, teórico programable en Test), el display del "Controller" mostrará en cada disparo cual es la diferencia del tiempo del DB con el TB y el UH.

Cada uno de los disparos es grabado en el Sercel 428, ya que vía una conexión RSR- la información de los tiempos del "uphole" y del Radio Delay son enviados por el Encoder al Sercel 428 y estos son mostrados en el Reporte del Observador.



Figura 36, mochila conteniendo al "Synchronizer", Radio, antena y Batería de alimentación [13]

Conexionado del Controller SGD-S con el Sercel 428

La figura 37 muestra el conexionado entre la unidad Encoder (o "Controller" según el fabricante) y el Sercel 408.

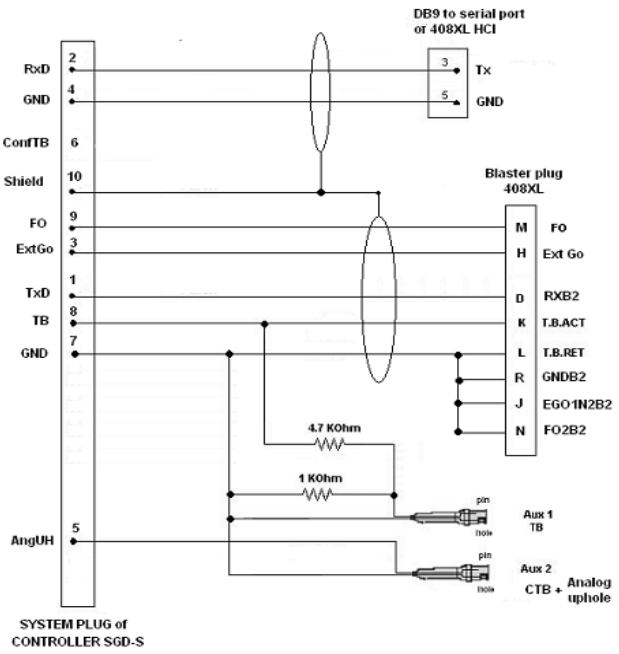


Figura 37, conexionado del Controller con el Sercel 428 [13]

Interpretación de las señales

- La señal de "Time Break", que determina el comienzo de la adquisición del dato sísmico, se aplica al conector de "Blaster" del CM408XL (pin K: TB active; pin L: TB return). Este mismo "Time Break" se aplica, mediante un atenuador resistivo a la entrada de la FDU que corresponde al Canal Auxiliar #1.

- El Canal Auxiliar #2 corresponde a una señal combinada en el Encoder: "Confirmation Time Break & Uphole".

Si observamos en un monitor los tiempos allí indicados veremos que corresponden al siguiente orden:

- T0 = "Confirmation TB" + 100 ms. Midiendo el tiempo real en cámara, por ejemplo: T0 = 104 ms, de aquí deducimos que el CF se produjo a: 104 – 100 = 4 ms. Realmente los tiempos del CB son iguales o menores a 5 ms, lo que demuestra que la precisión de medida en papel es muy mala e innecesaria, ya que el CB solamente nos indica que la carga ha detonado.

T1 = "Uphole" + 350 ms. Restando al valor de T1 a 350 ms, obtenemos el valor del UH (365 – 350 = 15 ms).

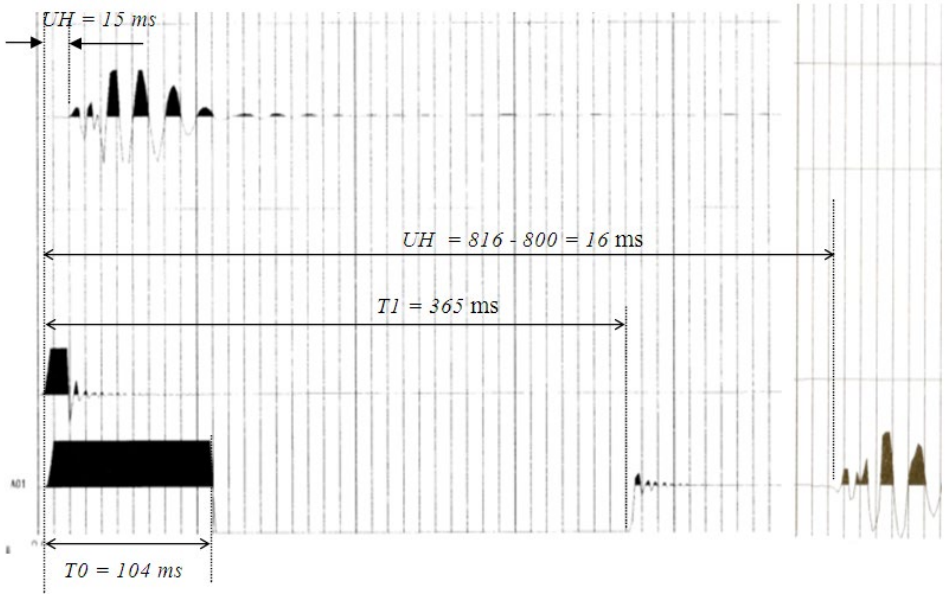


Figura 38: Diagrama de tiempos correspondiente al Canal Auxiliar #2, visto en monitor [11]

Finalmente también existe la posibilidad de determinar el UH analógicamente, luego de 800 ms, se puede contar el UH como solíamos hacerlo hace muchos años.

VI - GOLPEADORES (Weight Drops: thumpers, hammers, AWDs,)

Los martillos o golpeadores fueron introducidos en la actividad como fuente de energía sísmica recién en 1953.

La fuerza generada por unidad con esta fuente de energia y transmitida al terreno, es mucho menor que la generada con explosivos, por lo tanto se debe recurrir a la suma de eventos para lograr una energía equivalente, pero el costo operativo es también mucho menor que utilizando explosivos o vibradores, corriendo menos riesgos ambientales y culturales.

Para aumentar la potencia generada por cada unidad golpeadora, se desarrollaron varios tipos de aceleradores de la caida del peso que se denominan AWD (Accelerated Weight Drop Energy Source). Sin embargo la necesidad de sumar eventos persiste ya que la suma de unidades se ve afectada por la imposibilidad de sincronizarlas dentro de tiempos adecuados con el deterioro del ancho de banda de la energia transmitida.

Digipulse

El mas popular AWD fue el Digipulse, cuya energia de impacto es de 70 a 100 KJulios, aproximadamente 100 KNewtons de fuerza de impacto en tierra por unidad. El impacto es producido por una Masa de 535 Kg (1180 lb) que impacta sobre una base metálica sobre el suelo. La Masa o Martillo es

elevado hidraulicamente hasta la "posición de carga", cerrando un cilindro que es cargado con gas Nitrógeno a aproximadamente 8000 psi y que proporcionará una fuerza adicional a la Masa cuando esta es soltada para impactar a gran velocidad contra la plancha metálica en el suelo (baseplate). El impacto es sensado por un acelerómetro solidario a la plancha y que se transmitirá al equipo de adquisición para iniciar la grabación de datos (T/0).



Figura 39, Digipulse AWD III [8]

Digipulse AWD III Model 1180 GC/TR General Specifications

Item	Specification
Energy Source Type	Digipulse AWD III Series Model 1180 Accelerated Weight Drop – Truck mounted P-wave surface impact seismic source. Uses ground coupled impact base plate.
Mass Acceleration	Single piston nitrogen gas charged cylinder *Maximum Pressure: 15,000 psi Minimum Pressure: 2,000 psi*
Mass Weight	1180 lbs (535 Kg) *Optional 3,000 lb (1360 Kg) mass available with IVI Minibuggy*
Mass/Base Plate Control	Dual hydraulic piston (1000/2000 psi operating pressure)
Hydraulic Motor Type	Hatz 20 HP "Silent Pack" Diesel Motor *Installed on Ford F450 and F750 only*
Standard Vehicle Platforms	Ford F450/550 HD Diesel Powered V8/4x4 Ford F750 HD Diesel Powered V8 IVI Minibuggy All Terrain Articulated Vehicle
Digipulse Source Weight	6,200 lbs (2807 Kg) *Mercedes Unimog: 10,200 lbs (5,987) Ford F450 Weight: 7,200 lbs (3,260 Kg) Ford F750 Weight: 8,900 lbs (4,030 Kg) IVI Minibuggy Weight: 9,600 lbs (4,347 Kg)*
Stacking Cycle Rate	Minimum 8 seconds
Impact Force	40,000 – 60,000 ft/lbs (20,000 g-force)
Operator Controls	Master Control Unit Interface with Remote "Hand Held" Controller *Hand held controller operates hydraulic system for mass lift and movement of tower/base plate assembly*
Source Fire Control	Pelton Encoder/Decoder Remote "Source" Controller System with optional PC Based Command Controller I/F. *The Pelton controller system offers dual mode operation for fire command from the Digipulse, or from the seismic recording station (doghouse). Supply Voltage : 9-36 Volts DC Internal Time Break Accuracy : 40 microseconds +/- Sensing Threshold : 1.2 Volts Input/Outputs : Opto-isolated*
"Zero" Time Trigger Sensor	Base Plate mounted accelerometer *The trigger pulse is detected with mass impact on the base plate, and transmitted to the recording system via the Pelton UHF radio link. Time break pulse accuracy is 8.85*

Figura 40, Especificaciones del Digipulse AWD III [8]

Golpeadores Electromagnéticos

Las Fuentes Electromagnéticas son los golpeadores mas recientemente desarrollados y se los utilizó por primera vez en Siberia, Rusia, en 2002 como fuente de energía en VSPs, generalizándose luego su aplicación en Sísmica 2D y 3D para horizontes someros. Estas fuentes se diferencian de las demás AWD, en que las unidades pueden ser iniciadas con una sincronización de tiempo de ± 20 microsegundos (ídem vibradores),

permitiendo la suma de energías de varias unidades golpeando simultáneamente, sin detrimento de pérdida de ancho de banda. Dentro de estas unidades se encuentran: el GeoTon (original ruso) y el OnSeis (Geokinetics).
La fuerza del impacto sobre el terreno de c/u de las unidades OnSeis es de 220 KNewtons (48000 lb), similar a la amplitud pico de un vibrador de 60,000 lb trabajando al 80% de este valor.



Figure 41, OnSeis: AWD electromagnetically [12]

El Geoton y el OnSeis

Existen distintos fabricantes que están produciendo este tipo de fuentes electromagnéticas: GeoTon de **"**OOO Soldigen-Technologies", Yenisey de **"**Geotechnocenter Yeniseigeofizika OJSC" y en el continente americano "Geokinetics" ha desarrollado el OnSeis (Onshore Synchronized Electrical Impulsive Source), bajo un acuerdo con la Empresa Rusa: **"**Geotechnocenter Branch Yeniseigeofizika OJSC", quien le provee del Sistema Actuador (modelo Yenisey Kem-1).
Todas estas fuentes de energía utilizan el mismo sistema de disparo (Shooting System): SGD-SP, de la también Rusa: "*Sib Geofiz Pribor Ltd*".
La característica que diferencia esta fuente de las demás fuentes de energía sísmica, es que esta utiliza fuerzas electromagnéticas, para producir un golpe, de corta duración, sobre la 2superficie de la tierra. Por lo tanto es una fuente de energía impulsiva que pertenece a la categoría de los "golpeadores" (thumpers) y mas genéricamente, aunque algunos desean apartarlo de tal categoría, a los "AWD" (Accelerate Weight Drop).



Figura 42: El GeoTon trabajando en Siberia, Rusia [9]

Una gran ventaja posee esta fuente con respecto a las de igual tipo (AWD), y radica en que las fuentes electromagnéticas pueden sincronizarse con mucha precisión (± 20 μ, similar a la de los vibradores). Por lo tanto pueden utilizarse en arreglos de fuentes de energía, lo que permite incrementar la relación señal/ruido por aumento del número de unidades, ahorrando en cantidad de golpes sumados (stacks).
Entonces la energía total a generar puede ser calculada en función de las unidades empleadas y de la cantidad de sumas realizadas.

$$\text{Energía total} \sim E0.\ Nf\ .\sqrt{Ns}$$

E0: Energía fuente individual
Nf: Número de fuentes de energía
Ns: Número de sumas

La cantidad de fuentes de un arreglo contribuye proporcionalmente a la energía total emitida, en cambio la cantidad de golpes sumados (barridos en caso de vibradores), contribuye proporcionalmente a la raíz cuadrada de su número.

Además, por ser impulsivas, estas fuentes electromagnéticas reducen el tiempo de adquisición de cada disparo al "listen time", ahorrando un tiempo considerable con respecto a la adquisición con vibradores.

Tiempo de Adquisición Fuentes Impulsivas: "Listen Time"
Tiempo de Adquisición Vibradores: "Listen Time + Sweep Length"

En el caso de los Geotones, el arreglo de fuentes de energía, se consigue combinando sus componentes mediante rígidas estructuras metálicas y seguras conexiones eléctricas de alimentación y control, que igualmente permiten su fácil manipulación en el campo, tanto para cambiar el arreglo como para ser desplazadas por las picadas sísmicas. Las picadas, o líneas

sísmicas, deben ser adecuadas para permitir deslizar los trineos (skid) con que se desplazan los Geotones, por la superficie nevada- helada de la estepa Rusa de Siberia (Figura 41).

El Onseis de Geokinetics utiliza la unidad de mayor energía disponible (modelo Yenisel-Kem 1) y llega a montar dos actuadores en un mismo "Carrier". El sistema hidráulico que permite subir y bajar al piso los actuadores, resulta muy práctico y rápido para desplazarse de estación en estación. Todo el sistema eléctrico fue construido por Geokinetics bajo diseño general de la Compañía Rusa y simplificado para disminuir componentes eléctricos. Por ejemplo: el voltaje de carga del banco de capacitores es fijo y de 850V.
La Capacidad total del banco para una unidad por Carrier es de 4600 μF y de 5200 μF cuando posee 2 Actuadores por Carrier.



Figura 43, OnSeis Dual de Geokinetics [12]

Principio de funcionamiento de la Fuente electromagnética

Un esquema básico del sistema actuador del Geoton se muestra en la figura 44.

Cuando los condensadores del Geoton (no mostrados en la figura), descargan la energía eléctrica previamente acumulada sobre la bobina del inductor del electroimán (7), se produce un pulso de corriente eléctrica que circula por la bobina del inductor, generando un Flujo Magnético (Ø) que a su vez genera una Fuerza mecánica (8). Esta fuerza hace mover al Inductor (y al peso de lastre) hacia arriba y a la Armadura (4) del electroimán hacia abajo. La armadura solidaria a la Placa Metálica (1) aplica este pulso de fuerza sobre la superficie del terreno. El golpe es detectado por un acelerómetro (10) el cual permite medir la fuerza y el tiempo de reacción de la fuente.

La fuerza del golpe puede ajustarse variando la distancia (6) entre Inductor y Armadura (3 – 8 mm) y también mediante el voltaje de carga de los capacitores eléctricos. Si el valor de Capacidad es de 1000 μF, el voltaje a que es cargado en tal capacidad puede llegar a 1000 Voltios y si la distancia de separación (6) es de 5 mm, el valor del golpe (pulso de fuerza) puede ser de 30 * 104 Newton (300 KN).
Por medio de amortiguadores se ayuda al Inductor-Peso a regresar hacia su posición inicial de descanso sobre la placa (1) sin provocar un excesivo ruido sísmico.

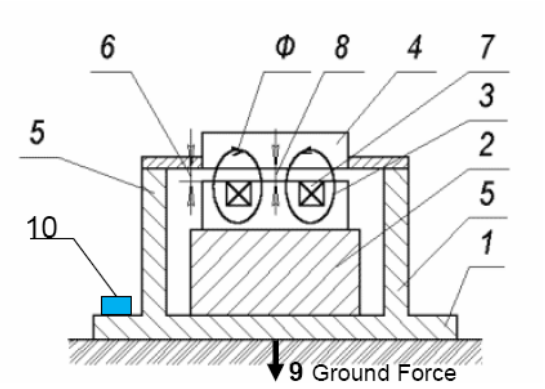


Figura 44, diagrama básico del actuador de la fuente electromagnética [10]

Componentes y Secuencias del Geoton

El modelo que se describe a continuación, corresponde al del "Geoton, Operating Manual, OOO SOLDIGEN Technologies -2004", cuatro de estas unidades son mostradas en la figura 41.
Conocida la teoría de operación de la fuente de energía (Actuador del GeoTon y OnSeis), describimos la función de sus demás componentes durante una secuencia de disparo de una sola unidad.
En la figura 45, se muestra al Actuador del GeoTon (skid –oscillator) y sobre él la caja que contiene a la Unidad de Control de Energía (Electric board). En otros modelos, las componentes eléctricas se encuentran en un modulo separado del actuador (CD & MR units).

El GeoTon consta de un sistema Actuador y de la "Electrical Board". El actuador posee una fuerte estructura metálica que le permite deslizarse sobre el hielo como un esquí (skid). Ambos módulos son arrastrados por un vehículo (Tractor: "Carrier"), el cual también acarrea el resto de los componentes del sistema.

El operador del GeoTon, desde el Panel de Control del vehículo (3), inicia la carga eléctrica de los capacitores, conectando la salida del Grupo Electrógeno (7), mediante el Cable de Alimentación de Energía Eléctrica (1), a la Fuente Eléctrica. El Cable Telemétrico (2) transmite la orden para el cierre de la llave que permite la carga de los capacitores a un valor aproximado a 1000 Voltios. Cuando los capacitores se encuentran cargados, el Operador del GeoTon informa al Observador del Sismógrafo vía radio (6), que se encuentra listo para recibir la Orden de Disparo.

El Observador mediante la unidad Controlador SGD-SP (5), envía la orden de disparo vía Radio (6), esta es recibida por la Radio (6) de la unidad Sincronizador SGD-SP (4) y a un tiempo determinado, el Panel de Control (3) envía la orden de disparo para que los condensadores se descarguen sobre las bobinas del actuador.

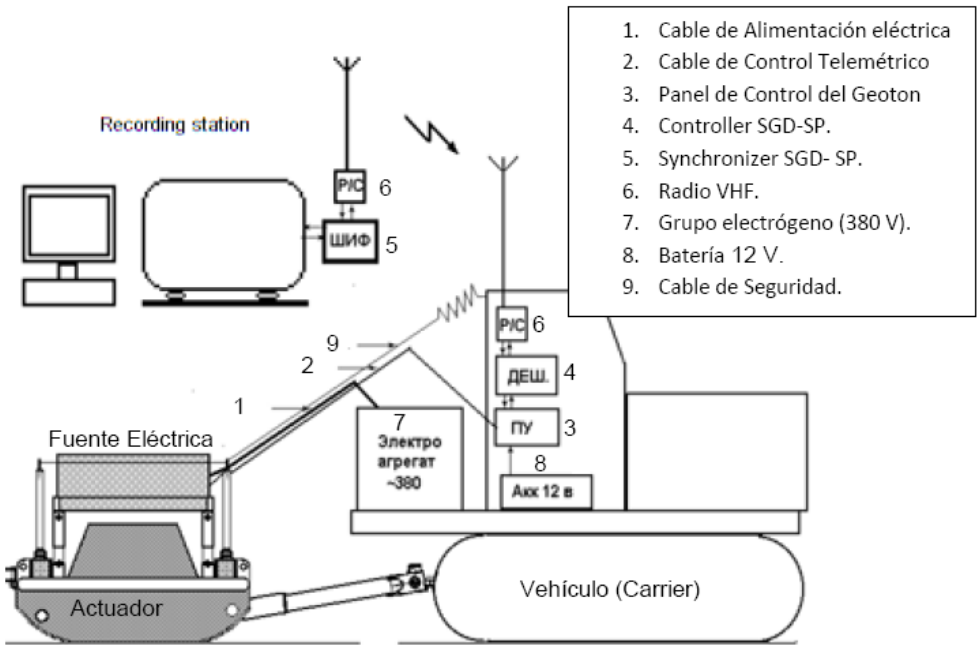


Figura 45, Sistema GeoTon y sus componentes [10]

El Actuador del GeoTon, cuyo funcionamiento ya ha sido explicado, se presenta nuevamente en la figura 46 en donde se completa la estructura real de una unidad.

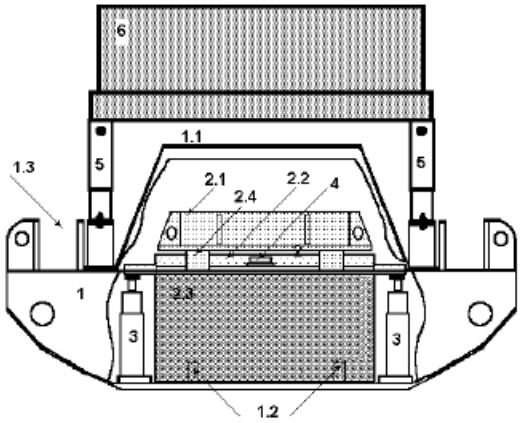


Figura 46: Sistema Actuador del GeoTon [10]

1. Actuador (Skid –Oscillator)
    1.1 Cubierta del Actuador (Skid-oscillator housing)
    1.2 Guías para el movimiento del Peso Lastre (Runners of the weights)
    1.3 Lugar de amarre del vehículo impulsor (Site for cross-beam)
2. Electroimán (Electromagnetic engine (EME)
    2.1 Armadura del electroimán (Engine armature)
    2.2 Inductor del electroimán (Inductor)
    2.3 Peso de Lastre (Weights)
    2.4 Soportes de la Armadura (Armature supports)
3. Amortiguadores para el retorno del Peso (Damping device)
4. Acelerómetro (Accelerometer)

5. Amortiguadores de la unidad Control de energía (Shock-absorber supports)
6. Unidad de Control de Energía (Electric board)

Fuente Eléctrica (Electrical Board)

La figura 47 muestra a la unidad que ocupa la parte superior al Actuador (Electric Board o Fuente Eléctrica de la figura 46).
Los capacitores a cargar son: C4 en paralelo con C5 de 2500 µFaradios c/u (hacen un total de 5000 µF), que podrán ser cargados hasta un voltaje máximo de 950 Voltios (de acuerdo a las especificaciones del GeoTon). En otros modelos, esta unidad se denomina CD (Charge –Discharge Unit).
La energía máxima acumulada en el banco de capacitores es de:

$$E = V^2 * C / 2 = (950)^2 * 5000 * 10^{-6} / 2 = 2250 \text{ Joules}$$

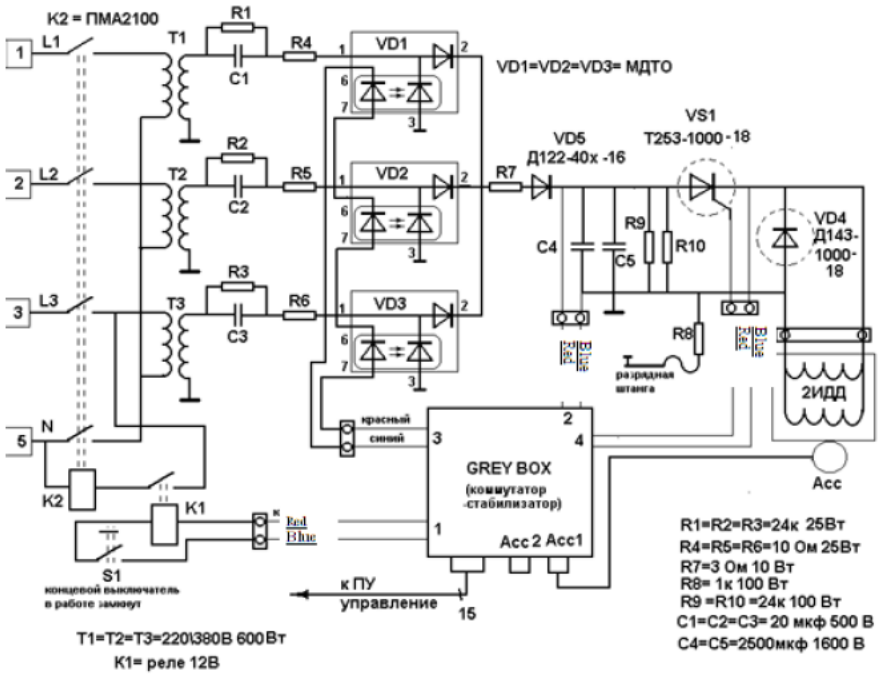


Figura 47: Unidad de Control de Energía (Electrical Board) [10]

El circuito aquí mostrado, es comandado por el Panel de Control (ubicado en la cabina del vehículo impulsor), perteneciente al Sistema de Disparo SGD-SP (unidad Synchronizer). El Panel se comunica con la "Electrical Board" por intermedio del Cable Telemétrico, donde la unidad "Grey Box" interpreta y controla a las componentes eléctricas. En otros modelos la "Grey Box" se denomina MR (Multiplexer Regulator).

A la izquierda de la figura 47, se encuentran las entradas trifásicas (220 Voltios, 50 Hz) provenientes del Grupo electrógeno (inputs: 1, 2, 3 y 5), que se aplican sobre los transformadores de entrada T1 – T3 cuando se cierren las Llaves L1 –L3; estas llaves son comandadas por los Relé K1 y K2 (salida 1

del Grey Box, alimenta con 12 V a K1 cuando en el Panel de Control se oprime el botón "Charge").
Los transformadores elevan en su secundario el voltaje de entrada a 380 V (el OnSeis, alimenta directamente con fases de 380 Volts y no necesita los Transformadores).
Cada transformador posee en su secundario, circuitos rectificadores-duplicadores de voltaje, que permitirán cargar a C4 // C5 hasta un valor máximo de: $2 * 380 * \sqrt{2} \approx 1000$ Vcc. Este voltaje puede variarse externamente (por seteo en el SGD-SP), mediante los diodos opto-acoplados VD1 –VD3 comandados desde el Panel de Control (salida 3 del Grey Box).
El voltaje de carga es detectado por el Panel de Control (salida 2 del Grey Box).

Cuando el Sincronizador SGD-SP genera la orden de disparo (Fire Command), el Panel de Control dispara al Tiristor VS1 (salida 4 de Grey Box), descargando a C4//C5 sobre la bobina del electroimán del Actuador del GeoTon. Un Sensor de Corriente permite detectar este instante.

Cuando se produce el golpe del actuador sobre el terreno, un acelerómetro (4 en Figura 5), detecta el pulso de aceleración enviando esta respuesta al Panel de Control (salida Acc1 del Grey Box).
Las resistencias R9, R10 = 24 KΩ, están colocadas para la descarga de los condensadores de almacenamiento de energía (C4 y C5), cuando se necesite des-energizar al sistema. El tiempo de descarga, en este caso es de 5 minutos.
La llave S1, en el circuito del Rele K1, deshabilita la energía de alimentación cuando se abre la compuerta de acceso a esta unidad.
Una varilla que conecta a tierra a los capacitores C4 y C5 por intermedio de la resistencia R8 de 1 KΩ, se utiliza para seguridad personal (tocar la varilla para equilibrar potencial eléctrico), cuando por mantenimiento o reparación, el personal técnico accede al sistema eléctrico des-energizado..

Performance del GeoTon

El fabricante del GeoTon específica que: la fuerza mínima aplicada durante el pulso de impacto sobre la tierra (Fg; Ground Force), si el banco de capacitores se carga a 950 Voltios y la distancia Inductor – Armadura es de 5 mm), es de:

$$Fg = 30 \times 10^4 \text{ Newton} = 300 \text{ KNewton} = 67000 \text{ lbs}$$

La amplitud del pulso es similar a la amplitud de un barrido sinusoidal de un vibrador de 80,000 lb (trabajando al 83% de su fuerza máxima).

Para comprobar la performance de los Geotones, tendremos que ensayarlos en un área de terreno plano y homogéneo en su composición. El voltaje de carga deberá encontrarse entre 850-900 V e igual en todas las unidades.

El pulso es detectado por los acelerómetros y la curva obtenida permite apreciar la magnitud del golpe.

La Máxima amplitud de Aceleración varía entre 20 a 25 g, dependiendo del voltaje de carga y del valor del "gap" (clearance) entre inductor y armadura.
El ancho del pulso de la curva de aceleración es, aproximadamente el valor del "gap" {1ms = 1mm}.
La curva característica correspondiente a los parámetros mencionados, se muestra en la figura 47.

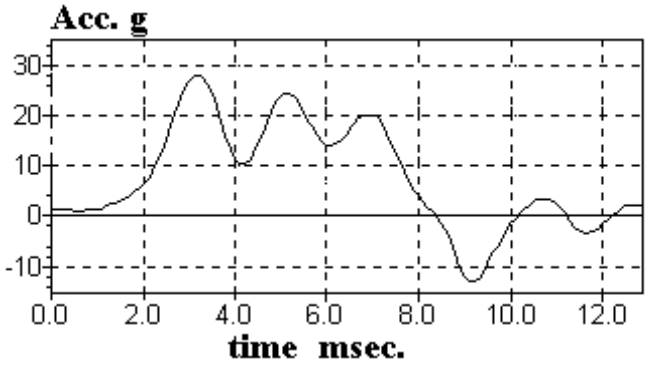


Figura 48: Respuesta de un impacto del GeoTon [10]

Se observa en la figura 48 que el Ancho del pulso es de: 7 ms – 2 ms = 5 ms (coincide con la distancia inductor-armadura)

$$1g = 9{,}8\ m/s^2$$
$$25g = 245\ m/s^2$$

La fuerza del impacto seria entonces:

$$F = m * a = 300\ KN = m * 245$$
$$m \sim 1000\ Kg$$

Si la energía eléctrica acumulada en los condensadores (2250 Julios) se pudiese convertir en energía potencial sin ninguna pérdida (rendimiento 100%), el valor del impacto del GeoTon sería equivalente a la caída de un peso de 1000 Kg desde una altura de 23 cm.

$$\text{Energía Potencial} = m * g * h = 1000\ Kg * 9{,}8\ m/s^2 * 0{,}23\ m = 2250\ \text{Julios}$$

Performance del OnSeis

La capacidad eléctrica del OnSeis es ligeramente menor que la del GeoTon (4600 μF) y el valor del voltaje de carga es fijo y de 850 V.

De acuerdo a las especificaciones del Yenisel Kem-1, la Fuerza Máxima del impacto es de 220 KNewtons. Se comprueba que la energía eléctrica acumulada en el banco de condensadores es directamente proporcional a la fuerza del impacto producido sobre el terreno:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{F_1}{F_2}$$

Energía Eléctrica GeoTon = 2250 Julios (E_1)
Fuerza del Impacto GeoTon = 300 KN (F_1)

Energía Eléctrica OnSeis = 850^2 * 4600 * 10^{-6} / 2 = 1660 Julios (E_2)

Fuerza del Impacto OnSeis = F_1 * E_2 / E_1

= 300 * 1660 / 2250 = 221 KN = 48,000 lb

La "ground force" generada por el OnSeis es similar a la amplitud pico de un vibrador de 60,000 lb trabajando al 80% de este valor.

Geokinetics ha realizado un test para comparar la performance del OnSeis contra vibradores, en las cercanías de Houston, Texas – USA en 2008, y conocer la cantidad de energía que es generada por su OnSeis.
El resultado fue que: que dos unidades duales OnSeis (total 4 unidades), produjeron el mismo nivel de energía que un vibrador de 60,000-lb con un barrido de 8 – 128 Hz de 80-s de duración.
La figura 48 muestra el espectro de potencia de la señal sísmica recibida por un geófono colocado a 330 metros de profundidad sobre la línea sísmica donde se realizó el ensayo mencionado.

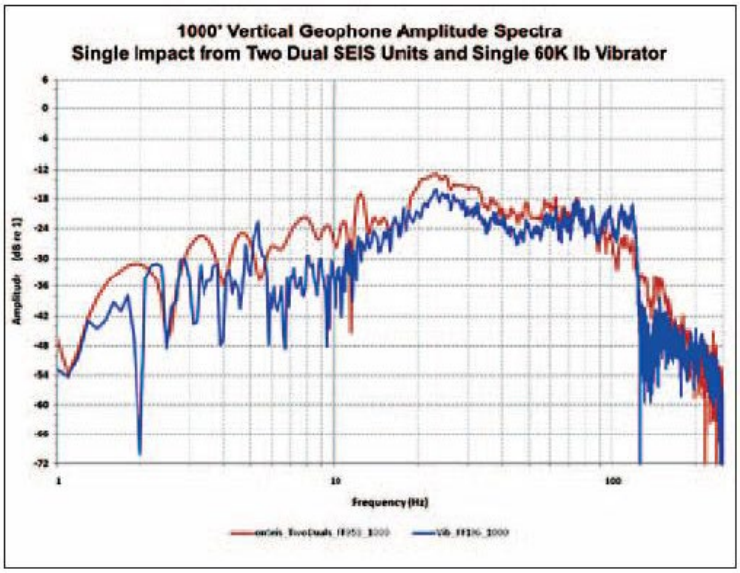


Figura 49, Espectro de Amplitud Absoluta de un geófono vertical ubicado a 1000 pies de profundidad para un simple impacto de dos Dual OnSeis units (red) y un simple Vibrador de 60,000 lb (blue) [12]

En rojo aparece el espectro de potencia del Dual OnSeis y en azul el del vibrador, ambos espectros muestran similares niveles de amplitudes, aunque puede apreciarse una mayor contribución de bajas frecuencias con el OnSeis, en donde el vibrador todavía puede vibrar y por supuesto más allá donde el vibrador no puede llegar a tan bajas frecuencias.
Si bien se trató de un objetivo muy somero, para ese nivel de imagen el ahorro de tiempo ha sido mayúsculo: 5 segundos contra 85 segundos de tiempo de adquisición.

Sistema de Disparo por Radio SGD –SP

"Controller" y "Synchronizer" SGD–SP (fabricadas por Sib Geofis Pribor), son utilizadas para sincronizar y controlar las Fuentes de Energía Sísmica Electromagnéticas GeoTon (también los OnSeis).

- SGD-SP Controller

  La unidad SGD-SP es instalada en la cabina del Sistema de Adquisición, la cual el fabricante identifica como: "Controller".



Figura 50, SGD-SP Encoder o "Controller" [11]

El Controller SGD-SP, se encuentra conectado con el Equipo de Adquisición (Recording System) del cual recibe la orden de disparo (FO: Fire Order), iniciando la adquisición de un punto de emisión (SP: Shot Point). A su vez el "Controller" envía al "Recording System" el "Time Break" para que comience la grabación de los datos sísmicos y demás datos auxiliares para la identificación del SP y para el control de calidad de dicho disparo.

- SGD-SP Synchronizer

  Estas unidades, denominadas "Synchronizers" por el fabricante, se instalan en cada una de las RCS (RCS: Remote Control System) para controlar a grupos de GeoTones.



Figura 51, SGD-SP Decoder o "Synchronizer" [11]

En la figura 51 se observa la unidad instalada en el Vehículo Impulsor (Carrier).
Existen modelos de "SGD-SP Synchronizers" con diferentes disposiciones en su tablero).

Descripción de las etapas de sincronización y control (ver diagrama de tiempos)

1. El Operador del Geoton/OnSeis (en la cabina del carrier), enciende la unidad "SGD-SP Synchronizer" y lee el display para verificar los voltajes de alimentación, la temperatura interna de los circuitos del MR, coordenadas del punto de emisión, etc.

2. El Operador del GeoTon/OnSeis presiona el botón "ENTER" en el SGD-SP Synchronizer con el cual se alimenta a los MRs que se encuentran conectados y la pantalla muestra a todas las fuentes que se encuentran conectadas, la presencia o ausencia de acelerómetros (A1, A2, A3 y A4) y sensores de corriente (C5 y C6).

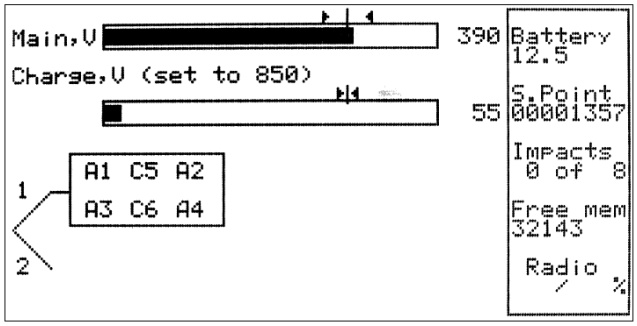


Figura 52: Monitor del Synchronizer SGD-SP indicando la configuración de las fuentes [11]

3. El Operador presiona el botón "Charge" y el banco de capacitores empieza a cargarse eléctricamente. Al mismo instante las luces de (color verde) de "Charge & Reset" se encienden. En la pantalla del "*Synchronizer"* el diagrama de configuración es reemplazado por el diagrama de respuesta de tiempos y la duración de los impulsos de aceleración y corriente detectada. Cuando el voltaje de los capacitores alcanza el valor preseteado en el SGD-SP, el indicador "RDY" aparecerá en la pantalla. Los capacitores se encuentran listos para descargarse sobre los inductores de los Geotones.

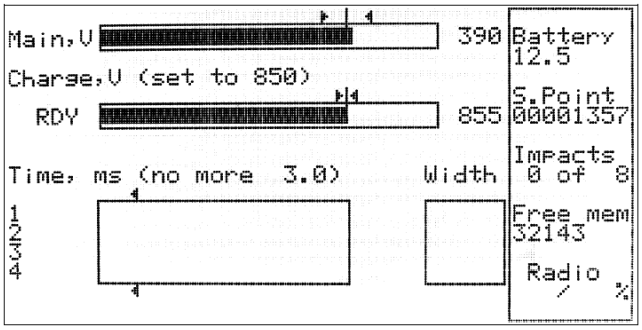


Figure 53: Pantalla del SGD-SP Synchronizer después de la carga de los capacitores [11]

4. El Operador presiona la tecla "READY" y el SGD-SP Synchronizer transmite vía radio el "ready tone" hacia el "Recording System".

5. El SGD-SP Controller recibe el "ready tone" y el Observador verifica en la pantalla que el RCS que envió el tono se corresponda con el que necesita ser disparado.

6. El Observador dispara al "Recording System" (Sercel 408, por ejemplo) y este último responde enviando al SGD-SP Controller la señal "FO" (Firing Order) y el Controller transmite vía radio un subtono (100 ms) y el "FO code" (400 ms). Cuando finaliza el envío de los tonos de códigos, el Controller comienza la cuenta: "Time Break Delay".

7. Cuando finaliza el "time break delay", el Controller envía el pulso "TB" (Time Break) al "Recording system" y este inicia la toma de datos (SOD: Start of Data).

8. Al mismo tiempo el SGD-SP Synchronizer recibe el "FO code" y decodifica el mensaje incluido que lo autoriza a su actuación y cuando el "FO" finaliza, inicia la cuenta del "Start Delay" (time break delay = start delay).

9. El SGD-SP Synchronizer conmuta su radio de recepción a transmisión y transmite 200 ms antes de la finalización del "start delay" la señal DB (Decode Time Break).

10. A la finalización del "start delay", todas los RCS activos son disparados sincrónicamente y sus platos impactan la superficie de la tierra.

11. Desde el momento del disparo y durante 20 ms, los acelerómetros y sensores de corriente son medidos a un "sample rate" de 100 μs.

12. El SGD-SP Synchronizer lee y analiza las respuestas de los acelerómetros y de los sensors de corriente para determinar los tiempos de actuación de las fuentes (actuation times), que son salvados en una memoria no volátil en el SGD-SP. El "actuation time" (diagrama de tiempo izquierdo), es determinado por el tiempo que transcurre desde la orden de impacto hasta que el acelerómetro (sensor de corriente), alcance el valor previamente establecido (preset Threshold: 10 g). La duración del impulse es determinado desde el "actuation time" hasta que el pulso decae al valor del "threshold" (diagrama derecho).

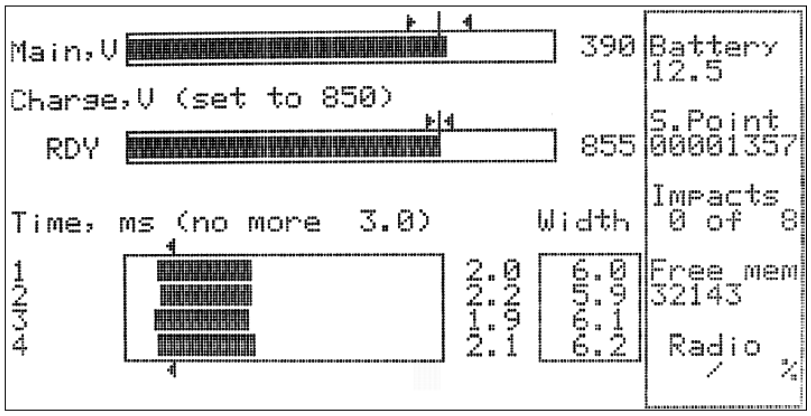


Figure 54: Pantalla del SGD-SP Synchronizer después del impacto [11]

13. El SGD-SP Synchronizer transmite por radio los "actuation times" al Controller en secuencia. Si hay dos RCS (dos SGD-SP Synchronizer), un RCS será el "master" y comenzará transmitiendo sus "actuation times" en la secuencia.

14. El SGD-SP Controller, recibe el "DTB" (Decoded Time Break) y el "CTB" (Confirm Time Break).

- DTB: es el intervalo de tiempo entre la generación del Time Break (TB) en el "Controller" y la orden del disparo para el impacto del GeoTon en el "Synchronizer" (ajustado para que no supere ± 50 µs mediante el parámetro "Radio Delay").
- CTB: es definido como el promedio de todos los tiempos de actuación de los Geotones (2.0 ms en la figura 54 y 55).

La figura 55 muestra la pantalla del "Controller" inmediatamente después de la respuesta de un "Synchronizer" (existe 1 solo RCS) con sus cuatro fuentes electromagnéticas.



Figura 55, Monitor del Controller luego de un disparo [11]

15. Después de in impacto, el "Charge-Discharge Unit" (CDU), comienza a cargar nuevamente al banco de capacitores, el operador puede ver en la pantalla del "Synchronizer": el número del próximo "shot" de la suma y el voltaje de los capacitores durante el tiempo de carga.

16. El "Controller" es demorado por el "recording system (shot delay)" para evitar que el "ground roll" provocado por el impacto anterior interfiera con la adquisición del próximo impacto.

17. El "Synchronizer" espera por el próximo "fire command" y el proceso continua hasta que la cantidad de sumas alcance el valor seteado en el parámetro: "Number of Stacking".

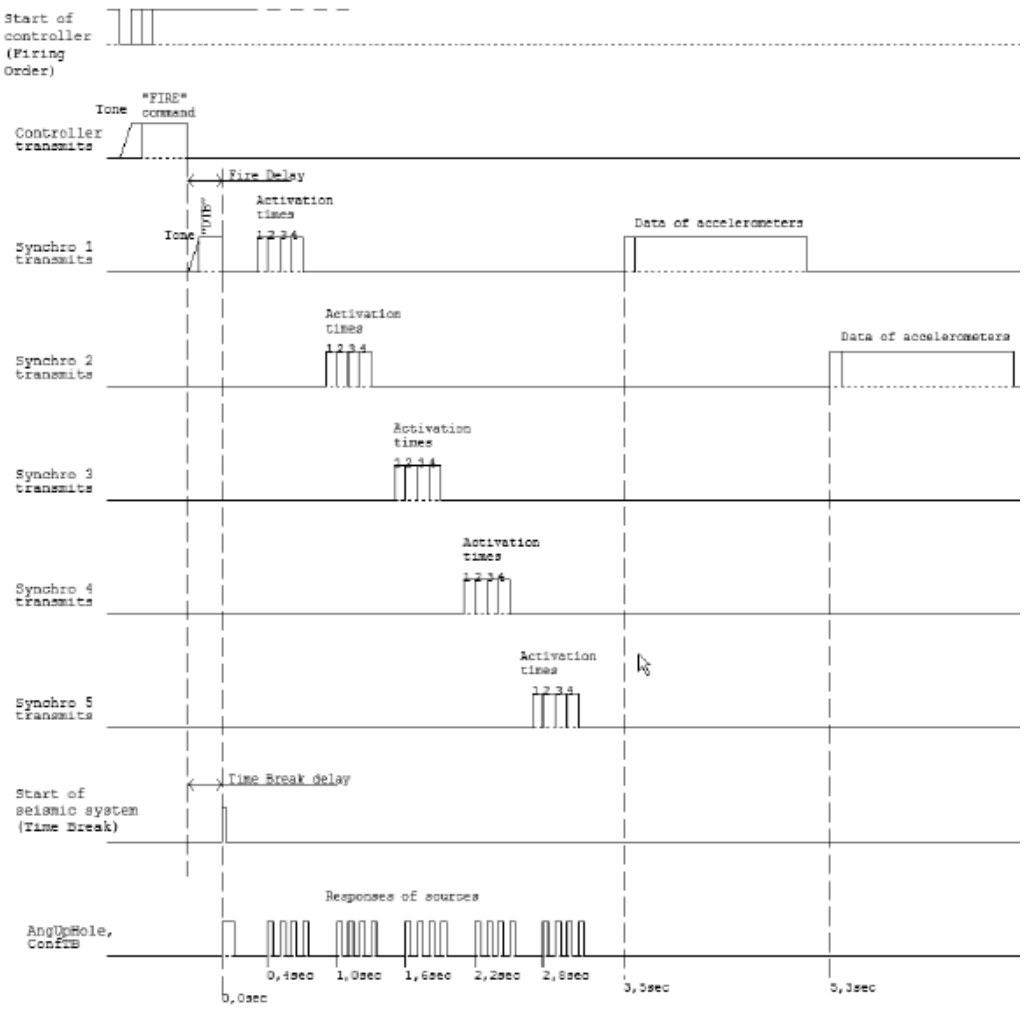


Figura 56, Diagrama de Tiempo de un disparo [11]

VII -EL CAÑON DE AIRE COMPRIMIDO

Introducción

Aunque la fuente de energía original en "sísmica offshore" fue el explosivo, razones ambientales y de rápidos y repetidos disparos con similares respuestas, llevaron a la utilización de nuevas fuentes de energía.
La mas común de las fuentes de energía utilizadas por la sísmica marina es el: Cañón de Aire (Air Gun) introducido en los 1960's. Sismica verticalTambién se lo solía utilizar en Sísmica Vertical (VSP y Check Shoots).

El sistema consiste en cargar una cámara con aire comprimido a una presión entre 2000 a 5000 psi para luego liberarlo bruscamente mediante una expanción violenta de aire (explosión), transmitida al agua circundante a los cañones. El cañón de aire mas moderno es el denominado "Sleeve Gun" (cañon de manguito), llamado así pues emplea una válvula en forma de manguito para liberar el aire al exterior del cañón (shuttle valve).

Llenado de las Cámaras del Cañon (Filling)

El aire a presión ingresa por la tubería **A** y se acumula en la cámara principal **D** y en la tubería de retorno **C** que opera como un resorte de presión de aire.

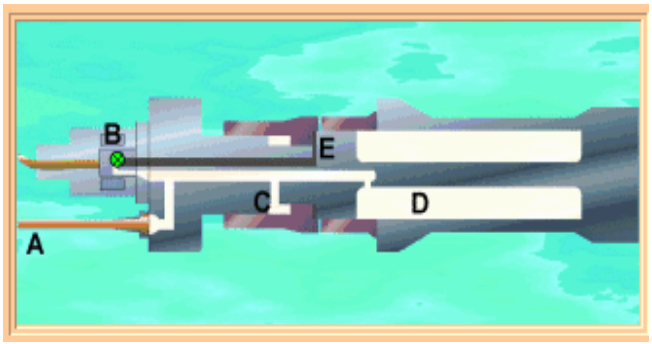


Figura 57 , esquema general de un Cañon de Aire comprimido

En el esquema real del cañon G Gun de Sercel, el aire comprimido ingresa por el **"**air coupling" y llena primero la cámara de retorno (return chamber), ubicada en el interior del émbolo de disparo (shuttle), empujando al casquillo del émbolo para cerrar y sellar la salida del aire hacia el exterior. Al mismo tiempo la cámara principal (firing chamber), ubicada entre el cuerpo exterior del cañón y el "shuttle", comienza a presurizarse.

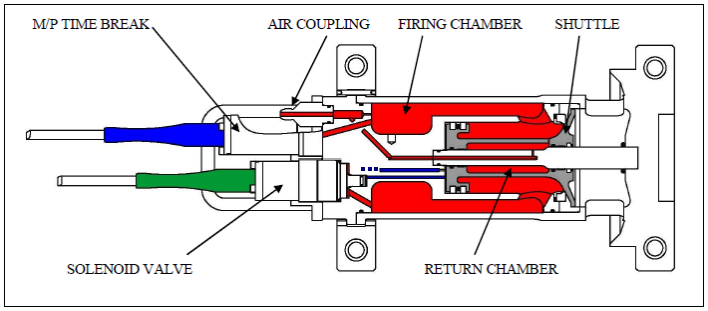


Figura 58, Cañon G de Sercel [15]

Disparo del Cañon (Triggering)

Cuando el solenoide **B** es activado, la presión de aire de la cámara **C** se transfiere a la cámara de disparo **E** produciendo una presión diferencial sobre los casquillos de salida que al moverse hacia la izquierda liberan con gran violencia el aire comprimido en **D**.

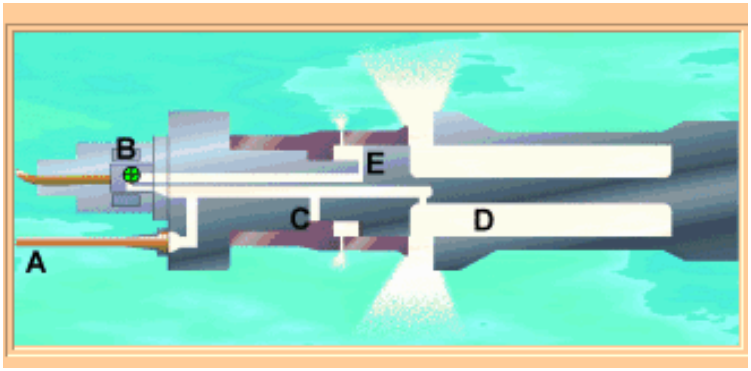


Figura 59, esquema general de un cañon disparado

Cuando en el G Gun, la "Solenoide Valve" es energizada (recibe un pulso eléctrico del Controlador de Cañones), permite presurizar la superficie inferior del émbolo (Triggering Chamber), moviendo a este y liberándolo del sello (unsealing) que mantenía aislada a gran parte de la superficie del "shuttle" de la "Firing Camera".

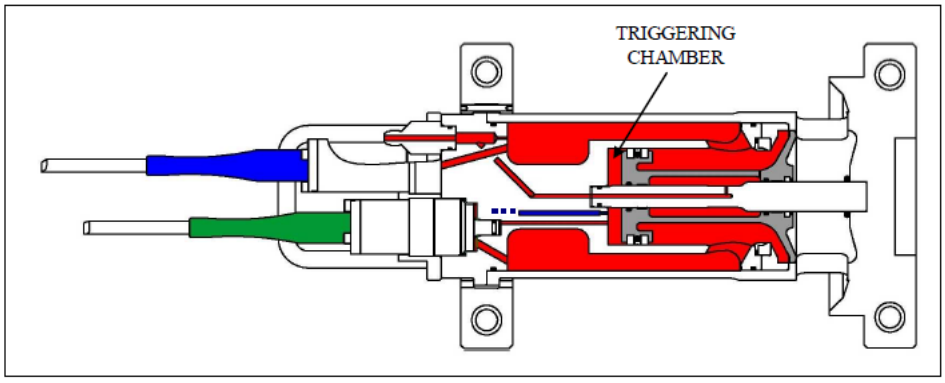


Figura 60, Cañon G de Sercel, disparado [15]

Descarga del Cañon (Shooting)

La presión diferencial ejercida así en el émbolo, dispara velozmente al mismo liberando con gran violencia el aire comprimido acumulado en el cañón y transmitiendo la onda acústica en forma de burbuja de aire (air bubble).

La burbuja de aire a gran presión liberada en este acto, produce una onda impulsiva sobre el área circundante al cañón.

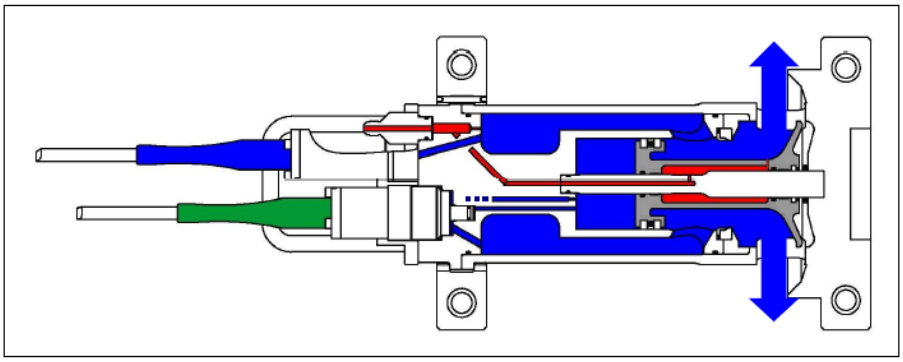


Figura 61, descarga del Cañon G de Sercel [15]

Despresurización del Cañon (Return)

Una vez liberado el aire comprimido de la cámara principal (firing camera) y como la "return camera" todavía se encuentra presurizada, el émbolo vuelve a su posición de reposo.

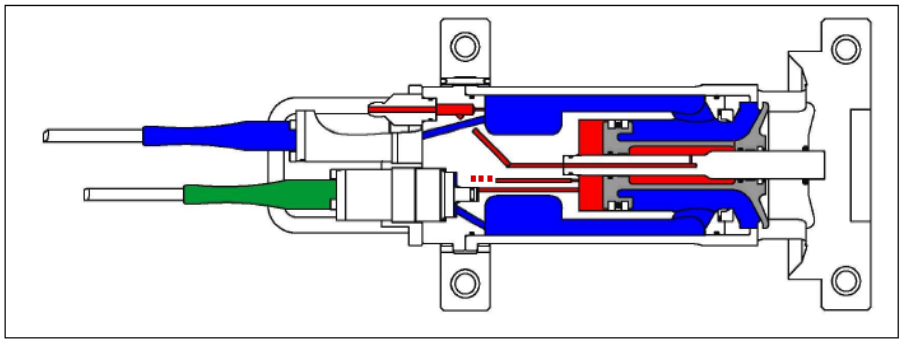


Figura 62, despresurizacion del Cañon G [15]

Respuesta Acústica del Cañon

La energía liberada por un solo cañón, es representada por un pulso (ó "signature") tal como se representa en las siguientes figuras.

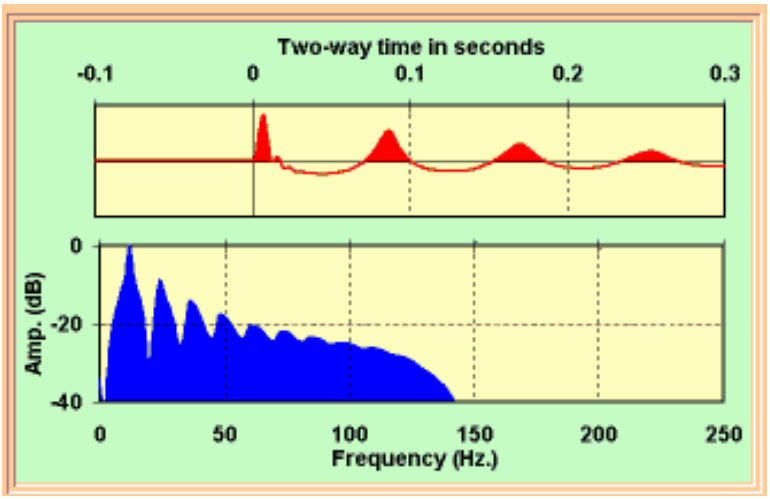


Figura 63, Amplitud vs tiempo y Amokitud vs frecuencia de un disparo

En el grafico superior de la figura 63, se muestra la amplitud del evento en función del tiempo. En el gráfico inferior se muestra la misma amplitud en función de las componentes de frecuencias producidas en dicho evento. Se observa que existe un efecto de oscilación entre la burbuja de aire original, el agua en donde flota la burbuja hacia la interface agua-aire y la reflexión de la misma en la superficie del mar. La amplitud y el período de esta energía entretenida, es dependiente de la profundidad en la cual se encuentra el cañón y del tamaño de su cámara principal. Este efecto se denomina: "Efecto Burbuja" y genera ruidos intolerables para la calidad de la información

Arreglo de Cañones

Mucho no se puede hacer modificando la profundidad de los cañones, pero si se puede modificar el tamaño de la cámara del cañón, reemplazando un solo cañón por una ristra de cañones de diferentes tamaños que deberán ser disparados simultáneamente.

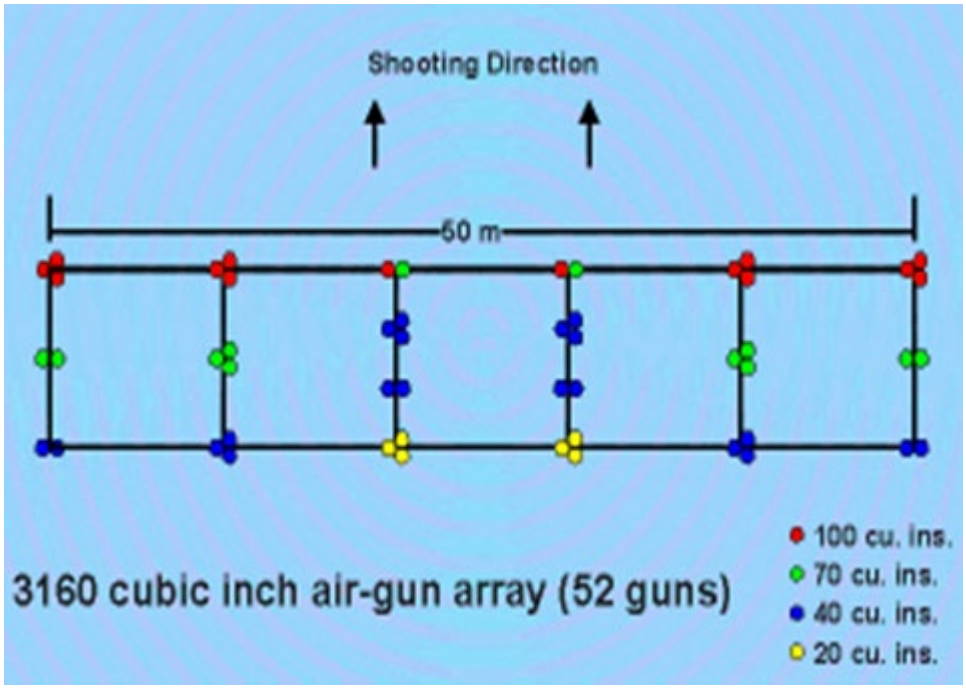


Figura 64, típico arreglo de cañones de aire comprimido

En la figura se encuentra una ristra de 52 cañones de 4 diferentes tamaños. Los tamaños se miden por la capacidad de aire comprimido que contienen y generalmente de especifican en: "pulgadas cúbicas" (cu. ins).

Las ventajas de este método son varias:

- Se aumenta la energía acústica emitida.
- Las diferentes capacidades de los cañones producirán burbujas de diferentes tamaños y tiempo que atenuaran la oscilación suma en la respuesta del arreglo de cañones.
- Se mejora la direccionalidad de la energía emitida



Figura 65, ristra de cañones antes de ser depositados en el agua [16]

Curva de Respuesta del Arreglo de Cañones

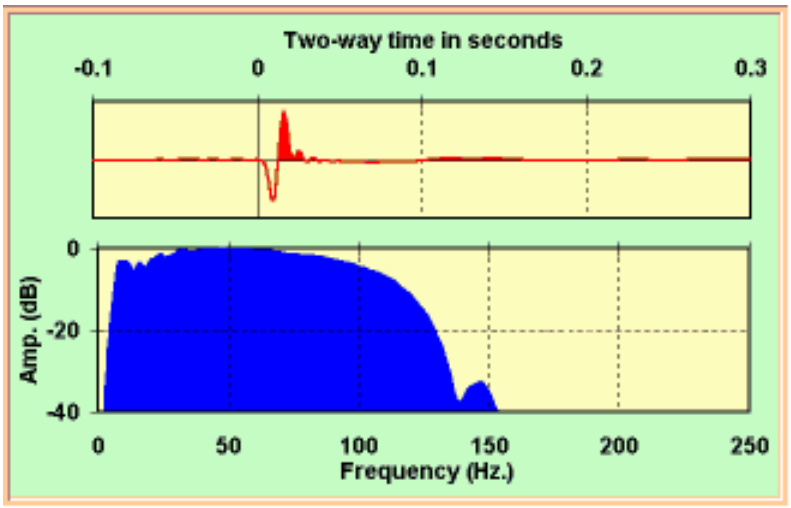
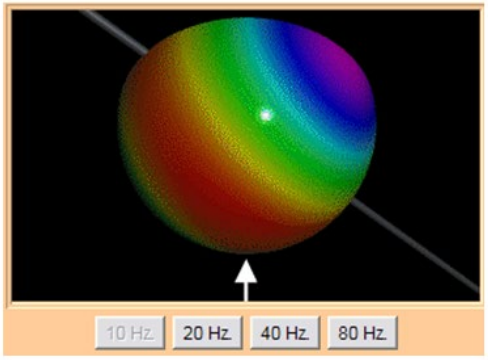
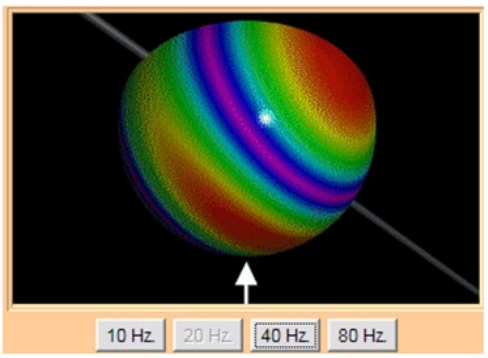


Figura 66, respuesta del arreglo de cañones [16]

Las curvas de respuesta del arreglo nos muestran ahora como las oscilaciones entretenidas han quedado reducidas a un mínimo. En el grafico de amplitud versus tiempo, los pulsos generados por las distintas burbujas actuaron cancelándose entre si, ahora el espectro de amplitud se lo ve mucho mas plano para todo el ancho de banda sísmico pretendido.
En los gráficos siguientes se ve el hemisferio de energía de la emisión del conjunto de cañones visto desde abajo.





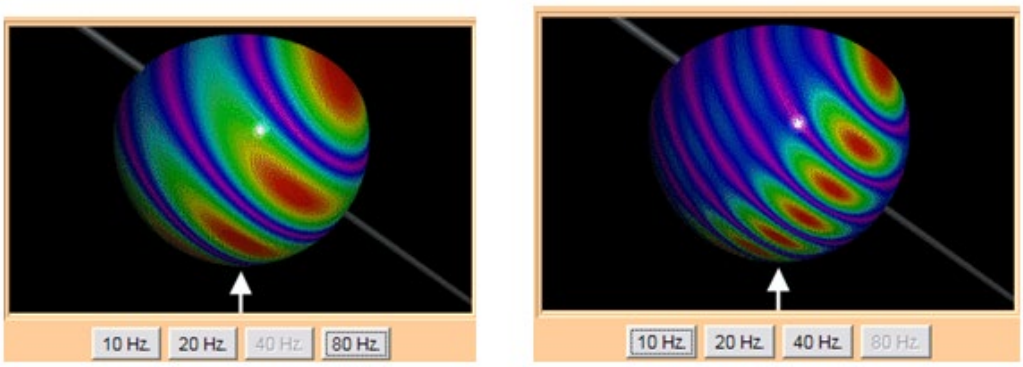


Figura 67, hemisferios de energia emitida, vista desde abajo [16]

El arreglo de fuentes de energía, así como los arreglos de estaciones receptoras, mejora la respuesta sísmica porque ciertos ruidos superficiales son atenuados.

La línea gris muestra la dirección de la línea sísmica que esta recorriendo el barco. La flecha vertical indica la dirección de emisión de la energía del arreglo.

Los colores indican los niveles de energía emitidos, siendo el valor más alto: el color rojo.

Los distintos filtros de frecuencia mostrados en los gráficos muestran como las componentes verticales se mantienen con valores altos de energía y como el arreglo reduce las emisiones laterales al mismo.

Anclaje de los cañones

Los cañones del arreglo deben mantenerse a una misma profundidad evitando desviaciones en su direcconabilidad. La figura muestra los detalles del anclaje de un cañon a la barra que los une.

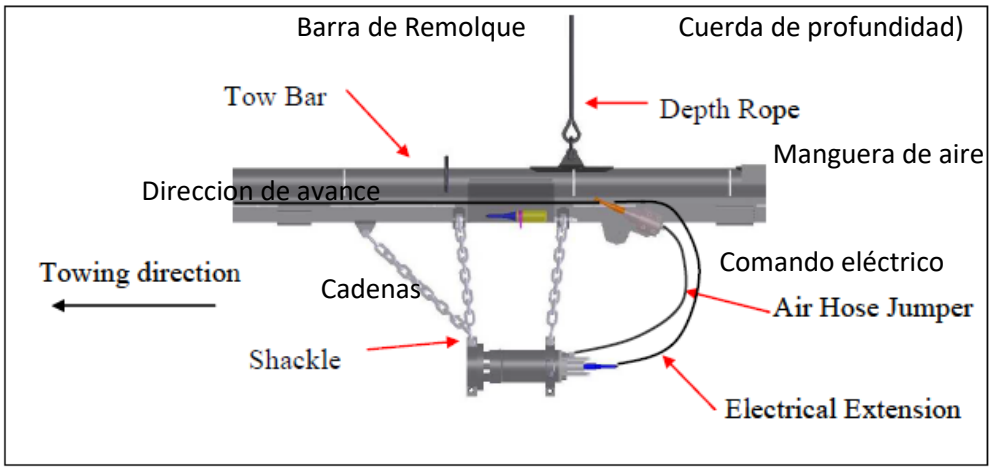


Figura 68, anclaje de un cañon dentro del mar [15]

Bibliografía consultada:

1. *El DetonadorEléctrico Sísmico, P.R.Concetti 2001. Experiencia adquirida en el Laboratorio de Estudios y Desarrollos Geofísicos de Florencio Varela, Y.P.F. Argentina (1978-1981).*
2. *Dupont Blasters' Handbook. 175th Anniversary Edition.*
3. *HARSEIM S.A.I.C. (Dyno Nobel Chile) Auditory (October 2001)*
4. *Nobel Electric Super Seismic Caps Brochures (Glen Allan Tite)*
5. *Nobel Explosives (Patrick Thompson presentation),P.M. Sales Training, Houston May, 2002*
6. *Dynamit Nobel (Harald Krueger, The RF-Safe Electronic Detonating System.*
7. *Prueba de Explosivos Empleados en Prospección Sísmica - Víctor Pelayes, Mario Ramos, Daniel Lorenzo, Juan La Vecchia, Pacífico Concetti, Miguel Espósito, Eduardo, George Cariz, Gerardo Flores.*
8. *The Digipulse III Accelerated Weight Drop Seismic Source Systems Applications and Performance of the Series Model 1180 GC/TR, A Ganguly* & Ivan Moissa**.*
9. *Electromagnetic Impulsive Seismic Source "Geoton". D.G Soloviev. OOO "Soldigen-Technologies", 2002, Russia.*
10. *Electromagnetic Impulsive Seismic Source "Geoton", Operating Manual. D.G Soloviev. OOO "Soldigen-Technologies", 2004, Russia.*
11. *SGD-SP Synchronization and Control System of Electromagnetic Seismic Sources. Operation Manual. Sib Geofiz Pribor Ltd. June 2009.*
12. *OnSEISTM an Alternative Seismic Source for Complex and Challenging Environments. Richard Verm, Nestor Sanabria, and Renato Longo, Geokinetics. 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 26-29, 2013.*
13. *The synchronized electromagnetic impulsive source. Bill Pramk and Lee Bell, Geokinetics. The Leading Edge, October 2011.*
14. *Adquisición Sísmica 2-D y 3-D, Diseño y Control de Calidad, Mustaghresource Ltd; curso dictado en WesternGeco Buenos Aires en 2007.*
15. *SercelMSD G GUN Operation and Mantenaince Manual.*
16. *Marine Seismic Exploration, Dr. Yasir Bashir, University, Sains Malaysia, Penang.*

CAPITULO 9: FUENTE DE ENERGIA SÍSMICA VIBRACIONAL

Introducción

Los "Vibradores Sísmicos" o "Vibroseis", como debía mencionarse por razones de "royalty", constituyen una fuente de energía alternativa a la provista por Fuentes Impulsivas.
En la actividad sísmica en tierra, el mayor exponente de energía impulsiva es: "el explosivo"; generalmente nos referimos al explosivo con el término "Dinamita", pero realmente el explosivo más utilizado es la "Pentolita", que difiere químicamente con la Dinamita.

Resulta evidente que el "Vibroseis", fue inventado para ahorrar esfuerzos y reducir costos en la exploración de hidrocarburos, ya que suplanta al explosivo como fuente de energía, en áreas donde la perforación, necesaria para sumir la carga explosiva, resulta muy dificultosa. Las operaciones con Vibroseis también aumentan la velocidad de adquisición de datos sísmicos y pese a que, por el contrario, aumenta las etapas de procesamiento de dichos datos, no se adiciona costos comparables con los costos de adquisición empleando explosivos.

El "Vibroseis" en la Argentina es la principal fuente de energía sísmica utilizada, facilitada por la necesaria suave topografía y ausencia de vegetación de las áreas de prospección petrolera.



Figura 1, Vibroseis [AHV IV brochure]

Para optimizar la imagen sísmica generada con vibradores, estos deben generar fuerzas sobre el terreno: sincrónica, repetibles de un amplio espectro de barrido de frecuencias durante el periodo de tiempo previsto, con un mínimo porcentaje de distorsión armónica.

El apoyo a la "Ecología y Medio ambiente" que últimamente las Empresas Petroleras vienen comprometiendo, generó limitaciones al recurso del

Vibroseis, ya que el mismo debe ser empleado sobre caminos o picadas preexistentes o bien sobre la misma superficie del terreno sin limpiar con lo cual sus performances se ven disminuidas. El aumento del peso y la potencia en los "Vibroseis" (en Argentina se trabaja con unidades de 60000 Lbs. de "Hold Down Weight"), el perfeccionamiento de los controles hidráulico-electrónicos (Servoválvula Moduladora de Presión "DR") y el registro permanente de cada posición de vibrado de cada vibroseis (DGPS w/ Navegation capacity), ha permitido una operación mucho más confiable con Vibroseis, por otro lado descubrimos los graves errores cometidos en el anterior manejo de esta fuente de energía.

Cronología del Vibrador Sísmico

El primer vibrador conocido como tal, fue ensayado el 24 de abril de 1953 en una localidad cercana a Ponca City (Oklahoma-U.S.A.), bajo la dirección de John Crawford y Bill Doty de la Compañía Continental Oil (CONOCO). Desde el prototipo de "Vibroseis" electro-mecánico de 1953 hasta el actual, muchas modificaciones fueron realizadas y muchos adelantos técnicos fueron incorporados para lograr hoy en día un sofisticado instrumento electro-hidráulico.

Los siguientes acontecimientos llevaron a construir el instrumento actual:

• 1914: Se inventó el Primer Oscilador Generador de Ondas Sísmicas (Fassenden).

• 1942: Se estableció la Teoría Matemática de la Correlación Cruzada (Weiner).

• 1958: John Crawford and Bill Doty (Conoco) presentaron la primera experiencia con una nueva técnica que denominaron: "Vibroseis" (Ponca City-Oklahoma-USA)

• 1965: Se incorporó la Primera Caja Controladora Eléctrica del Vibrador, anteriormente el control del vibrador se realizaba por una compleja combinación de relevadores.

• 1970: Se incorporó el Comando Radial para ejecutar un Barrido Sísmico Programado desde el Vibro y con un incipiente control digital.

• 1978: Se incorporó el Barrido de Retorno del Vibrador vía radio para QC.

• 1984: Se estableció el Control Automático de Fuerza, utilizando la suma pesada de los acelerómetros de masa y plancha (Ground Force); anteriormente no se utilizaba control de fuerza y la amplitud de cada componente de frecuencia del barrido de cada vibrador quedaba librada a las características del conjunto vibro-terreno. El Control de Fase era realizado por la realimentación suministrada por el acelerómetro de plancha, siendo ahora reemplazado por la "ground force".

• 1993: Se inventó la Servoválvula DR (Dennis K. Reust), transformando la clásica servo válvula moduladora de flujo hidráulico en moduladora de presión.

• 2010 aproximadamente: Por aumento del peso de la Masa de Reacción y mejor mecanizado en el Actuador, se ha logrado vibrar en frecuencias mucho más bajas con aceptable performance, ganando un poco más de una octava de ancho de banda.

Energía Impulsiva vs. Energía Vibracional

La Figura 1 muestra gráficamente, una grosera comparación entre las potencias generadas por una fuente impulsiva y una fuente vibracional.

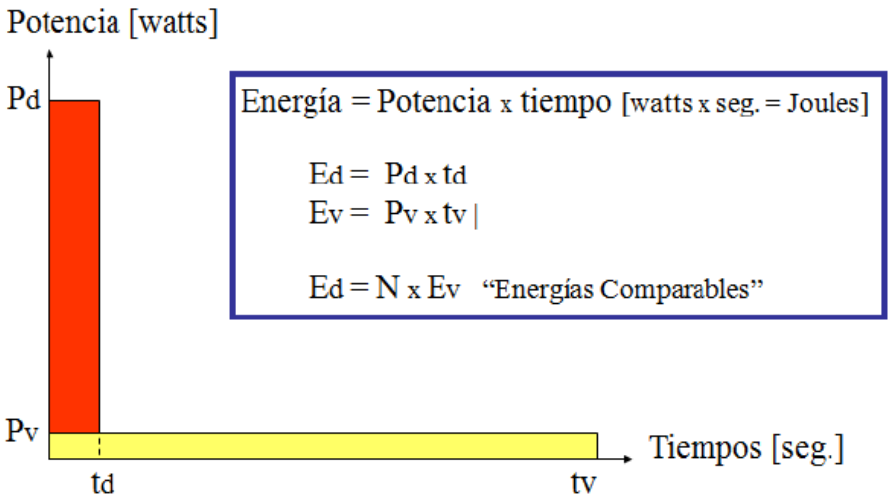


Figura 2: Comparación de energía impulsiva vs, vibracional [7]

Los rectángulos mostrados poseen como lados:

1. En ordenadas: a las respectivas amplitudes de las potencias involucradas.
2. En abscisas: a los tiempos durante el cual son aplicadas las anteriores potencias.

El área o superficie encerrada por los rectángulos representan a la Energía desarrollada por ambas Fuentes.

Podemos apreciar que pese a que la potencia de la fuente vibratoria es bastante inferior a la impulsiva, la energía desarrollada por esta podría ser comparable si mantenemos activa dicha fuente durante mayor cantidad de tiempo, y/o multiplicamos las fuentes y/o sumamos energías de varias vibraciones.

En el Sistema MKS, la Potencia se mide en Vatios o "Watts" y la Energía en Julios o "Jules"

También comprobaremos que podemos obtener una energía equivalente a la generada por la Dinamita, sumando las energías desarrollados durante "n" secuencias de vibraciones (Barridos de Frecuencias Sísmicas).

Energías Sísmicas Equivalentes: Wi = Pi x Ti = n x Pv x Tv

Símil Eléctrico del Circuito Hidráulico del Vibrador

Podemos fácilmente relacionar un Circuito Eléctrico Serie sencillo de corriente continua, con el circuito hidráulico de un vibrador sísmico. En la Figura 3 se muestra las partes mecánicas más sobresalientes de un vibrador y en la Figura 4 el símil eléctrico.

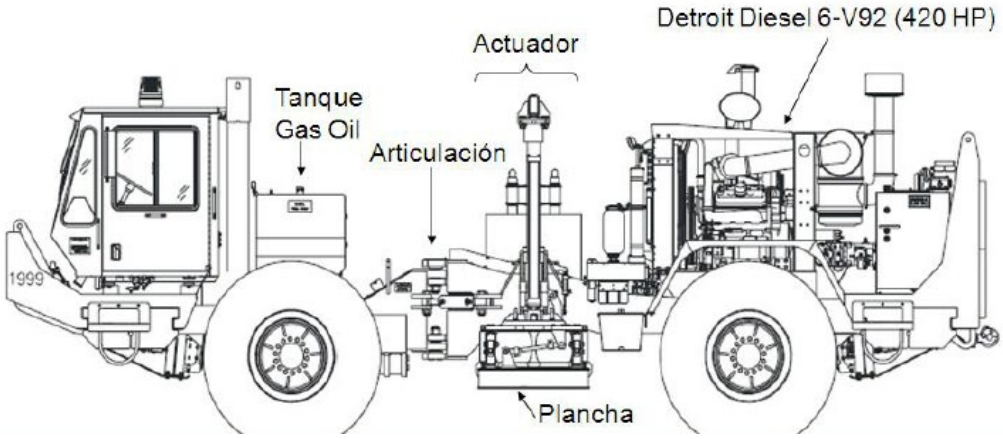


Figura 3, Vibrator AHV-IV (Articulated Hydrostatic Vehicle - IV) [12]

• **Bomba Hidráulica:** La batería eléctrica de voltaje "V", suministra la energía que disipará el resto del circuito eléctrico. Esta es análoga a la presión "P" de la bomba hidráulica que suministra la energía hidráulica al circuito del vibrador.

• **Circuito Hidráulico:** Las resistencias eléctricas R2, R3, R4 y R5, gastan en calor una pequeña parte de la energía total como producto de la circulación de la corriente eléctrica "I". Ocasionan que el voltaje sobre la carga (LOAD) sea menor al voltaje de la Fuente de Alimentación. Estas resistencias son análogas a la resistencia que ofrece al paso del aceite hidráulico en las distintas etapas del circuito hidráulico. En cada etapa se produce alguna pequeña caída de presión de tal manera que la presión diferencial que se aplica en el sistema actuador del Vibro es menor a la presión "P" de la bomba.

El **caudal hidráulico "QL"** que circula por todo el circuito entre la Bomba y el Sistema Actuador, es equivalente a la corriente eléctrica "I". Consideraremos que el sistema actuador (equivalente a la carga eléctrica), no posee pérdidas de caudal hidráulico y por lo tanto QL1=QL2=QL*.
(QL: Caudal Hidráulico se mide en "GPM": galones por minuto" en medida Americana; y en "Litro por Segundo o Metro Cúbico por Segundo" en el sistema M.K.S.)*

Servoválvula: Las resistencias o potenciómetros R1 y R1' son resistencias variables y de e igual valor que modulan la caída de tensión eléctrica en función del movimiento de su cursor. Estas resistencias son análogas a las resistencias que ofrecen al paso del líquido hidráulico las "canillas" ó Servoválvula y cuyo valor depende de una excitación eléctrica externa denominada "Barrido de Frecuencias Sísmicas" o "Pilot Sweep" (lo llamaremos indistintamente "barrido" y/o "sweep"). El Controlador Electrónico (**V**ibrator **C**ontrol Unit) genera el movimiento descrito por intermedio de una señal eléctrica que aplica a la Servoválvula (etapa: "Torque Motor") para que esta mueva sus pistones obturando más o menos los agujeros por donde circula el aceite. Son dos los caminos del circuito hidráulico dentro de la Servoválvula, uno de "ingreso" del líquido y otro de "retorno" pero que se van conmutando en función de la inversión de polaridad que genera el "Barrido".
Nota: la servoválvula produce la conmutación de dirección del flujo hidráulico, por eso en la figura 3, se indica una "inversión de circulación del líquido hidráulico aplicado al sistema actuador o "Carga".

• **Sistema Actuador** (Masa de Reacción y Pistón de la Plancha): La carga eléctrica es la que se quiere alimentar para producir la conversión de energía (ejemplo: en lámparas eléctricas se transforma electricidad en calor-luz, en motores eléctricos se transforma electricidad en movimiento, etc.)

Por lo tanto la Presión Hidráulica es un símil del Voltaje Eléctrico, el Caudal Hidráulico "QL" es un símil de la Corriente Eléctrica y el sistema actuadores equivalente a la carga o impedancia eléctrica. También consideramos, por ahora, que no se producen pérdidas de caudal hidráulico y por lo tanto QL1=QL2=QL.

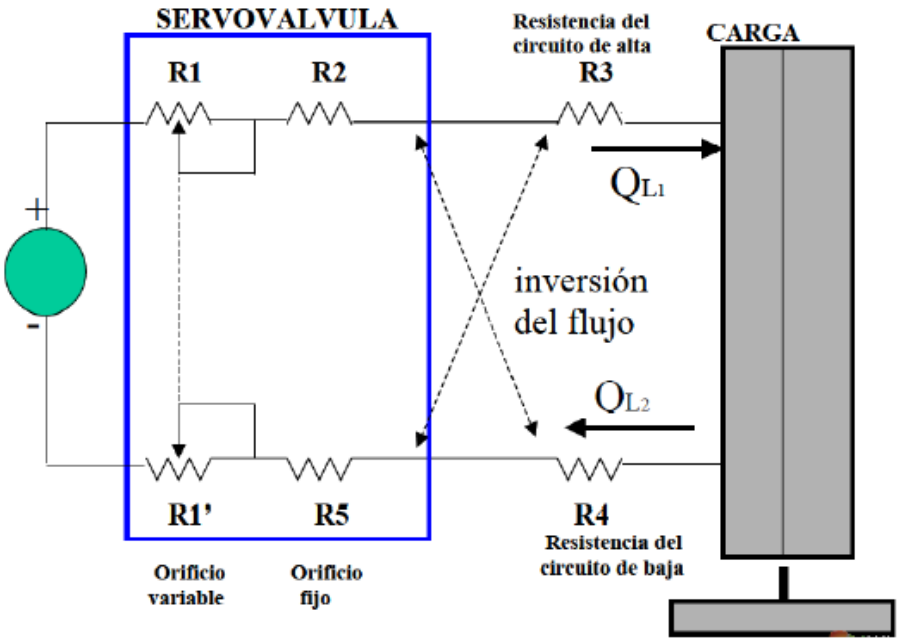


Figura 4: Símil Eléctrico del Circuito Hidráulico del Vibroseis [7]

En este circuito serie, la Servoválvula modula el caudal QL produciendo una diferencia de presión sobre el Sistema Actuador (PH1-PR1) que es menor a la presión de la Bomba Hidráulica (preseteada generalmente a 3150 psi en el AHV IV).
*(*Ver: Apéndice "A" por conversiones y conceptos)*

Modelo Hidráulico simplificado del Vibrador

En la Figura 3, vemos como un Motor Detroit Diesel, impulsa una Bomba Hidráulica Dennison, la cual es preseteada a un valor de Presión de 3150 psi con una capacidad de caudal superior a 200 galones por minuto. En la actualidad (2010), los vibradores más modernos usan motores que son capaces de entregar más de 200 kW de potencia hidráulica.

El Sistema de Alimentación Hidráulica, contiene al Tanque o Depósito de aceite hidráulico, radiadores de enfriamiento del aceite y acumuladores de presión del sistema. Vemos que a partir de aquí, existe una tubería que transporta el líquido a alta presión (3150 psi) y otra de retorno de baja presión, aproximadamente 150 psi a la salida de la Masa de Reacción. Vemos también a la Servoválvula la cual modula el flujo del aceite hidráulico en función de una excitación eléctrica, entregada por la Unidad de Control Electrónico o VCU (Pelton VibPro, Advance II, Sercel Ve432, etc.).

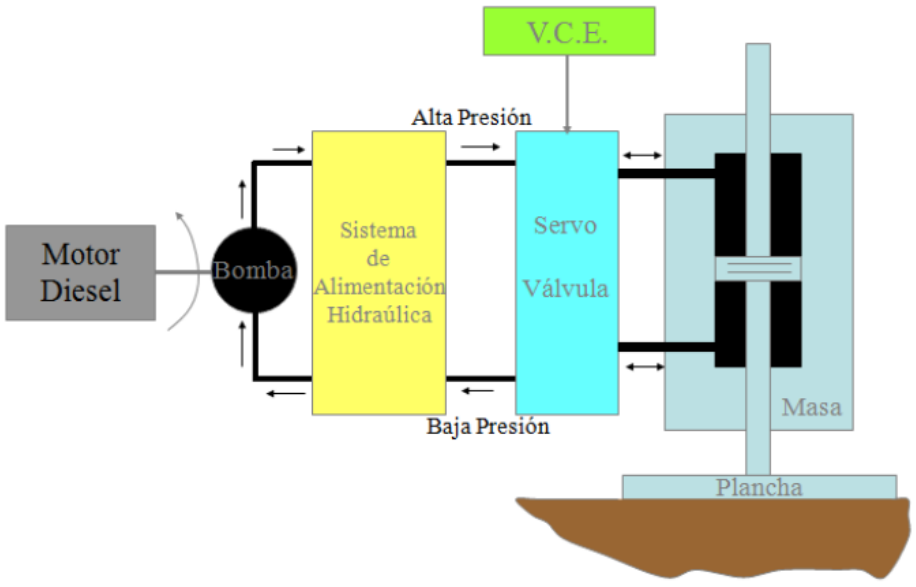


Figura 5: Esquema simplificado del Vibroseis [7]

La Servoválvula consta de tres etapas:

1. Torque Motor que es el transductor eléctrico-mecánico.
2. Pilot Valve: constituido por el Pistón Hidráulico que es movido por la armadura del "Torque Motor" y que moviéndose por un cilindro

obturará (más o menos) los agujeros de ingreso y retorno del circuito hidráulico.

3. Main Valve: o válvula principal que contiene al Pistón Principal que es movido por la presión diferencial generada en la "Pilot Valve" y cuyo cilindro contiene el ingreso y retorno del circuito hidráulico al sistema actuador.

En la mayoría de los Vibradores se utiliza la marca de Servoválvula: "Moog" para las dos primeras etapas y Atlas para la tercera etapa (ver figura 6).

Los Vibradores que emplean Control Electrónico Pelton, suelen utilizar una Servoválvula denominada "DR", que tiene un mecanizado especial que la transforma de "Válvula Moduladora de Caudal" en "Válvula Moduladora de Presión". Se la conoce con el nombre de "Servoválvula DR" pues Denis Reust fue el que investigó y patentó esta novedosa e importante performance del Vibrador: realimentación negativa de presión.

Finalmente a la Servoválvula ingresa y se retira el aceite hidráulico de la "Reaction Mass", generando una presión diferencial sobre el "Pistón de la Plancha" que se transforma en una fuerza vibracional sobre la Plancha (Baseplate) que se encuentra acoplada a la superficie del terreno.

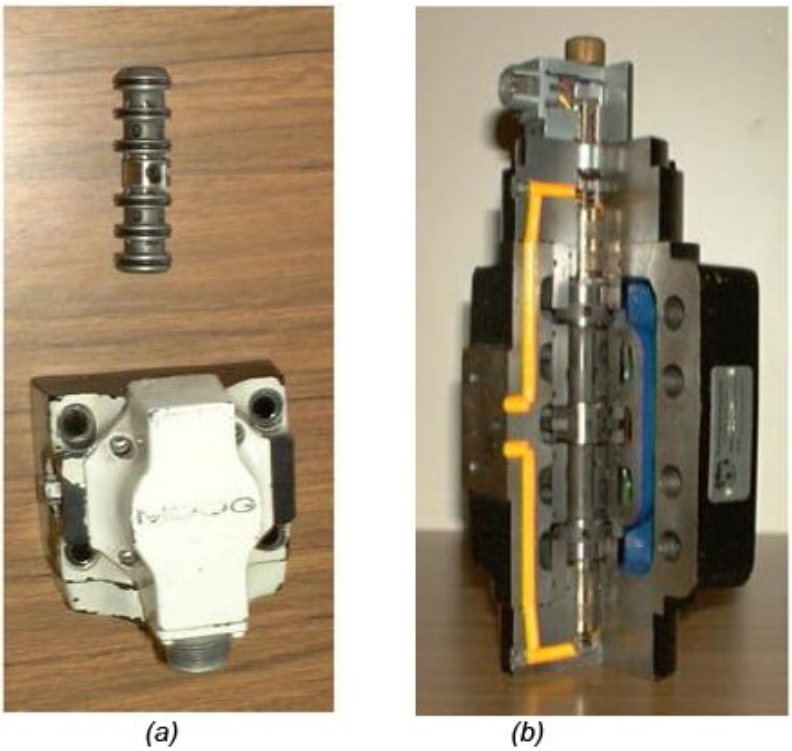


Figura 6, Servovalvula Moog-Atlas: (a) Abajo "Torque Motor" y arriba "Pilot Valve"; (b) "Main Valve" [4]

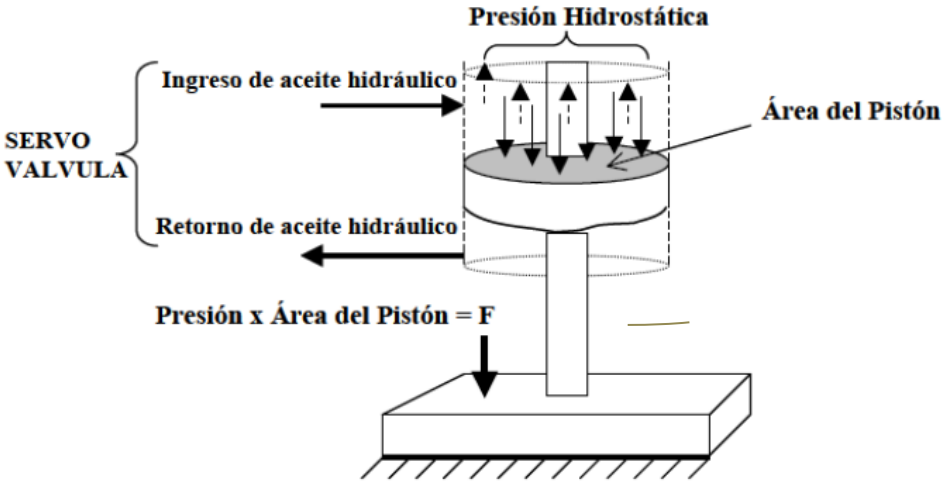


Figura 7: Estructura metálica solidaria del "Baseplate" [7]

La Figura 7 representa la estructura metálica de la Plancha (Baseplate) cuando el aceite hidráulico ingresa por la parte superior del cilindro de la Masa de Reacción (Reaction Mass). La presión Hidráulica "P" que ejerce ese líquido, es análoga al barrido sísmico generado en la VCU y provoca la acción de una fuerza mecánica y análoga a la anterior "F" sobre el área superior del pistón. La plancha (baseplate), solidaria con la estructura del pistón ejerce una fuerza sísmica análoga sobre el terreno sobre el cual se encuentra acoplada (en este caso la está ejerciendo con sentido "de arriba hacia abajo", comprimiendo el terreno).

Peso del Vibrador sobre la Plancha (Hold Down Weight)

La fuerza "F" mostrada, como producto de la Presión Hidráulica del Barrido Sísmico, no podría ejercerse sobre el terreno, si sobre la Plancha (Baseplate) no le colocamos suficiente Peso. Cuando la "Plancha" del vibrador se apoya sobre la superficie a vibrar y el sistema se presuriza, tanto el "Baseplate" como la "Masa de Reacción" quedan aislados del resto de la estructura del vibrador. La "Reaction Mass" queda flotando sobre el "pistón del Baseplate" debido al líquido hidráulico en su cilindro (por ahora el aceite hidráulico puede considerarse: totalmente incompresible).
Por lo tanto el peso que la "plancha" ejerce sobre el terreno hasta aquí, es equivalente al peso de la Masa y de la Plancha. Como este peso no es suficiente para ejercer sobre la superficie del terreno una "Fuerza Dinámica Sinusoidal" importante, también se le suma al mismo, parte del peso del resto de la estructura metálica del vibrador. Para esto se utilizan 2 "Gatos Hidráulicos" (Lift Cilinders) solidarios al chasis del vibrador) que se acoplan al "Baseplate" a través de sendos Amortiguadores de Aire (Airbags). Los "airbags" permiten la aplicación del peso estático del chasis pero lo aíslan de los esfuerzos dinámicos del barrido sísmico (por encima de una frecuencia de 3 Hz, los "airbags" son buenos aislantes de movimiento)

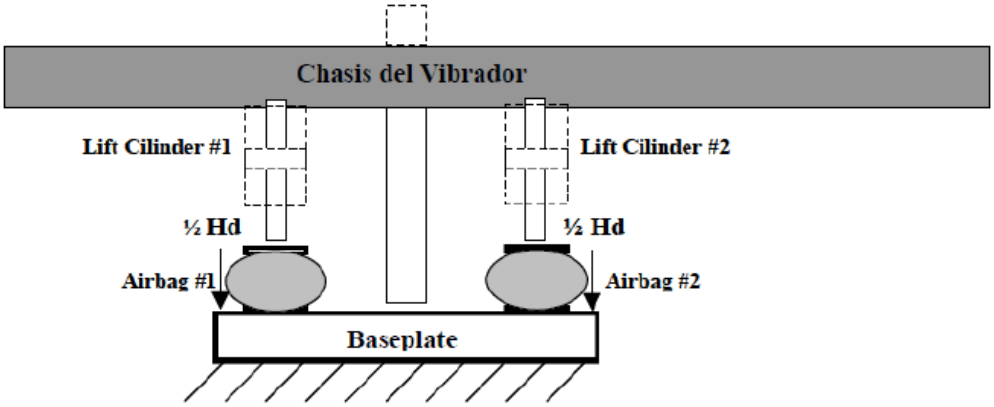


Figura 8: Aplicación del "Hold Down Weight" [7]

Finalmente el valor total del Peso que la Plancha pone sobre el terreno es de:

Holdown Weight = R.Mass Weight + Baseplate Weight + 2 * Pressure Lift *Area Pistón Lift

Ejemplo para el Vibrador AHV-362**:**

- Peso total del vibrador (GW): 63000 lb.
- Peso de la Masa de Reacción (Wrm): 7728 lb.
- Peso de la Plancha (Wbp): 3735 lb.
- Diámetro del pistón de los "Lift Cilinders": 4 in
- Área del Piston de la Lift: π x 42 /4: 12.56 sq.in

El valor del Holdown deberá ser ligeramente menor que el peso total del vibrador, para que este no se encuentre levantado sobre su plancha sin apoyar ni su eje delantero ni trasero (se generarían distorsiones en el barrido por balanceos en el vibrador), el valor adoptado es:

- Holdown Weight: 60000 lb.

Solamente nos queda saber qué valor de presión deberíamos suministrar los "Lift Cilindres" para que se ejerza el "hold down" de 60000 lb.

Pressure Lift = (Holddown -Wrm - Wbp) / 2 * Area Piston Lift
= (60000 - 7728 – 3735) / 2 * 12.56
Pressure lift = 1932 psi (lb/sq.in)

Concepto de Barrido de Frecuencias

Como hemos visto, para lograr una energía equivalente a la proporcionada por el explosivo, deberemos generar sobre la superficie del terreno, esfuerzos alternados y para ello las Oscilaciones Sinusoidales son las más adecuadas por su facilidad de ser transmitidas y detectadas en su viaje y retorno por las diferentes capas del subsuelo. A estas oscilaciones las denominamos: **Barrido Sísmico** (Sweep). Se trata de "barridos" y no de una

única frecuencia de oscilación pues, por razones que ya se mencionarán, es necesario utilizar (barrer) un rango limitado de frecuencias sinusoidales durante el desarrollo temporal del evento (Sweep Length).

La energía desarrollada en un barrido generalmente no es suficiente para satisfacer el requisito propuesto y por lo tanto deberán ser emitidos (en esa misma posición) otros barridos (similares o no) cuyas energías serán sumadas en el Sismógrafo, al cual llegan las respuestas captadas por el dispositivo de recepción (ristras de Geófonos).
El dato sumado en el Sismógrafo, debe ser "correlacionado" (operación matemática compleja), ya que el barrido origen tuvo una duración determinada (no fue un impulso) y es necesario identificarlo como respuesta de cada capa del subsuelo, entre todas las respuestas de diferentes horizontes profundos del subsuelo que arriban simultáneamente.

El proceso de correlación permitirá identificar el tiempo en que el barrido emitido es reflejado/refractado en cada horizonte profundo, lográndose finalmente un registro sísmico equivalente al de dinamita. Para ello debemos memorizar el barrido emitido y luego utilizarlo en la identificación de la señal recibida, como respuesta de cada capa del subsuelo. Decimos entonces que: el "Barrido Emitido", oficia de "Operador de Correlación" (denominado generalmente "E.S.G.True Reference").

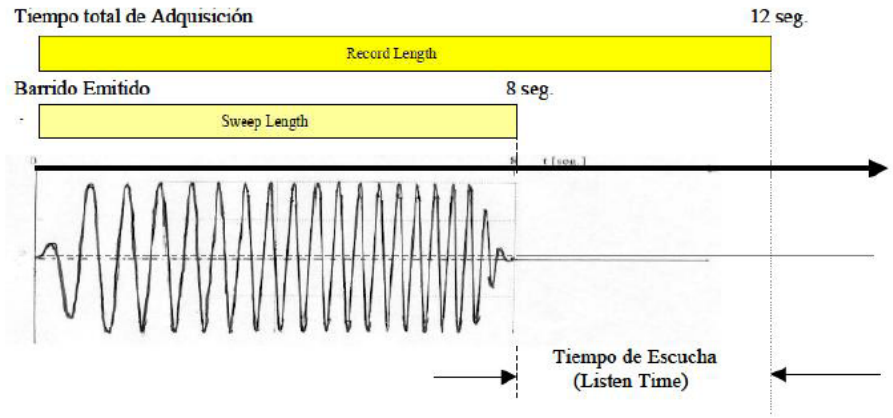


Figura 8: Tiempos de emisión y recepción de un Barrido Sísmico [7]

En la Figura 8, se grafica un Barrido de "ocho segundos de duración" (Sweep Length: 8 sec) donde se emplea un Tiempo de Adquisición de Datos Sísmicos de "12 segundos de duración" (Record Length: 12 sec). El Registro Final Correlacionado poseerá la duración de tiempo denominado "Tiempo de Escucha" (Listen Time) ya que equivale al tiempo necesario para que la última componente del barrido original viaje hacia el horizonte reflector más profundo, elegido como objetivo, y regrese a la superficie para ser sensado (en dinamita, como la duración del evento es infinitesimal, directamente el "tiempo de escucha" es el "tiempo total de adquisición).

$$\text{Listen Time} = \text{Record Length} - \text{Sweep Lenght}$$

Control de Amplitud de un Barrido de Frecuencias

El barrido de frecuencias ideal, sería el que resultaría de producir una amplitud de fuerza constante durante la duración de todo el barrido de valor igual al "hold down weight", que gráficamente sería representado por un rectángulo.

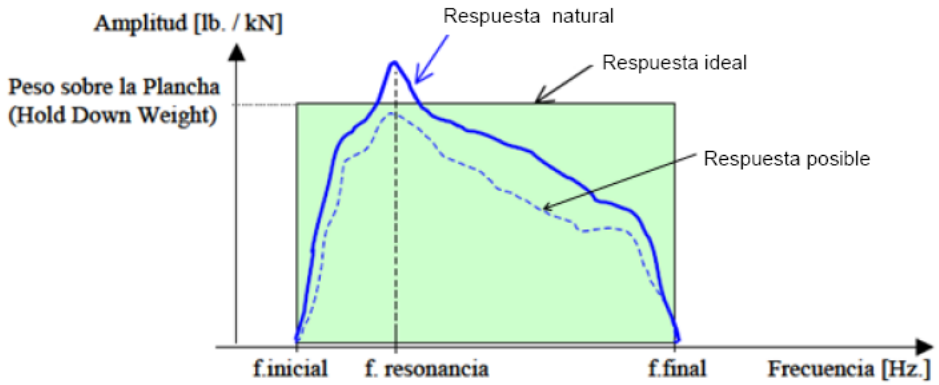


Figura 9: Espectros de Amplitud ideal de Fuerza de un Barrido y el real antes de 1984 [7]

En la Figura 9 se graficaron tres respuestas de un barrido de frecuencia: el ideal (rectángulo en verde), la respuesta natural del terreno sin correcciones en el vibrador (en continuo azul) y la respuesta corregida del anterior barrido (en línea azul puntuada) donde se tuvo que disminuir la fuerza aplicada para no desacoplar la Plancha del terreno.

El Vibroseis, hasta 1984, no poseía un Control de Fuerza que permitiese mantener constante, la amplitud de la misma a lo largo de todo el barrido, por lo tanto la respuesta se apartaba de la curva ideal tal como lo muestra la curva en "azul". Esta curva presenta un pico de amplitud muy grande en las cercanías de la "frecuencia de resonancia Vibro-Terreno" (generalmente comprendida entre 15 y 40 Hz.) que llegaba a duplicar la fuerza preseteada (denominada: Drive) y si el peso que el vibrador ejercía sobre su plancha (Holdown Weight) no era suficiente, se producía el desacople de la plancha sobre el terreno (tal como estaría sugiriendo la Figura 9). Por esta razón es que los Vibradores, en ese entonces, poseían un peso (y por lo tanto un "Holdown Weight") equivalente al doble de la fuerza (Drive) máxima que podían suministrar*.

**Antes de 1984, Geosource Argentina poseía Vibradores Failing Y-1100, cuya fuerza máxima posible (Peak Force) era de 27000 lb., pero el peso total del camión (Kenworth o International) era del orden de las 43000 lb.*

Cuando el peso del camión no era lo suficientemente grande, entonces se debía bajar la fuerza del vibrador (bajar el "Drive") hasta que el pico de amplitud fuese menor que el "Holdown Weight" (peso de la plancha sobre el terreno). Como también podemos apreciar en la Figura 9, al bajar el "Drive", bajamos todavía más la amplitud de la curva, especialmente en las frecuencias

altas, naturalmente ya atenuadas por la respuesta del terreno (en curva de trazos). Como veremos más adelante la superficie de la tierra, se comporta como un filtro Corta Altos ("Hi-Cut"), atenuando selectivamente los componentes del barrido y afectando más a las altas frecuencias del mismo.

También debemos agregar que en ese entonces ya existía el "Control Automático de Fase" (Baseplate Phase Lock) y este se realizaba sensando la respuesta del Vibrador por intermedio de un "Acelerómetro" colocado sobre la Plancha del Vibrador (en algunos casos también se emplearon: sensores de velocidad o de desplazamiento, pero entre ellos solamente difiere una operación matemática de diferenciación o integración fácilmente realizable electrónicamente).
El primer "Control de Automático de Amplitud"**,** también empleó a ese mismo "Baseplate Accelerometer" para conocer la fuerza colocada por el Vibrador sobre el terreno.

Resulta evidente que para operar con Vibradores coherentemente, deberemos asegurarnos que todas nuestras fuentes emisoras (vibradores) se comporten como unidades similares.

Es decir:

1. "La Amplitud del Barrido de Frecuencias Sinusoidales" generada sobre el terreno en cada Vibroseis, deberá ser similar, para cada componente de frecuencia. Por lo tanto cada vibrador deberá poseer un "Control Automático de Amplitud" y un valor de referencia de amplitud común a todo los vibradores.

2. "La Diferencia de Fase del Barrido de Frecuencias Sinusoidales" generado sobre el terreno, en cada Vibroseis, comparada con un "Barrido Sinusoidal de Referencia", deberá mantenerse lo más baja posible, para que exista la mejor suma efectiva de energía sísmica para cada componente del barrido.

La respuesta ideal es la que intenta producir en la práctica el "Control Automático de Amplitud", el cual partiendo del conocimiento de la respuesta natural del Vibrador (en "azul"), intentará aumentar/disminuir la amplitud de salida del Barrido en función de compensar las atenuaciones y/o distorsiones que provoca el mismo vibrador y el terreno con el cual se acopla.

Como vemos en la Figura 9, el valor máximo de amplitud ideal, será equivalente al Peso que se ha colocado sobre la Plancha del Vibrador (Holdown Weight) y que queremos mantenerlo durante todo el rango de frecuencias generadas (ff – fi = ΔF =Rango del Barrido).

NOTA**:** Si la Presión de la "Lift Valve" es suficiente para que el Vibrador se levante y quede colgado sobre su "Baseplate", entonces el "Hold Down Weight" será el valor de su Peso Total (Gross Weitght), pero la performance

del vibrador será muy mala por generación de distorsiones armónicas y no armónicas.

La similitud entre vibradores con el barrido de referencia (Reference Sweep), se fundamenta en que: **"**toda diferencia de amplitud y/o fase entre el barrido emitido y el recibido, será adjudicada a la respuesta del terreno". Por lo tanto cuanto más preciso sea el control de amplitud y fase del vibrador, más preciso será el modelo sísmico obtenido.
Como siempre ocurre con la realidad, a este ideal solamente podremos aproximarnos. Algunos de los factores físicos que modificarán el modelo ideal serán:

- El terreno vibrado no responderá linealmente a la fuerza generada por el barrido, generándose otras fuerzas de frecuencias armónicas a las del barrido cuyas amplitudes dependerán de las características elásticas de dicha superficie y de la calidad del acoplamiento vibro-terreno.
- Por lo tanto podemos aquí apreciar que parte de la energía generada responderá al barrido pretendido, que denominaremos: "Fuerza Fundamental del Barrido" (Fundamental Ground Force) y otra parte se convertirá en ruido organizado en armónicas de las frecuencias fundamentales del barrido (Harmonic Distortion). Estas componentes armónicas se sumarán algebraicamente a la fuerza fundamental, podría darse el caso de que se sumen en fase durante el semiciclo en el cual la plancha del vibro se encuentra "traccionando el terreno" y entonces la amplitud de la fuerza podría llegar a superar el "Holdown Weight" y así producirse el desacople del vibro sobre el terreno. Por lo tanto deberemos colocar la amplitud del barrido del vibrador como máximo al 90% del Holdown Weight para contemplar las demoras inerciales en el cumplimiento del control de amplitud (todos los controles electrónico de vibradores, limitan la fuerza máxima de vibrado al 90% del valor del "holdown").
- Como todo sistema inercial, el vibrador no podrá reaccionar en forma inmediata a una acción física. Por lo tanto resultará más eficaz comenzar y terminar el barrido con una velocidad creciente / decreciente de la fuerza (Start/End Tapers) la cual podrá ser mejor copiada por la respuesta vibro-terreno (ver en la Figura 8, la acción de los "tapers" sobre el comienzo y finalización de un barrido.
- Como nos interesa controlar la amplitud de la Fuerza Fundamental y no la Fuerza Total Emitida (F. total = F. fundamental + Distorsión Armónica), tendremos que considerar disminuir algún margen adicional de amplitud con respecto al valor anterior, para cumplir con la ecuación:

  Fundamental + Armónicas < Hold Down Weight

Por lo tanto no podemos llegar a obtener como respuesta el "cajón ideal" de amplitud vs. Frecuencia, pero si podemos desarrollar un espectro de amplitud y fase aceptables y predecible que se compatibilizará con el resto de los procedimientos sísmicos.

La Figura 10, resulta de aplicar las anteriores limitaciones a la Figura 9, donde ahora el Barrido de Frecuencias comienza y finaliza gradualmente (se aplica un "Taper" al iniciar y finalizar el barrido), la amplitud de la "Fuerza Fundamental" (libre de armónicas y otras distorsiones) se aproxima al valor "preseteado", en función de la respuesta elástica del terreno (idealmente este valor debería encontrarse entre el 70 y el 80% del "Holdown Weight "), y en donde el valor máximo de amplitud de la fuerza emitida (Total Peak Ground Force), no supere el valor del "Holdown Weight" durante todo el barrido.

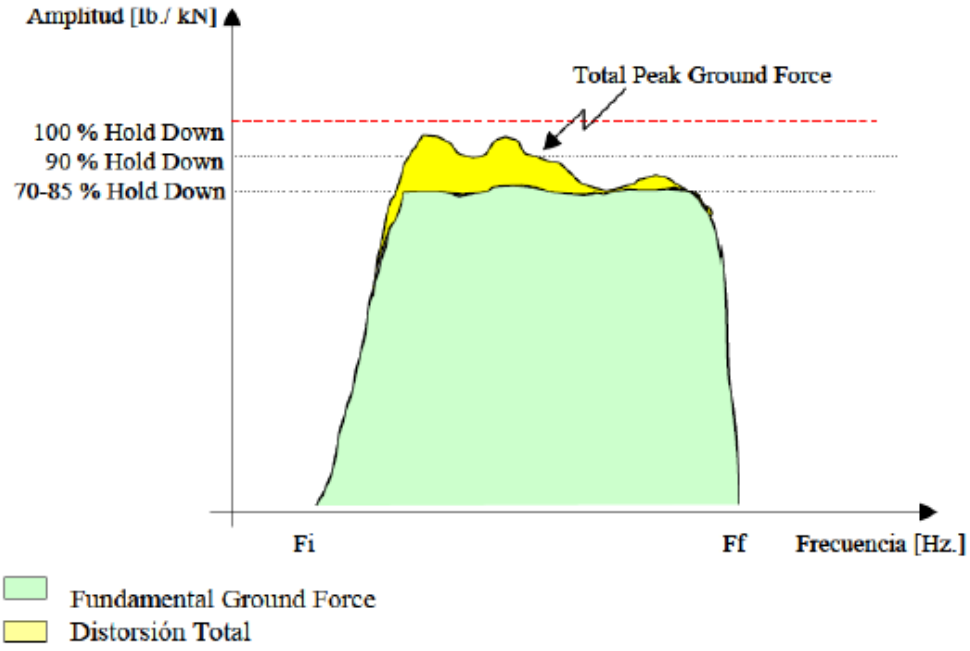


Figura 10: Aproximación real al Espectro de Amplitud emitido en un Barrido [7]

Fuerzas actuantes durante un Barrido Sísmico

La Figura 11 intenta reflejar gráficamente todo lo que hemos dicho anteriormente. Es un ejemplo básico de las fuerzas que actúan durante un "Barrido Sísmico". En este gráfico Fuerza vs. Tiempo, vemos que:

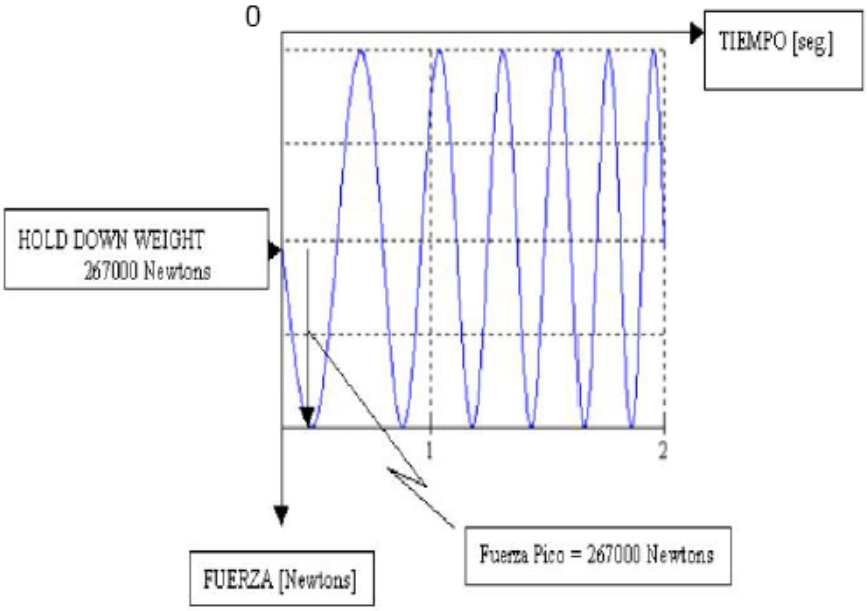


Figura 11: Fuerzas aplicadas sobre la plancha de un Vibrador

1. Sobre el terreno y en forma continua "la plancha" del vibro (Baseplate) ejerce una fuerza sobre la superficie del terreno, equivalente a casi el total del peso del Vibrador (Holdown Weight = 267000 Newton = 60000 lb.).

2. Sobre esta fuerza constante y durante el barrido de frecuencias, se suma algebraicamente la Fuerza Hidráulica generada por el Barrido Sísmico, sobre el sistema Actuador del Vibrador (por ahora denominada "Ground Force"). Esta fuerza es análoga a la señal sinusoidal que excitó a la primera etapa de la Servoválvula (la primera etapa de la servoválvula es el "Torque Motor").

3. Podemos apreciar que, durante la mitad de un ciclo sinusoidal del barrido, la fuerza hidráulica aumenta la compresión de la plancha sobre el terreno, ya que se ejerce en el mismo sentido que el "holdown" (hacia el Centro de la Tierra). Teóricamente la fuerza total llega a duplicar la fuerza gravitatoria ejercida por el "holddown", durante el valor pico del barrido en compresión:
"Holdown Weight + Fuerza Dinámica ~ 120000 lb. = 534 Kn

4. Durante el semiciclo de polaridad opuesta al anterior, la fuerza hidráulica se ejerce en dirección opuesta al "Holdown", traccionando la plancha y tendiendo a levantar a esta del suelo. Como vemos, si durante el valor pico de este semiciclo de tracción se supera el peso de la plancha sobre el terreno (Holdown weight), se produce el desacople de la plancha del vibrador, arruinando toda nuestras especulaciones anteriores. Por lo tanto este es el punto crítico en el control de amplitud del vibro, sobre todo cuando nos encontramos barriendo frecuencias cercanas a la frecuencia de resonancia del sistema

formado por vibro-terreno entre 15 y 40 Hz, dependiendo del tipo de terreno para un mismo vibro).

NOTA: En las cajas Pelton y Sercel, el valor máximo de la fuerza hidráulica a desarrollar esta restringido al 90% del "holdown weight". Un valor ligeramente menor todavía es necesario para lograr un control de amplitud de Fuerza Fundamental más plano (70 – 85 %)

Concepto de "Ground Force" y Weighted Sum" (Sallas 1984)

En el Apéndice, agregamos algunas leyes físicas y relaciones matemáticas que podrían mejor explicar algunos conceptos, que daremos por conocidos para continuar con este desarrollo:

• El vibrador aún en pleno barrido, es un sistema mecánico en equilibrio.

• El "Holdown" es una fuerza estática: durante todo el tiempo posee la misma magnitud dirección y sentido.

• La Fuerza Dinámica ejercida por el Sistema Actuador Hidráulico es generada durante un Barrido Sísmico.

• Para que un sistema se encuentre en equilibrio mecánico a "toda fuerza ejercida debe oponerse otra fuerza igual magnitud y dirección pero de sentido contrario" (Tercera Ley de Newton).

Por lo tanto las dos fuerzas ejercidas por el Vibrador sobre el Terreno a través del "Baseplate", deberán ser equilibradas por una Fuerza del Terreno (Ground Force) de una magnitud igual a la suma de las dos magnitudes, ejercida en la misma dirección vertical pero de sentido contrario.
Para hallar las ecuaciones que expliquen el resultante de fuerzas intervinientes en un vibrador en plena tarea de vibración, utilizaremos Analogías Eléctricas para representar al Sistema Actuador del Vibrador y al Terreno Vibrado.
En este modelo, consideramos que: La Masa de Reacción (Reaction Mass) y la Plancha (Baseplate) son cuerpos rígidos. El aceite hidráulico posee cierto grado de "compresibilidad". Que existe cierta fuga (leakage) de aceite a través del pistón (con lo cual no interviene en los esfuerzos). Que el terreno no responde linealmente a los esfuerzos del vibrador.

La Figura 12, muestra un diagrama de distribución de fuerzas sobre el sistema actuador del vibro (Reaction Mass & Baseplate) donde:

• Fh: Holdown Weight. Como vimos este peso es suministrado a través de los "air bags".

• Fa: Fuerza ejercida por el fluido hidráulico sobre el pistón del "Baseplate" y Masa de Reacción (ver que el sentido de "Fa" es diferente en el Bp y la Rm debido a que la presión hidráulica es ejercida en todas direcciones, sí el pistón se mueve hacia abajo, la masa se mueve hacia arriba).

• Fg: Fuerza con que reacciona la tierra para equilibrar las fuerzas anteriores**:** "Ground Force".

• Fe = Ka (Xrm-Xbp), Fuerza perdida debido a la compresibilidad del aceite hidráulico y que es proporcional al desplazamiento relativo entre la Masa y la Plancha, siendo:
Ka: Constante Elástica del aceite
Xrm - Xbp: diferencia entre los desplazamientos de la Masa y de la Plancha.

• Fp = Da (Vrm-Vbp), Fuerza perdida debido a la fuga de aceite hidráulico y que es proporcional a la velocidad relativa entre la Masa y la Plancha, donde:
Da: Coeficiente de pérdidas de fluido hidráulico.
*Vrm-Vbp**:** diferencia de velocidades entre Masa y Plancha.*

Para obtener las fórmulas que vinculan a estas fuerzas, emplearemos equivalentes mecánicos para nuestros elementos eléctricos análogos, que derivan de la ley: (Fuerza) F = m x a

Frm = Mrm x Arm: Fuerza hidráulica ejercida durante el barrido sobre la Masa.

Fbp = Mbp x Abp: Fuerza hidráulica ejercida durante el barrido sobre la Plancha

Suponiendo que la "Reaction Mass" y el "Baseplate" son cuerpos rígidos, podemos establecer los siguientes equilibrios de fuerza, tanto sobre la Masa como en la Plancha, considerando positivas las fuerzas ejercidas de "arriba hacia abajo" y negativas a las opuestas a ese sentido.

I) Fuerzas sobre la "Reaction Mass": $-Fa = Frm + Da\,(Vrm - Vbp) + Ka\,(Xrm - Xbp)$

II) Fuerzas sobre el "Baseplate": $Fa + Fh - Fg = Fbp - Da\,(Vrm - Vbp) - Ka\,(Xrm - Xbp)$

Sumando miembro a miembro $Fh - Fg = Frm + Fbp$

$Fh - Fg = Mrm \times Acrm + Mbp \times Abp$

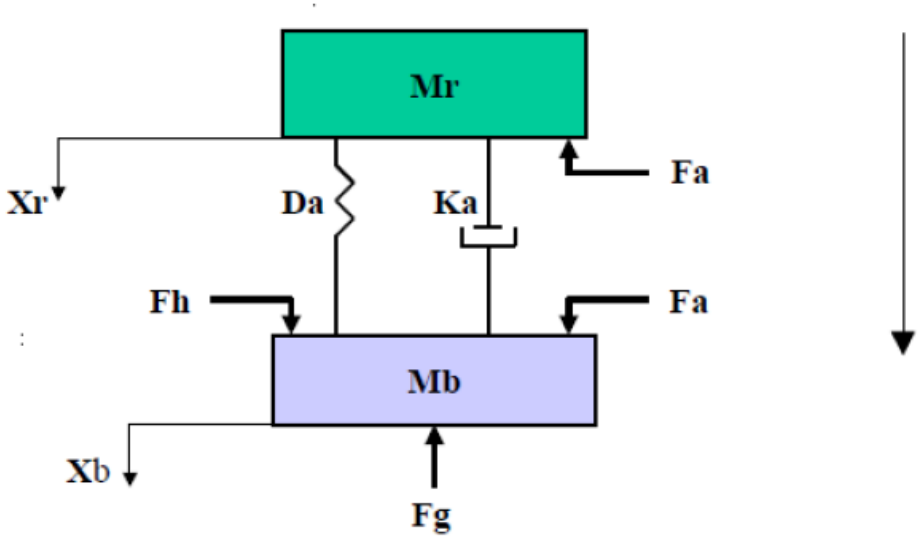


Figura 12: Analogía de Impedancias del Sistema Actuador del Vibrador [2]

Como resultado de la suma de fuerzas, vemos que:

• Las pérdidas hidráulicas se compensan (válido hasta cierto límite de frecuencias de barrido), quedando solamente las fuerzas dinámicas del barrido sobre la Masa y la Plancha.

• Se compensan las fuerzas sobre el sistema actuador (Fa) por ser iguales y de sentidos opuestos.

• La diferencia entre el "Holdown" y la "Ground Force" es igual a la suma de las Fuerzas Dinámicas.

Desde el punto de vista dinámico "Fh" puede ser totalmente despreciado para frecuencias de barrido superiores a 3 Hz., ya que los "airbags" actúan como perfectos aisladores del barrido con respecto al chasis del vibrador. (Sucede como en la "polarización" de circuitos electrónicos, donde se introducen voltajes continuos para llevar a transistores a su curva de respuesta o zona de trabajo lineal, para luego bloquearlos a la salida por intermedio de capacitores).
Por lo tanto el resultado anterior con respecto a una respuesta dinámica es:

$$\textbf{(I) - Fg = Mrm x Arm + Mbp x Abp}$$

La ecuación (I) nos dice que:

"La suma de las fuerzas dinámicas (Weighted Sum) ejercidas sobre la Masa de Reacción y la Plancha del Vibrador por efectos del barrido, es igual en amplitud y dirección pero de sentido contrario a la Fuerza que ejerce la Tierra (Ground Force) sobre la plancha del vibrador".

O sea que: **- Ground Force = Weighted Sum**

Por lo tanto y contando con acelerómetros que nos permitan medir la aceleración instantánea sobre la "Rm" y el "Bp", podremos conocer en cada instante de tiempo, el valor de la "Ground Force", ya que solamente tendremos que multiplicar los voltajes análogos a las aceleraciones (Arm. y Abp.) por los valores conocidos de las masas (Mrm y Mbp).

Lo anterior es fácilmente implementado por un Amplificador Diferencial Sumador tal como se muestra en la Figura 13:

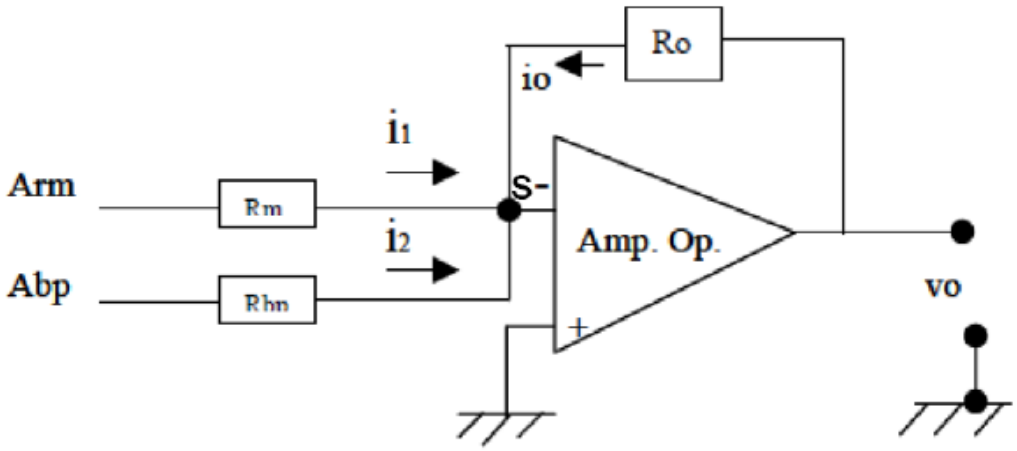


Figura 13, Amplificador Operacional

• El Amplificador Operacional por poseer impedancia de entrada infinita no permite circulación de corriente interna y la que circula, lo hace externamente:

$$i1 + i2 = - io$$

•El Amplificador Operacional posee una amplificación tan grande (teóricamente infinita), que permite considerar a su entrada (S) como una masa o tierra virtual, con lo cual las corrientes pueden ser reemplazadas por:

$$i = V / R \text{ "ley de Ohm"}$$

Reemplazando los valores de corriente por sus equivalentes (i = Voltaje / Resistencia)

$$\frac{Arm}{Rm} + \frac{Abp}{Rb} = \frac{- vo}{Ro}$$

Pasando R_0 al otro miembro:

$$\frac{Ro}{Rm} x\ Arm + \frac{Ro}{Rb} x\ Abp = - vo \qquad \textbf{(II)}$$

Si en la ecuación (II) hacemos que los valores de:

$$\frac{Ro}{Rm} = Mrm \qquad \frac{Ro}{Rb} = Mbp$$

Entonces la ecuación (I) coincide con la (II) y se interpreta así:

La suma pesada (Weighted Sum) del voltaje generado por el acelerómetro de la Masa y el de la Plancha, nos permite obtener un voltaje de igual magnitud y dirección que el de la "Ground Force" pero de sentido opuesto".

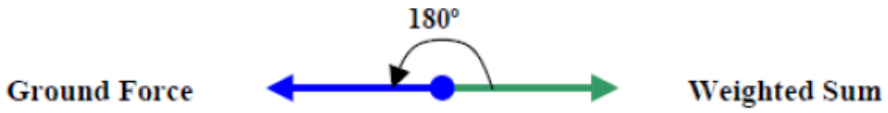


Figura 14: Vector "Weighted Sum" y "Ground Forcé"

Acelerómetros de Masa y de Plancha

En la Figura 15, se ha agregado a la estructura conocida, los acelerómetros de Plancha (Baseplate Accelerometer) y de Masa (Reaction Mass Accelerometer). Los acelerómetros generan voltajes análogos a las aceleraciones que soportan las estructuras donde se encuentran acoplados, estos serán utilizados por el Control Electrónico del Vibrador (ejemplo VCE Pelton VibPro) para obtener la suma pesada de voltajes (Weigthed Sum) con la cual se controlará la "Fase y Amplitud del "Barrido Sísmico".

En general, el Acelerómetro de Plancha es colocado sobre el puente superior que une las columnas laterales del vibrador y que son solidarias con la Plancha, para evitar roturas del cable eléctrico que lo conecta con la Caja electrónica y del mismo acelerómetro. También en un mismo envase se encuentran 2 acelerómetros idénticos, para que sus respuestas sean comparadas, si ambas coinciden (o sus diferencias de amplitud y fase son menores) el Control Electrónico toma como válidas tales respuestas: uno de esos acelerómetros acoplados es utilizado como acelerómetro del sistema: "Loop Accelerometer" y el otro es utilizado en pruebas de similaridad radial y por cable: "Similarity Accelerometer".

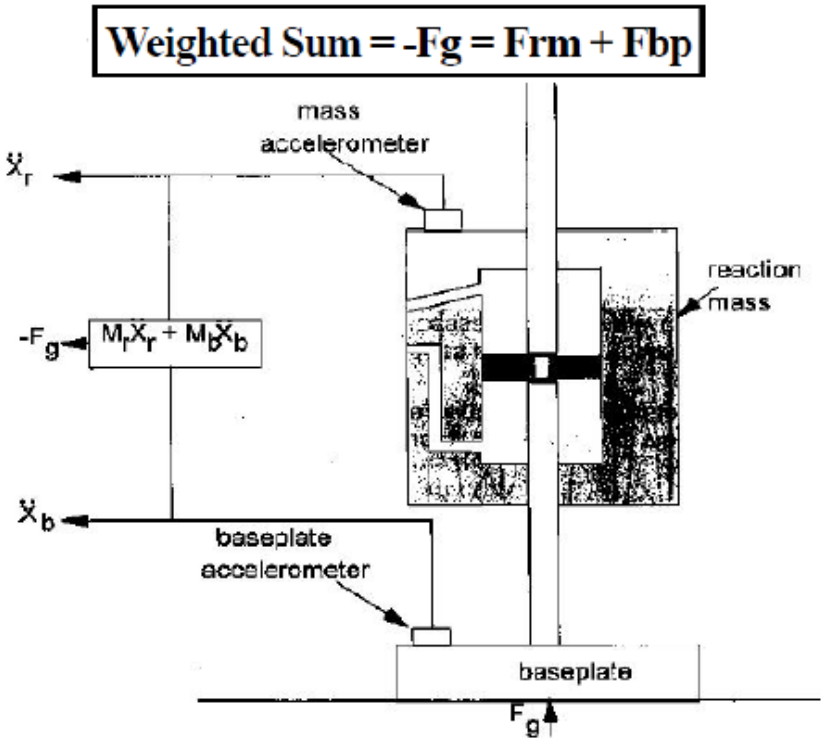


Figura 15: Acelerómetros: "Baseplate & Reaction Mass" [1]

Principales Especificaciones del Vibrador (ejemplo vibro AHV-IV –362 4x4 Buggy)

1. Gross Weight (GVW)

Es el peso total del vibrador y se expresa generalmente en libras (lb) o en kilogramos (Kg) (ver Apéndice "A").

GVW = 63,100 lb. (28622 Kg)

2. **Holdown Weight**

Cuando un Vibrador deposita la Plancha sobre el terreno a vibrar (Plancha y Masa de Reacción), el sistema actuador queda separado estructuralmente del resto de la carrocería del vibrador.

Holdown = Peso de la Masa + Peso de la Plancha + 2 * Presión Lift * Área pistón Lift

3. **Peak Force & Piston Area**

Es la fuerza máxima (teórica) que puede desarrollar el vibrador. Por lo tanto corresponde a la simple multiplicación de la presión diferencial sobre el pistón del actuador por la superficie de dicho pistón.

Differential Pressure: 3000 psi (2069 N/cm2)
Piston Area: 20.6 sq.in (132.9 cm^2)
Fuerza = Presión * Área Pistón actuador
3000 * 20.6 = 61,800 lbfs.(libra fuerza)
Ó 2069 * 132.9 = 275000 Newtons = 275 Kn. (kiloNewton)

4. **Usable Stroke**

"Stroke" es la carrera máxima permitida que podrá desarrollar el pistón del actuador, o sea es el desplazamiento máximo del pistón dentro del cilindro de la masa de reacción. Es "seteado" como un parámetro de la caja electrónica del vibrador:

Mass Stroke: 3.87 in. (9.83 cm) p/vibros 362.

Este valor es limitado a un porcentaje de la carrera total (Usable stroke), que generalmente se elige entre el 70 y el 90 % de dicha excursión, a través de otro parámetro de la caja electrónica:

Usable Stroke: 70 - 90 % (2.71 in. - 3.38 in.) (6.88 cm – 8.85 cm)

Como veremos más adelante, el "usable stroke" es determinante del caudal de líquido hidráulico que circula en la masa de reacción y por lo tanto de diversas ineficiencias del vibrador.

Circuito Hidráulico del Vibrador

La Figura16, muestra un esquema del circuito hidráulico del vibrador.

1. Circuito de Alta Presión (HP: en "azul"): La Bomba Hidráulica inyecta aceite a alta presión (HP = 3150 psi) que recibe de un depósito o acumulador de aceite y que distribuye a través del denominado "Accumulator Manifold" (acumulador-distribuidor)

• Del Manifold sale una derivación hacia la segunda etapa de la Servoválvula o "Válvula Piloto" (Pilot Valve). Antiguamente se interponía un reductor de presión para que la "Pilot Valve" trabajara a una 1000 psi pero las actuales Servoválvulas reciben directamente alta presión. El retorno del aceite de la "Pilot Valve" regresa al "Manifold" de baja presión para luego ser acumulado en el acumulador de baja presión.

• También del HP Manifold sale una segunda derivación que se aplica sobre la tercera etapa de la Servoválvula o "Válvula Principal" (Main Valve) Antes de ingresar a esta válvula el circuito pasa por un Acumulador "In-Line" el cual trata de compensar los transitorios de exceso o falta de presión hidráulica. 2. Circuito Modulador (en "verde"): La "Pilot Valve" modula el caudal hidráulico en función de la amplitud y frecuencia del movimiento que la aguja del "Torque Motor" ejerce sobre ella. A su vez este circuito recibe una realimentación de la salida de la "Main Valve" (realimentación negativa que la convierte en una válvula moduladora de presión) Ídem para el circuito (en color "rosado") del retorno de la "Pilot Valve".

3. Circuito Actuador (en "rojo"): La presión de 3150 psi resulta modulada por la "Main Valve" debido a la presión ejercida sobre los extremos de este otro pistón por el aceite proveniente de la "Pilot Valve". El aceite a la presión modulada ingresa al Sistema Actuador con la polaridad determinada

instantáneamente por el "Barrido". El retorno desde el Sistema Actuador (variando su polaridad de acuerdo al barrido) regresa a la "Main Valve".

4. Circuito de Baja Presión (LP: en "naranja"): El retorno a baja presión (150 psi) desde la "Main Valve", también pasa por un "Acumulador In-Line", similar al de alta presión y con igual actuación regresando al "Accumulator-Manifold" de baja presión.

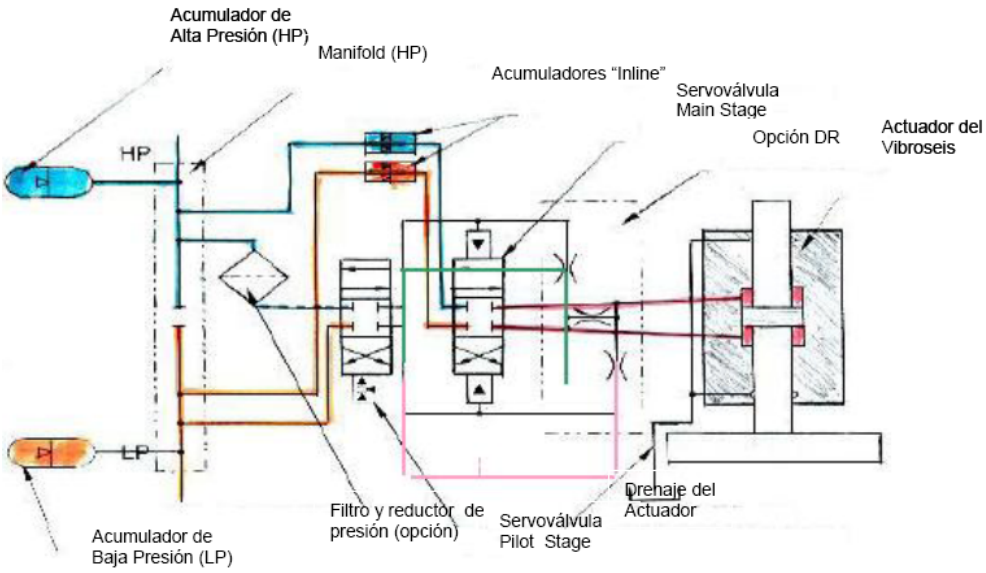


Figura 16, esquema hidráulico básico de un vibroseis [12]

HIDRÁULICA Y ELEMENTOS DEL VIBRADOR

Generalidades sobre Hidráulica y Fluidos

La **Hidráulica** es la rama de la física que se relaciona con el estudio de las propiedades mecánicas de los fluidos. Si bien el término "hidráulica" se refiere al fluido "agua" (proviene del griego "hydor": agua) el término se ha generalizado para cubrir a la transmisión, control de fuerzas y movimientos por medios de líquidos.

Cuando el fluido es el aire comprimido, el término **"neumática"** se aplica a este estudio en particular.
Los vibradores sísmicos utilizan la hidráulica y la neumática como medio de transmisión de energía, empleando como fluido hidráulico: "aceite mineral", en el primer caso y aire comprimido en el segundo caso.
Un Fluido es una sustancia que se deforma continuamente al ser sometida a un esfuerzo cortante, por más pequeño que este sea".
Los fluidos son elementos en estado líquido o gaseoso cuyas moléculas se encuentran débilmente unidas por fuerzas cohesivas y por fuerzas ejercidas por las paredes del recipiente que los contiene. Por lo tanto los fluidos adquieren la forma del recipiente que los contiene (ver Apéndice A, las leyes que rigen la mecánica de los fluidos).

Para las aplicaciones que nos ocupa, solamente consideraremos un fluido ideal, compuesto de una sustancia infinitamente divisible (concepto de continuo).
Entonces el término "fluido" es aplicable a cuerpos líquidos y gaseosos que no presentan resistencia elástica a los esfuerzos tangenciales mientras que los sólidos si lo hacen. En cambio si el esfuerzo es compresivo, tanto los cuerpos líquidos como los sólidos se deforman elásticamente (hasta cierto límite del esfuerzo), para recuperar luego su volumen original, los cuerpos gaseosos siguen sin presentar resistencias ya que sus moléculas son desplazadas con uno y otro tipo de esfuerzo. Se dice entonces que los líquidos ideales no son compresibles y los gaseosos si lo son.

Ejemplo sísmico:

Las Ondas Sísmicas S (Shear Waves u ondas de corte) no se transmiten en el agua pues no producen sobre sus partículas una reacción elástica y la energía es gastada plásticamente en su deformación (desplazamiento lateral), en cambio las Ondas P (Pressure Waves u ondas de presión) si son transmitidas en el agua ya que sus partículas responden elásticamente a la presión hidrostática.

El Vibrador AHV IV como referencia

El Vibrador Sísmico que adoptaremos como referencia, como lo vinimos haciendo hasta aquí, es el AHV IV de la actual ION Corporation. Conceptualmente todo lo que conozcamos de este vibrador es aplicable para todos los otros vibradores de distinta manufactura o modelos.
El AHV IV posee varios sistemas hidráulicos y uno neumático, pero todas las bombas hidráulicas (4 en total) y el compresor de aire, son impulsadas por el mismo motor Detroit Diesel 6-V92 DDEC de 420 caballos de fuerza.
El sistema de circuitos hidráulicos que utiliza el AHV IV para movilizarse (drive hydraulic system), está constituido por 2 bombas Sundstran de desplazamiento variable: una para impulsar un motor hidráulico (Sundstran de desplazamiento fijo) en el tren de tracción delantero (front drivetrains) y otra para impulsar el motor hidráulico ídem al anterior para el tren trasero (rear drivetrains).

El sistema de circuitos hidráulicos que se ocupa de la generación del barrido sísmico (vibrator supply hydraulic system), está compuesto por dos circuitos interrelacionados compuestos por 2 bombas de pistones Denison P7. Estas bombas al unísono son utilizadas en el sistema hidráulico de vibración del vibrador para proveer de un caudal máximo de 156 gpm (galones por minuto). Una de ellas también se emplea para alimentar los siguientes sistemas hidráulicos auxiliares: Dirección hidráulica (steering), Freno de servicio (service brakes), Freno de parqueo (park brakes), Bloqueo de diferencial (differential lock), Motores de los ventiladores de los radiadores de enfriamiento (cooler fan motor circuits), Alimentación para los 2 "lift cilinders".

El circuito neumático es empleado para: Impulsar los engranajes de las cajas de velocidades (gear selector valve and shifting cylinders). Trabar-destrabar el actuador del vibrador para que los "lift cylinders" bajen-suban a este hacia y desde el suelo.

Circuito hidráulico elemental de un vibrador sísmico

Una vez más emplearemos un circuito hidráulico elemental al cual le hemos variado ligeramente su actuador para asemejarlo a un vibrador sísmico. Aquí utilizaremos como fluido "aceite hidráulico" de bajo coeficiente de viscosidad ya que no pretendemos lubricar sino transmitir un caudal hidráulico al cual luego modularemos mediante una "válvula de control (la Servovalvula en el caso del vibrador).

En la figura 17 observamos que para impulsar el aceite proveniente de un "tanque-reservorio" (1), se utiliza una "bomba hidráulica" (2). La presión diferencial creada por la bomba moviliza el caudal de aceite "Q" por la tubería del circuito que pasa por una "válvula de control" (3) que se encuentra totalmente abierta no produciendo ningún obstáculo al movimiento del fluido (no produce caída de presión por aumento de velocidad del fluido). El aceite no tiene otro camino que retornar al tanque-reservorio sin producir ninguna acción sobre el cilindro actuador (4). Este circuito hidráulico se asemeja a un circuito eléctrico donde se cortocircuita la batería. La "válvula de alivio" (5) (release or check valve) no trabaja en este caso ya que no existe diferencia de presión para vencer la fuerza del resorte y bola que obtura este circuito de descarga.

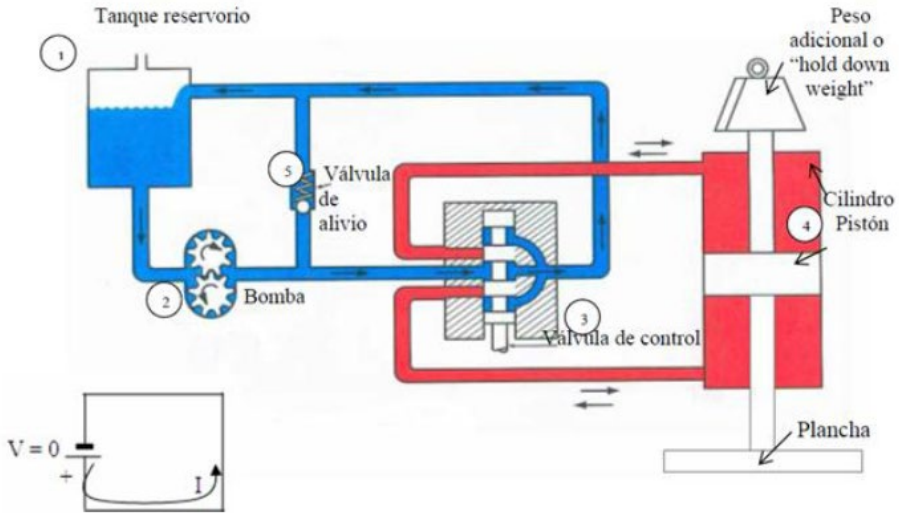


Figura 17, circuito hidráulico en reposo [7]

Observar que a la figura le falta el dibujo de la fuente de energía la cual debe ser producida por un motor que impulsa a la bomba del circuito. Al existir fluido en movimiento también existen roces debido a la viscosidad del fluido contra las paredes e irregularidades de la cañería, por lo tanto habrá caída de

presión ante el gran caudal de aceite que el circuito hidráulico está movilizando.

La válvula de control se encuentra centrada y en reposo cuando no se está ejecutando un barrido sísmico y el circuito hidráulico principal (color azul) es prácticamente un circuito cerrado (loop) que vuelca el aceite de la bomba hacia el tanque para volver a chuparlo y enviarlo hacia la válvula. En el símil eléctrico este es un circuito en corto pero en este caso el caudal Q está limitado en la salida de la bomba de tal manera que la presión en ambos lados de la bomba no es cero.

Durante la ejecución de un barrido de frecuencias, esta situación se presenta dinámicamente cuando el desplazamiento sinusoidal de la válvula de control (o piloto: "pilot valve") pasa por un cruce por cero.
El circuito del sistema actuador (circuito secundario: color rojo) se encuentra totalmente en reposo, por lo tanto la presión hidráulica es la misma en todo punto y no existe ninguna fuerza neta sobre el pistón del cilindro. En esta situación todo el peso del sistema actuador: peso del cilindro y peso pistón + peso adicional (hold down weight), es soportado por la tierra sobre la cual se apoya la estructura del pistón mediante una plancha (baseplate).

Circuito actuador activado

La válvula de control mostrada como (3) en la figura 17, es una válvula de 3 posiciones (posición 1: la central mostrada, posición 2: hacia arriba como se muestra en la figura 18 y posición 3: hacia abajo) y 4 vías (entrada de alta presión P, retorno a tanque T, salida A y salida B). Al desplazarse el embolo de la válvula de control con respecto a su posición central (posición de reposo del circuito), se permitirá la circulación de aceite hacia el actuador: si el émbolo se mueve hacia abajo (Figura 18) se conecta el circuito principal (vía P de la válvula) con el secundario del actuador (vía A) y el aceite ingresa por la parte inferior del cilindro empujando el pistón hacia arriba. A su vez el pistón empuja el aceite de la parte superior del cilindro para que circule hacia la válvula de control (vía B) y regrese al tanque (vía T).

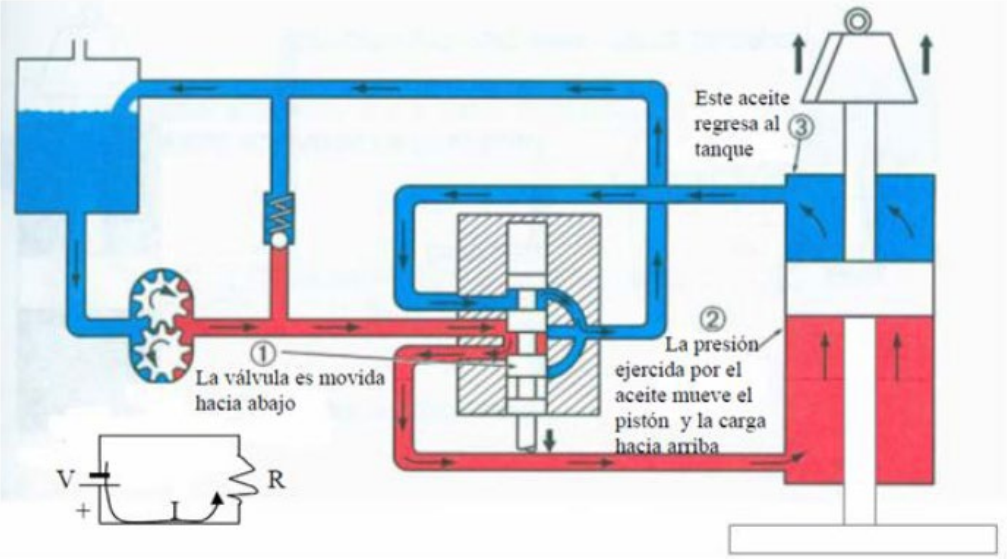


Figura 18, circuito hidráulico activo [7]

Ahora la salida de la bomba se muestra en rojo ya que la presión ha crecido debido a la carga del actuador. Al moverse la válvula hacia abajo (1), circula aceite del circuito principal hacia la parte interior del cilindro empujando al pistón hacia arriba (2). En la parte superior del cilindro el aceite es desplazado hacia la válvula la cual también ha habilitado el camino de este (3) hacia el tanque-reservorio, donde la presión debe ser mínima (de aquí que el color azul identifica al circuito hidráulico de baja presión. En este caso el símil eléctrico es el de una corriente que circula por una carga R donde el voltaje es máximo hacia un lado de la resistencia R y es 0 voltios hacia el otro lado.

La válvula de control del vibrador, es un poco más sofisticada que la mostrada como "válvula de 3 posiciones" ya que adopta diferentes posiciones para un lado y para el otro de su posición central, en función de la amplitud de la señal sinusoidal que le llega desde la caja electrónica. La cantidad de espacio abierto que posee la válvula (como una canilla) es proporcional al caudal Q que esta deja pasar, por lo tanto la válvula controladora en un vibrador es realmente una "válvula controladora de caudal hidráulico.

La fuerza con que el pistón es empujado hacia arriba es proporcional a la diferencia de presión en ambas partes del cilindro por el área de dicho pistón:

$$\Delta P * \text{Área pistón} = \text{Fuerza}$$

Si la válvula deja pasar un caudal proporcional al desplazamiento de su embolo y este es movido sinusoidalmente, la caída de presión sobre el pistón "P" también será proporcional a ese desplazamiento y sinusoidal.

En general se identifica la fuerza máxima teórica que un vibrador puede desarrollar como producto del valor de la presión de la bomba hidráulica por el área del pistón.

Vemos en la figura 18, que a la fuerza ejercida por el pistón se le contrapone el peso de la estructura del cilindro y del mismo pistón que contiene a la plancha y la carga adicional. Si esta fuerza hidráulica supera a la suma de los pesos, la plancha se levantara de la tierra que la soporta.

Por último, si ahora la válvula se mueve hacia arriba, se invertirá el sentido de ingreso del aceite en el cilindro y la presión ejercerá una fuerza neta del pistón hacia abajo y será ahora la parte del cilindro inferior la que habilita la válvula para retornar el aceite al tanque-reservorio. El símil eléctrico será similar al mostrado en la figura 18 pero con los bornes de la batería "V" invertidos y por lo tanto la corriente "I" circulando en forma inversa.
La fuerza hidráulica ejercida coincide ahora con el sentido de acción de los pesos de las estructuras y el peso adicional, debiendo el terreno soportar la suma de todas estas fuerzas para que la plancha no se hunda en él.

Ejercicio: Calcular la fuerza pico del vibrador AHV-IV.
Los datos son los siguientes:
Presión de la bomba: 3000 psi (21428 KPa)
Área del pistón del actuador: 20,6 inch2 (132,9 cm2)

Peak force (fuerza pico) = $3000 \frac{lb}{in^2} * 20.6\ in^2 = 61800$ lb = 275 KN

La Servoválvula

La Servoválvula es el transductor eléctrico-hidráulico del vibrador y uno de los principales responsables de la performance del vibrador. La Servoválvula está constituida por 3 etapas diferentes:

1. Motor de Torque (Torque Motor)
2. Válvula Piloto (Pilot Valve)
3. Válvula Principal (Main Valve) (con o sin: "DR" enhancement)

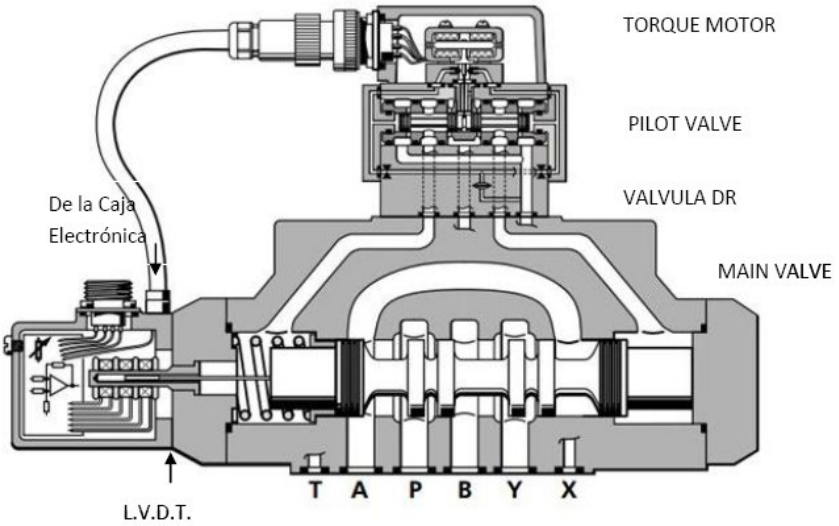


Figura 19: Servoválvula con realimentación de presión

Primera Etapa: el "Motor de Torque" (Torque Motor) [4]

El Controlador Electrónico (ejemplo: VibPro Pelton), excita con su señal eléctrica (barrido más otros voltajes sumados a este para mejorar la respuesta del vibro), a la Primera Etapa de la Servoválvula: "Torque Motor" (ver Figura 15).
El "Torque Motor" está constituido por una doble bobina (generalmente conectada en paralelo) donde se generan variaciones magnéticas análogas al Barrido eléctrico que se distribuyen en su circuito magnético. Este electroimán posee entre sus piezas polares una armadura ferro magnética que es movida mecánicamente entre sus polos norte y sur, convirtiendo la energía eléctrica recibida en una fuerza magneto-motriz. Solidariamente a la armadura, se encuentra un tubo que se desplaza solidariamente con la armadura y oficia de modulador de caudal hidráulico al desbalancear la presión diferencial sobre la "Pilot Valve". El extremo del tubo anterior se encuentra adosada una aguja elástica plástica que encastra en una ranura de la "Válvula Piloto", y que oficia de cupla antagónica (ver figura 20).
Segunda Etapa: la "Válvula Piloto" (Pilot Valve)

Como se ve en la figura 20, el tubo solidario con la armadura del electroimán, al desplazarse hacia la derecha, tiende a obturar la salida del aceite por el circuito derecho de la válvula y, por el contrario, tiende a abrir el circuito izquierdo, creando una "Presión Diferencial" sobre los extremos de la Piloto que la hace mover hacia la izquierda de su posición central, cuanto mayor es el voltaje eléctrico aplicado sobre el "Torque Motor" mayor es el desplazamiento de la "Pilot Valve". Si esta pequeña válvula no es desplazada de su posición de equilibrio, entonces esta debe encontrarse centrada sobre su cilindro de desplazamiento, obturando completamente los orificios de entrada de líquido hidráulico "Ps" (en este caso la presión diferencial = 0).

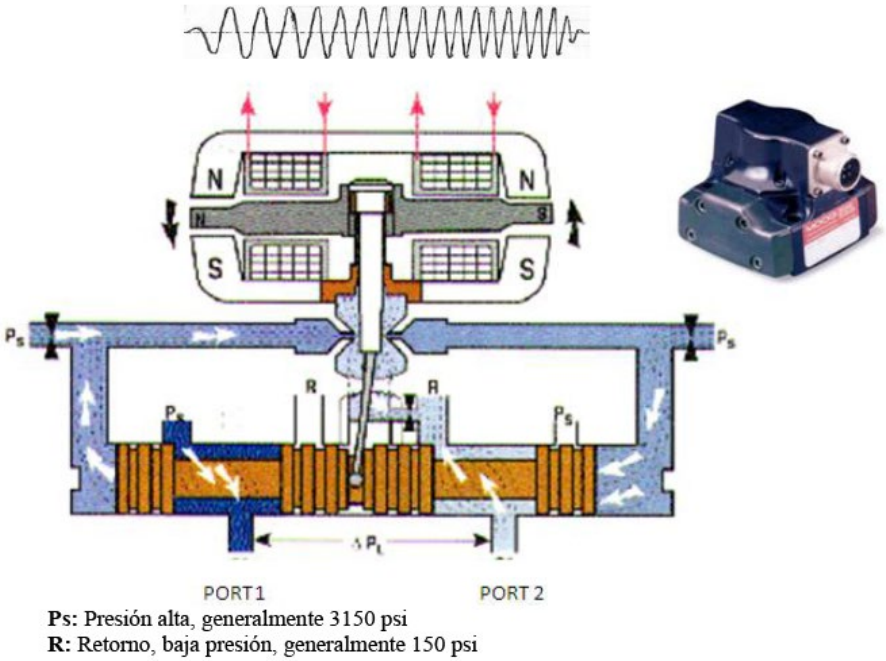


Figura 20, Torque Motor y Pilot Valve [4]

Como la señal eléctrica, origen de nuestro barrido de frecuencias, es sinusoidal, el sentido del desplazamiento se invierte en cada semiciclo.

El desplazamiento del pistón o "Spool" de la Válvula Piloto (Pilot Valve), modula el caudal hidráulico proveniente de la bomba y que ingresa por los orificios "Ps" (Press Supply) de la figura 20. Como se ve en dicha figura, la válvula se muestra desplazada ligeramente hacia la izquierda, permitiendo que el aceite hidráulico ingrese al orificio "Port 1" con un caudal proporcional al desplazamiento de la "Válvula Piloto". Como se ve, el otro orificio "Psi" de las mismas dimensiones, pero ubicado sobre la mitad derecha de la "Piloto Valva", se encuentra totalmente obturado durante este presumible hemiciclo de un barrido (ídem para el orificio de retorno "R" sobre la mitad izquierda). El retorno del caudal a la válvula piloto se realiza a través del orificio "Port 2" y circulará hasta el orificio "R" (mitad derecha) de regreso a la Bomba Hidráulica.
Los dos orificios anteriores orificios "Port 1" y "Port 2", ingresan a la Tercera etapa de la Servoválvula, la "Maine Valva".

Tercera Etapa: la "Válvula Principal" (min vale)

La "Main Valve" (Ver Figura 21) está constituida por un pistón mayor que la "Pilot" y será desplazado análogamente a la diferencia de presión provocada en sus extremos por la "Pilot Valve" (ya que se encuentran vinculadas a través de los orificios "Port 1 y Port 2". El desplazamiento de la "Main Valve" dependerá del caudal hidráulico introducido desde la válvula piloto, que crea una presión diferencial sobre los extremos de la válvula principal que la hace desplazar. En la figura 21 la "Main Valve" se ha desplazado hacia abajo y ha suministrado un caudal hidráulico al cilindro

superior de la masa de reacción proporcional al desplazamiento de esta válvula. El retorno hidráulico a la Servoválvula se producirá por el orificio que conecta a esta con el Cilindro Inferior de la Masa y seguirá su camino hacia la conexión de baja presión de la Bomba.
La "Pilot & Main Valves" constituyen un amplificador hidráulico. La Presión de entrada a la válvula piloto "Ps" puede ser de menor valor que la "HP" que alimenta a la válvula principal (no es nuestro caso).

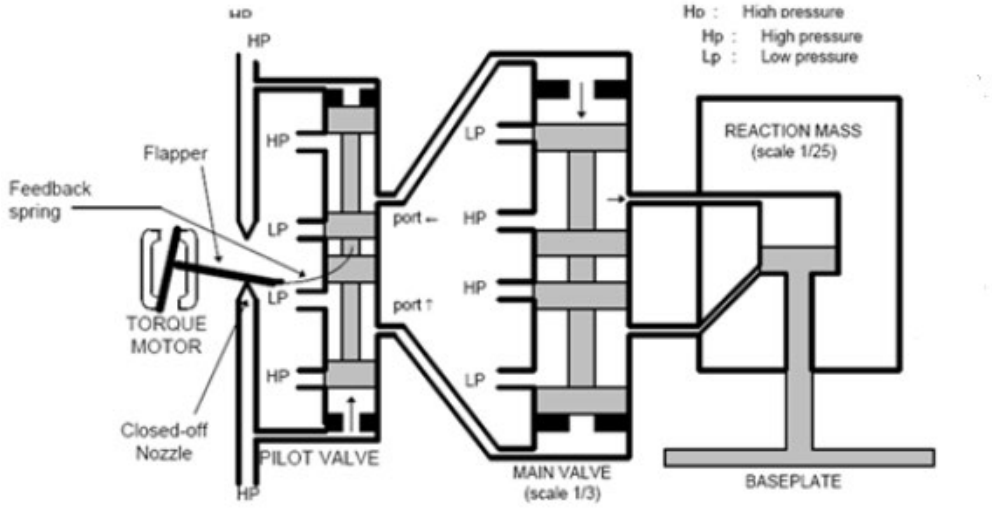


Figura 21: "Main Valve", Tercera Etapa de la Servoválvula: la "Válvula Principal" [7]

En la "Main Spool Valve" (el pistón de la válvula principal) y solidario a él, se encuentra enroscada una varilla plástica y que en su otro extremo posee una pieza magnéticamente permeable. La pieza permeable se desplaza en el interior de un transformador eléctrico, solidario al cuerpo de la servoválvula, cortando líneas de flujo magnético entre primario y secundario transformándose en un "sensor de desplazamiento" o "Valve LVDT" (conocer la posición de esta válvula permite, dentro de ciertos límites, que el Controlador Electrónico utilice al secundario del LVDT como voltaje de realimentación negativa: para centrar a la válvula automáticamente, para mejorar la respuesta instantánea del actuador y para fines de calibración). También y emparentado con la calibración, al conocer la cantidad de desplazamiento de la "Válvula Principal", se podrá acotar la carrera (usable stroke) de la misma, para que no golpee sobre sus extremos y/o para mejorar la respuesta del vibrador.
Como veremos cuando tratemos sobre el Controlador Electrónico, existe otro L.V.D.T. (Lineal Voltage Differential Transformer) similar al de la Válvula, colocado entre la estructura de la Plancha y la Masa, para sensar la posición del Pistón Actuador (solidario a la plancha) relativo al cilindro donde él actúa (perteneciente a la Masa de Reacción) El voltaje análogo a este desplazamiento relativo también se suma como realimentación negativa para mejorar la respuesta inercial del sistema actuador.
Considerábamos que la servoválvula modulaba el caudal hidráulico "Q" en función análoga a la corriente eléctrica de entrada al "torque motor" (barrido o "Pilot Sweep). Así descripta estaríamos refiriéndonos a una Servoválvula

Controladora de Flujo y que produce una variación de velocidad en el sistema actuador (la plancha o "baseplate") proporcional al flujo hidráulico. Por lo tanto si hablamos de flujo producido en un período de tiempo estamos diciendo que dicho flujo es proporcional al desplazamiento de la plancha sobre el terreno.

Manifold DR (DR Enhancement), no utilizado con electrónica Sercel

Una sencilla y genial modificación en la Servoválvula ha permitido un gran avance en la performance del vibrador. Dennis K. Reust fue el descubridor de la "Servoválvula Moduladora de Presión" (presentada en Mayo de 1991 ante la 53 reunión de la EAEG en Florencia, Italia). De allí las siglas "DR" en la mencionada servoválvula. Son tan significativas las ventajas obtenidas que ahora el Controlador Electrónico produce correcciones someras para mantener la amplitud y la fase de la "Ground Force" estable para todo el rango del barrido. Esto merece un capítulo especial en donde aprovecharemos a tratar las ineficiencias del vibrador.

La Servoválvula Controladora de Presión producirá una diferencia de presión sobre el pistón del actuador, proporcional a la corriente de entrada al "Torque Motor" prácticamente independiente de los cambios en la impedancia del terreno.

Como vemos en la Figura 22, los puertos de salida hacia la "Reaction Mass" C1 y C2 en la "Main Valve" (tercera etapa de la Servoválvula), son vinculados con los puertos de entradas IN1 y IN2 respectivamente por intermedio de cavidades practicadas sobre el mismo cuerpo de esta etapa y por un cuerpo adicional intercalado entre esta etapa y la "Pilot Valve" (denominado "Manifold").
Si por una mayor presión hidráulica en "IN1" respecto a "IN2" el pistón de la válvula principal se mueve hacia la derecha, un porcentaje de la presión alta de la bomba, presente en el puerto "P", se aplicará sobre el puerto de salida "C2", y por lo tanto al actuador o cilindro de la masa (ídem para el circuito de baja presión en puerto "R" que se conecta a el puerto "C1") A su vez un porcentaje de la presión alta sobre "C2" es realimentado sobre el circuito de entrada "IN2" (ídem para "C1" con "IN1") donde las presiones son sumadas algebraicamente. Las presiones realimentadas negativamente permiten obtener un pequeño porcentaje de presión de reacción opuesta a la presión original (observar que a la presión original en "IN1" ("IN2") se le resta la presión realimentada desde "C2" ("C1").
La Servoválvula Controladora de Flujo con el mecanizado mostrado se ha transformado en una Servoválvula Controladora de Presión. Ahora la presión realimentada tiende a mantener cerrada la servoválvula por lo que será necesario aplicar corriente eléctrica a la entrada para lograr superar esta; cuanta más corriente eléctrica apliquemos a la entrada, mayor presión estaremos aplicando sobre el actuador.

Como la presión diferencial sobre el pistón del actuador por el área de dicho pistón, es, dentro de ciertos límites de frecuencia de barrido, la fuerza efectiva ejercida sobre la tierra por la plancha, podemos afirmar que la Servoválvula está controlando el "Ground Force". La diferencia entre la fuerza actuadora y el "Ground Force" ahora no es significativa como sucedía con la antigua servoválvula ya que el pistón de la masa se acelera de manera más estable para un mayor rango de frecuencias de barrido. Por lo tanto como la "Ground Force" es mucho más linealmente dependiente de la corriente eléctrica de entrada, la respuesta de fase es mucho mejor que la obtenida hasta entonces.

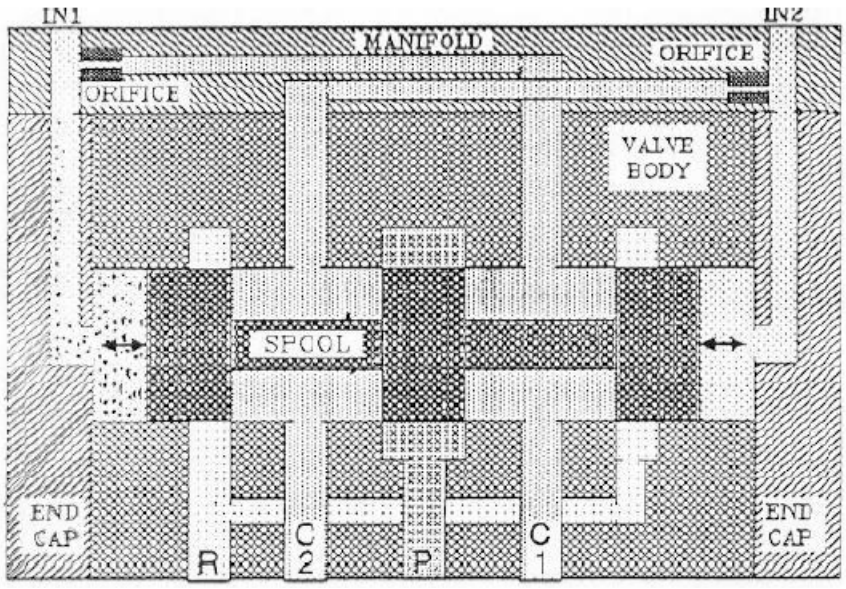


Figura 22, Servoválvula "DR" con realimentación negativa de presión [6]

La realimentación de presión podría haberse realizado sobre otros puntos tales como: "Pilot Valve' o "Torque Motor" o convertido en corriente eléctrica y realimentado en la "Summing Junction" del Controlador Electrónico (junto con las realimentaciones de L.V.D.T. de Válvula y Masa). Pero cada etapa agregada al actuador introduce "retardos" de tiempo en la respuesta del lazo de realimentación, reduciéndose el ancho de banda del sistema. El camino más corto y con el menor "delay" proporciona la mejor performance en un lazo de realimentación y así sucede con la Servoválvula "DR" donde la presión del actuador se vincula a través de orificios de corto recorrido con la presión diferencial de entrada a la válvula principal.

Sensores de Desplazamiento L.V.D.T. (Lineal Voltage Differencial Transformer)

Estos sensores permiten conocer la posición de la "Válvula Principal" de la Servovalvula y de la "Masa de Reacción respecto a la Plancha" en todo momento.
Los Voltajes generados por tales desplazamientos, son parcialmente "realimentados negativamente" sumándolos con el barrido corregido en fase

y en amplitud, proporcionando al sistema completo una gran estabilidad en su respuesta.
Cada LVDT puede ser considerado como un Transformador cuyo primario es alimentado por una señal sinusoidal de mucho mayor frecuencia que la del barrido sísmico (en Pelton dicha frecuencia es de 4 Khz.).

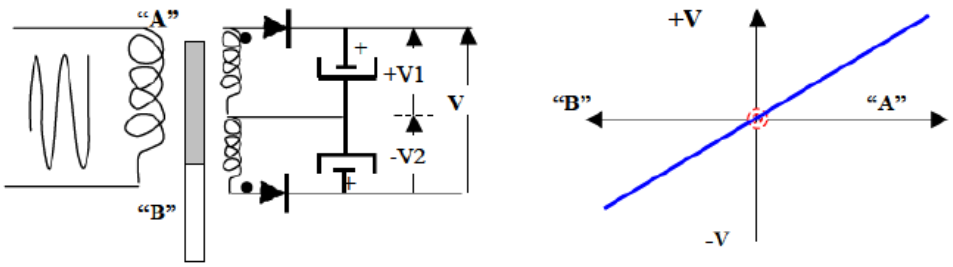


Figura 23, LVDT: Circuito Eléctrico y gráfico con el Elemento Permeable Centrado [2]

En la Figura 23 se muestra un esquema básico del funcionamiento de una LVDT. La señal alternada que alimenta al primario del transformador, genera un flujo magnético que se induce sobre el bobinado de su doble secundario; el voltaje inducido sobre cada secundario, depende de la ubicación del elemento permeable que se encuentra en el camino del flujo magnético. En la figura, el elemento permeable se encuentra exactamente centrado con respecto al doble secundario, generando voltajes de igual amplitud pero de polaridades opuestas sobre los Capacitores, por lo tanto el Voltaje de Salida es:

$$V = V1 + (- V2) = 0$$

Si la varilla que contiene al elemento permeable se desplaza hacia el lado "A", el voltaje "V1" será más grande que el "V2" y entonces el voltaje de salida será "positivo".
De manera contraria si la varilla se desplaza hacia el lado "B" el voltaje "V2" será mayor que el de "V1" y por lo tanto el voltaje de salida será negativo.
En todas los Controladores Electrónicos, los voltajes generados por las LVDT de Válvula y de Masa, se utilizan para el "auto calibración del Vibrador". Solamente el Operador del Vibrador deberá informar a dicha VCU, si la Masa se encuentra "arriba o abajo" (para definir la polaridad de medida).
Cuando no estamos ejecutando un barrido, las LVDT permitirán centrar, por "realimentación negativa", tanto a la "Main Valve" como a la "Reaction Mass" ya que un desplazamiento de la varilla de su centro, generará un voltaje eléctrico que la VCU sumará parcialmente y con polaridad opuesta a los "0 Voltios" del barrido. Este voltaje aplicado al "Torque Motor" de la Servoválvula generará un flujo hidráulico que desplazará a la "Main Valve" (y por lo tanto también al Pistón del Actuador) compensando al desplazamiento original dinámicamente.

Nota: Todo lo anterior es válido dentro de límites de corrientes eléctricas de realimentación pequeñas ya que cuando los requerimientos son importantes, tanto la LVDT de Servoválvula como la de Masa deberán ser ajustadas mecánicamente hasta centrarlas lo mejor posible (que se logra cuando los valores de realimentación sean mínimos).

Acumuladores (Bladders)

Los fluidos líquidos son prácticamente incompresibles pero los fluidos gaseosos pueden ser comprimidos con facilidad. Aprovechando esta propiedad y recordando la Ley de Boyle (ver Apendice A): "La presión absoluta de un gas confinado en un recipiente varía en forma inversa a su volumen, cuando la temperatura permanece constante", podemos entender el concepto de "Acumulador Hidráulico" que el AHV IV dispone tanto en el sistema de alta presión como en el de baja.

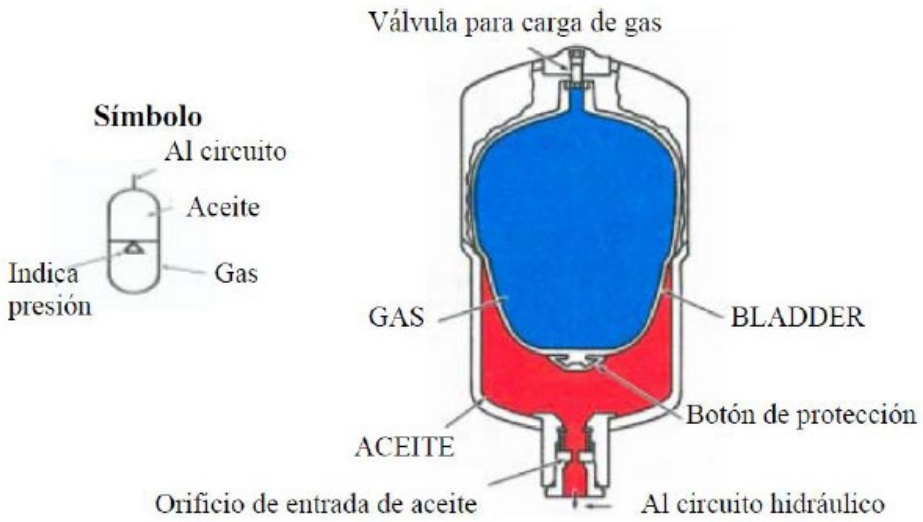


Figura 24, Acumulador de presión hidráulica [13]

En los vibradores el gas contenido en los "bladders" es Nitrógeno, que cumple bastante bien con la Ley de Boyle: "si la presión ejercida por el circuito hidráulico en contacto con el "bladder" que contiene al gas aumenta, el volumen del gas disminuye conservando constante el producto "presión * volumen". De esta manera el acumulador absorbe cambios bruscos de presión en el circuito.
El Acumulador de Alta Presión deberá cargarse a la mitad de presión que la salida de alta de la Bomba (generalmente la presión de alta en los AHV IV es de 3150 psi, por lo tanto la presión de Nitrógeno en el Acumulador deberá ser de 1550 psi, aproximadamente).
También el Acumulador de Baja Presión deberá cargarse el Nitrógeno a la mitad de la presión de la salida de baja presión de la Bomba (generalmente la presión de baja es de 150 psi, entonces el Nitrógeno en el Acumulador de Baja deberá esta en 75 psi).

Generalmente existen "bladders inline" (dentro de la Masa de Reacción) tanto en el circuito de alta como en el de baja. Las presiones a cargarse en estos mini-acumuladores deberán ser iguales a los mencionados.
En la figura 29 se muestran algunos ejemplos de las propiedades de los acumuladores en los circuitos hidráulicos:

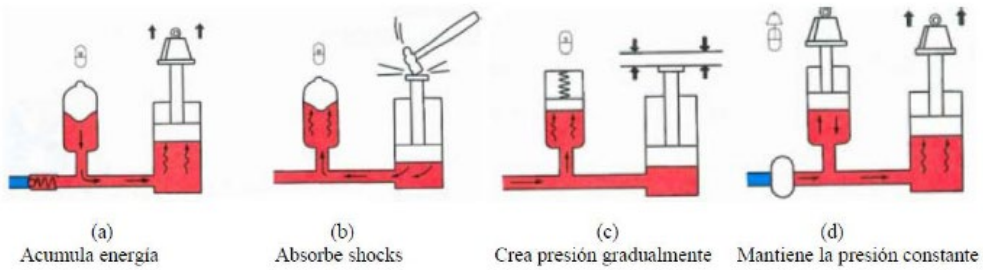


Figura 25, distintas propiedades características del acumulador hidráulico [13]

Concepto de bomba y motor hidráulico

Bomba de engranajes

Para entender cómo trabaja una bomba hidráulica, expliquemos como funciona una bomba de engranajes tal como la mostrada en las figuras 17 y 18 y vuelta a dibujar en la figura 26.



Figura 26, bomba de engranajes {4]

La bomba de engranajes exteriores, es una de las más populares bombas de caudal constante. En la Figura 26 vemos que esta bomba está formada por dos piñones dentados iguales y acoplados que giran en la dirección mostrada con un cierto juego y dentro de un cuerpo estanco. Uno de los piñones es impulsado por un motor externo y el otro piñón es conducido por el primero.

De acuerdo al movimiento de los engranajes mostrado en la figura, la entrada de aceite es (1) ya que los dientes de los engranajes al girar se apartan produciendo una presión negativa con respecto a la presión atmosférica en que se encuentra el aceite en el reservorio; por lo tanto el aceite es subsionado

por esta bomba. Los engranajes impulsan el aceite entre sus dientes y la carcasa hacia la salida (2).

En el área de salida (2), los dientes de los engranajes se vuelven enfrentar y expulsan el aceite que han movilizado desde (1) hacia la tubería del circuito al cual se encuentra la bomba acoplada.
Por supuesto que esta bomba posee varias limitaciones para ser usada en vibradores: su caudal depende de su tamaño y de las revoluciones a que giran sus engranajes, su caudal sufre de pulsaciones que limitan la presión de trabajo, etc. pero sirve para entender el concepto de bomba.

Bomba de pistones de desplazamiento axial variable (axial-pistón variable displacement pump)

Tanto las bombas Denison P7 como las Sundstrand, son bombas de pistones de desplazamiento variable, que pueden cambiar su caudal hidráulico (manteniendo la presión de salida constante) de acuerdo a las exigencias del circuito hidráulico.
La Figura 27 muestra un esquemático de esta bomba.

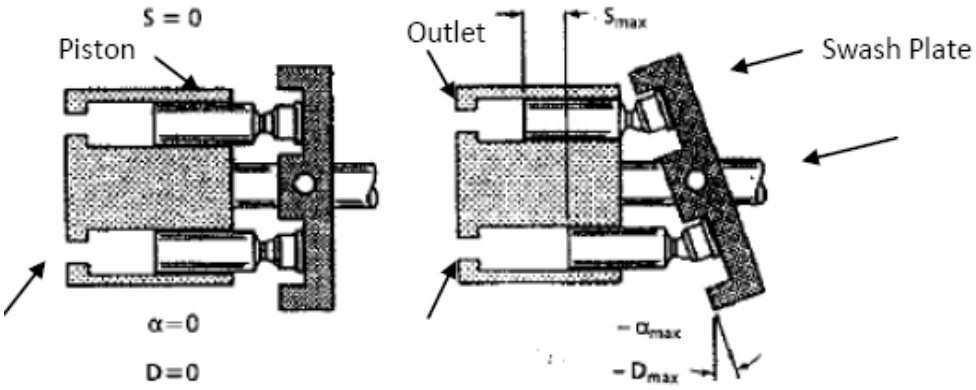


Figura 27, bomba de pistones axiales [11]

En las bombas de pistones axiales, el block de cilindros (cylinder block) y el eje impulsor (drive shaft) se encuentran alineados. Los pistones se mueven paralelo al eje sobre una plato inclinable (swash plate) que contiene a los pistones mediante unos anillos (retracting rings) donde descasan las cabezas de los mismos (piston shoes). Cuando la placa no se encuentra inclinada, no existen posibilidades de aspirar ni descargar aceite ya que no se producen diferencia de presiones en el interior de la bomba, por lo tanto el caudal es "0". Cuando la placa comienza a inclinarse (parte derecha del dibujo) y debido a la rotación de la misma arrastrando la cabeza de los pistones, estos últimos alternativamente van saliendo y entrando de sus cilindros permitiendo el proceso de aspiración (se desplazan los pistones hacia su máximo recorrido) y descarga (los pistones regresan a su recorrido 0). Como

se ve se trata de una bomba de caudal variable y dependiente del grado de inclinación de dicha placa.
En la figura 28 se muestra la bomba completa que incluye el sistema compensador de presión (pressure compensator) y la bomba de carga (low pressure pump or charge pump).

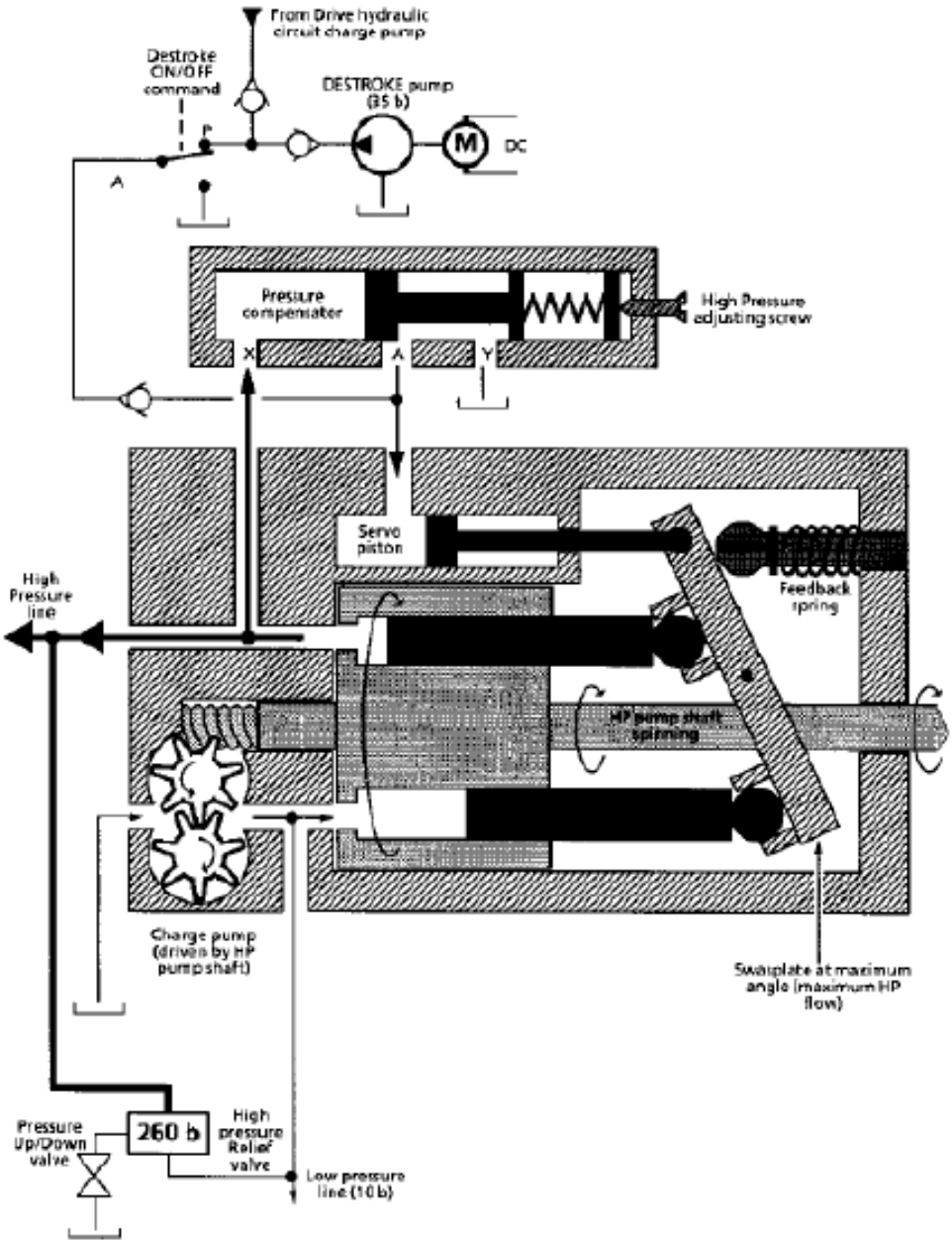


Figura 28, bomba y compensador de presión [11]

El propósito del **compensador de presión**, es el de modificar el caudal hidráulico de salida de la bomba, modificando el ángulo de inclinación del plato en función de los requerimientos del circuito. La entrada "X" al compensador sensa la presión del circuito de alta (HP), cuando esta es suficientemente baja, el pistón interno (spool valve) es impulsado por su resorte bloqueando la puerta "A" y vinculándola con la puerta "Y" que se

encuentra conectada al tanque reservorio; entonces el pistón del servo (Servo Piston) permite que el plato sea empujado a su inclinación máxima proveyendo de máximo caudal hidráulico al circuito.
Cuando la presión en "X", aumenta la válvula del compensador es empujada contra su resorte, "A" queda conectada con "X" y el pistón del servo es empujado para enderezar el plato y bajar el caudal de salida de la bomba.

El propósito de **la bomba de carga** (charge pump), es el de generar la presión de salida de baja de la bomba (LP), para mantener los pistones estables sobre sus cabezas contra los anillos del plato. Esto se logra mediante una bomba de engranajes, propulsada por el mismo eje impulsor, que fija la presión de entrada a la bomba (LP) a un valor de 110 psi (12 bares). Esto evita cavitaciones en el circuito permitiendo que la bomba trabaje a mayores revoluciones. El control del buen funcionamiento de esta bomba es realmente importante ya que es causa de rotura de la bomba.

La figura 29 corresponde a una fotografía de la placa motriz de la bomba Denison P7, donde se aprecia un cierto grado de inclinación de la placa y donde se ven los 7 asientos de apoyo de las cabezas de los 7 pistones (no mostrados en la foto) que componen a esta bomba.

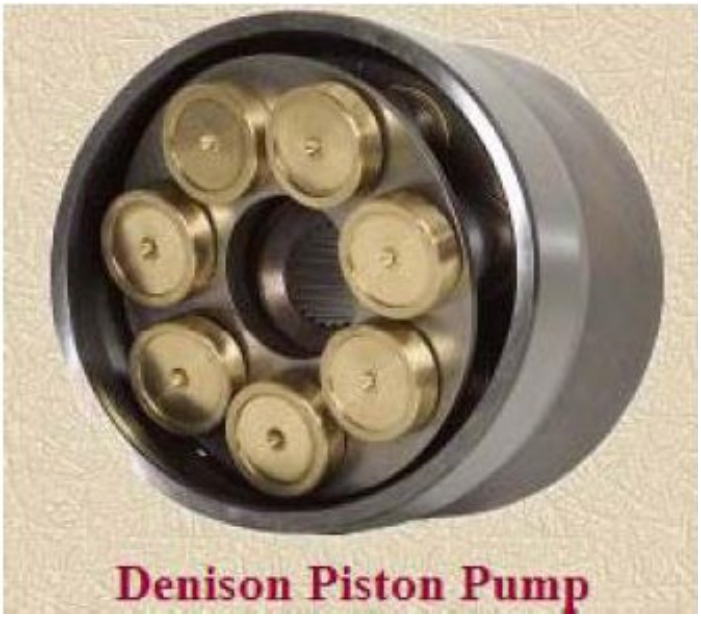


Figura 29, bomba de pistón Denison [11]

Con el concepto de la bomba de engranajes, resulta muy fácil entender el concepto de motor hidráulico, invirtiendo el proceso: ingresa fluido hidráulico por un extremo que hace mover los engranajes haciéndolos rotar y desplazando fluido hacia el otro extremo.

Las bombas y motores hidráulicos se simbolizan con los siguientes esquemas:

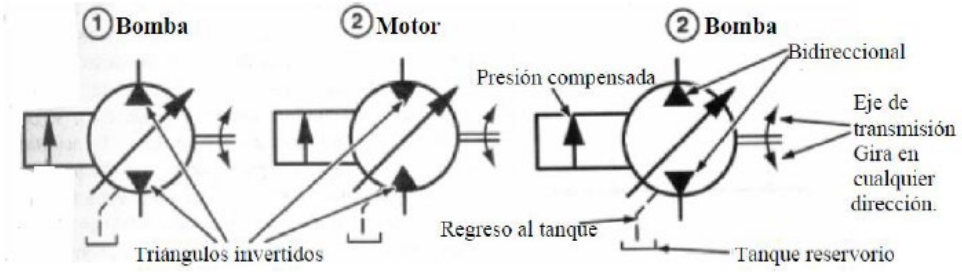


Figura 30, símbolos esquemáticos de las bombas y motores hidráulicos [13]

Válvulas hidráulicas

El AHV IV y demás Vibroseis, está compuesto por gran cantidad de válvulas de variadas características utilizadas para controlar y dirigir el flujo hidráulico del vibrador. Algunas de estas válvulas son o pueden ser comandadas manualmente aunque la mayoría de ellas se comandan mediante mecanismos servo o electro-hidráulicos y algunas también electro-neumáticos.

De acuerdo a la Norma DIN/ISO 1219, según su función, las válvulas se subdividen en 5 grupos:

1. Válvulas de vías o distribuidoras.
2. Válvulas de bloqueo
3. Válvulas de presión
4. Válvulas de caudal
5. Válvulas de cierre

Válvulas distribuidoras

Estas válvulas determinan el camino que debe seguir el fluido, pueden ser de una o varias vías. Habíamos visto que la Servoválvula, o válvula de control, es una válvula de 4 vías y 3 posiciones.
Para representar a estas válvulas, se recurre a esquemas internacionales que la representan en cuando a su función, no así en las demás características de la misma.
Las posiciones de las válvulas se representan por cuadrados, cuantos cuadrados posea el dibujo tantas posiciones dispone dicha válvula.

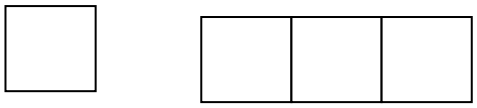


Figura 31, válvula de 1 y 3 posiciones respectivamente [13]

El funcionamiento de las válvulas se representa esquemáticamente en el interior de cada posición.
En la figura 32 se muestra una válvula de 2 posiciones y 2 vías (entrada y salida) que se encuentra normalmente abierta pues no se ha movido la

palanca de comando (cuadrado de la derecha: posición de flujo bloqueado). Cuando se desplaza la palanca contra el esfuerzo del resorte, el cuadrado de la izquierda (posición de circulación) se desplaza hacia la derecha habilitando el pasaje de fluido entre la entrada y la salida.

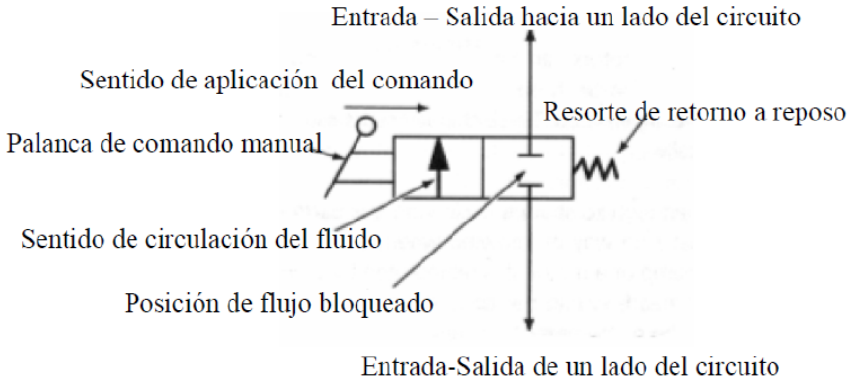


Figura 32, esquema de una válvula distribuidora de 2 posiciones 2 vías [13]

Una válvula muy utilizada en los "manifold" o distribuidores hidráulicos del AHV IV, es la denominada "cartridge valve", que es una válvula de 2 posiciones y 2 vías tal como la mostrada en la figura 32 y son comandadas eléctricamente desde el tablero de control de la cabina del AHV IV (dashboard control and indicators modules), permiten habilitar determinados circuitos hidráulicos.

Válvulas de bloqueo (check valves)

Son válvulas que generalmente permiten el paso del fluido en una determinada dirección, entre ellas se encuentran las denominadas:
"Release valve" (válvula de alivio): que son empleadas en su mayoría para proteger el circuito hidráulico de presiones anormales, ya que se habilitan automáticamente cuando una diferencia de presión determinada supera la fuerza sostén del resorte que mantiene una bola especial obturando la entrada con la salida y bajando inmediatamente la presión alta al valor de la baja presión establecida.

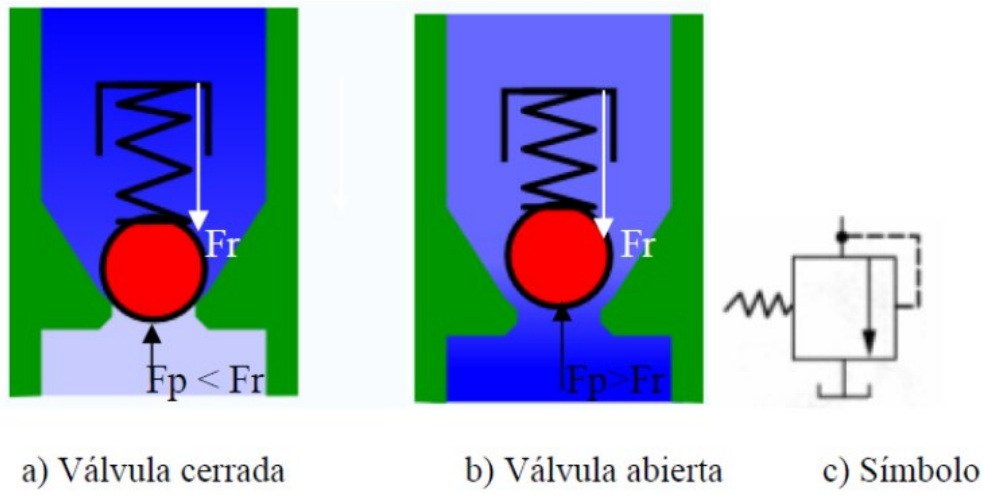


Figura 33, válvula de alivio mostrada en sus 2 estados [13]

Válvulas reguladoras de presión

Estas válvulas, como la mostrada en la figura 34, permiten regular la presión en un determinado circuito hidráulico mediante un simple ajuste de un tornillo regulador.

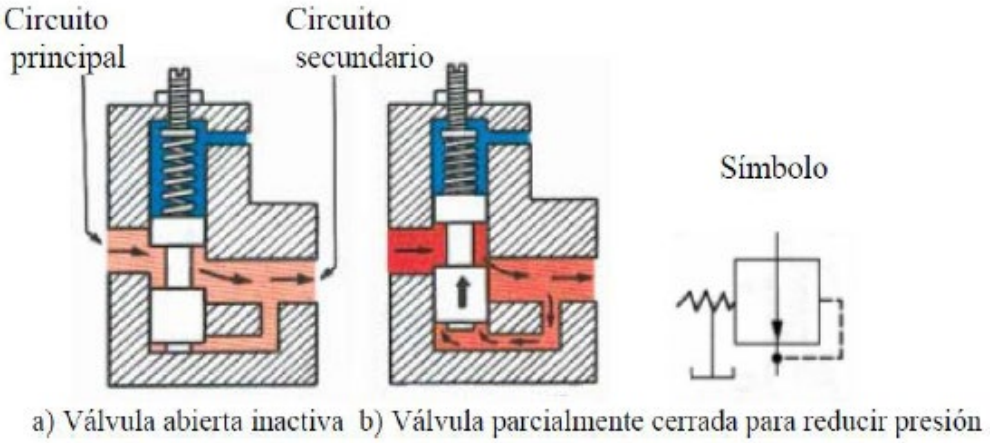


Figura 34, Válvula reguladora de presión [13]

El circuito de los "lift cilinders", que deposita el sistema actuador y aplica el "holdown weight" sobre la plancha del vibrador y terreno, está compuesto por dos cilindros hidráulicos que poseen una válvula reguladora de caudal como la mostrada para reducir la presión de bomba de 3200-3000 psi a aproximadamente 2000 psi, que es la presión necesaria para colocar en el AHV IV un peso de 60000 lb de la plancha sobre el terreno (hold down weight).

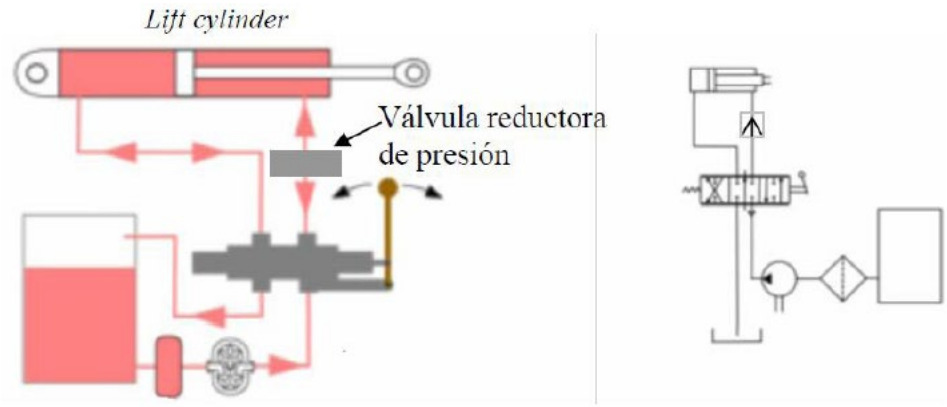


Figura 35, Circuito representativo de uno de los dos "lift cylinders" [13]

Válvula reguladora de caudal

También varios circuitos del AHV IV poseen válvulas reguladoras de flujo hidráulico, también el circuito anterior de los "lift cylinders".

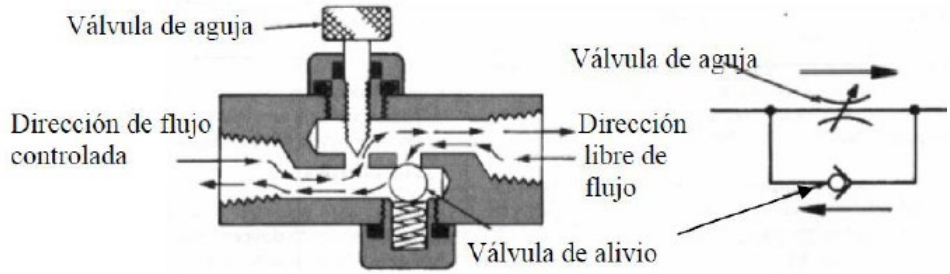


Figura 36, válvula reguladora de caudal a aguja y válvula de alivio [13]

INEFICIENCIAS DEL VIBRADOR

Introducción:

En la introducción de la primer parte de este capítulo, habíamos definido a los vibradores como "una fuente de energía alternativa al empleo de explosivos" y allí empezó la complejidad de comenzar a explicar cómo se genera esa energía equivalente, la necesidad de utilizar varias unidades simultáneamente, de repetir los barridos para una misma posición (sumas). También hemos evitado considerar al terreno vibrado como una variable importante en la respuesta a obtener, este generalmente no es plano y varía de un lugar a otro su rigidez y su viscosidad. La compresibilidad del aceite hidráulico, las pérdidas de aceite (leakage) que se producen en el sistema, son otros factores que concurren a que las ecuaciones obtenidas sean solo aproximaciones a la verdadera "Ground Force".
En esta tercera parte identificaremos a muchos de estas deficiencias para conocerlas y tratar de minimizarlas mediante el buen empleo de nuestra herramienta: "el vibrador sísmico".

Disferencias entre la "Weigthed Sum" y la "Ground Force"

En el desarrollo matemático anterior, se ha supuesto que: la Masa de Reacción y la Plancha son cuerpos rígidos; veremos más adelante como la Plancha sufre flexiones y otras deformaciones debido a su falta de rigidez.

Zhouhong Wei de ION Geophysical Corporation, publicó en el "Leading Edge" de Agosto de 2009, una experiencia realizada con sus vibradores AHV IV, donde obtiene una verdadera "Ground Force" (en verde en la Figura 28) midiendo, mediante el uso de celdas transductoras de fuerza (Load Cells) colocadas debajo de la Plancha del vibrador, para comparar esta fuerza con la calculada "Weighted Sum", mediante los acelerómetros de Masa y de Plancha del vibrador (en azul en la figura). Si bien esta experiencia es relativa y varía de acuerdo son la superficie vibrada y el grado de rigidez de la Plancha, podríamos coincidir en que el método es bastante preciso para medir la "Ground Force", mediante la "Weighted Sum", hasta los 50 Hz; para frecuencias entre 50 y 100 Hz la "Weighted Sum" resulta de amplitud inferior a la "Ground Force" y para frecuencias mayores a 100 Hz la suma pesada calcula una fuerza superior a la ejercida sobre el terreno siendo más exagerada a medida que se incrementa la frecuencia.

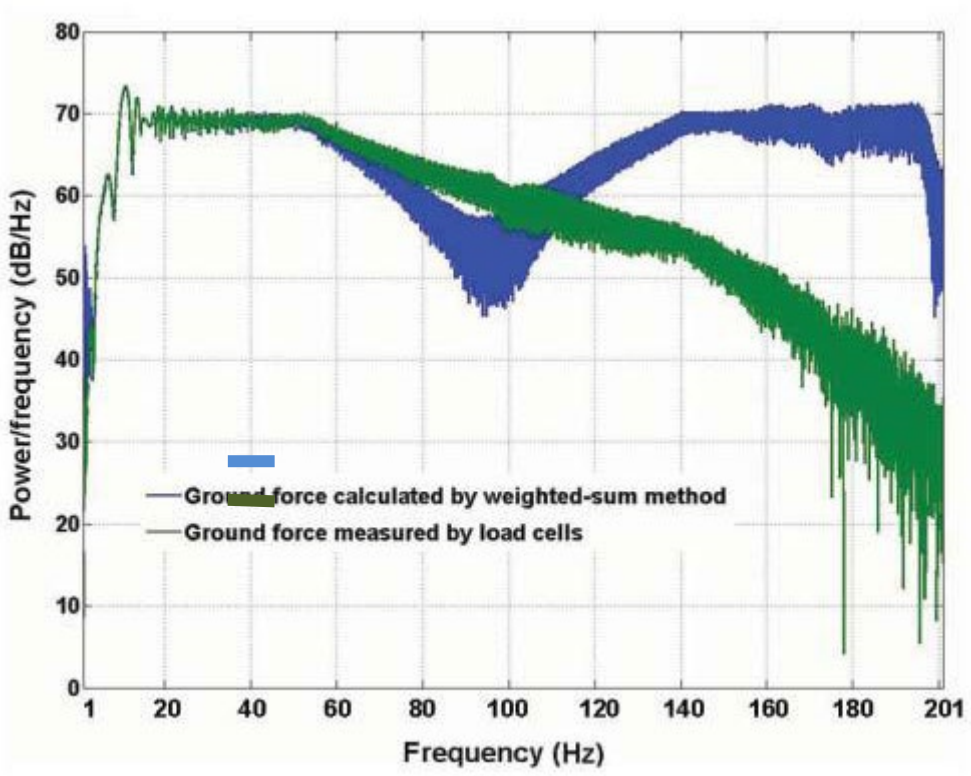


Figura 37, "Weighted Sum" vs. "Ground Force" [9]

Limitaciones en la Servoválvula

La Servoválvula generalmente se define por la "cantidad de galones por minuto de aceite hidráulico que puede abastecer al sistema".

En la Figura 38 se muestra la curva de respuesta de la Servoválvula Atlas de 200 gpm (Gpm: galones por minuto, equivalente a 757 litros por minuto). En el eje de ordenadas se mide el caudal en gpm y en el de abscisas el desplazamiento de la "Main Valve" en pulgadas; también se especifica que esta curva fue ensayada con una presión de 1000 psi.
La curva de respuesta se mantiene cercana a una línea recta hasta el punto de 200 gpm de ordenadas y +/- 0,1 pulgadas (+/- 0,25 cm) de abscisas, luego la curva ya no responde linealmente y distorsiona. Por esta razón se limita la carrera (stroke) de la Válvula Principal para que se emplee dentro de la curva de respuesta lineal, evitando fuerte contenido de frecuencias armónicas.

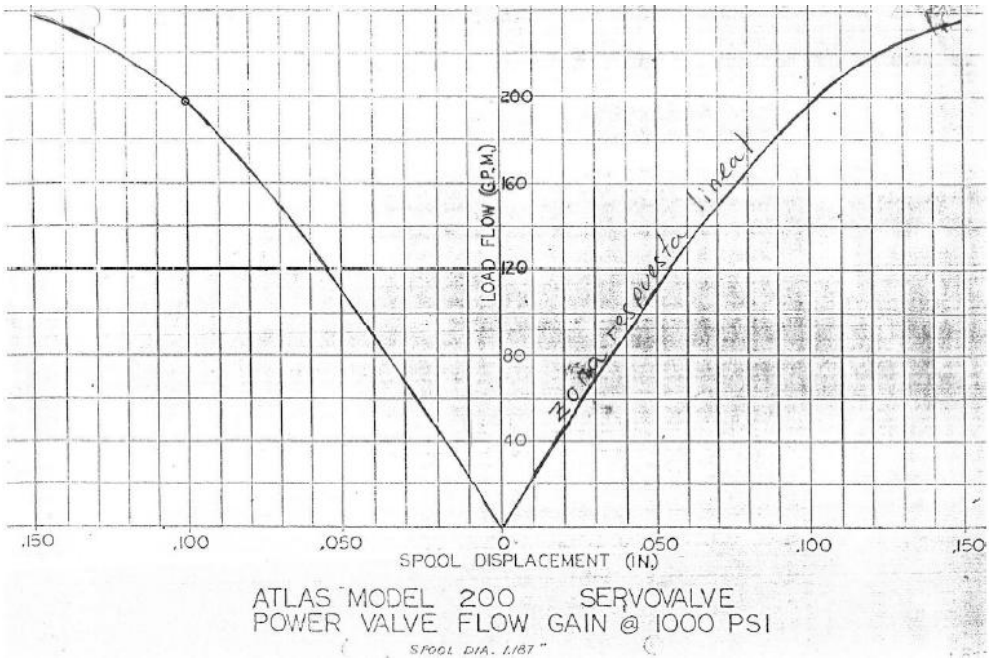


Figura 38: Desplazamiento de la "Main Spoil Valve" (in) vs. Flujo Hidráulico (gpm) [4]

Distorsión por Cruce en la Servoválvula (Spool in the Null Position)

Como vimos existen limitaciones en la apertura de la Válvula Principal para suministrar el caudal hidráulico que el vibrador necesita para ejercer mayor fuerza de vibrado sobre el terreno. También existen limitaciones cuando pasamos por un "cruce por cero" del barrido sinusoidal, cuando el pistón de la válvula controladora de flujo, pasa por su posición central de cerrado (absoluto) de orificios, entonces no circula líquido por el sistema actuador, pero cuando se desplaza ligeramente de este estado (denominado: "null position"), el flujo no responde linealmente a este desplazamiento, produciéndose: "distorsiones por cruces" (similares a las distorsiones por cruce en amplificadores clase "B") que deben ser

compensadas por intermedio de realimentaciones electrónicas a partir del Acelerómetro de Masa. Este hecho es más notable en bajas frecuencias.

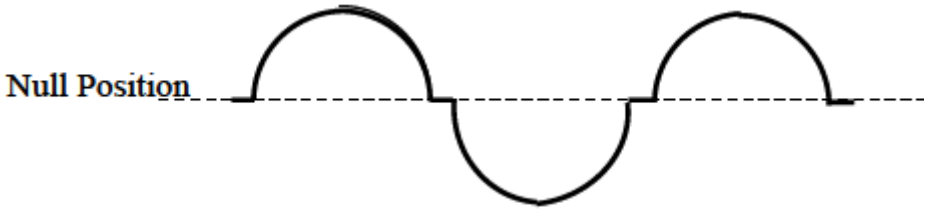


Figura 39: Distorsión por cruce al pasar por la "null position" [4]

Esta provoca que la Servoválvula controladora de flujo, sea la principal responsable de la generación de Armónicas Impares (Odd-Order Harmonics)

Las Características elásticas del terreno

Para magnificar físicamente la respuesta del terreno a la señal elástica que le proporciona al mismo la Plancha del Vibrador, utilizamos otra vez una analogía eléctrica para ensayar tal respuesta
Dicho modelo se muestra en la Figura 40, donde:

Fg: Ground Force
Kg: Constante elástica (Módulo de Young)
Dg: Constante de pérdidas inelásticas (plásticas)
Xb: Desplazamiento del "Baseplate"
Lp: Distancia de la Plancha desde el eje de aplicación de la fuerza hasta su extremo.

La "impedancia eléctrica" que presenta la superficie de un terreno a vibrar, es la carga que se aplica sobre el sistema actuador (plancha). Para bajas frecuencias podemos considerar la bobina "Kg" como una resistencia sin componente inductiva y que análogamente representa a la constante elástica del terreno. "Dg" es un capacitor por donde drena corriente eléctrica y por lo tanto representa a las atenuaciones inelásticas del terreno.
Tanto "Kg" como "Dg" dependen del Módulo de Corte del terreno (Shear Modulus).

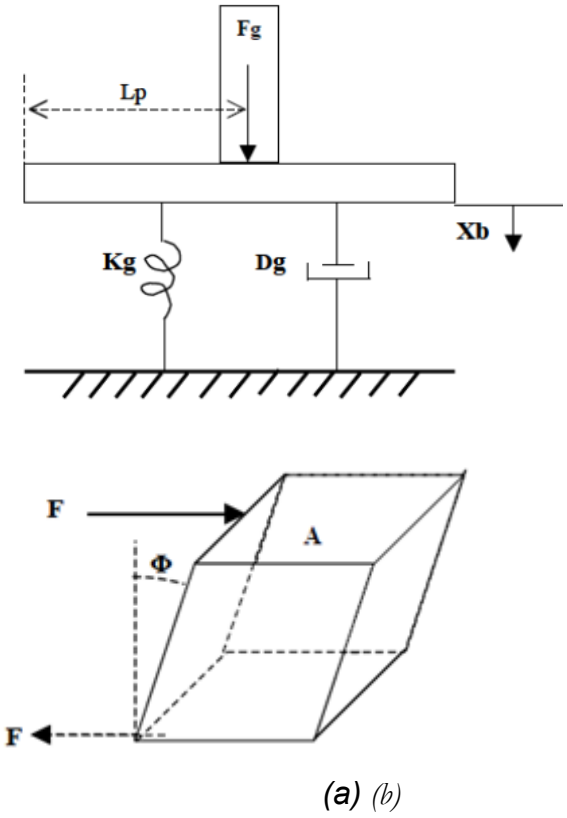


Figura 40: (a) Modelo análogo eléctrico para la tierra; (b) Esfuerzo de "Corte o cizalla" [7]

En la Figura 40(b), se ha dibujado un cuerpo rectangular sometido a un Esfuerzo de Corte E:

$$E = F / A$$

La fuerza de corte "F" se aplica sobre las superficies "A" lo cual produce un desplazamiento de las caras opuestas (de superficie "A") medida por el ángulo "**Φ**".

Se define como Módulo de Corte "G", a la relación entre Esfuerzo de Corte y el Angulo de Desplazamiento:

$$G = \text{Esfuerzo} / \text{Ángulo} = \mathbf{F / A / \Phi}$$

Los valores de "Kg" y de "Dg" dependen del "Módulo de Corte" "G" de la siguiente manera:

$$Kg = \pi \, Lp \, G$$
$$Dg = \pi \, Lp \, (g \, G)^{-1/2}$$

g: aceleración de la gravedad

Si bien casi todo tipo de terreno tiene un rango lineal en donde el desplazamiento "Xb" es directamente proporcional a la Fuerza Fg (donde la impedancia solamente está compuesta por Kg), fuera de este rango, para mayores esfuerzos ejercidos, la curva de respuesta es alineal (ídem como la

variación del flujo hidráulico en función del desplazamiento de la Main Valve).
En la Figura 41, vemos una representación del efecto de la fuerza aplicada a terrenos con distintas impedancias. La respuesta que se observa en terrenos muy duros (rocas) es sublineal y, para este tipo de impedancias (valores muy altos de "G"), el esfuerzo para obtener un mismo desplazamiento del terreno "Xb", es menor que el necesario para un terreno completamente lineal. Quiere decir que la plancha estará sometida a diferentes cargas (impedancias) que variarán aún con la frecuencia instantánea de un mismo barrido.

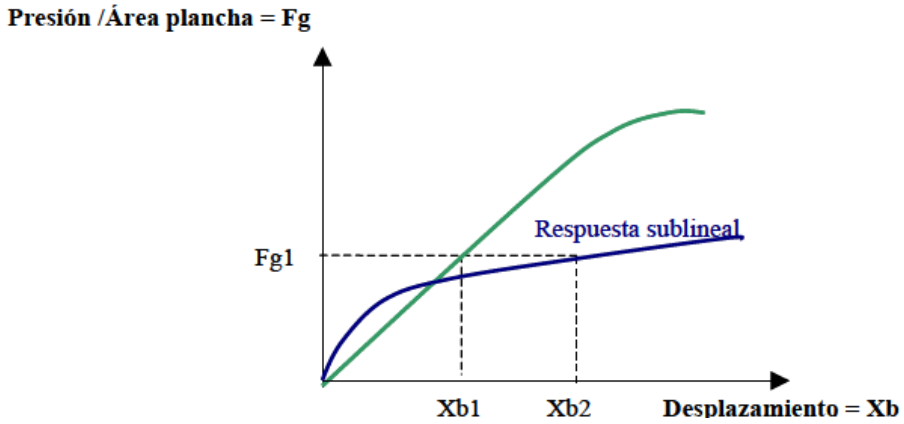


Figura 41: Curvas de Fuerza vs. Desplazamiento [6]

La no-linealidad de la respuesta de la tierra es la principal responsable de la generación de Armónicas Pares (Even-harmonics).

También, deberemos considerar el efecto de la "resonancia plancha-terreno", la cual depende de la impedancia del mismo (entre 15 – 40 Hz.), cuando la reactancia inductiva de "Kg" sea igual a la reactancia capacitiva de "Dg".

En la Figura 42, vemos las curvas de fuerza y de fase vs. Frecuencia, obtenida con una Servoválvula Controladora de Flujo sin utilizar ni el Control Automático de Amplitud ni el de Fase. Se observa que la frecuencia de resonancia para dicho terreno se produce a los 35 Hz aproximadamente, alcanzando la fuerza un valor de 35000 lb., siendo de 12000 lb el nivel de la fuerza a frecuencias superiores.

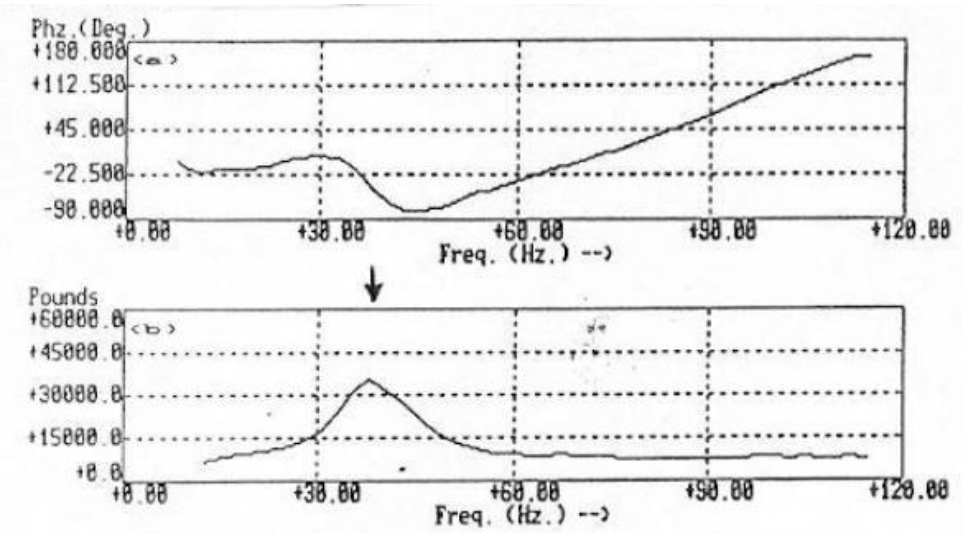


Figura 42: Curvas de Fase y de Fuerza en función de la Frecuencia (Servoválvula convencional) [6]

Antes de la utilización del control automático de amplitud, para evitar bajar el valor de fuerza preseteada y que este pico de fuerza no superara el "Holdown Weight", se usaban camiones con pesos que duplicaban el "peak force" del sistema hidráulico, (actualmente el control automático de amplitud y la "DR", permiten equiparar el "Gross Weight" con el "Peak Force").

Con una Servoválvula Controladora de Presión, el mismo vibrador para las mismas condiciones anteriores, produjo las respuestas que se muestran en la figura 43, en donde la fuerza no es afectada por la resonancia plancha-terreno como si esta Servoválvula no fuera afectada por los diferentes valores de impedancia del terreno.

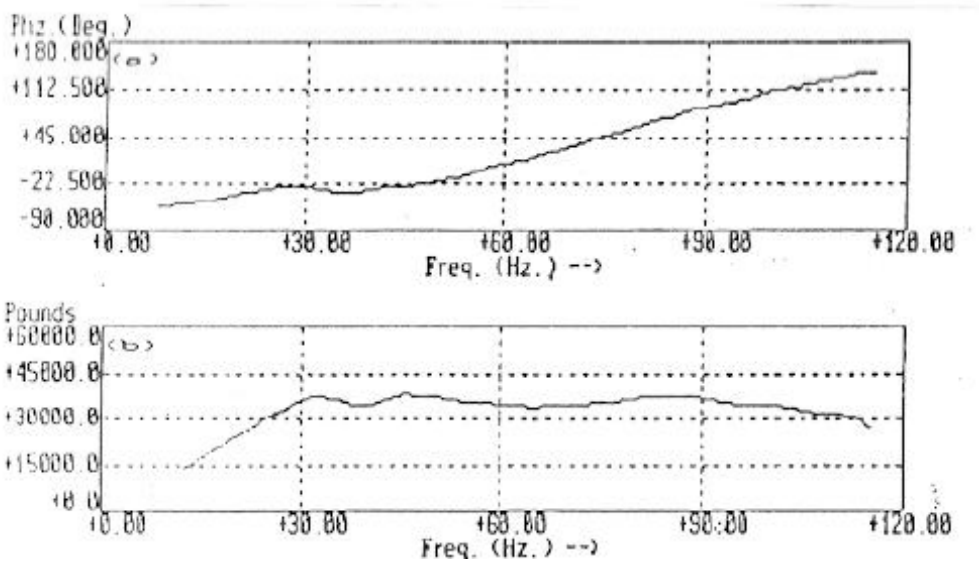


Figura 43, Curvas de Fase y de Fuerza en función de la Frecuencia (Servoválvula DR) [6]

Tamaño de la Masa de Reacción y el Caudal Hidráulico

Sabemos que, el "Stroke": es la distancia máxima que puede recorrer el pistón del actuador dentro del cilindro de la masa de reacción. Al limitar esta carrera entre un 70 y un 90%, obtenemos el valor de la carrera o desplazamiento del pistón máximo permitido "Usable Stroke" (que en el caso del vibro AHV IV - 362 es = 0.9 x 3.87" = 3.5"). La diferencia de carrera que queda "teóricamente" sin utilizar, se denomina: "overtravel" ((3.87 – 3.5)/2 = 0.19").

El volumen de líquido hidráulico movido en la Masa de Reacción dependerá justamente del desplazamiento relativo del pistón con respecto al cilindro de la Masa y que según la figura 44 denominamos "Xr".

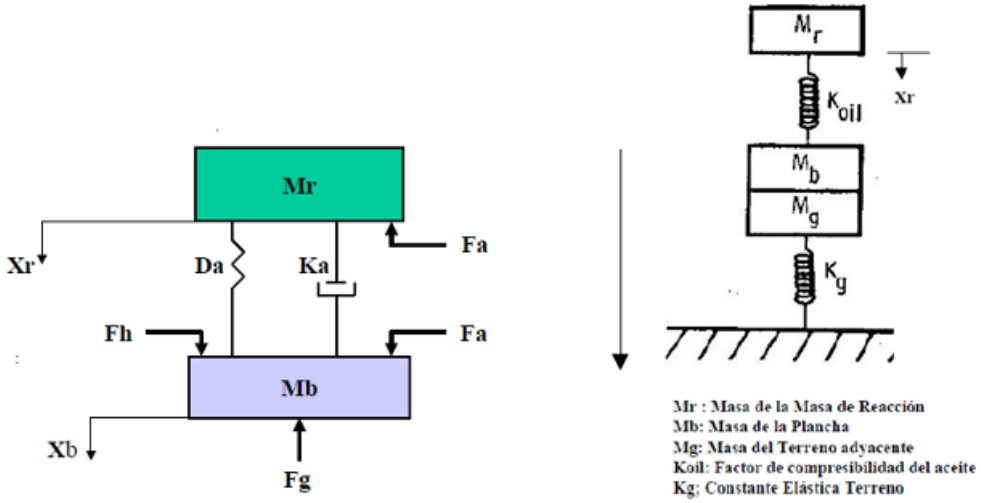


Figura 44, modelo Análogo de Impedancias Eléctricas del Actuador del Vibrador [1]

NOTA: Tener en cuenta que la Masa podrá desplazarse Xr veces respecto al Pistón pero que el Pistón podrá mover Xb veces la plancha sobre el terreno ya que, como se muestra en una analogía de impedancias (Figura 44), entre la Masa "Mr" y el pistón solidario con la Plancha "Mb" influye el factor de compresibilidad del aceite "Koil" y entre la Plancha y el terreno influye la constante elástica del mismo "Kg".

Volumen movido de aceite en la Masa = Área pistón * Carrera relativa pistón

$$\mathbf{V = Ap * Xr}$$

Por definición, el Caudal "Q" es el volumen de un líquido movido en la unidad de tiempo. Por lo tanto:

$$\mathbf{Q = V / t = Ap * Xr / t}$$

Pero: Xr / t = Vr: velocidad del caudal hidráulico.
Entonces:

$$Q = Ap * Vr$$

También hemos visto que la fuerza dinámica ejercida sobre la Masa es:

Fr = Mr * Ar (siendo Ar = Vr/ t: la aceleración sobre la Masa)

Operando: **Fr = Mr * Vr / t = Mr * Vr * f**

(Pues frecuencia: f = 1/ t), entonces: **Vr = Fr / Mr * f**

Reemplazando el valor de velocidad Vr por su igual):

$$Q = \frac{Ap * Fr}{Mr * f}$$

En la fórmula del Caudal Q, vemos que caudal hidráulico varía inversamente a la frecuencia del barrido, por lo tanto el Caudal Hidráulico necesario para mover la Masa en bajas frecuencias, es mayor que el necesario para moverla en altas frecuencias del barrido. Por esa razón la Masa Mr tiende a ser más pesada para compensar esta ineficiencia del vibrador.
También deberemos tener en cuenta que cuando más caudal exista sobre el circuito hidráulico (ídem a la corriente eléctrica en la analogía), mayor serán las pérdidas de presión entre la bomba y el actuador, la energía se gastará en calentar el aceite el cual deberá ser llevado a un radiador para que un ventilador intercambie ese calor con el ambiente exterior.
En la figura 45, ION Corporation muestra una comparación de espectros de amplitud entre dos vibradores con un barrido de 2 a 20 Hz y una Fuerza Fundamental de 187 KN (42000 lb). Uno de los vibradores ensayados es un AHV IV con mayor peso en su "Reaction Mass" y el otro con un peso estándar. Un mayor peso en la Masa permite extender el ancho de banda del barrido en 2 Hz, vibrando a menores frecuencias que los anteriores. Al disminuir el caudal "Q", necesario para proporcionar la fuerza fundamental a esas frecuencias, las carreras (strokes) del Pistón de Masa y el de la "Main Valve", ahora no llegan a sus límites para abastecer la demanda de aceite hidráulico. Igualmente observamos que la fuerza por debajo de 5 Hz sigue siendo mucho menor que la deseada y esto se debe que casi todos los límites se han alcanzado.

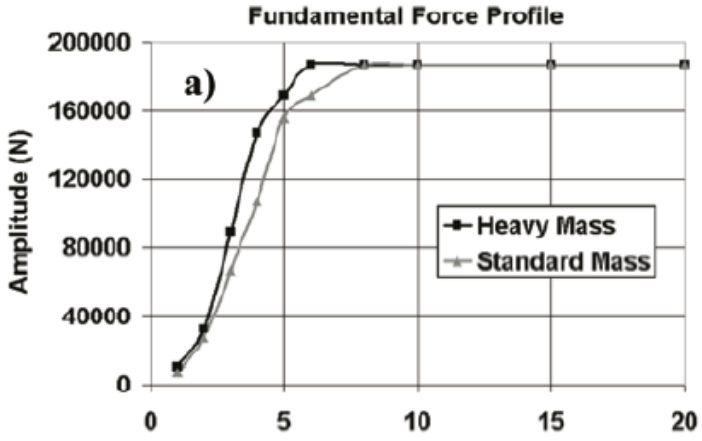


Figura 46 AHV IV Standard Mass (3683 Kg) vs AHV IV Heavy Mass (5000 Kg) [10]

Vemos que los vibradores alcanzaron al 90% del desplazamiento permitido de la Masa entre 1 y 4 Hz, ya que le hemos limitado su carrera disponible para que no choque contra sus topes de carrera. También pudieron haberse alcanzados, en este rango de bajas frecuencias, ó: el límite de carrera para el desplazamiento de la "Main Stage" de la Servoválvula o el Valor Pico de la Fuerza de no Desacople (Peak-decoupling Force) o la corriente máxima del "Torque Motor", o todos los límites simultáneamente (un alto porcentaje de armónicas impares reflejará estos fenómenos, especialmente: la tercera armónica del barrido).
En todos los casos un mayor peso en la masa mejora la respuesta en baja frecuencias.

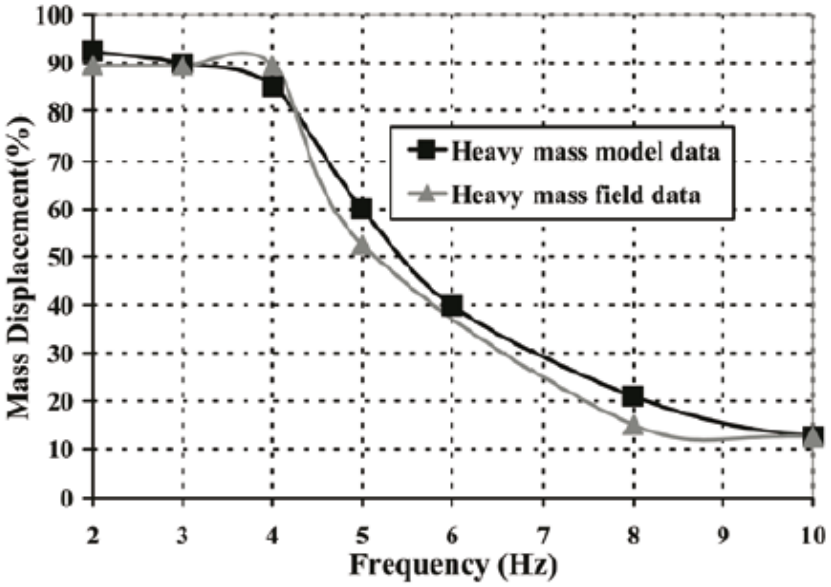


Figura 46, Desplazamiento de la Masa de Reacción vs. Frecuencia de barrido [9]

NOTA: En los Vibradores Nomad Neo LF de Sercel, han aumentado el peso de la Masa de Reacción a 4,794 Kg (10,352 lb), por disminución del Área del Pistón a 112.6 cm² (17.45 pulg²). Con esto logran emitir más bajas frecuencias sin superar los límites mecánicos-eléctricos que provoca el gran caudal hidráulico necesario. Para mantener el Peak Force en 62000 lb tuvieron que aumentar la presión hidráulica:

High Pressure 267 Bar (3871 psi).
Low Pressure 20 Bar (290 psi)
Peak force lb: (PHigh–PLow) * Piston Area = 3,580 * 17.45 = 62,400 lbf = 278 KN =

Compresibilidad y pérdidas (leakage) del aceite hidráulico

Los líquidos son poco compresibles, pero un líquido es tanto más compresible cuanto mayor es su viscosidad. Como dato orientativo se puede decir que en los aceites minerales, un volumen de 100 litros de fluido a la

temperatura de 20ºC y sometido a una presión de 100 bar (1450 psi), experimenta una disminución de volumen de 0,7 litros, es decir, tendrá un volumen de 99,3 litros.
Este fenómeno puede despreciarse en instalaciones de poco volumen y que funcionen a baja presión, pero habrá que tenerlos en cuenta cuando existan cilindros de gran capacidad, tuberías de cierta longitud y de gran diámetro, y presiones importantes como en los vibradores que nos ocupan.
Su efecto, en los vibradores, está representado por dos sumideros de aceite, uno en el circuito de alta y el otro en el de baja presión, denominados: "Oil Spring". El efecto es magnificado por la siguiente fórmula:

Compresibilidad = (Total del volumen de aceite en el sistema/Coeficiente de Compresibilidad) x frecuencia =

Compresibilidad _(Área Pistón x Usable Stroke + Resto Volumen) * f / Be

La fórmula anterior nos dice que: "Cuanto mayor es la frecuencia del barrido, mayor es el efecto de la compresibilidad del aceite."

En la Figura 47, se muestra nuevamente la fórmula del Caudal Hidráulico del circuito y como sumideros del circuito se consideran las pérdidas del caudal de aceite debido a su compresibilidad (Dash Spot).

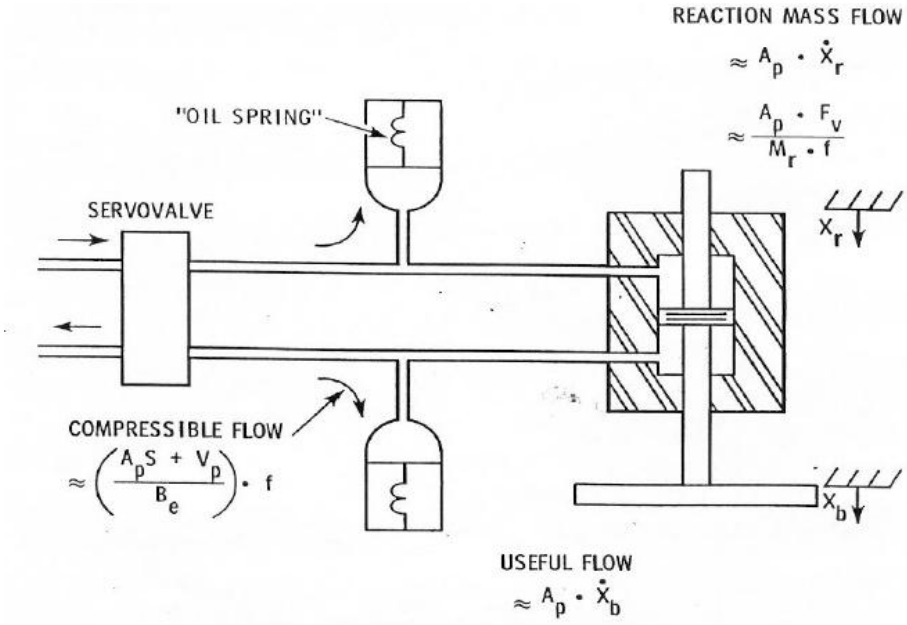


Figura 47, Compresibilidad del líquido hidráulico entre la Servoválvula y el Actuador [2]

Como efecto no deseado, con el aumento de la frecuencia del barrido se disminuye el caudal de aceite útil en el circuito hidráulico y por lo tanto la fuerza ejercida sobre el terreno. En otras palabras: "a mayor frecuencia mayor será el volumen de aceite que se irá por los sumideros mostrados en la Figura 49 y que se restará del circuito del actuador.
Una manera de aumentar la performance del vibrador en altas frecuencias sería: disminuir el "Usable Stroke**",** (con lo cual disminuiríamos el volumen

de aceite a mover, que es: disminuir el caudal en el circuito), pero esto impediría desarrollar una buena respuesta en bajas frecuencias.

Por último, el efecto de la compresibilidad del aceite hidráulico, nos hace especular sobre la "Frecuencia de Resonancia de la Columna de Aceite" dentro de la Masa de Reacción, que debería encontrarse muy arriba de la frecuencia máxima del barrido sísmico posible (por encima de 250 Hz.).

$$\text{Frecuencia de resonancia del aceite} = \frac{Ap\sqrt{Be}}{\sqrt{(Ap * \text{"Stroke"} + Vp) * Mr}}$$

La relación anterior sugiere que: el mayor peso de la Masa "Mr" podría afectar la performance del Vibrador en altas frecuencias del barrido, al disminuir la frecuencia de resonancia del aceite. Por lo tanto encontramos una limitación importante para el incremento desmesurado del peso de la Masa.

No todo el aceite del circuito hidráulico es empleado en producir trabajo. Hemos hablado que el aceite se calienta durante su circulación y debe ser enfriado en Radiadores con Ventiladores para intercambiar el calor adquirido con el medio ambiente. El calor es trabajo perdido pues se ha gastado energía calórica y no hidráulica y esta última es nuestra energía útil. Un pequeño volumen de aceite también se escapará de nuestras fórmulas por los aros del Pistón del Sistema Actuador, contribuyendo a su lubricación y disminuyendo roces pistón-cilindro.

Las dimensiones y características de la Plancha (Baseplate)

La inercia de la Plancha tiene su gran relevancia dentro de las ineficiencias del Vibrador. Cuanto más pesada sea la Plancha, mayor será la fuerza necesaria para sacarla de su inercia y moverla. Por lo tanto, se trata de construir el "baseplate" lo más liviano posible, dentro de la rigidez necesaria, para que no reduzca significativamente la fuerza del actuador.
La función de la Plancha es transmitir la fuerza hidráulica dentro del terreno donde apoya. Consideramos a la Plancha como una estructura rígida que vibra sobre la Superficie del Terreno. Si la Plancha es de una superficie reducida, la presión ejercida sobre el terreno sería mayor y las posibilidades de romper el terreno aumentarían (la plancha podría ser más rígida y liviana pero gastaría parte de la energía en deformar plásticamente al terreno). Si aumentamos la superficie de la Plancha bajaríamos la presión ejercida pero aumentaríamos su flexibilidad disminuyendo su rigidez y generando que las distintas partículas del terreno debajo de la Plancha reciban la fuerza con diferentes niveles de origen (diferente fase de la onda) y que de acuerdo a las longitudes de ondas generadas podrían producir atenuaciones importantes (inclusive cancelaciones), cuando concurran sobre partículas lejanas (distorsiones armónicas y no armónicas).

En la Figura 48 vemos un modelo computarizado de la Plancha, vibrando sobre una superficie plana, homogénea y suficientemente rígida, donde se exagera su flexibilidad. Este y otros efectos sucederán si la Plancha no apoya perfectamente su superficie sobre el terreno, por ejemplo una piedra ocasiona que parte de la plancha se encuentre en el aire. Generalmente nos enteramos de tal problema observando el alto porcentaje de armónicas detectadas en ese Vibrador. Por supuesto que los Vibradores más pesados tendrán menores posibilidades de que esto suceda.

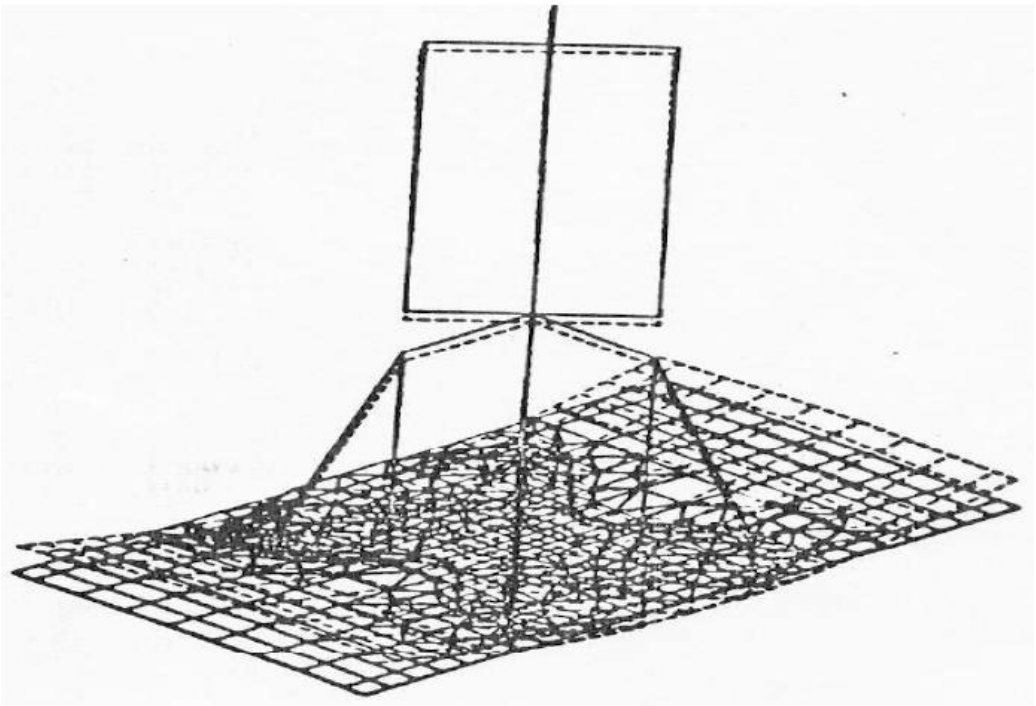


Figura 48, Modelo computarizado del efecto de la flexibilización de la Plancha [2]

De cualquier manera, la Plancha del Vibrador no es lo suficientemente rígida y liviana. Por lo tanto los efectos de estructura flexible que el modelo computarizado de la figura 26 muestra, resultan de amplitud exagerada pero reales, entonces es de esperar que se produzcan:

- Desacoples parciales de su superficie sobre el terreno, especialmente en el centro de la misma cuando esta descomprime el terreno.
- Fuerzas antagónicas en los extremos de su superficie, a la fuerza principal de vibrado ejercida en su parte central, que se hace más evidente cuando se incrementa la frecuencia del barrido.

La Plancha no solo vibrará verticalmente (modo vertical) tal como pretendemos sino que se producirán otros movimientos indeseados que denominamos: "modos de vibración" y sus amplitudes aumentarán cuando mayor sea la fuerza del vibrado (drive). Los distintos modos de vibración que se pueden producir en la plancha del vibrador debido a su estructura y a su acoplamiento con el terreno son:

- Modo Vertical (normal).
- Modo Balanceo (rocking): se producen por movimientos horizontales de la estructura generalmente a frecuencias menores a 20 Hz.
- Modo de Flexión (bending); se producen en las frecuencias altas del barrido.
- Modo de Torsión o giro (twisted).
- Modo de Aleteo (flapping)

El efecto del terreno sobre la Plancha que vibra sobre él

La gran variedad de superficies de terreno donde se apoya la Plancha del vibrador, complica aún más los defectos de la misma.
En la Figura 51 se muestra un modelo más completo que el desarrollado hasta aquí para deducir la fórmula de "Suma Pesada" (Weighted Sum) y aproximarnos al valor y fase de la "Fuerza Ejercida en el Terreno" (Ground Force).
En este nuevo modelo se le ha agregado una nueva interface, la del acoplamiento Vibro-Terreno, diferenciándola del terreno vibrado que mantendrá sus valores intrínsecos de rigidez y viscosidad. Este modelo tiene en cuenta los diferentes defectos anteriormente mencionados en la Plancha y ahora en contacto con un terreno real, entonces existirán en la interface Plancha-Terreno, distintos Módulos de Rigidez (k1, k2, k3, ..kn) y un único Modulo de Viscosidad (DT).
Se considera el Terreno bajo la Plancha (Ground), fuera del contacto entre ambas, poseerá su Módulo de Rigidez (Kg) y su Módulo de Viscosidad (Dg), valores que se calculan y se memorizan en cada barrido y sirven bastante fielmente a definir la característica de la superficie vibrada (weathering).

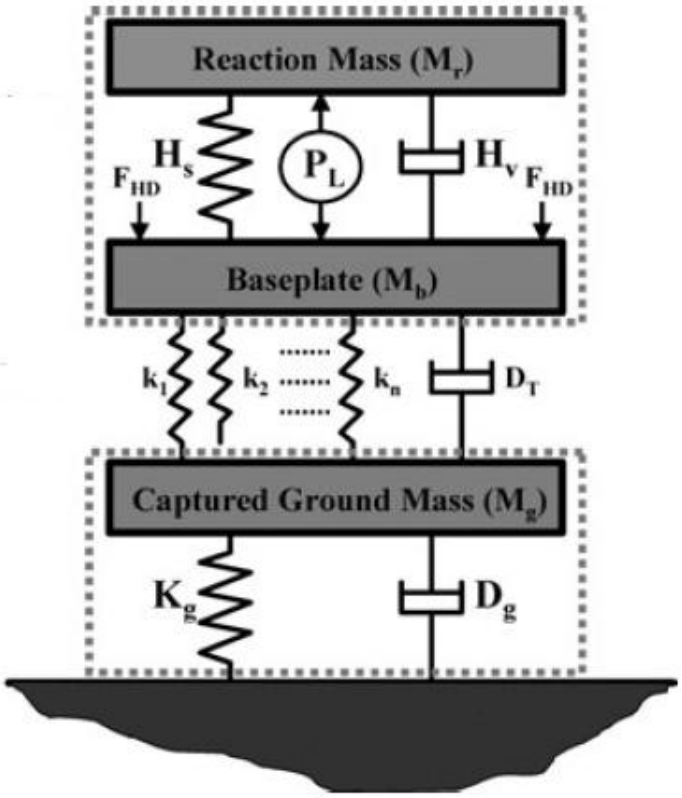


Figura 49: Analogía de impedancias del sistema Vibro-Terreno [9]

La Plancha y los "Air Bags"

Como sabemos, los dos "airbags", son empleados para aplicar a la Plancha (Baseplate) del Vibrador, parte del peso de su carrocería, o sea: el "Holdown Weight".
Los "air bags" actúan como aisladores de movimiento y no permiten que se transmitan las vibraciones del barrido sísmico al resto de la carrocería, pero esto resulta eficaz para frecuencias mayores a 3 Hz y constituyen otra limitación a mejorar la respuesta del Vibrador en muy bajas frecuencias.

En la figura 50 se muestra el esquema de una Plancha y en esta se observa uno de los dos "Radius Rod" (varillas radiales) que permiten la estabilidad lateral de la Plancha que no puede ser proporcionada por los "airbags". Los "Radius Rod" deben ser graduados para transmitir el esfuerzo vertical del sistema actuador a la Plancha para que esta, en toda su extensión, distribuya el esfuerzo lo más homogéneamente posible.
Las cadenas laterales (chains), permiten que cuando la Plancha es levantada / bajada, el esfuerzo sea ejercido por las cadenas y no por los "airbags", pero, en condiciones de vibrado, las cadenas deberán permanecer lo suficientemente flojas para no transmitir la vibración del barrido hacia el chasis del Vibrador (con la consiguiente pérdida de energía)

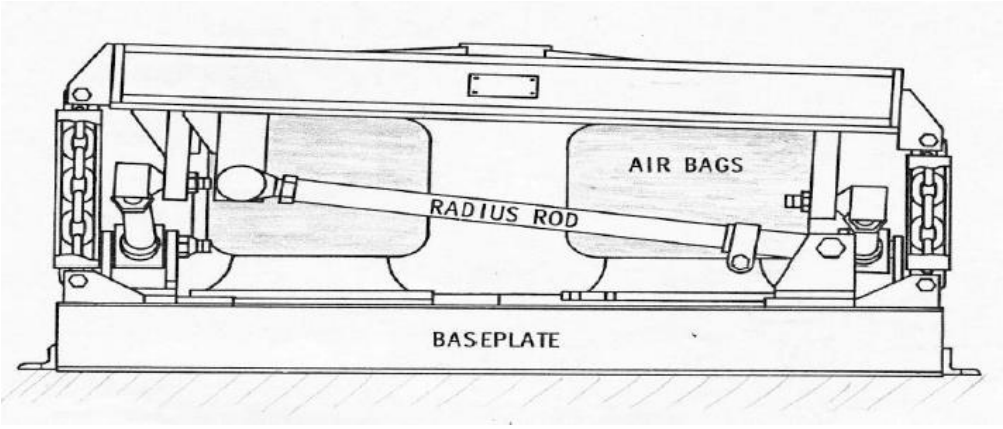


Figura 50, Estructura solidaria con el "Baseplate" [2]

Como hemos visto, sensamos la vibración emitida con los acelerómetros de masa y de plancha para sumarlos con sus pesos respectivos y así obtener la suma pesada (weighted sum) que teóricamente es de igual amplitud a la "Ground Force". Esta última es la reacción del terreno y si su valor supera al del "Holdown", durante el semiciclo de tracción de la Plancha, esta se desacopla del terreno y cuando cae, produce un golpe sobre el terreno (impulso o "spike") que luego correlacionará perfectamente con nuestro Barrido de Referencia. Este fenómeno se verá en el Registro Sísmico Correlacionado, como una Refracción. Otras veces las aceleraciones podrán ser muy grandes pero no existe suficiente tiempo físico para levantar la plancha del terreno, en ese caso no se verán refracciones pero sí se generarán muy altos errores de fase).

Resumen final

Como resumen graficaremos las distintas ineficiencias del Vibrador en función de la frecuencia del barrido sísmico, según la figura 51:

f1 - f2:
Se necesita más caudal hidráulico para vencer la inercia del actuador (mayor "stroke" tanto en la masa de reacción como en la Servo válvula). Tampoco a estas frecuencias los "air bags" actúan como tan buenos aisladores entre el chasis del vibrador y el sistema actuador El límite aconsejado para f1 es de 5 Hz.

f2 - f3:
La resonancia Plancha Terreno genera correcciones bruscas a aplicar sobre la Servo. El buen control electrónico y la servoválvula DR compensan este fenómeno.

f3 - f4:
Banda de mejor respuesta del sistema (no más allá de 50 Hz), el "Holdown" solo limita la correcta performance del sistema.

f4 - f5:
La compresibilidad del aceite afecta la respuesta del sistema y se tiene que proveer un caudal de aceite extra para compensar esta pérdida. La flexibilidad de la Plancha genera diferencias de fases en la señal sísmica emitida desde su superficie de acople con el terreno, la señal sísmica resultante se atenúa por dicha razón.

f5 - ffinal:
La velocidad mecánica de la Servoválvula limita la apertura de la "Main Valve" y con ello la posibilidad de producir una respuesta análoga en presión a la corriente eléctrica del barrido sobre el actuador. Se recomienda no utilizar el vibrador en frecuencias superiores a 150 Hz.

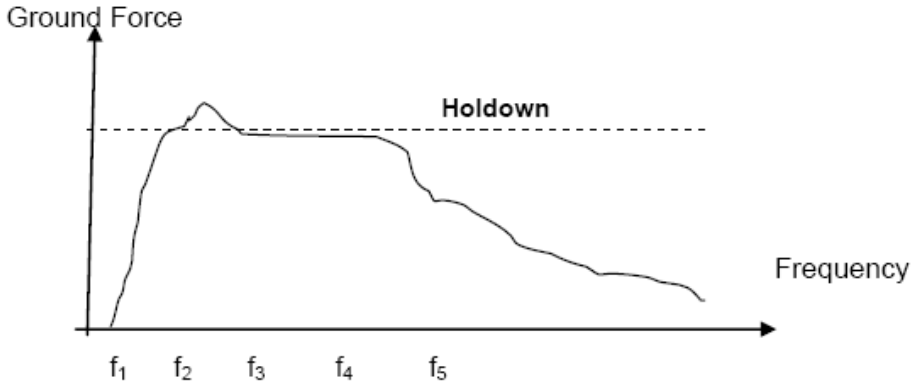


Figura 51: resumen de las ineficiencias del Vibrador en función de la frecuencia del barrido [7]

Nota: ION publicó que ha producido un vibrador con un nuevo diseño de "Reaction Mass", que logró fabricar un "Baseplate" 2,5 veces más rígido que el anterior, que modificó la electrónica de control y que, como consecuencia, ha logrado extender la frecuencia final de barrido hasta 250 Hz. (New vibrator system holds promise, Zhouhong Wei, E&P November 2008).

Bibliografía consultada:

1. *D.G. Lang- Petty Ray Geophysical: "Vibroseis"- May 1977.*
2. *Geophysical Service Inc: "Vibrator Force Output Rating"- Jan 1988.*
3. *Robert A. Brook: "Vibrator Mechanical Principles" – July 1995.*
4. *Atlas Fluid Controls Corp.: "Electrohydraulic Servovalves".*
5. *Pelton Company Inc: "Vibrator Electronic Control: Advance II and VibPro".*
6. *Dennis K.Reust: "Enhanced Servovalve Technology for Seismic Vibrators" – May 1991 EAEG Meeting, Florencia Italia.*
7. *P.R. Concetti- Y.P.F, Geosource, Halliburton, WGS & WesternGeco Training Courses.*
8. *K.P.Allen, M.L.Johnson, J.S. May, Mobil E & P Technical Center: "High Fidelity Vibratory Seismic (HFVS) Method for Acquiring Seismic Data" – 1998 SEG Expanded Abstracts.*
9. *Zhouhong Wei: "Modelling and modal analysis of seismic vibrator baseplate"(ION Geophysical Corp., 12300 Parc Crest Drive, Stafford TX 77477, USA.*
10. *Sercel Nomad Neo LF Vibrator Manual and QC in field, Marzo de 2018.*
11. *Mecánica de los fluidos, Hidraúlica, Wikipedia.*
12. *Mecánica de los Fluidos e Hidraúlica, Renald V.Giles, Jack B.Evett, Cheng Liv.*

CAPÍTULO 10: CONTROL ELECTRÓNICO DE LOS VIBRADORES

Introducción:

En el capítulo anterior, se hizo una pequeña reseña sobre la invención del Vibroseis y los principales avances logrados hasta nuestros días, lo cual denominamos: "Cronología del vibrador". En él se menciona que en 1965, recién se instala la primera Caja Controladora del vibrador sísmico, la cual podría denominarse: de control eléctrico y no electrónico, pues consistía de una integración de relevadores y llaves conmutadoras que anteriormente se encontraban distribuidas en el chasis y en la cabina del vibrador. Recién en 1970 se incorpora un incipiente control digital que intentaba mantener en fase al sistema actuador del vibrador con la señal Piloto, utilizando la realimentación de un acelerómetro ubicado en la Plancha del vibrador (baseplate phase loop lock).

En 1978 se incorporó el retorno por radio del barrido ejecutado por el vibrador (similaridad radial) que generó un importante progreso en el QC de los mismos, pues se podía seguir en tiempo real la performance de cada uno (eso sí, uno por vez).

En 1984 se estableció el control automático de la amplitud de la fuerza ejercida por el vibrador, utilizando la suma pesada (weighted sum) de los acelerómetros de plancha y de la masa de reacción (ver Capítulo 9). A partir de entonces pudimos considerar que cada uno de los vibradores que compartían un grupo, se comportaban en forma similar, pudiéndose establecer tolerancias para las desviaciones de amplitud y fase durante el barrido de un vibrador y tolerancias para las desviaciones de esos mismos parámetros entre los distintos vibradores del grupo.

En 1993 Pelton incorporó la Servo Válvula DR, la cual podía mantener por si sola una aceptable respuesta de amplitud de la fuerza ejercida sobre el terreno y de la fase de la misma con respecto a un barrido de referencia que denominamos: "Barrido Piloto". Con la DR la Caja Controladora del vibrador se ocupa ahora de correcciones mucho más pequeñas y precisas. Sercel no incorporó esta Servoválvula y continúa corrigiendo electrónicamente la amplitud y fase de los vibradores utilizando modelos matemáticos del vibro y del terreno, que calcula durante un proceso denominado: "identificación".

En 2008, Sercel comercializa la Caja Ve464 que utiliza un sistema de radio de múltiple acceso (TDMA radio: Time Division Multiple Access), en lugar de la tradicional radio VHF. Esta permite la operación de un sistema DGPS (incorporado a la caja) que dispara tanto el barrido de los vibradores (unidades "decoder") como así también el barrido piloto del sismógrafo (unidad "encoder"), por intermedio del reloj satelital, eliminando definitivamente toda diferencia de tiempos entre los vibradores y la señal "Piloto de Correlación" ("T/O time delay" = 0 ± 10 μs).

Diagrama en grandes bloques del conjunto Vibrador-Control electrónico

En grandes rasgos, todos los Vibradores y Controladores Electrónicos, responden a los diagramas en bloques que vamos a mostrar.

En la Figura 1 se muestra en color verde, los bloques que pertenecen a los Decoders (Caja electrónica de los vibradores o VCE): Generador de Barridos de Frecuencia (Sweep Generator) y el Circuito Sumador de Señales (Sum). La salida de la VCE, alimenta al "Torque Motor", ubicado en la Servoválvula del Vibrador, que es el transductor eléctrico- mecánico del sistema.

El **"Torque Motor"** recibe el barrido de frecuencias al cual se le han sumado las realimentaciones negativas (negative feedback) de los LVDTs (transductores de desplazamiento) de la Válvula Principal (Main Valve) y de la Masa de Reacción (Reaction Mass), con el objeto de amortiguar la acción del sistema y que este trabaje en forma estable.

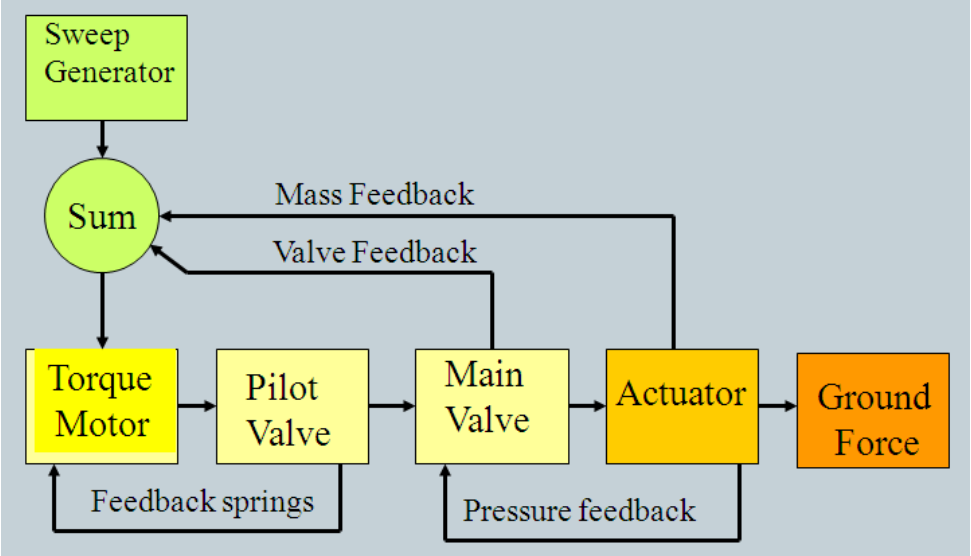


Figura 1, diagrama en grandes bloques del conjunto Vibrador – VCE [4]

La **Válvula Principal** alimenta al Sistema Actuador, formado por la Masa de Reacción y la Plancha (Baseplate) y esta última transduce la fuerza hidráulica en onda elástica al suelo cuya reacción denominamos "Ground Force".

Feedback springs: es la cupla antagónica de la armadura del "Torque Motor", como ya lo hemos visto en el Capítulo anterior, consiste en una varilla plástica deformable unida al péndulo de la armadura del "Torque Motor" y a la "Pilot Valve".

Pressure feedback: es la realimentación negativa de presión que genera el "Manifold DR" sobre la "Main Valve". Este dispositivo no puede ser empleado con los sistemas Sercel Ve432 y Ve464.

Controles Electrónicos de los Vibradores Sísmicos

En la figura 2, se muestran las unidades electrónicas más empleadas, hasta el momento, para controlar electrónicamente a los vibradores sísmicos: Pelton, en sus modelos Advance II y VibPro y Sercel, en sus modelos Ve432 y Ve464).
Cada Vibrador posee una unidad "Decoder" o VCE (Vibrator Control Electronic) y esta es comandada por una unidad ubicada en la Central Electrónica del Sistema de Adquisición (Sismógrafo): "Encoder" o ESG (Encoder Sweep Generator).

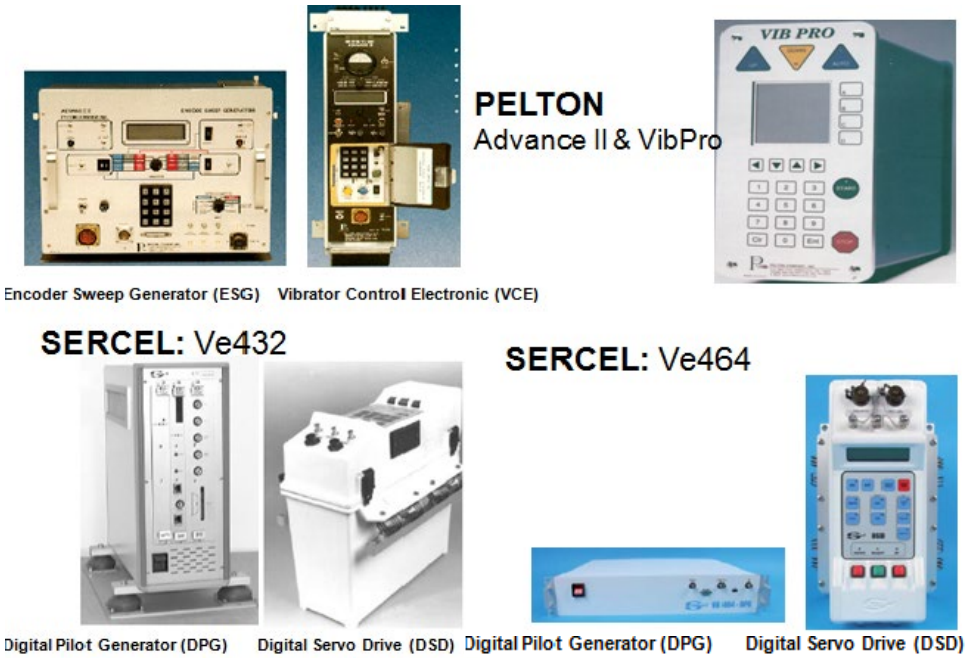


Figura 2: Fotos de los sistemas controladores de vibradores más comunes

Como veremos en forma particular, la gran diferencia entre Pelton y Sercel radica en que: Pelton emplea la Servoválvula DR y Sercel no la emplea. Por tal razón las unidades VCE y ESG son prácticamente iguales en Pelton y no así en Sercel.

Empecemos describiendo con más detalles el diagrama, en grandes bloques de una unidad VCE, para identificar los procesos principales que realiza la misma. Algunos de los bloques de las VCE son idénticos a los usados en la ESG, por lo tanto hacemos referencia a ellos cuando corresponda.

Diagrama en Bloques de la VCE

Volvemos a repetir que la salida de la VCE (Vibrator Controller Electronic), es aplicada al Motor de Torque (Torque Motor) de la Servoválvula.

En la Figura 3 se vuelve a mostrar el Sistema Actuador del vibrador y a la Servoválvula adosada al cuerpo de la Masa de Reacción, cuyo Motor de

Torque se encuentra eléctricamente conectado al Amplificador Sumador de la VCE.

La función del **Amplificador Sumador**, es generar la corriente eléctrica necesaria para que la Válvula Piloto de la Servoválvula (ver Capítulo anterior), reproduzca mecánica y análogamente el barrido electrónico. El barrido de frecuencias electrónico proviene de la salida del Control Automático de Amplitud (AGC) y se le suman las realimentaciones negativas de las LVDTs (LVDT: Lineal Voltage Differerential Transformers).

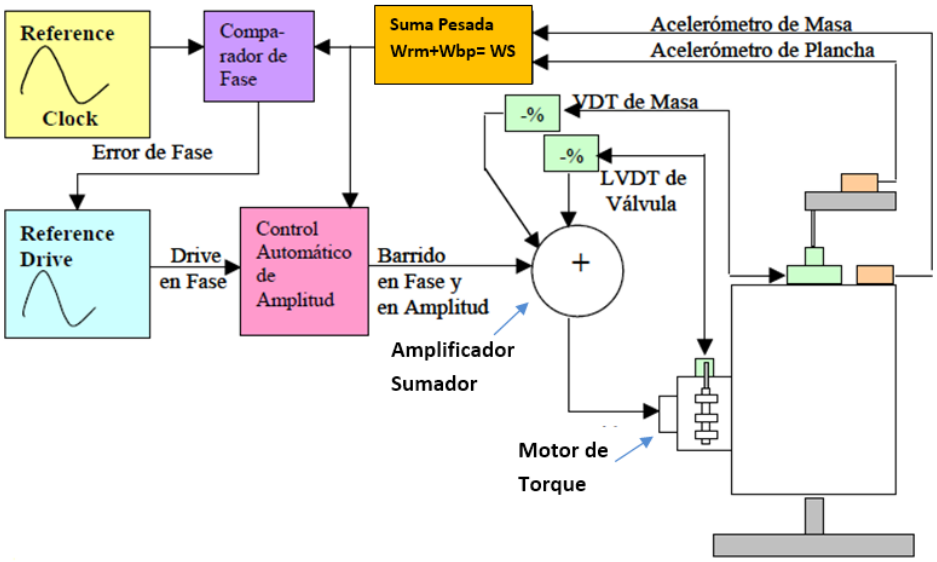


Figura 3: Diagrama en Bloque de la VCE y las Realimentaciones [8]

La realimentación negativa de los voltajes generados por las LVDTs, no solo censan la posición instantánea de la Válvula Principal de la Servoválvula y la posición instantánea relativa entre la Masa de Reacción y la Plancha, sino que permiten una mejor performance de todo el sistema hidráulico.

La función del bloque denominado **Suma Pesada,** es la de sumar los voltajes generados durante el barrido por los acelerómetros de masa y de plancha, luego de multiplicar los mismos por sus respectivos valores de masas. En este bloque también se separa la parte Fundamental y las Distorsiones. La suma pesada o "weighted sum Fundamental" (WS), la utiliza el controlador para medir la fuerza aplicada al terreno durante el barrido y corregir las desviaciones con respecto a la amplitud programada y del atraso o adelanto de fase con respecto a un barrido de referencia.

La función del **Comparador de Fase**, es medir la diferencia de fase instantánea que existe entre el "Barrido de Referencia" y la "Weighted Sum Fundamental".

"Reference Clock": Este bloque lo posee la unidad "Encoder" como las "Decoders o VCE", su función es generar el barrido electrónico de referencia que fue programado. En el Vibrador el barrido de frecuencias de este bloque es utilizado para comparar la fase instantánea con la "Weighted sum" filtrada

de armónicas (fundamental). En el "Encoder" es el de proporcionar el "Barrido Piloto" con el cual se va a correlacionar la señal sísmica adquirida en un VP (Vibrator point).

La función del **"Reference Drive"** es generar el barrido electrónico que se le aplicará a la Servoválvula. Si bien su circuitería es muy similar al de la "Reference Clock", se diferencia de esta en que su "reloj" varía en función del error de fase existente entre el "barrido de referencia" y la "Weighted Sum fundamental", para corregir la fase de la fuerza aplicada al terreno.

La función del **Control Automático de Amplitud** o AGC, es comparar la amplitud de la "Weighted Sum Fundamental" con la fuerza se salida preseteada para el barrido (salida del Reference Drive), modificando esta amplitud para que la fuerza aplicada sobre el terreno sea lo más parecida a la amplitud especificada.

Sensores de Desplazamiento (LVDTs)

Si bien ya hemos visto con cierto detalle las LVDTs, volveremos a tratarlas aquí para que las señales electrónicas generadas intervengan en el control electrónico del Vibrador.

La LVDT de Válvula, se encuentra en el interior de la Válvula Principal y solamente podemos observar la conexión eléctrica de la VCE con la misma, en cambio la LVDT de Masa está expuesta externamente y puede ser fácilmente calibrada, se tratan de circuitos similares encargados de medir la posición del elemento permeable dentro de una bobina eléctrica.

En la Figura 4 se muestra un esquema de la LVDT. Se trata de un transformador eléctrico cuyo bobinado primario es alimentado por una señal sinusoidal, que generalmente es de una frecuencia de 4 KHz, que proviene de la VCE. El secundario del transformador es doble y se conectan tal como lo muestra la figura. La señal de 4 KHz inducida sobre cada secundario del transformador, depende de la posición de la varilla con el elemento permeable que corta el flujo magnético entre bobinados primarios y secundarios.

En la figura 4, el elemento permeable se encuentra exactamente centrado con respecto al doble secundario, generando voltajes de igual amplitud pero de polaridades opuestas sobre los Capacitores ($V_1 = -V_2$), por lo tanto el Voltaje de Salida es:

$$V = V1 + V2 = 0$$

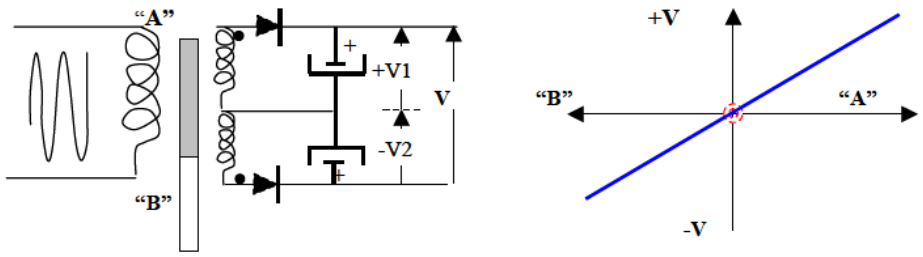


Figura 4, LVDT: Circuito Eléctrico y gráfico con el Elemento Permeable Centrado [1]

Si la varilla que contiene al elemento permeable se desplaza hacia el lado "A", el voltaje "V1" será más grande que el "V2" y entonces el voltaje de salida será "positivo" (luego de su rectificación).

De manera contraria si la varilla se desplaza hacia el lado "B" el voltaje "V2" será mayor que el de "V1" y por lo tanto el voltaje de salida será negativo (luego de su rectificación).

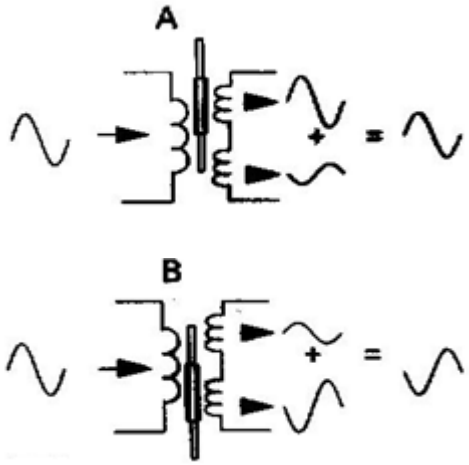


Figura 5, posiciones extremas de una LVDT [1]

Es decir el voltaje de salida de la LVDT depende de la posición instantánea de la varilla y por lo tanto es un excelente medidor de desplazamiento entre dos cuerpos.

- El desplazamiento de la Válvula Principal de la Servoválvula con respecto al cuerpo fijo de la misma, es una medida de cuanto se abrió la válvula y por lo tanto de cuanto flujo hidráulico está pasando y en qué dirección. Si el vibrador esta en reposo sin vibrar, se deberá detectar un valor de 0 voltios o un valor muy próximo a él.

- El desplazamiento de la Masa de Reacción con respecto a la Plancha: Si el vibrador esta sin vibrar, se deberá detectar un valor muy cercano a 0 voltios, indicando dicha condición de reposo. Si el vibrador se encuentra vibrando el voltaje cambiará de positivo a negativo análogamente con cada semiciclo del barrido.

Cuando no estamos ejecutando un barrido, las LVDTs permitirán centrar, por "realimentación negativa": 1) a la Válvula Principal (Main Valve) de la Servoválvula y (2): al Pistón del actuador con respecto a la Masa de Reacción (Reaction Mass), ya que un desplazamiento de la varilla de su centro, genera un voltaje eléctrico que el Amplificador Sumador del VCE sumará parcialmente y con polaridad opuesta a los "0 Voltios" del barrido. Este pequeño voltaje eléctrico aplicado al "Torque Motor" de la Servoválvula, generará un flujo hidráulico que desplazará a la "Main Valve" (y por lo tanto también al Pistón del Actuador), compensando al desplazamiento original dinámicamente.

En todas las VCE, los voltajes generados por las LVDTs de Válvula y de Masa, se emplean para la "auto calibración del Vibrador", donde se establecen los porcentajes de realimentación de cada circuito de LVDT que se aplicará al Amplificador Sumador. Solamente el Operador del Vibrador deberá informar a dicha VCE al inicio de la calibración, si la Masa se encuentra "arriba o abajo" (para definir la polaridad de medida).

Nota: Todo lo anterior es válido dentro de límites de corrientes eléctricas de realimentación pequeñas ya que cuando los requerimientos son importantes, tanto la LVDT de Servoválvula como la de Masa deberán ser ajustadas mecánicamente hasta centrarlas lo mejor posible (que se logra cuando los valores de realimentación sean mínimos)

Generador del Barrido de Frecuencias (Sweep Generators):

El proceso electrónico de la generación del barrido de frecuencias se encuentra ahora muy integrado electrónicamente y se hace imposible obtener un concepto del análisis del mismo, así que me voy a referir al momento donde la integración electrónica era discreta y cada hecho físico podía ser fácilmente explicado.

En el diagrama esquemático de la Figura 3, vemos que existen 2 bloques indicando una generadora de barridos en cada uno de ellos, uno denominado: "Clock Reference" y el otro denominado: "Drive Reference". Si bien ambos bloques poseen gran semejanza, su empleo en la VCE es muy diferente.

En general podemos decir que la "Clock Reference", la posee tanto la Caja del Vibrador (VCE) como también la unidad Sismógrafo (ESG), pues el barrido de frecuencias de los vibradores se debe correlar con el barrido piloto en el Sismógrafo. Por lo tanto la generación del barrido, salvo algunas diferencias especialmente de tiempos, se debe generar de igual manera y simultáneamente tanto en la ESG como en las VCEs.

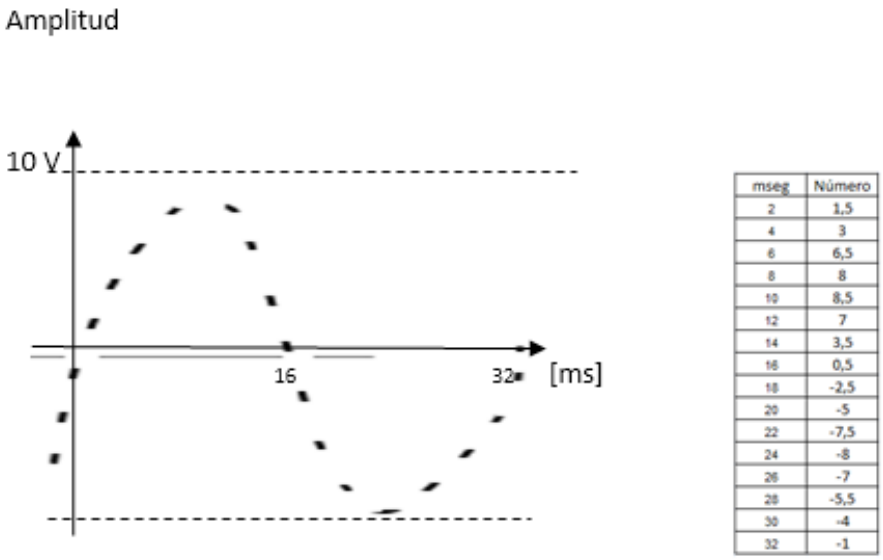
La **"Drive Reference"** solamente es necesaria en las VCE, pues es el que causa la fuerza hidráulica análoga a este barrido en el sistema actuador del vibrador.

Veamos cómo se genera un barrido de frecuencias electrónicamente:

La manera más práctica de procesar señales analógicas es convirtiéndolas en señales digitales, es decir en números y conservarlos en una memoria. Para hacerlo tenemos que sacar muestras de la señal a intervalos adecuados y periódicos de tiempo (muestreos de la señal).

En la figura 6, a modo de ejemplo, un ciclo de una señal sinusoidal es muestreado y cada muestra transformada en un número. Las amplitudes se encuentran en un rango de ± 10. En un ciclo de la señal sinusoidal se tomaron 16 muestras c/ 2 milisegundos (T = 35 ms), es decir la frecuencia de la señal es de: f = 1 / T = 1 / 35 ms ~ 29 Hz

En realidad no hace falta memorizar un ciclo completo de señal sinusoidal. Las dos generadoras de barrido poseen en sus memorias 1024 muestras de ¼ de sinusoide (0 – 1023).



mseg	Número
2	1,5
4	3
6	6,5
8	8
10	8,5
12	7
14	3,5
16	0,5
18	-2,5
20	-5
22	-7,5
24	-8
26	-7
28	-5,5
30	-4
32	-1

Figura 6, Conversión de 1 ciclo de una señal analógica en números [8]

En la Figura 7 se muestra el diagrama completo de una generadora de barridos donde una memoria de 1024 muestras posee grabada en números, un cuarto de sinusoide.

Las salidas de la memoria se aplican como entradas a un Conversor Digital-Analógico para obtener la señal sinusoidal pretendida.

Un contador programable permite suministrar las direcciones para ir leyendo la memoria anterior. Si suponemos que el contador parte de la dirección 0, leerá digitalmente en la memoria el número 0 y a medida que progresa la cuenta se irán leyendo los valores digitales del cuarto de sinusoide. Cuando la cuenta llegue a la dirección 1023 (máximo valor del contador), estaremos en el valor pico positivo de la sinusoide. Al llegar el Contador a su valor máximo, activa su salida "overflow" y esto hace que un circuito asociado active la entrada "down" del Contador, entonces este empieza la cuenta

descendente a partir de la dirección 1023. De esta manera se van leyendo las direcciones de la memoria inversamente, que corresponden al segundo cuarto de ciclo, completando el semiciclo positivo de la sinusoide.

Cuando el Contador llega a la cuenta de 0, activa por segunda vez su salida "overflow" lo cual genera 2 acciones en el circuito auxiliar: (1) se vuelve a activar la entrada "up" del Contador y este comienza una nueva cuenta ascendente desde 0, (2) le cambia el "bit de signo" al Conversor D/A que producirá el primer cuarto de ciclo negativo de la señal sinusoidal. Cuando el Contador llegue nuevamente a la cuenta de 1023, activa una vez más su salida "overflow", el circuito auxiliar nuevamente activa "down" y el Contador inicia una nueva cuenta descendente. El circuito auxiliar mantiene el "bit de signo" negativo sobre el Conversor D/A pera generar el último cuarto de la sinusoide.

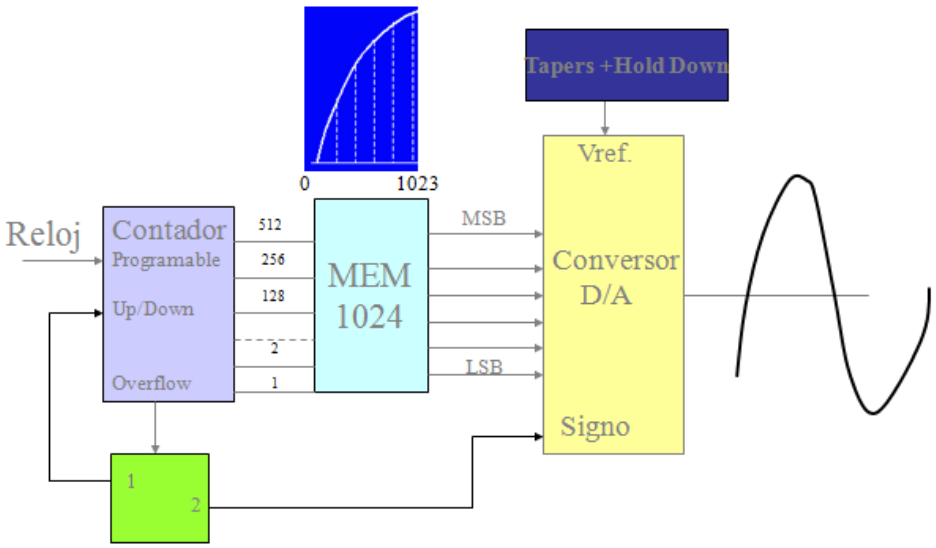


Figura 7: Generadora de Barridos (Sweep Generator) [8]

Como vimos podemos fabricar una señal sinusoidal a partir de una memoria digital de ¼ de sinusoide. Si el Reloj que hace avanzar el contador varía su periodo proporcionalmente a la frecuencia del barrido, entonces completamos la generación del mismo.

Ejemplo: si queremos producir una frecuencia de comienzo del barrido de 10 Hz, debemos barrer 4096 direcciones por ciclo en un tiempo de T = 1 / frecuencia = 1 /10 = 100 milisegundos. El Reloj deberá poseer una frecuencia 4096 veces superior a la del barrido, es decir 10 $_x$ 4096 = 40960 Hz = 40,96 KHz.

Igualmente si la frecuencia final es de 100 Hz, el reloj deberá finalizar con un periodo de:

Tr = 1 / 4096 = 0,0024 ms = 2,4 microsegundos que corresponde a una frecuencia de:

f = 1 / Tr = 4096 x 100 = 409.600 Hz = 409,6 KHz.

Si el barrido es lineal el reloj debería variar de acuerdo a la frecuencia tal como lo muestra la Figura 8.

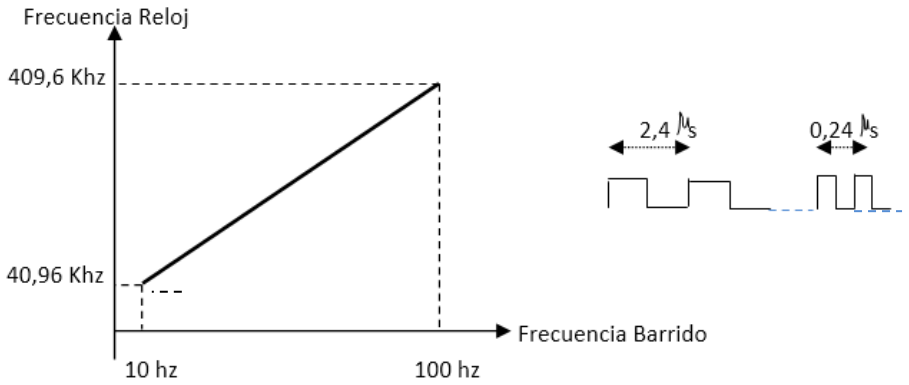


Figura 8, relación entre la frecuencia del barrido y la del Reloj del Contador [8]

Para completar la explicación de la figura 7, observamos la entrada "Vref" del Conversor D/A. Este corresponde al "Voltaje de Referencia" y controla el valor máximo que la señal analógica del Conversor, en este caso controlará la amplitud pico de la señal sinusoidal del barrido. Quiere decir que podemos controlar desde aquí la amplitud del barrido en todo momento:

El valor de amplitud pretendido se expresa en función del "holdown weight" (ver Curso Parte Uno), generalmente este valor varía entre el 70 y el 85% del "holddown", correspondiendo al 100% el valor máximo de voltaje disponible.

Podemos iniciar el Vref con un valor de 0 voltios y hacerlo crecer con una dada pendiente o forma de entrada, durante un cierto tiempo hasta llegar al valor final. También podremos finalizar con una gradual bajante de la amplitud. En definitiva estaríamos aplicando la función "Start / End Tapers".

Como también ocurre con muchos barridos especiales, podemos establecer una variación de amplitud del barrido diferencial para cada rango de frecuencias.

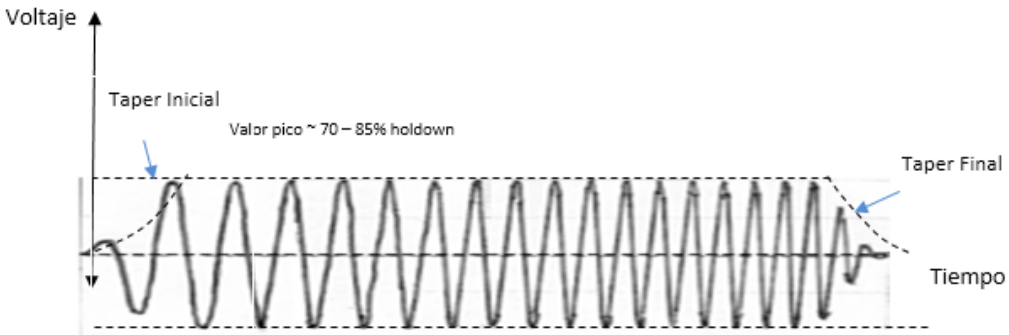


Figura 9, salida del Conversor Digital / Analógico del Generador de Barridos [8]

Sweep vs. Drive References

De acuerdo a lo anterior, un ciclo de sinusoide, para cualquier frecuencia del barrido, contiene 4096 muestras. La frecuencia de muestreo es tan grande que podemos cambiar la frecuencia a gran velocidad sin producir distorsión en ningún rango del barrido de frecuencias. Veremos que esta propiedad nos permite compensar la fase del barrido de manera eficiente.

La función de la "Sweep Reference" es generar un barrido en la VCE simultáneo al generado en la ESG del Sismógrafo. Por lo tanto este barrido servirá para corregir la diferencia de fase entre la fuerza del barrido realmente aplicado al terreno (Ground Force) y dicha referencia.

La función de la "Drive Reference" es proveer la señal electrónica del barrido sísmico a la Servoválvula del vibrador y así producir una fuerza análoga (vibración sísmica) sobre el terreno. Si no existiera ningún retardo de tiempo debido a la inercia mecánica (de la Servoválvula y actuador del vibrador) el reloj de la "Drive Generator" seria el mismo que el de la "Sweep Generator" y ambos módulos no se diferenciarían. Pero el barrido que recibe el terreno (ground force) debe ser permanentemente corregido durante su longitud para mantenerlo aceptablemente en fase con el barrido de referencia, y por lo tanto el reloj de la "Drive Reference" deberá ser más rápido o más lento que el de la "Sweep Generator" dependiendo de la fase instantánea que determine el módulo "Phase Comparator" (Comparador de Fases, ver figura 3).

Corrección de Fase

Cono sabemos, la señal "Weighted Sum" es la suma pesada de los voltajes generados por los acelerómetros de masa y de plancha y es la que se utiliza como realimentación para comparar y corregir la fase y la amplitud de la "Ground Force". También conocemos que debido a las alinealidades en las respuestas del vibro y del terreno, al barrido efectivamente aplicado se le han sumado distorsiones armónicas y no armónicas del barrido fundamental. Como nos interesa mantener la fase de la componente fundamental del barrido entregado al terreno (porque es con la señal fundamental con la que generalmente se correlacionan los datos sísmicos obtenidos con vibradores), la "Weighted Sum" (o "Fuerza Bruta"; también se la denomina "Absolute Force", "Peak Force", "Raw Force", etc) debe ser filtrada de distorsiones para obtener la "Fundamental Ground Force".

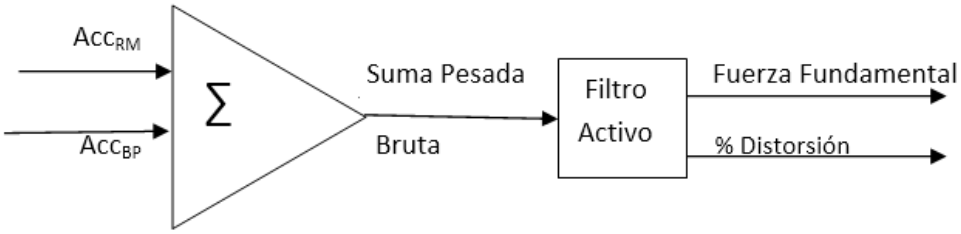


Figura 10, Suma pesada de aceleraciones y filtrado [8]

En la figura 10 un filtro activo, filtra las componentes de frecuencia que no corresponden al barrido y que se sumaron algebraicamente al mismo. Las salidas del filtro son:

- Fuerza Fundamental del Terreno (Fundamental Ground Force).
- Distorsiones armónicas y no armónicas (los porcentajes de la distorsión pico y promedio, serán utilizados luego para limitar la fuerza de salida del vibrador).

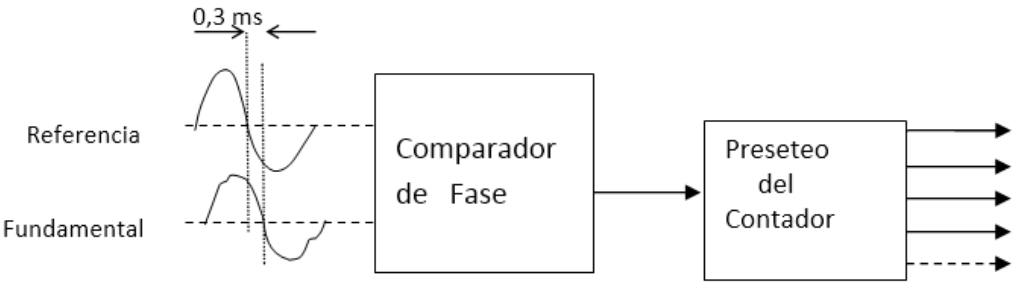


Figura 11, Comparador de fase [8]

La figura 11 muestra una manera elemental de medir la fase entre dos señales, midiendo la diferencia de tiempo entre el cruce por cero de ambas señales.

Ejemplo: Supongamos que la diferencia de tiempo entre la Referencia y la Fundamental (Ground Force) fue de 0,3 ms y que la frecuencia de la señal de Referencia era de 20 Hz (T= 1/20 = 50 ms). Entonces la diferencia de fase entre la Referencia y la Fundamental Ground Force es de:

$$0{,}3 \text{ ms} \times 360^{\circ} / 50 \text{ ms} = 2{,}2^{\circ}.$$

La diferencia de fase anterior significa un atraso de la Fundamental Ground Force con respecto a la Referencia ya que esta última "pasa por 0" un tiempo antes que la fundamental.

Si 1024 direcciones representaban 90º de una sinusoide, 2,2º de atraso significa que, la Fundamental se atrasa en: $2{,}2 \times 1024 / 90 = 25$ direcciones. Si en ese momento adelantamos 25 direcciones al contador de la Generadora de Barridos (figura 7), compensamos exactamente la diferencia de fase anterior.

Vemos que modificando la dirección instantánea del Contador de la "Reference Drive", podemos lograr un adelanto de fase igual al retraso indicado por el Comparador de Fase (por supuesto que también se pueden compensar adelantos de fase cuando el caso lo requiera).

La mejor compensación de fase es necesaria para que el grupo de vibradores produzca la mejor suma de energía en el terreno y para que el dato sísmico adquirido correlacione de la mejor manera con la señal "Piloto de Correlación". Pero esto no es tan sencillo de aplicar a sistemas realimentados físicamente como los vibradores sísmicos. Si la compensación es muy lenta las correcciones no son tan eficaces pero si las aceleramos en demasía se producen auto oscilaciones en el sistema que distorsiona la señal sísmica. Como vemos ha pasado mucho tiempo y la compensación de fase sigue siendo una opción de compromiso entre ambos resultados y, a su vez, depende de las características del terreno vibrado.

Lo anterior se trata solamente de una explicación conceptual. Sabemos que la señal del barrido se encuentra digitalizada a muy alta frecuencia de muestreo (en 1 ciclo existen 4096 muestras, para cualquier frecuencia del barrido)

Algún grado de distorsión adicional estamos generando al barrido con una corrección total instantánea. Por lo tanto la corrección de fase deberá ser realizada con cierta gradualidad.

En el primer barrido que ejecute un vibrador, no existirá ninguna compensación de fase inicial, si es que no se "adelanta" el Contador de la "Reference Drive" con un valor de tiempo lo más parecido posible al retardo por acción-reacción vibrador-terreno (este tiempo es del orden de los 13 ms). El parámetro "Initial Delay" identifica en las VCEs a la diferencia de tiempo en que arrancará adelantado el barrido de la "Reference Drive" con respecto a la Reference Clock". Por supuesto que ejecutando 3 o cuatro barridos previos a la adquisición de un VP o test, es suficiente para que el sistema se ajuste automáticamente al tiempo exacto del retardo inercial.

El Control Automático de Amplitud

Como vimos, las correcciones de fase se producen en el generador de barrido "Drive Reference", adelantando o atrasando los tiempos de su generación, luego ese barrido digital se convierte en analógico en el Conversor D/A siendo la amplitud de salida (fuera de la zona de "tapers") proporcional al valor del "Holdown". Esta señal analógica se aplica al Control Automático de Amplitud (AGC).

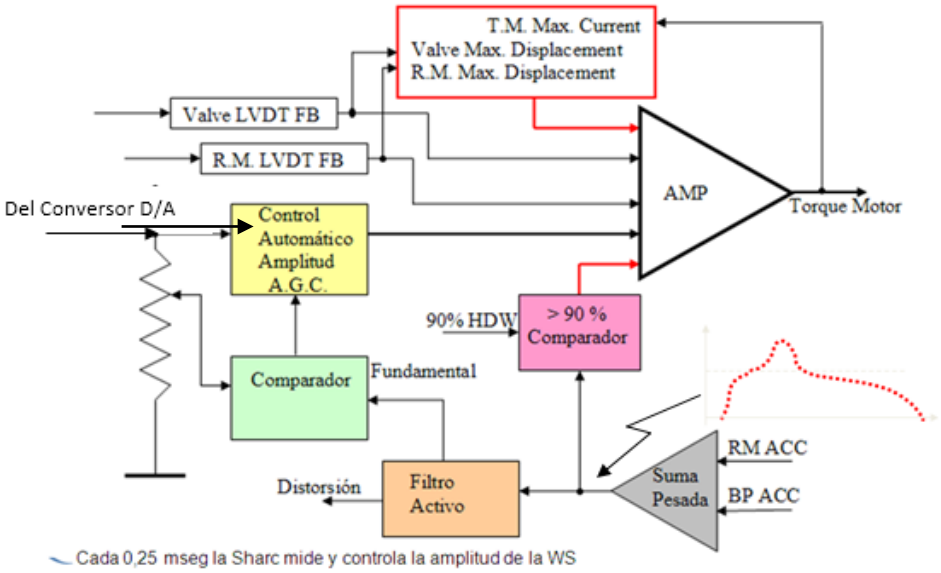
El Barrido corregido en fase y de amplitud equivalente al "holdown" alimenta al AGC cuya misión será aumentar o bajar la amplitud del barrido recibido en función de la orden que le de el Comparador (en verde en la figura 12).

El Comparador compara la Fundamental de la "Weighted Sum" con el porcentaje de Fuerza de Salida preseteada para el barrido (generalmente se

coloca entre el 70% y 85% del "holdown") y le indica al AGC si debe aumentar o disminuir la amplitud del barrido de salida.

La salida de AGC, corresponde al Barrido corregido en fase y en amplitud y se aplica al Amplificador Sumador junto a otras entradas.

El Detector de Desplazamiento de la Masa de Reacción (RM LVDT FB) y el de la Servoválvula (Valve LVDT FB), aplican un porcentaje del voltaje generado sobre el Amplificador Sumador, y por ser estos voltajes productos del mismo Barrido, decimos que se trata de una "realimentación" y decimos que es una "realimentación negativa" porque se aplican con polaridad inversa al Barrido generado para amortiguar la respuesta del sistema y que no se produzcan oscilaciones. Los porcentajes de realimentación son determinados y colocados automáticamente (tanto en Pelton como en Sercel) durante la Calibración Automática de los Vibradores.



El Amplificador Sumador tiene la propiedad de atenuar el Barrido corregido que le llega a su entrada, disminuyendo, en su salida, la corriente eléctrica (proporcional a la amplitud del Barrido) que le entrega al "Torque Motor, si los siguientes límites son alcanzados:

- Si la "Weighted Sum" supera al 90% del "Holdown". Como se ve en la figura 12 existe un comparador que se dispara si la Suma Pesada Bruta supera el valor mencionado. La reducción de amplitud, es algunas décimas de decibel (dB) en cada muestreo (0,25 ms en las VibPro). Por lo tanto no se puede pretender un buen control de amplitud del barrido, si el preseteo de fuerza permite que este valor más el contenido armónico que se le suma, supera al 90% del "holdown". Se debe cumplir siempre que:

  Fundamental + Armónicas < 90% Holdown

- Si la Corriente Eléctrica que el Amplificador Sumador envía al Motor de Torque, supera el máximo permitido, que es de 80 mA, para Torque Motors Moog Serie 760 (establecido por el fabricante), el Amplificador Sumador también bajará décimas de dB para mantener la corriente menor a ese límite.

- Si el desplazamiento de la "Main Valve" supera a la carrera preseteada (generalmente es de 80 – 90 % del "stroke"), también el Amplificador Sumador disminuirá la corriente eléctrica hacia el "Totque Motors" en algunas décimas de dB.

- Si la carrera del Pistón solidario a la Plancha) supera los límites establecidos (preseteados al 90% de la carrera total o "stroke"), también el Amplificador Sumador disminuirá la corriente eléctrica entregada a la Servoválvula.

- También se establece un valor máximo para la fuerza generada en la Masa de Reacción generalmente se coloca al 100% del "holdown", sobre todo en baja frecuencia donde el voltaje generado se utiliza para evitar la "distorsión por cruce de cero" de la Servoválvula.

NOTA: Por lo anterior vemos que es importante controlar estos límites para una buena performance en la respuesta de los Vibradores.

Reportes Radiales

Las pruebas de Similaridad Por Cable, son muy importantes para evaluar el estado de los Vibradores, por lo tanto se elige realizarlas en un terreno plano y con buena respuesta, de tal manera de evaluar solamente a los Vibradores y no el terreno. A partir de aquí se pueden comparar los resultados obtenidos dinámicamente, cuando los vibradores entren en producción y vibren en diferentes clases de superficies, para ello utilizamos: los PSS (en VibPro) y VSS (en Sercel) y las Similaridades Radiales, que nos permiten conocer sus respuestas barrido por barrido sin demorar su operación.

Luego de cada barrido cada Vibrador en secuencia numérica, transmite al sismógrafo su performance en los denominados PSS/VSS.

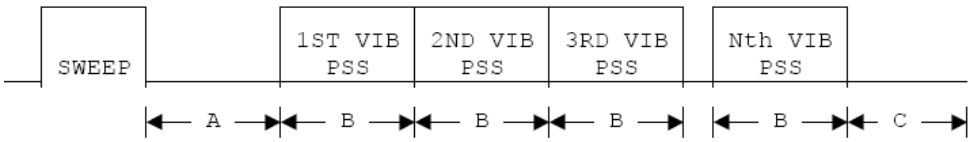


Figura 13, reporte secuencial de cada Vibrador luego de finalizado el Barrido [4].

Cuando finaliza la ejecución del Barrido (Sweep) y luego de un periodo de computación "A" (300 ms), necesaria para que el primer Vibro (de acuerdo a

su numeración) pueda completar su reporte, se establece una secuencia de transmisiones desde cada uno de los Vibradores que protagonizaron el barrido hacia el Sismógrafo, ocupando ventanas sucesivas de tiempo cuya extensión depende de la cantidad de datos que se le ha ordenado transmitir (se elige el número de PSS en función de los datos que se quieran transmitir). En general los Vibradores que transmiten el total de los datos disponibles, ocupan ventanas "B" de aproximadamente de 1200 ms).

Interpretación de los PSS de la Pelton VibPro

El programa VibraSig del VibPro, que corre en cualquier computadora cargada con el software Pelton, realiza varios análisis sobre los datos recibidos en los PSS de los Vibradores:

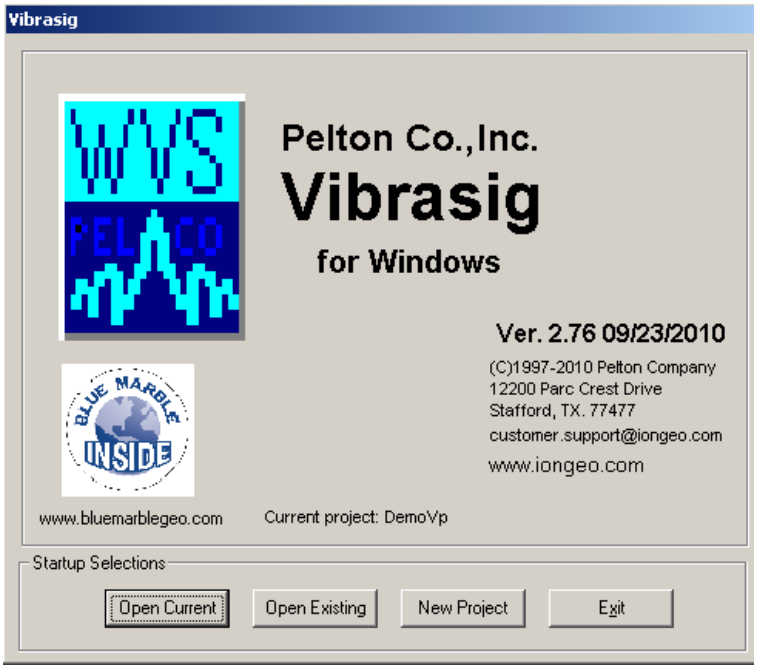


Figura 14, pantalla de ingreso al programa Vibrasig

1. Comparación de los "Checksums". Existen dos clases de "Cheksum":

   a. Checksum de Barrido (Sweep Checksum), expresado por un valor alfanumérico que deberá ser igual para cada vibro y para la unidad "Encoder" de la VibPro. Si este es diferente en algún Vibrador o en el "Encoder", indica que en esa unidad no se ejecuta el mismo barrido que en las demás unidades y debe analizarse y corregirse el error antes de ejecutar un nuevo barrido.

b. Checksum de Vibrador (Vibrator Cheksum), también es una expresión alfanumérica que expresa a los parámetros utilizados en los Vibradores (ejemplo: Fuerza de Salida, Tipo de Corrección de Fase, Pesos de la Plancha y de la Masa de Reacción, etc.). En este "Checksum" el "Encoder" no participa. Si algún Vibrador posee un diferente "Cheksum", es porque algún parámetro del Vibrador es diferente al de los demás y ese vibrador debe ser apartado hasta encontrar el error o falla.

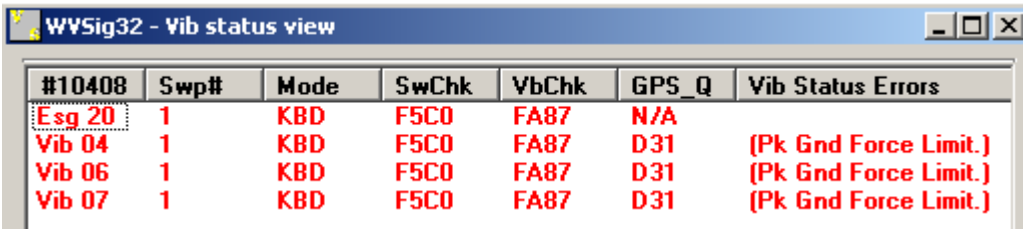


Figura 15, vista del menú de estados de la ESG y los VCEs

2. Calcula a partir de la Ondícula de la croscorrelación de "VCE Reference v Weighted Sum" transmitida en los PSS de cada Vibrador, el Espectro de Fase y de Amplitud y lo gráfica, superponiendo las respuestas de todos los Vibradores reportados en ese barrido, para su comparación.

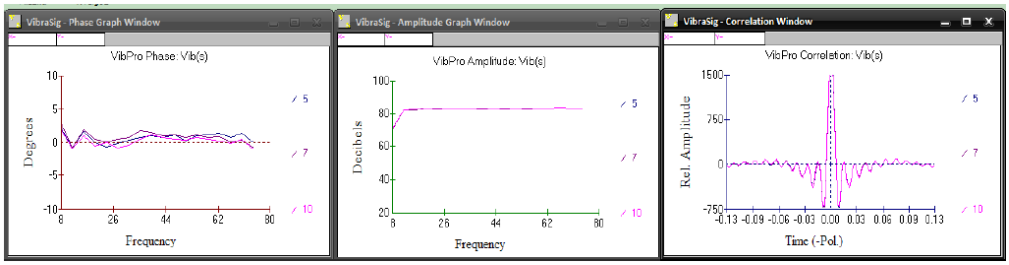


Figura 16, PSSs procesados en el sismógrafo por el VibSig

3. Muestra los valores "picos" y promedio de cada barrido para la Fase, Fuerza y Distorsión.

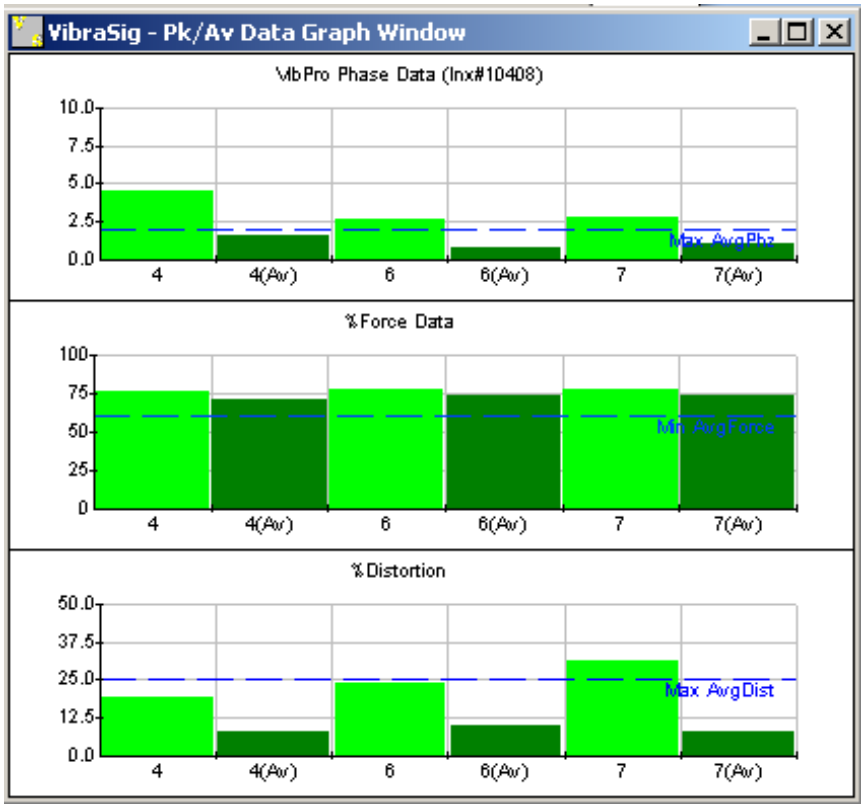


Figura 17, gráfico de barras mostrando valores picos y promedios

4. También se puede obtener un resumen de la actuación de todos los vibradores para todos los barridos emitidos.

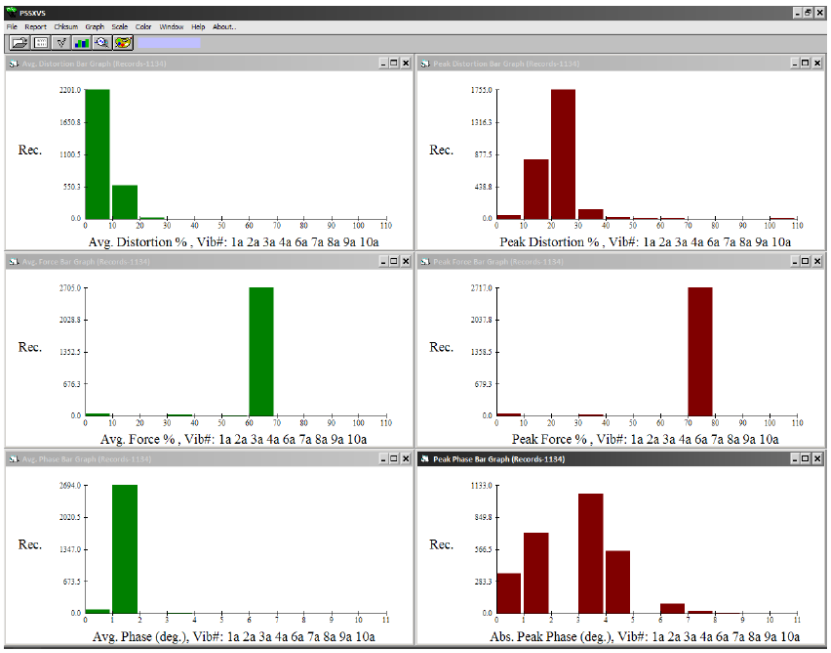


Figura 18, resumen de la actividad diaria de los vibradores

Programa VibQC de Pelton

Este programa es similar tanto para la similaridad por radio como para la utilización en el "Force Meter", para evaluar la performance individual de cada vibrador.
En el caso del "Force Meter", este aparato se utiliza para probar con acelerómetros externos a los vibradores su respuesta a un barrido.
En el caso de similaridad vía radio, el vibrador seleccionado transmite durante el barrido la "weighted sum", generada con los acelerómetros propios del vibrador o la "vibrator reference").

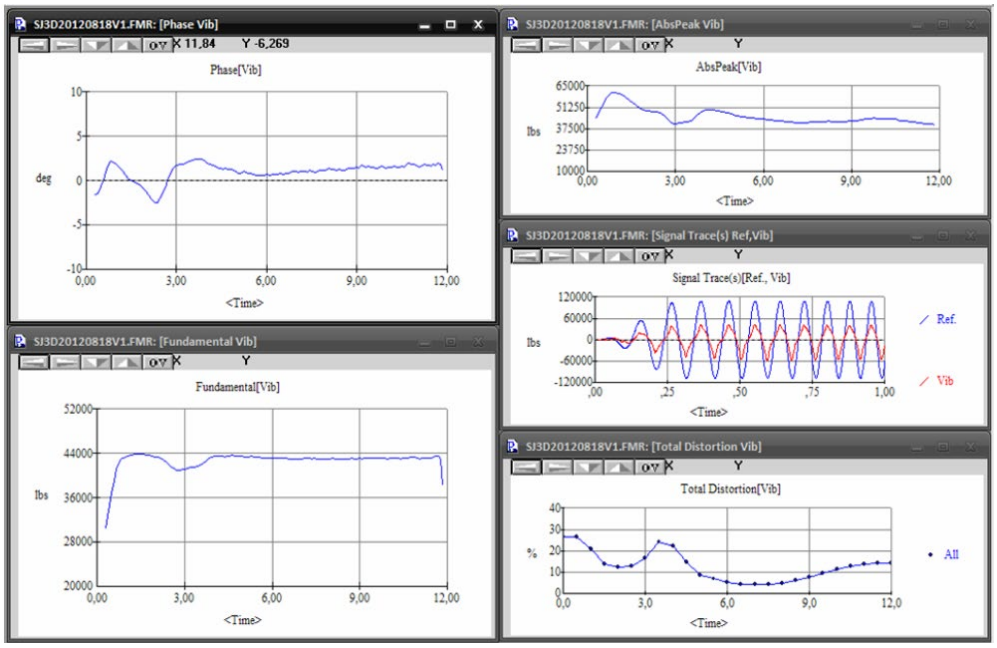


Figura 19, Resultados obtenidos con el "Force Meter"

El Ajuste del Tiempo 0 (T/0)

Es necesario que el barrido de cada vibrador y el Barrido Piloto en la ESG ocurran con la menor diferencia de tiempos posibles. Para lograr esto la ESG envía un "código de sincronismo" hacia las VCEs que estás luego reciben e interpretan para comenzar su barrido sísmico. El "código de sincronismo" se genera con la señal de "Time Break" (o Tiempo Cero, T/0) que en el sismógrafo inicia la adquisición de datos del sistema de registración.

Generalmente se utilizan radios (VHF o UHF) para transmitir el "código de sincronismo" hacia los vibradores: una colocada a la salida de la unidad ESG, que modula el código en FM, y una en c/u de los vibradores que reciben y demodulan dicho código para ingresarlo a las VCEs. Esta operación consume algunos decimas de milisegundos que deben ser medidos con precisión para atrasar en igual tiempo el comienzo del Barrido Piloto en la ESG.

El retraso de tiempo anterior depende principalmente, de los procesos de: modulación del "código de sincronismo" en la radio del ESG y de la demodulación de esa misma orden en c/u de las radios de los VCEs (modulación/demodulación FM). En menor medida influye el retardo por la

propagación electromagnética de la señal transmitida que depende de la distancia existente entre el sismógrafo y c/u de los vibradores.

Retardo de tiempo ESG-VCEs: $t = T_{radios} + T_{propagación}$

Como cada vibrador posee su propia radio y estas no han sido específicamente diseñadas para la transmisión de la orden del disparo sísmico (salvo las radios Tdma, que veremos más luego), cada una de ellas introduce un retardo distinto y habrá que seleccionar las radios de los vibradores entre las que más se acerquen en sus retrasos por demodulación. En general el tiempo de modulación/demodulación (transmisor y receptor) de radios VHF Motorola, es del orden de los 0,8 milisegundos (T_{radio}).

Resulta útil conocer el tiempo de propagación de las ondas electromagnéticas ($T_{Propagación}$), que calculamos en:

$$T_{propagación} = x / c$$

Donde:
x: distancia del sismógrafo al grupo de vibradores.
c: velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas (300.000 km/s)

Para x = 1000 metros:

$$T_{propagación} = 1 / 3 \times 10^{-5} = 3{,}3 \text{ microsegundos}$$

Para x = 10.000 metros

$$T_{propagación} = 1 / 3 \times 10^{-4} = 33{,}3 \text{ microsegundos}$$

Por lo tanto el ajuste del denominado T/0 (tiempo cero) deberá tener en cuenta la distancia entre el ESG y las VCE y en todo caso ajustar la medida a una distancia promedio entre el sismógrafo y la más lejana ubicación de los vibradores.

NOTA: Actualmente se programa el tiempo GPS en que se generará el Barrido en el Sismógrafo (Start of Data) y que se comunicará previamente a cada VCE lográndose errores de +/- 10 microseg.

Antiguamente el método utilizado era el siguiente, como se muestra en la Figura 20:

1. Se acercaba cada vibrador al sismógrafo y se conectaban las respectivas señales de referencia a un osciloscopio: Barrido Piloto (True o Pilot Reference) del ESG al Canal 1 (placa deflectora vertical) y "VCE Reference" del vibrador al Canal 2 (placa deflectora horizontal).
2. Se ejecutaba un barrido lo suficientemente largo para que podamos observar con precisión las Figuras de Lissajous generadas en el osciloscopio, especialmente para las frecuencias mas altas del barrido (por ejemplo 100 Hz).

3. Se modificaba el tiempo del "Encoder Delay" (parámetro de la ESG Pelton VibPro) hasta corregir las fases de las señales, o sea hasta que la Figura de Lissajous se corresponda a una recta inclinada a 45º. Inicialmente, cuando todavía no se había corregido el retardo de tiempo, la figura de Lissajous correspondía a una elipse tanto más grande cuanto mayor era el inicio de tiempo entre las 2 señales.
4. Se anotaba el valor del retardo medido para este vibrador.
5. Se procedía de igual manera con los restantes vibradores del grupo sísmico, anotando los tiempos de retardos medidos. Si algún vibrador poseía un retardo claramente diferente al de los demás, se le cambiaba la radio por otra que tuviese "delays" similares a las demás.
6. Con los valores de "Encoder Delay" anteriormente medidos, se hallaba el valor promedio. Este era válido si las desviaciones no superaban ± 50 microsegundos (0,05 ms = 50 micros).

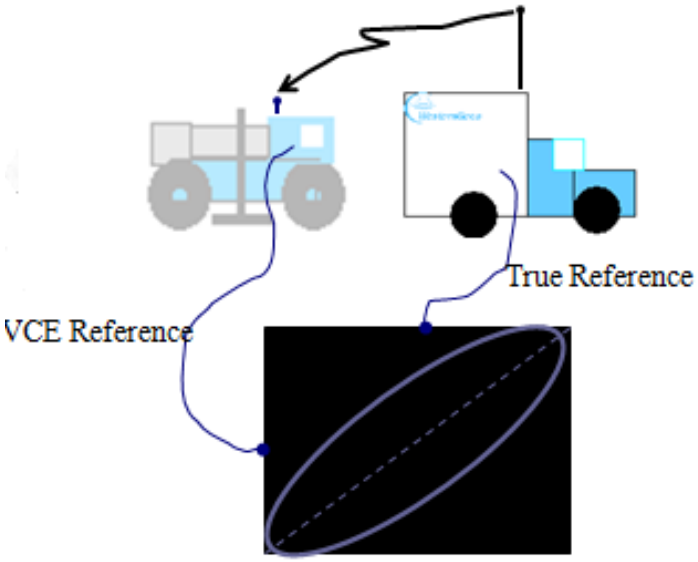


Figura 20: Medida del T/0 por medio de las Figuras de Lissajous y tabla ejemplar

Vibrador Nº	E. Delay	E. Delay Av.	Desviation
# 1	1.03 ms	0.99 ms	0.04 ms
# 2	0.98 ms		-0.01 ms
# 3	0.99 ms		0 ms
# 4	1.00 ms		0.01 ms
# 5	0.97 ms		-0.02 ms

Procedimiento para las Pelton VibPros

La unidad ESG posee la tarjeta CCC (Computer Communication Card) que permite conectar la señal VCE de Referencia del vibrador (previa una atenuación de amplitud X10) al programa VibQC, instalado en la computadora que maneja a dicha unidad Pelton. El VibQC compara la fase del Barrido Piloto (generado en el ESG) con la VCE Referencia. La

diferencia de fase por diferencia de tiempo del barrido corresponde a una variación lineal de fase con la frecuencia del barrido, es decir que se genera una rampa partiendo de 0º, la pendiente de la rampa debe ser modificada modificando el parámetro de la ESG: "Encoder Delay", hasta lograr que la misma coincida con el eje de abscisa (0º para el total del tiempo del barrido).

Mediante una similaridad por cable podemos verificar si todos los vibradores se encuentran dentro de tolerancias. Podemos acordar que los "T0s" de los vibradores, no deben diferir más de ± 50 µs con el "Time Break" (el TB origina el "Start of Data" y el comienzo del Barrido Piloto).

Los Espectros de Fase entre la Señal Piloto y la Señal de Referencia de los vibradores, que se muestra en la figura 21, permite medir las diferencias de tiempo en el inicio del barrido en cada vibrador con respecto a la "Piloto".

La pendiente de fase más grande corresponde al vibrador #9 y fue de 0,45º aproximadamente, equivalente a:

$$\frac{0{,}45^{\circ}}{80\ \text{Hz} * 360^{\circ}} = 16\ \mu\text{s} < 50\ \mu\text{s}$$

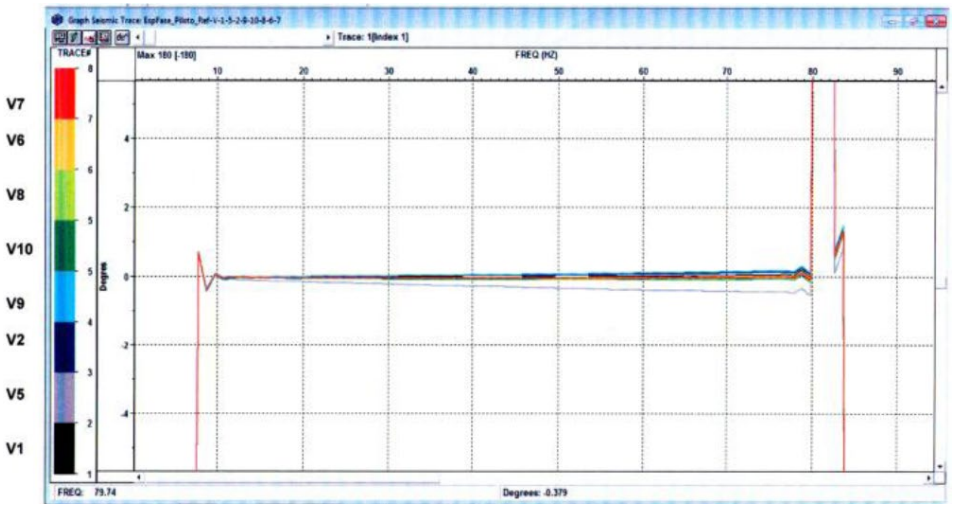


Figura 21, curvas de fase entre referencia de vibradores y Piloto

Conexionado ESG VibPro y Sercel 428

En la figura 22 se muestra un cableado entre la ESG VibPro y el equipo de adquisición Sercel 428.

- En la parte superior de la figura se muestra la conexión del ESG con la radio Motorola GM-300.
- El Sercel 428 mediante su módulo LCI (Line Control Interface) conector "Blaster 1", recibe la señal de "Time Break" para generar el "SOD" (Start of Data) y envía la Orden de Disparo (Remote Start o FO) para que se inicie un nuevo barrido de producción.
- Las señales provenientes del ESG, necesitan ser procesados por FDUs, pero necesitan ser atenuadas previamente pues poseen voltajes de ± 10 Voltios (20 voltios pico a pico) y las FDUs,

trabajando con 0 dB de ganancia, admiten un voltaje máximo de ± 2,250 Voltios. Las resistencias atenuadoras fueron colocadas para que las entradas a las FDUs no superen los ± 1 Voltios.

- Observen que la señal "Time Break" también se conecta en paralelo con un canal auxiliar para grabarlo conjuntamente con los datos sísmicos.

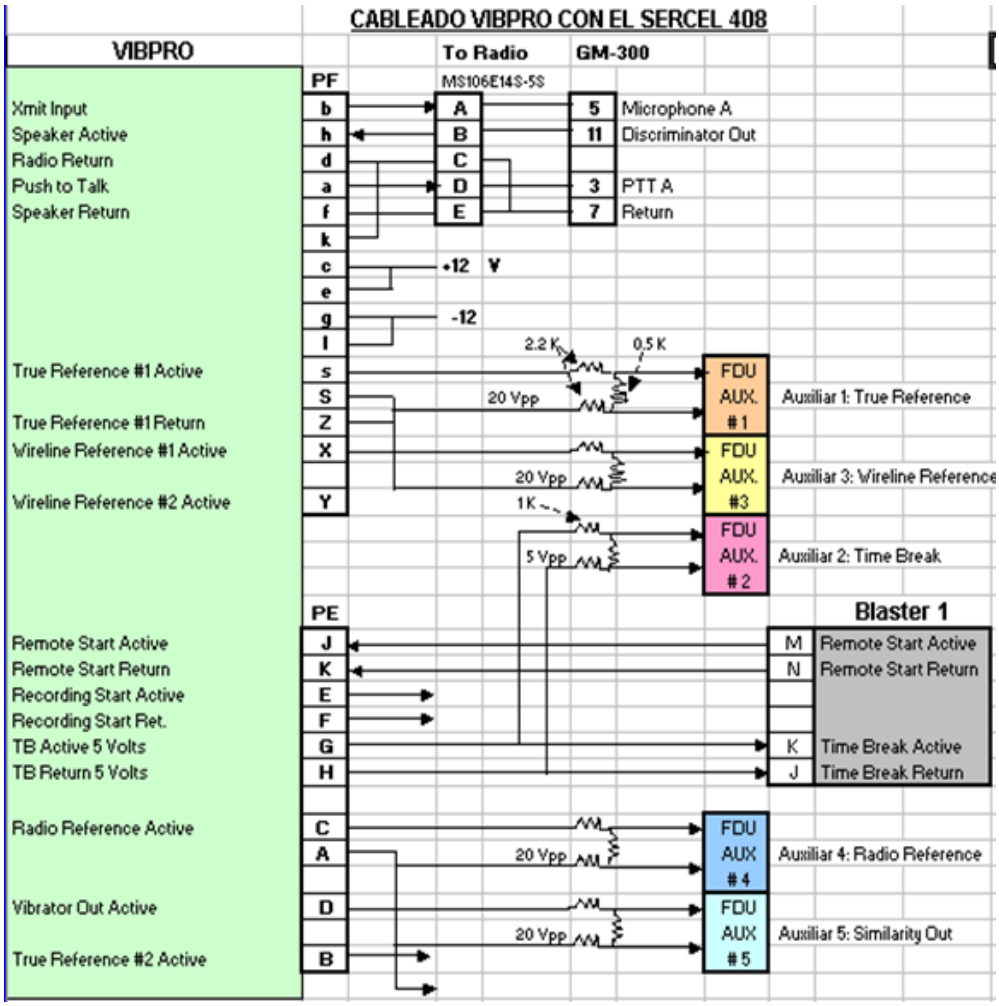


Figura 22, cableado ESG Pelton VibPro y Sercel 428

El Control Electrónico Sercel Ve432 y Ve464

Debido a la poca diferencia conceptual entre el sistema más antiguo y el más moderno Sercel Ve, optaremos por referirnos al Ve464 e informaremos las diferencias con el más antiguo (Ve432).

El DPG (Digital Pilot Generator), es la unidad Encoder del Sistema Ve464 y se conecta con el sistema de adquisición Sercel mediante una conexión Ethernet, aunque puede ser utilizado en otros sistemas de adquisición mediante su propia interface.

El DPG puede generar hasta 32 barridos digitales y 2 barridos pilotos analógicos para ser utilizados como "barridos pilotos" en el sistema de adquisición.



Figura 23, Digital Pilot Generator (DPG) [7]

El DSD (Digital Servo Driver), es la unidad Decoder que se instala en cada vibrador y controla la amplitud y fase de la fuerza ejercida sobre el terreno y transmite el QC de cada uno de los barridos emitidos.



Figura 24, Digital Servo Drive (DSD) [7]

Una diferencia entre los Decoders DSD y VibPro, es que el DSD necesita calcular matemáticamente el modelo vibro-terreno, función que denominan "Auto Adaptative Servo Mechanism", utilizando barridos predeterminados que deben ser ejecutados previamente (proceso de identificación) y por lo tanto la Servoválvula no puede utilizar el "manifold DR".

Una importante incorporación en el sistema Ve464, es la "Radio TDMA" (Time Division Multiple Accses), la cual permite que varios usuarios compartan la misma frecuencia de radio en diferentes periodos de tiempo (time slots), sin interferencias entre diferentes flotas de vibradores (hasta 32 "flotas" pueden emplearse simultáneamente). Las Radios TDMA vienen con el sistema GPS incorporado lo cual permite una sincronización casi perfecta de los barridos, ya que el barrido piloto del DPG y cada barrido en los DSD, comienzan con un mismo tiempo GPS, siendo la precisión del T0 de ± 10 μs.

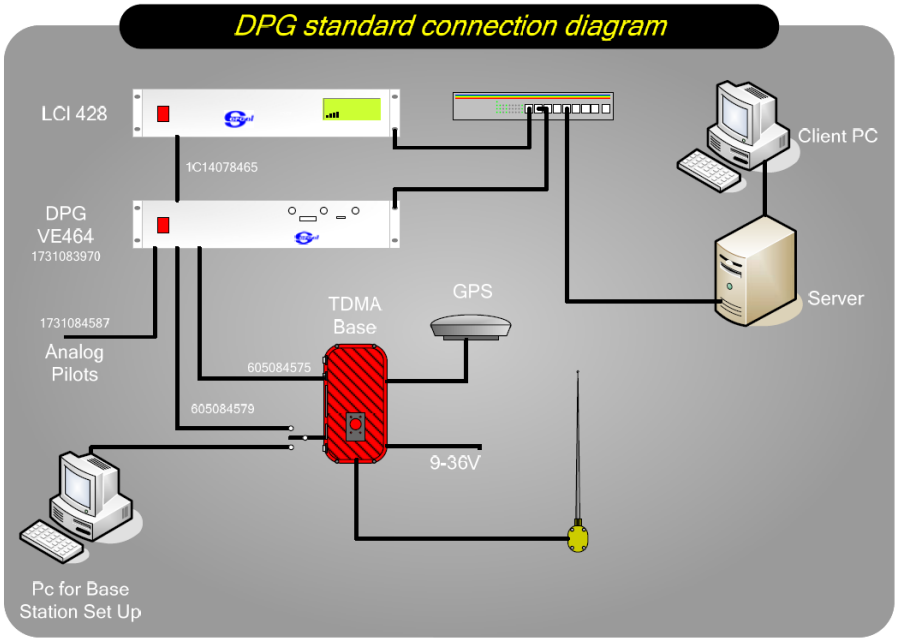


Figura 25, Sistema de Adquisición Sercel 428 [7]

En la figura que sigue se observan los diferentes conectores de la DPG:

- La orden de disparo (FO) es transmitida desde la "Client PC" via Ethernet a la DPG.
- El "time break (TB) es transmitido por la DPG por cable hacia la entrada "Blaster" del LCI 428.

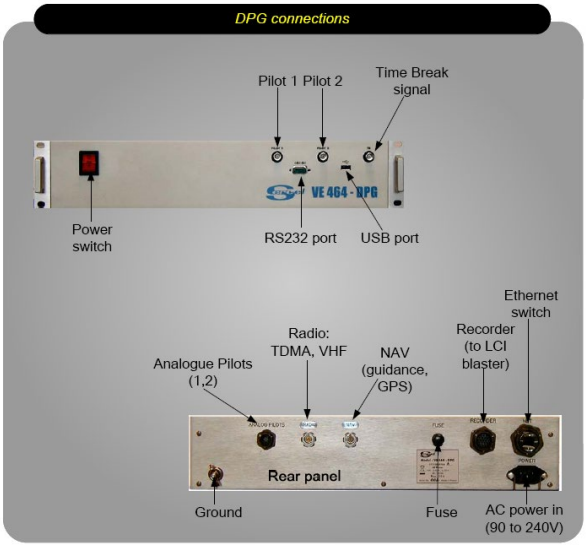


Figura 24, conectores en la DPG Ve464 [7]

El conexionado de la DSD en el vibrador, es bastante similar a la que vimos con la VibPro.

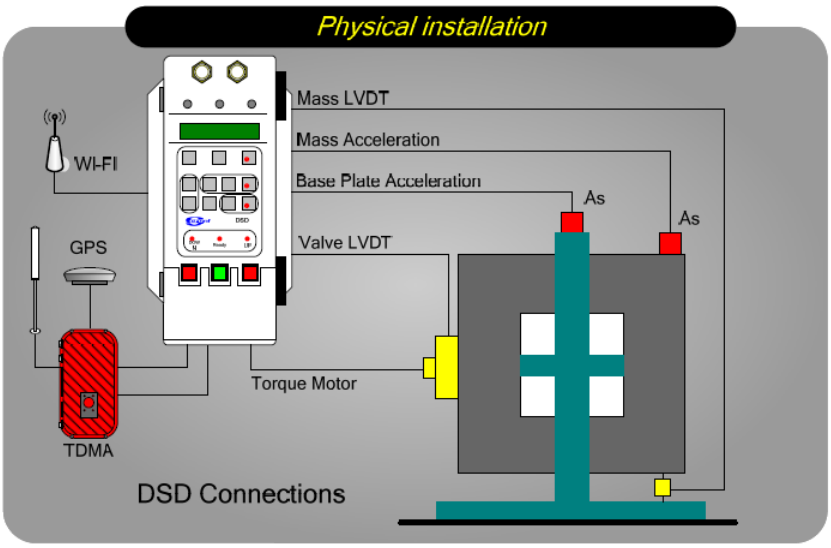


Figura 25, conexionado de la DSD con el sistema actuador del vibrador [7]

El Sistema Servo-Mecánico Auto-Adaptativo

Un sistema mecánico auto adaptativo es usado por las DSD para controlar continuamente la fuerza aplicada al terreno, basado en los principios del "Filtro de Kalman".

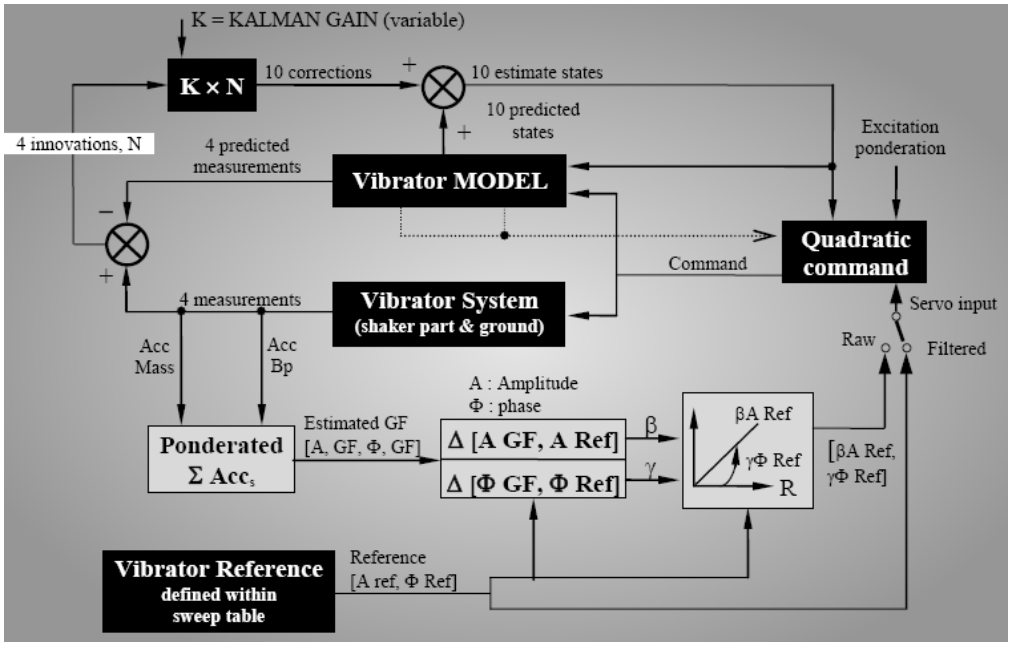


Figura 26, diagrama en bloques del Control Auto-adaptativo [7]

Los lazos de control del sistema se pueden dividir, para mejor comprensión, en dos sub-lazos:

- State Loop Control.
- Servo Input Loop Control.

State Loop Control

Este sub lazo se compone de los siguientes bloques:

- Vibrator System: Compuesto por cuatro señales provenientes del: Acelerómetro de Masa, del Acelerómetro de Plancha, del LVDT de Masa y del LVDT de Válvula.

- Vibrator Model: Corresponde al modelo matemático que el sistema predice en función del comportamiento de la fuerza del vibrador y de la reacción del terreno. Se basa en los datos extraídos de las siguientes señales: Aceleración de la Masa, Velocidad de la Plancha, Movimiento de la Masa y Movimiento de la Plancha.

- Kalman Filter: Vendría a ser como un estimador que compara el modelo del vibrador contra los obtenidos en el barrido que se está ejecutando, para aplicar correcciones al barrido y actualizar el modelo. Si los valores de las señales medidas durante el barrido son normales, es decir no muy diferentes a las del modelo, estas se emplearan para las correcciones; pero si alguna de estas señales se presenta muy diferente (por ejemplo: por ruido) entonces se aplicaran las del modelo para las correcciones del barrido.

- Quadratic Command: Es el encargado de suministrar con anticipación la corriente al Torque Motor (250 μs antes de aplicarse) como producto de las 10 estimaciones realizadas por el Kalman Filter y el Vibrator Model.

Servo control Input

Existen dos modos de controlar el sistema auto-adaptativo del servo: Filter y Raw.

La opción **"Filter",** utiliza la salida del Kalman Filter correspondiente a los estados estimados por el "Vibrator Model", es decir que el "Quadratic Command" trata de generar una corriente de salida al "Torque Motor" similar a la trayectoria de la señal de Referencia.

La opción **"Raw",** utiliza la misma técnica de ajuste de corrección de Amplitud y Fase en tiempo real ya conocida por ustedes al comienzo del capítulo, antes de aplicarse a la sección "Quadratic Command".

Si se elije esta opción conviene realizar, previo al comienzo de la operaciones de adquisición, un barrido de prueba con la opción "Filter", para que en operación se pueda detectar alguna incoherencia que pudiera ocurrir con las señales raw de los acelerómetros y LVDTs, para que le llegue al "Quadratic Command" la corrección correspondiente (la del modelo construido durante la identificación).

Servo Control Excitación parameter

Este es un parámetro que debe ser elegido para graduar la acción del "Quadratic Command". Un valor pequeño de excitación (= 0.2 por ejemplo), permite que el sistema aplique con mayor rapidez las correcciones para compensar las diferencias entre la señal de referencia y la respuesta del terreno (ground force). Un valor alto de excitación (= 0.9 por ejemplo) lo hace más lento para aplicar las correcciones. Por lo tanto debemos graduar el valor de esta excitación, a las características de la respuesta que obtengamos de la "ground force". Un valor de 0.5 podría considerarse un valor "default".

El Sistema Ve464 y el Sercel 428

La unidad DPG se conecta al Sercel 428 via Ethernet. Para acceder al DPG debemos seleccionar desde la pantalla e428 del "Client PC" el siguiente icono:



Aparecerá en la pantalla el menú principal de jVe464 (Ve464 Main Window)

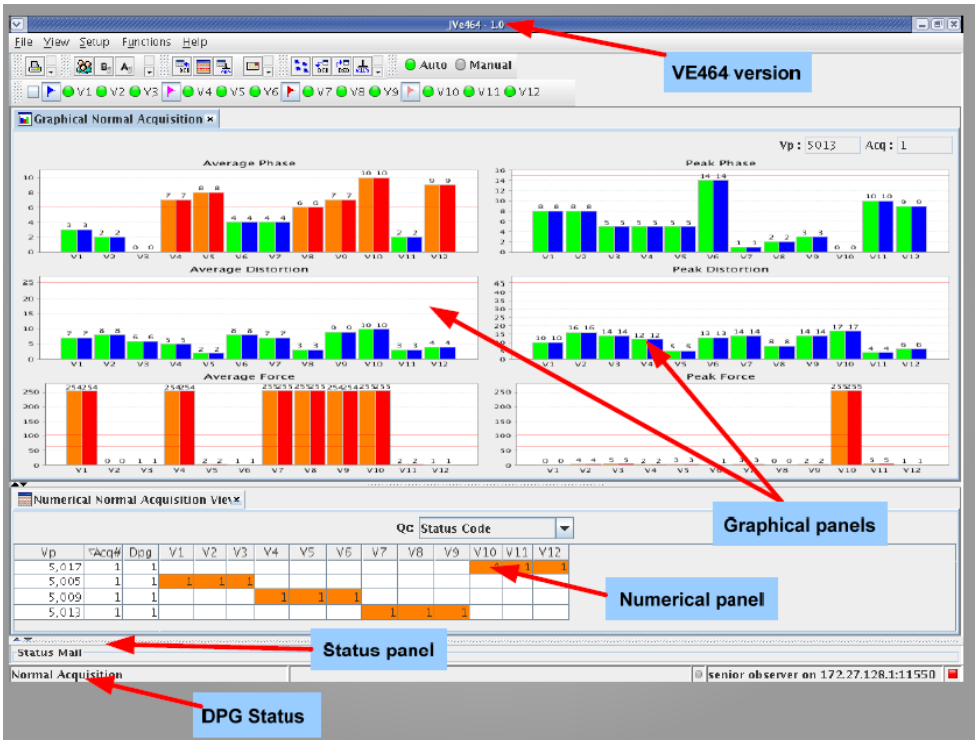


Figura 27, Ve 464 Main Menu [7]

Desde el menú principal seleccionamos: Setup > Vibrator Crew Setup

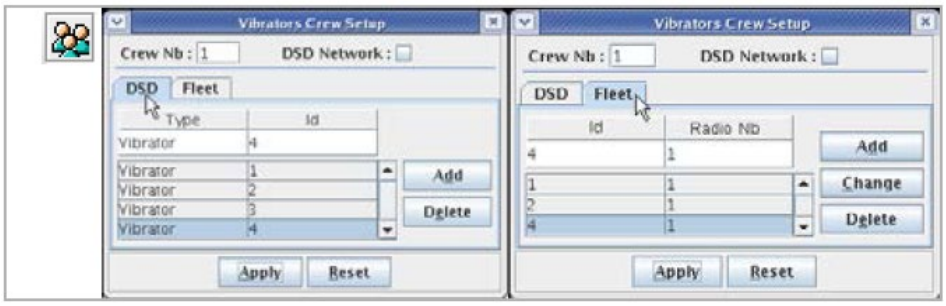


Figura 28, Vibrator Crew Setup Menu [7]

Debemos definir:

- Crew Nb: Identificación del Grupo (1 -4).
- DSD Network: Indica si la red WiFi entre los vibradores es usada.
- Id: Indica que vibrador está siendo usado en el grupo, definido por su número.
- Radio Nb: Indica a que radio TDMA base pertenece cada vibrador (2 TDMA bases por DPG se admite).

Basic Type Setup

En esta ventana se define el tipo de barrido y los parámetros del mismo que van a ser ejecutados por las DSD. Hasta 32 barridos digitales pueden ser definidos.

En el ejemplo mostrado más abajo, se eligió un tipo de barrido "Linear" con los siguientes parámetros:

- Star Taper: 200 ms
- End Taper: 200 ms
- Initial Phase: 0º
- Ti (s): 1. Tiempo Inicial del Barrido: 0 segundos (generalmente no existe delay).
  2. Tiempo final del Barrido: 8 segundos
- Fi (Hz): 1. Frecuencia Inicial del Barrido: 6 Hz.
  : 2. Frecuencia Final del Barrido: 86 Hz.
- Tj (s): 1. Tiempo Inicial del Barrido: 0 segundos.
- Aj (%): 1. Porcentaje de la fuerza programada aplicada para t = 0 s: 100%.
- Tj (s): 2. Tiempo final del Barrido: 8 segundos.

- Aj (%): 2. Porcentaje de la fuerza programada aplicada para t = 8 s: 100%

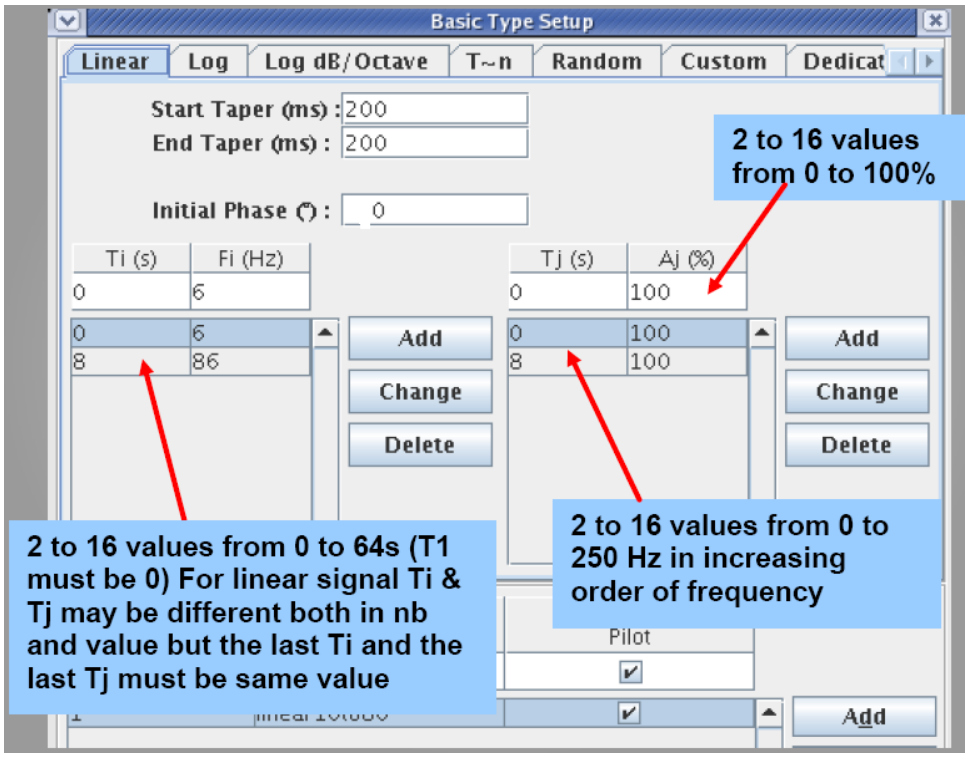


Figura 29, Basic Type Setup, ejmplo para un barrido lineal [7]

Acquisition Type Setup

Esta configuración: "Acquisition Setup", le indica a cada DSD seleccionado de una flota, y a la DPG, que es lo que debe hacer.

Los parámetros son los siguientes:

- Basic Type Nb: del seteo anterior, cual es el tipo de barrido (Linear, por ejemplo), que debe ejecutar la flota de DSDs.

- Pilot Basic Nb: Cual es la señal piloto (1 de 4) que debe enviar el DPG, mediante sus "Analog Output" al e428, para ser usada en el proceso de correlación. Esta señal se conecta con una FDU perteneciente a los canales auxiliares del e428, ídem Time Break.

- Auto Lift: Le indica a la DSD que debe (Yes) o no (No) levantar la plancha (baseplate) después de ejecutar los barridos.

- High Line Sync: Si se selecciona "Up", el T0 (o comienzo de un barrido) se sincroniza cuando una onda electromagnética inducida por una línea de alta tensión (High Line), pasa de un semiciclo

negativo a un semiciclo positivo (+ cruce por cero), "Down" el T0 se produce cuando la onda inducida pasa de un semiciclo positivo a uno negativo; "Free" no existe sincronización. Este sistema de eliminación de ruidos por inducción externa es muy útil para atenuar por suma de polaridades opuestas, las inducciones del registro sísmico.

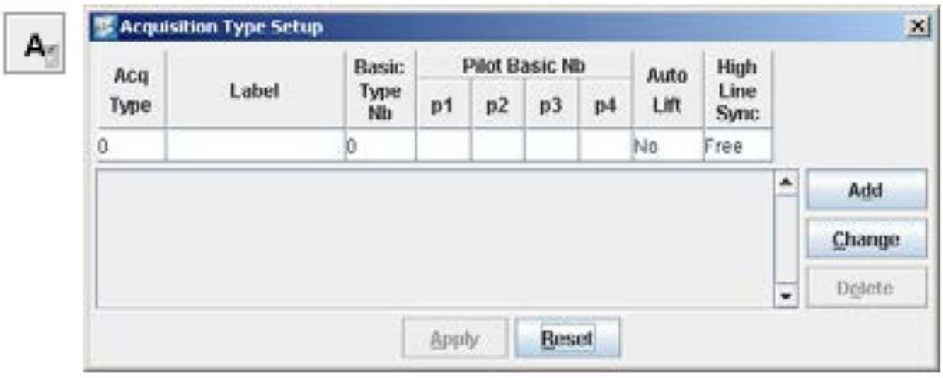


Figura 30, Acquisition Type Setup [7]

Radio Managment

El sistema Ve464 puede ser utilizado con radios VHF convencionales o con radios TMDA.

- Type Of Radio: "Analogical" seleccionamos utilizar radios VHF convencional y el menú se reduce a:
- Get DsD Status: "At end of sweep": cada DSD reporta su estado al finalizar el barrido. "During the sweep": los DSDs transmiten su estado durante la ejecución del barrido siguiente, ahorrando tiempo.

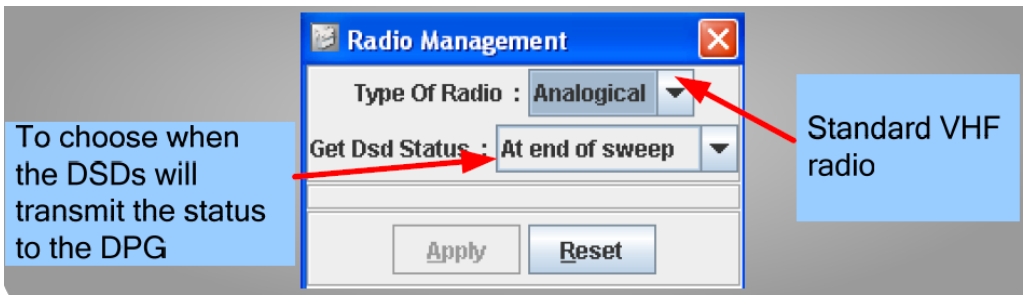


Figura 31, Radio Management Menu, option: VHF [7]

Type of Radio: "Tdma". Aparece una ventana diferente a la anterior donde:

- Gps Correction: permite elegir el tipo de corrección utilizada para la posición gps obtenida por el DSD:
  - No correction.
  - Differential Compress DGPS correction.
  - Differential Uncompressed: RTK mode.
  - Correction rate: generalmente se usa una velocidad de corrección de 200 bits/segundo con RTCM y 1600 bits/segundo con RTK.

- Nb of Tdma: generalmente se usa un solo Tdma, pero se puede expandir a dos radios Tdma si se requiere más información.
- Channel 1: se encuentran disponibles 9 canales (frecuencias). Si se usan 2 Tdma, deben usarse en canales distintos.
- Baud Rate 1: la cantidad de bits por segundo disponible va de 4800 a 14400. El valor default es 12000.
- Base Id 1: es la identificación del Tdma del DPG.
- Tracking: habilita al seguimiento continuo de la posición GPS de los DSDs (disponible en el conector DB25 "Data" del Tdma del DPG.

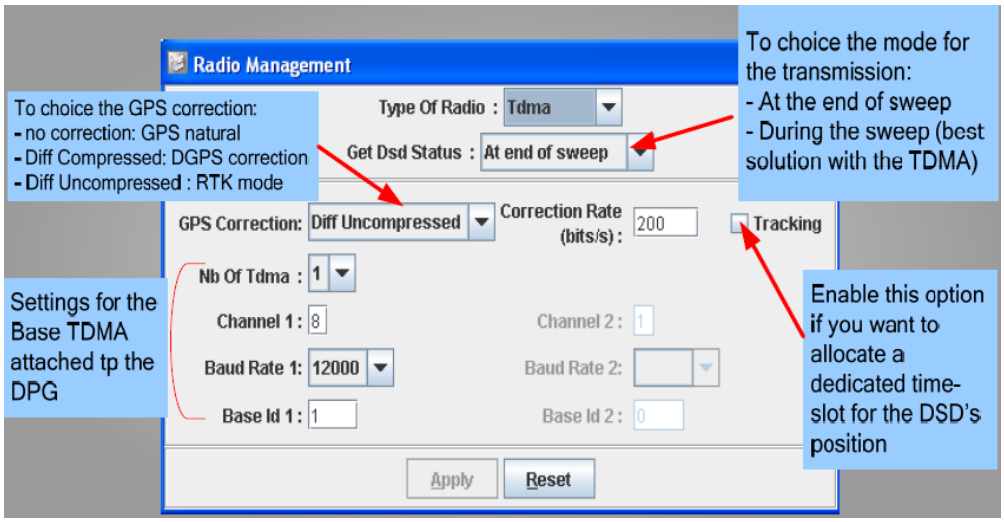


Figura 32, Radio Management, option: Tdma [7]

QC Limits

Este menú permite seleccionar los valores límites de tolerancia para la Fase, Distorsión y Fuerza. Si estos valores se superan, el valor numérico se mostrará en color naranja sobre la pantalla.

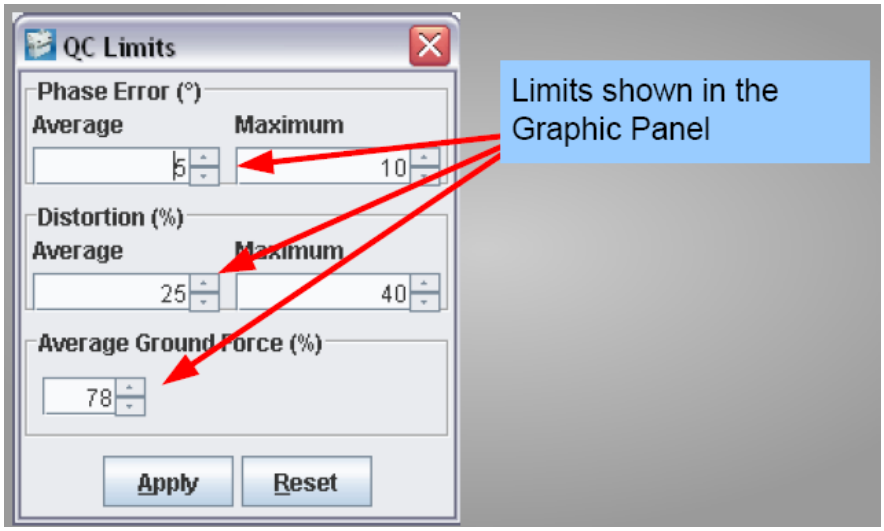


Figura 33, QC Limits [7]

QC Choise

Para mostrar los valores de QC de los DSDs, existen dos opciones:

- Data Computation Menu: La salida del DPG podrá presentar los datos de QC en:
  - Time domain: Distortion, Phase and Ground Force Amplitude.
  - Frequency domain: Phase and Ground Force Amplitude.
- Extended QC: las señales de QC pueden verse en tiempo real siendo computadas cada 0,5 segundos o cada 2,5 Hz.

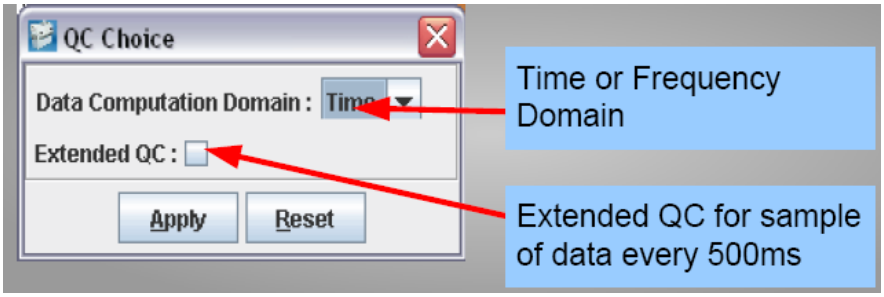


Figura 34, QC Choices [7]

Radio Function: TO Managment

Tanto en las VibPro como en las Ve464, desde la Orden de Disparo (FO: Fire Order), hasta la orden de Comienzo del Barrido (T0), deben enviarse: señales de sincronismo para que el reloj de las DSDs se enganchen con el de la DPG, para luego transmitir mensajes de la DPG hacia las DSDs (cuando deberá enviar del Dsd Status, similaridad radial, etc.).

- Como vemos en la figura 28, el FO conmuta la radio a transmisión y durante 200 ms transmite una onda cuadrada (todos unos) para que se sincronicen los relojes de las Dsds.
- T0 Parameters: durante 470 ms se transmiten y se repiten mensajes que contienen:
  - Source Line (SL).
  - Source Number (SN)
  - Auto Lift (Y/N).
  - Basic Nb: Barrido que se debe emitir.
  - QC Type: que tipo de reporte deben enviar las DSDs.
  - Early Status (Y/N), utilizado cuando operamos en Modo Continuo para ahorrar tiempo (hasta 1 seg por VP puede ser ahorrado), ya que al finalo del barrido la radio pasa a transmisión sin esperar al FO.
  - Etc.

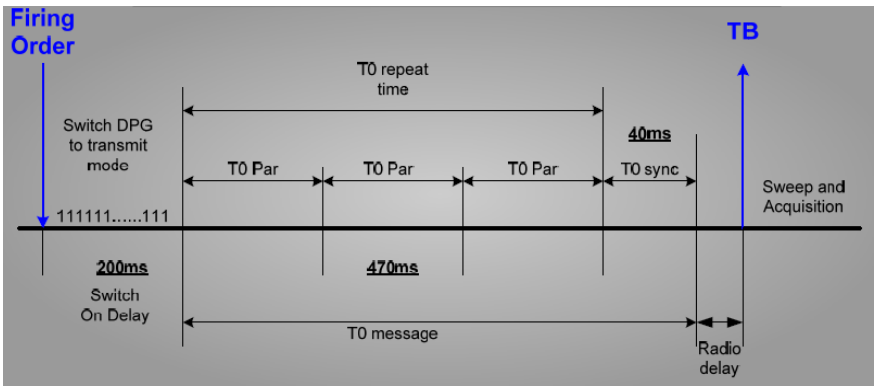


Figura 35, diagrama de tiempos empleados en la transmisión del T0 [7]

Como vemos el T0 Par se repite (3 veces en la figura) para asegurar que el mensaje sea bien recibido.

- T0 Sync code: es un código digital de 32 bits pseudorandom y único para cada Grupo de Vibros y utilizado para:
  - Medir el retardo de las radios (Radio Delay).
  - Permite que cada DSD comience en el tiempo T0.

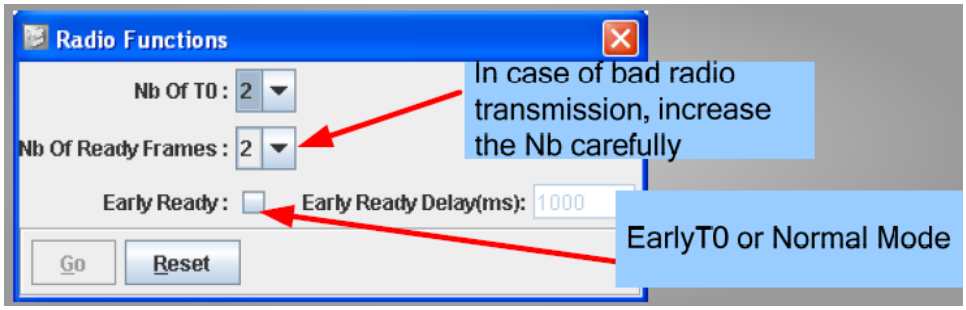


Figura 36, Radio Functions [7]

Menu Bar

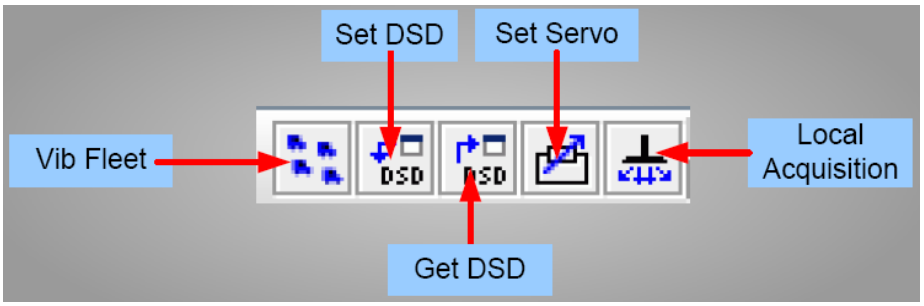


Figura 37, Menu Bar [7]

- Vib Fleet: permite elegir que DSD va a ser utilizado en cada flota.

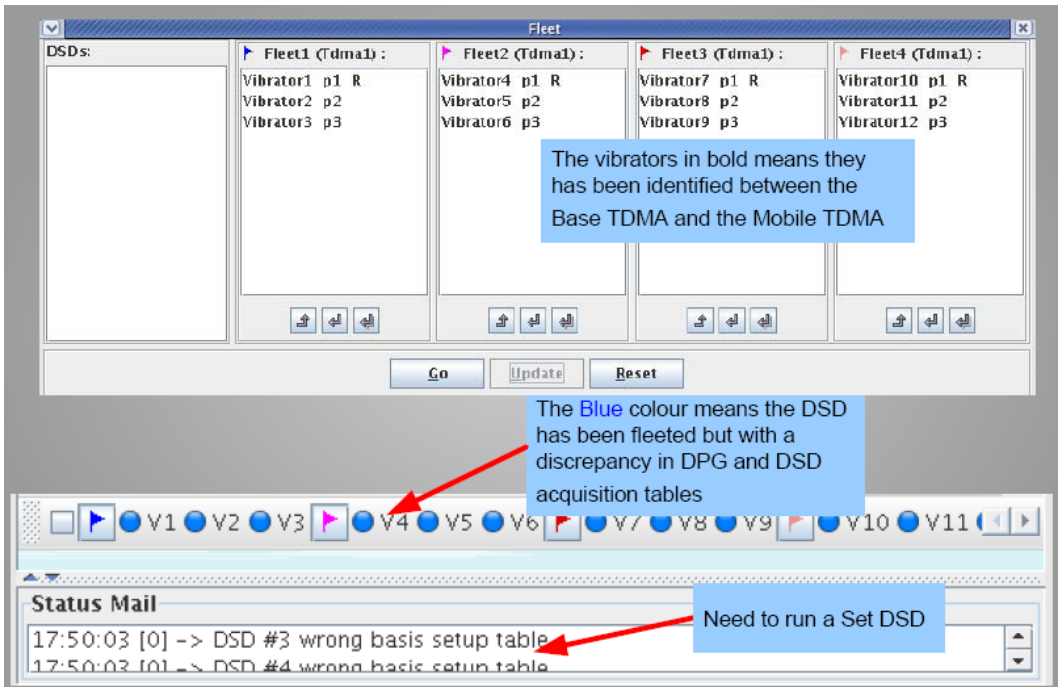


Figura 38, distribución de los vibradores en flotas [7]

En la figura todavía no se ha transmitido las tablas de los barridos y parámetros de la DPG hacia las DSDs, por lo tanto las circunferencias que representan a cada DSD se encuentran en color "azul".

- Set DSD: Permite cargar las Tablas de Barridos definidos en el DPG hacia los DSDs y los demás parámetros definidos en el Ve464 Environment.

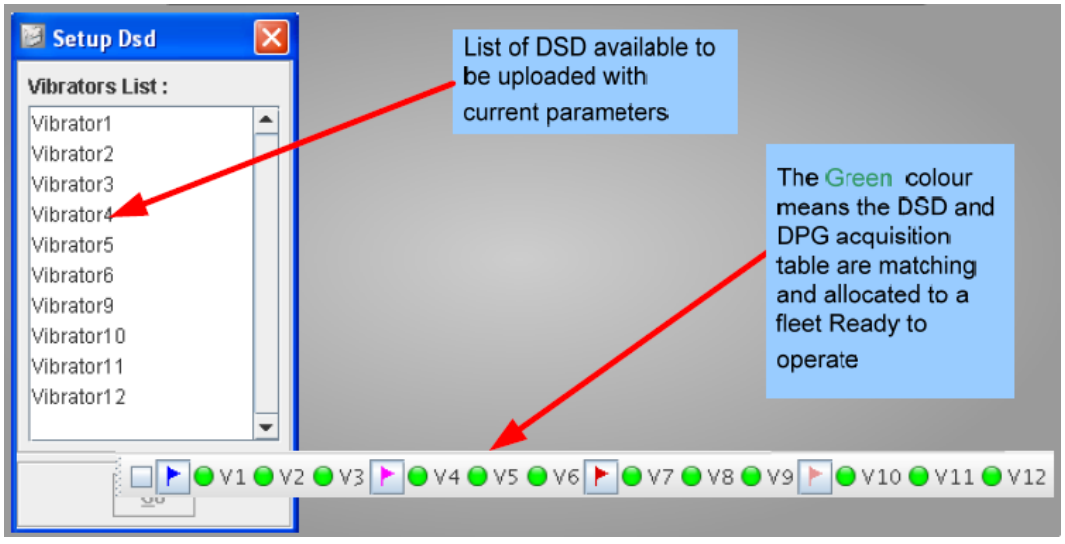


Figura 39, carga de datos en las DSDs [7]

Luego del Set DSD, todas las DSD han sido correctamente cargadas de acuerdo a los valores seteados en la DPG.

- Get DSD: permite interrogar a las DSDs para conocer y comparar todos los parámetros que contienen cada una.

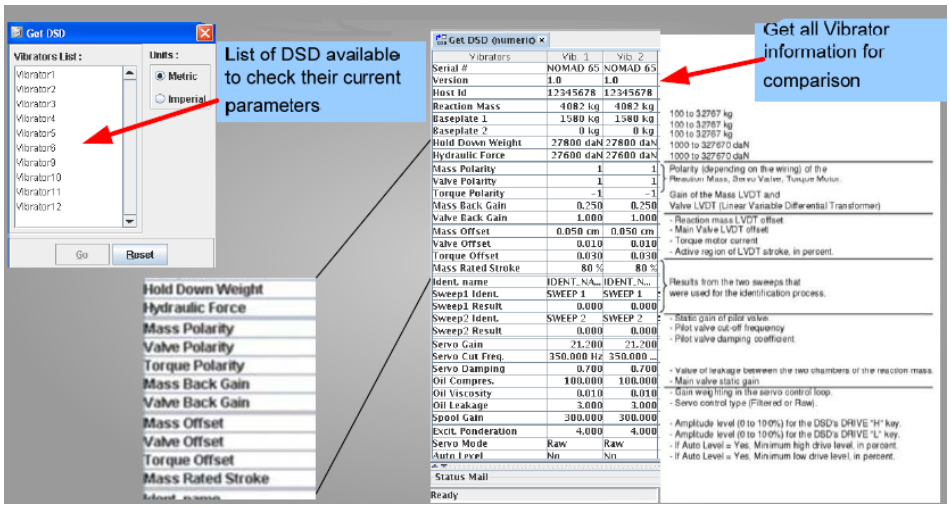


Figura 40, Get DSD, interroga parámetros en las DSDs [7]

Local acquisition

Para realizar pruebas de barridos sin necesidad de emplear el Sercel 428, se utiliza la denominada adquisición Local, donde la señal "FO" es reemplazada por la instrucción "GO" para iniciar el barrido.

Se elige el tipo de barrido a ejecutar (Basic Type) y el vibrador a ensayar y luego se dispara el barrido con el botón "GO".

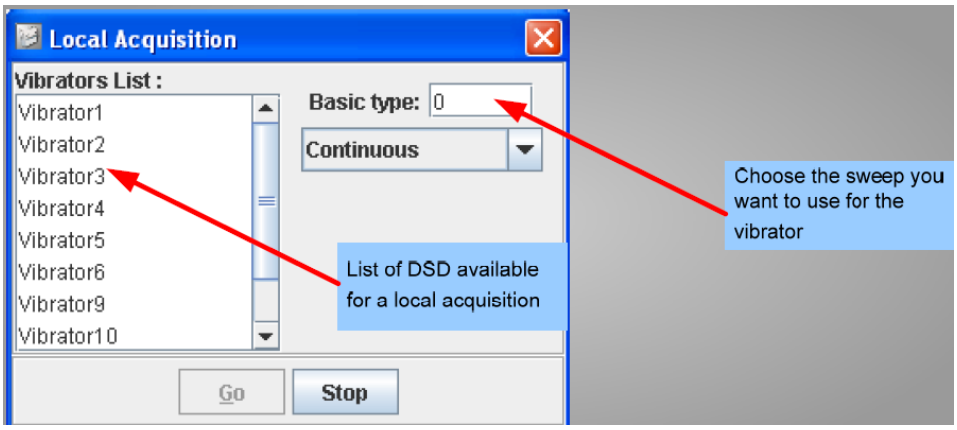


Figura 41, disparo manual de un barrido [7]

Para estudiar la respuesta del vibro, o de los vibradores elegidos, seleccionamos "Get QC" y "Extended QC in Time Domain".

En la figura 42 vemos a la derecha las respuestas analógicas del vibrador 2 (Fase, Distorsión y Fuerza).

En la parte izquierda la expresión numérica de la performance de los vibradores en los distintos VPs.

Se aprecia que en el VP 871, los vibradores: 7, 8, 9, 11 y 12, muestran el número 14 en color rojo indicando: "Lift Error", porque estos vibros no vibraron cuando se les ordenó (posiblemente tenían la plancha arriba).

Códigos de Estados

Parte de ellos se muestran en la figura anterior.

Algunos de ellos indican barridos normales: "1" OK, RAW Mode.
Otros indican errores a corregir: "19" OK, Small PPS discrepancy.
El total de los Códigos de Estados generados en las DSDs se muestran en las figuras 43 y 44.

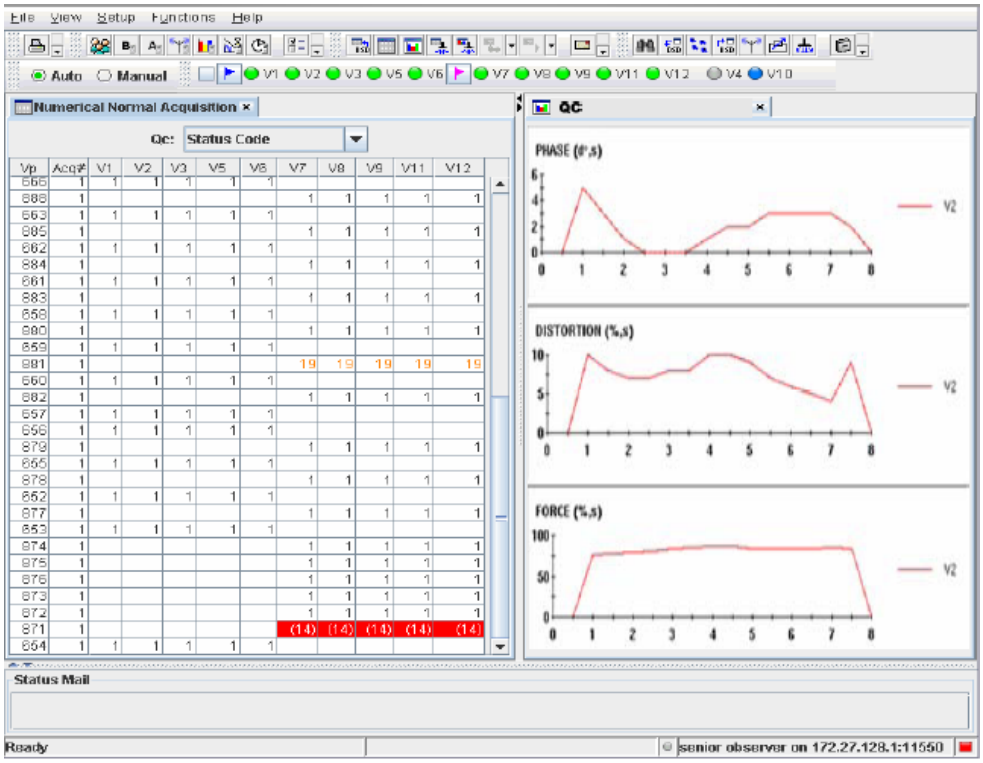


Figura 42, Main Menu con QC numérico y analógico [7]

Status code indicative of successful sweep	Meaning
1	OK, Raw mode.
11	OK, Ethernet error between DSD and PC.
12	OK, Filtered mode.
19	OK, small PPS discrepancy.
29	OK, DSD didn't have time to save the previous signal to file.

Figura 43, Códigos de Barridos ejecutados satisfactoriamente [7]

Status code indicative of error	Meaning
2	Sweep aborted by DSD.
10	Sweep aborted by user.
13	Discrepancy in DSD and DPG acquisition table.
14	Lift error.
21	Wrong sweep definition.
22	Custom definition error.
23	Sweep start time expired.
26	Slave recording unit failed to start (on a slave DSD only).
27	PPS discrepancy.
28	Force level too low.
98	No T_0 data received.
99	No T_0 data received or no status report.

Figura 44, Códigos de Barridos defectuosos [7]

Por último veremos cómo se aprecia una pantalla con gráfico y numérico QC, luego de ejecutarse un VP.

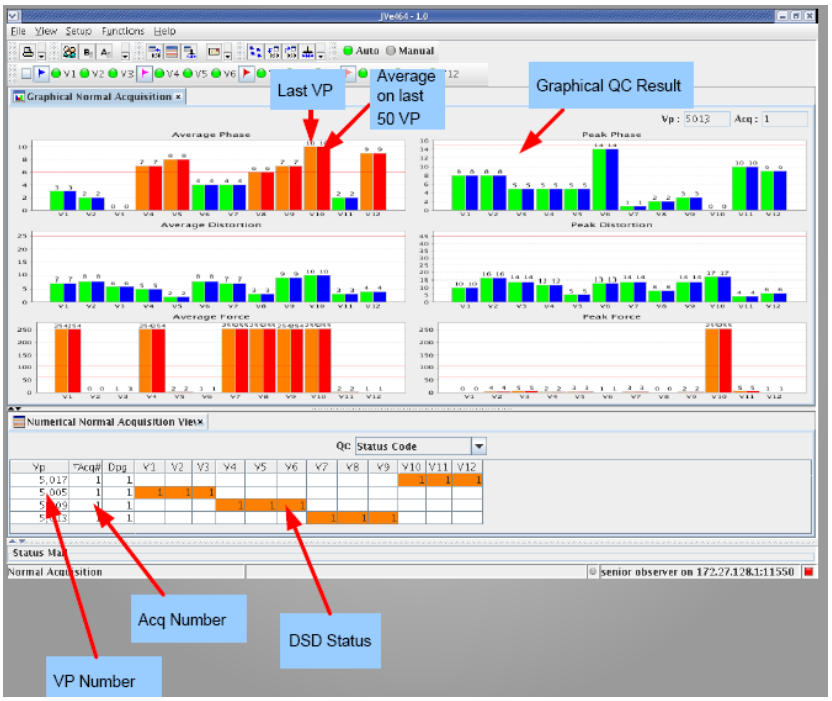


Figura 38, pantalla del menú principal después de un barrido de producción [7]

Bibliografía consultada:

1. *Electrónica SHV-210/310 Geosource, P.R. Concetti estudio e implementación -1982.*
2. *Electrónica VCS 5, GSI, P.R. Concetti estudio e implementación – 1986.*
3. *Electrónica Pelton Advance II, Training Course, Ponca City- Oklahoma, U.S.A. 1993.*
4. *Electrónica Pelton VibPro, P.R.Concetti estudio e implementación- 1996.*
5. *Electrónica Sercel Ve432, P.R.Concetti QC en campo – 2007.*
6. *Electrónica Sercel Ve464, P.R. Concetti QC en Cabimas –Venezuela – 2008.*
7. *Sercel VE432/464, Training Courses.*
8. *Curso de entrenamiento en adquisición sísmica e interpretación de los sistemas de control electrónico empleados, P.R. Concetti, WesternGeco 2002.*

CAPÍTULO 11: EL PROCESO SISMICO CON VIBRADORES

Introducción:

En el Capítulo 9 y 10 mencionamos al Vibroseis como una Fuente de Energía Sísmica a1ternativa a la proporcionada por Fuentes de Energía Impulsivas (Dinamita, Cañón de Aire, Golpeador) y lo comparábamos usando superficies rectangulares equivalentes, donde los lados del rectángulo estaban representando por: la "Potencia" (medida en Vatios) y por el "tiempo" de aplicación (medido en segundos).

Energía Equivalentes [Julios]= Pi x ti = N_x Pv_x tv (ver Capítulo anterior)

Luego tratamos al Vibroseis desde el punto de vista de su mecánica para comprender su funcionamiento, la naturaleza de las fuerzas por él desarrolladas y el control de su performance mediante la realimentación de esas mismas fuerzas, etc. En esa primer parte he intentado introducir la menor cantidad de matemática y electrónica posible para que el Vibroseis sea intuitivamente comprendido por la mayor parte de los participantes a este tema.



Figura1, Vibrador frente a la Central de YPF en Comodoro Rivadavia

Ahora volveremos sobre el mismo fenómeno pero tratando de justificarlo matemáticamente y para ello deberemos comparar esta Fuente de Energía Vibracional con la Fuente de Energía Impulsiva que fue tratadas en un capítulo anterior y que deberemos repetir a fines comparativos.

En una teórica Fuente Impulsiva, el espectro de frecuencias es infinito y todas sus componentes poseen la misma amplitud (figura 2b).

La figura 2(c), nos dice que todas las componentes se encuentran en fase con un valor de 0º (cero grados).

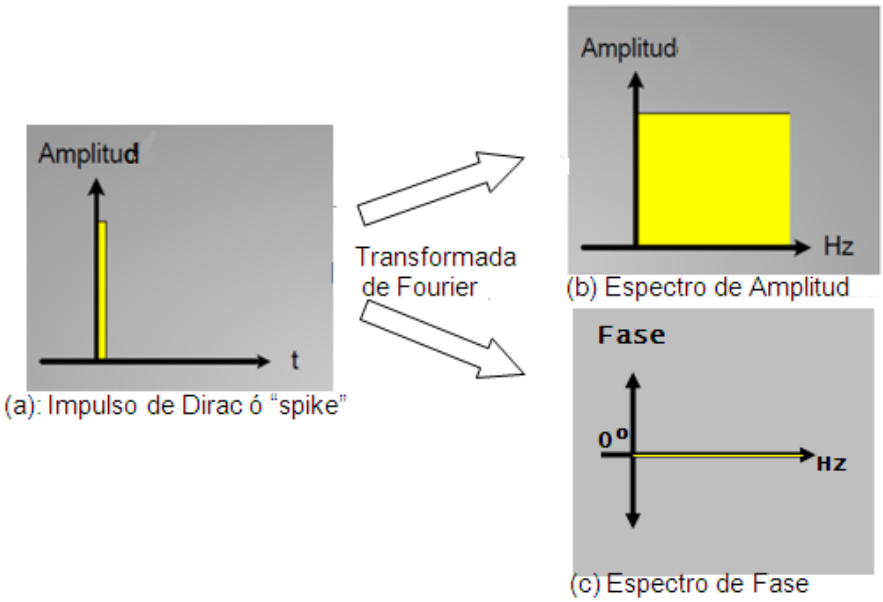


Figura 2: Función Impulso y su Espectro de Amplitud [9]

Planteo Matemático Inicial

Podemos asimilar el proceso de adquisición de datos sísmicos al siguiente modelo matemático:

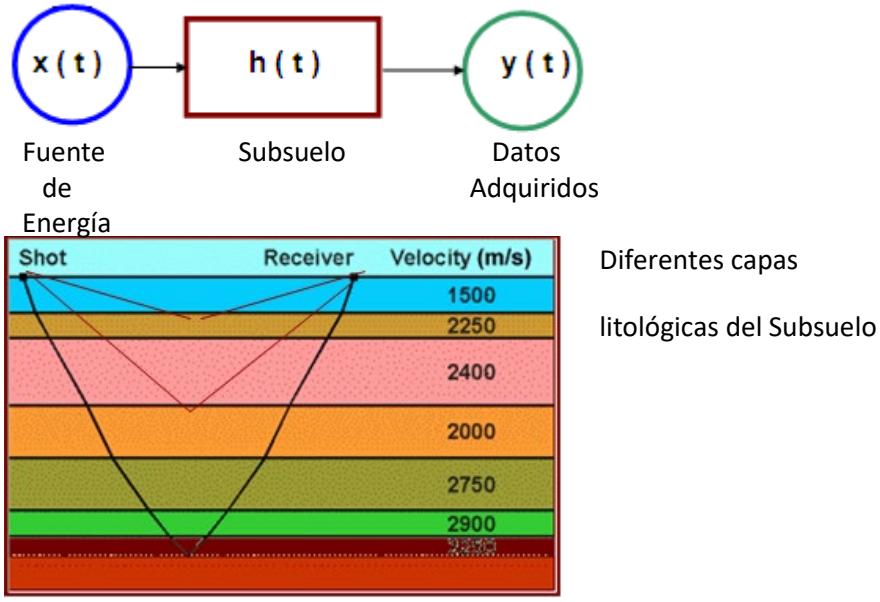


Figura 3: (a) Sistema Matemático Lineal Temporal; (b) Diferentes capas de un subsuelo marino. *x(t), h (t), y (t): son señales que variables con el tiempo [9]*

La figura 3 (a) es la representación esquemática de un Sistema Lineal y cada bloque corresponde a cada una de las partes que conforman la Prospección Sísmica de Hidrocarburos: fuente de energía sísmica, el subsuelo conformado por sus diferentes capas de diferentes substratos y los datos sísmicos adquiridos y procesados.

Nuestro objetivo en sísmica de hidrocarburos, es obtener imágenes del subsuelo que nos permitan ubicar posibles trampas (estructurales y/o estratigráficas) que es donde existen mayores posibilidades de albergar hidrocarburos. Por lo tanto el subsuelo es nuestra incógnita y matemáticamente la denominamos: "Función Transferencia" (bloque central en la figura 3 (a).

La expresión matemática que vincula a los tres bloques anteriores se denomina "Convolución".

$$(I) \qquad y(t) = x(t) * h(t)$$

Para nuestro propósito esta expresión nos dice que: "Los Datos Adquiridos resultan de la Convolución de la Fuente de Energía con el Subsuelo".

Como los Datos Sísmicos ya fueron adquiridos y conocemos la fuente de energía, despejando en la formula anterior, llegamos a definir la Deconvolución:

$$(II) \qquad h(t) = y(t) * 1 / x(t)$$

La imagen del Subsuelo se obtiene de Convolución sísmica a los Datos Adquiridos con la Fuente de Energía.

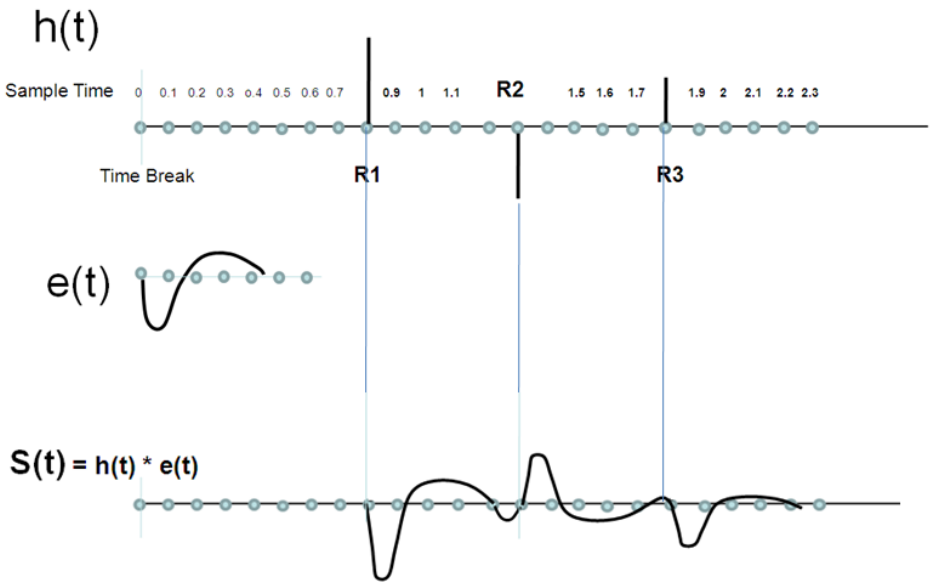


Figura 4, representación gráfica de la Convolución [9]

En la Figura 4 vemos que el Subsuelo h (t), es representado por los diferentes Coeficientes de Reflexión de las distintas interfaces litológicas. La Fuente de Energía: x (t) o Señal de Entrada, está representada por la Ondícula que genera en el terreno la onda elástica emitida (para fuentes impulsivas). El Dato Adquirido y (t), obtenido de la Convolución de x (t) con h (t), es nuestra "Traza Sísmica".

Para hacer el trabajo más sencillo se puede Transformar la operación de Convolución en una simple multiplicación y la Deconvolución en una división, si pasamos al dominio de la frecuencia (como hicimos con la Función Impulso, ahora generalizando).

(lll) $Y(f) = X(f) \times H(f)$ (IV) $H(f) = Y(f) / X(f)$

Veamos cual es la parte que nos interesa. Si la Fuente de Energía es Impulsiva entonces:

$x(t) = \partial(t)$ $\partial(t)$ es la Función Impulso o Delta de Dirac o directamente **"spike"**

La Transformada de la Función Impulso es la unidad:

$$T\,\partial(t) = 1$$

Con lo que nos queda la igualdad:

$$y(t) = h/t)$$

Para una Fuente Impulsiva, los Datos Adquiridos son suficientes para obtener las imágenes del Subsuelo.

Utilizando vibradores, la Transformada de "x (t)" ya no es la unidad y matemáticamente la obtención de h (t) se hace más complicada y es necesario otro proceso matemático denominado: "Correlación".

Barrido de Frecuencias

Pese a que las Fuentes Impulsivas generan una inmensa cantidad de componentes de frecuencia, la transmisión elástica de las componentes más altas de la señal sísmica son atenuadas en el subsuelo (la tierra se comporta como un "filtro corta-altos"). También las componentes más bajas de frecuencia son filtradas por los geófonos de imán permanente y bobina móvil (se comportan como un filtro corta-bajos), y aunque los actuales acelerómetros ahora permitan extender la frecuencia pasante hasta casi DC (frecuencia "cero"), la contaminación en muy baja frecuencia con el "ground roll", continua siendo un desafío lograr separar la señal del ruido.

Los geofísicos pensaron en crear una fuente de energía vibracional de frecuencias acotadas a aquellas que nos resultan de mayor interés, las que puedan ser adquiridas con buena calidad y no gran contaminación. Por eso

pensaron en un espectro de amplitud como el de la figura 5(a), donde la banda pasante va de 10 a 60 Hz (para este ejemplo, por supuesto).

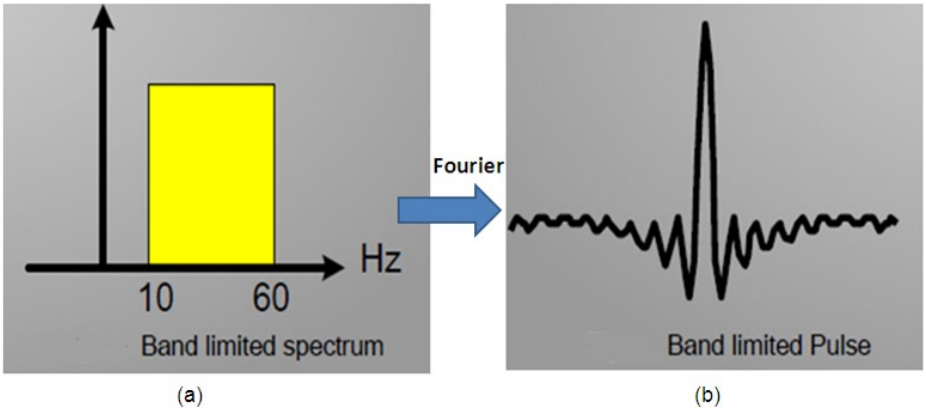


Figura 5, (a) Espectro de Amplitud; (b) Transformada Inversa del Espectro: Ondícula de Klauder [5]

Como habíamos visto: la Transformada del Impulso de Dirac o "spike", genera el Espectro de Amplitud de banda de frecuencia infinita de la figura 2 (b).

En la figura 5(a), tenemos ahora como dato un "espectro de banda limitada" de 10 a 60 Hz y entonces debemos operar inversamente aplicando "la Transformada Inversa de Fourier" para trasladarnos del dominio de la frecuencia al de tiempo y este nos muestra que "**el resultado de un espectro de banda limitada es la Ondícula (wavelet) de la figura 5 (b)**". Como vemos la Ondícula se aparta del "spike" de la figura 2 (a), porque las componentes de frecuencias se encuentran acotadas a una banda de 50 Hz y no a una banda infinita, pero también sabemos que las componentes recibidas luego del tránsito por el subsuelo se encuentran limitadas por la función filtro corta-altos del terreno. De cualquier manera si al lóbulo central de esta ondícula pudiéramos hacerlo lo más estrecho posible en el tiempo y a los lóbulos laterales le pudiéramos reducir su amplitud lo más posible, estaríamos tan cercanos al "spike" como si empleáramos explosivos.

El vibrador que hemos estudiado no puede generar directamente la Ondícula de la figura 5 (b) pero si puede generar barridos sinusoidales de amplitud fija en las frecuencias, mencionadas.

Si descomponemos por Fourier la Ondícula de Klauder o pulso de banda limitada, obtenemos una serie de sinusoides de diferentes frecuencias que van desde la frecuencia inicial a la final de la banda pretendida y que se encuentran en fase en su origen.

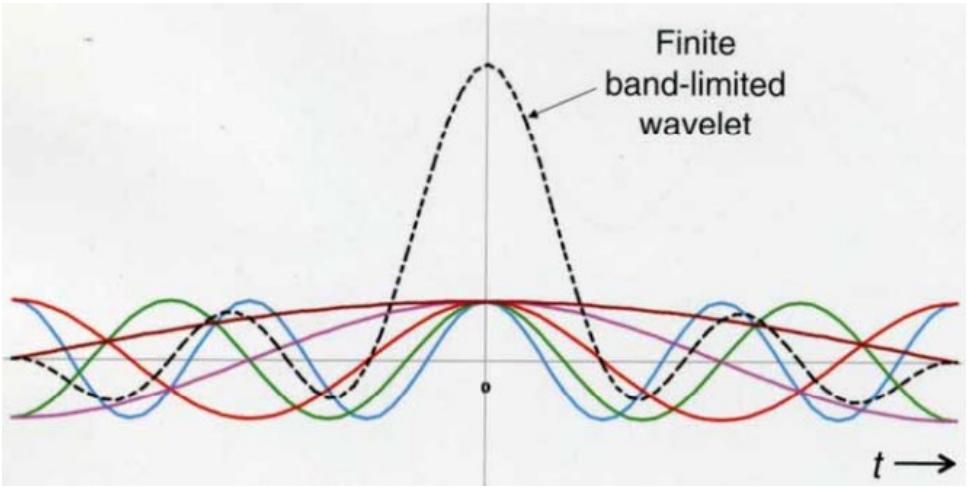


Figura 6, Ondícula de Banda Limitada como suma de 5 frecuencias sinusoidales [5]

Si a estas distintas sinusoides las emitimos con retardos dependientes de su frecuencia (según el tipo de barrido elegido), obtenemos el **Barrido de Frecuencias (Sweep)** que si podrá ser generado por el Vibrador Sísmico, ya que se trata de amplitudes alternadas de baja magnitud extendidas en un tiempo muy grande comparado con las fuentes de energía impulsivas (ver figura 7).

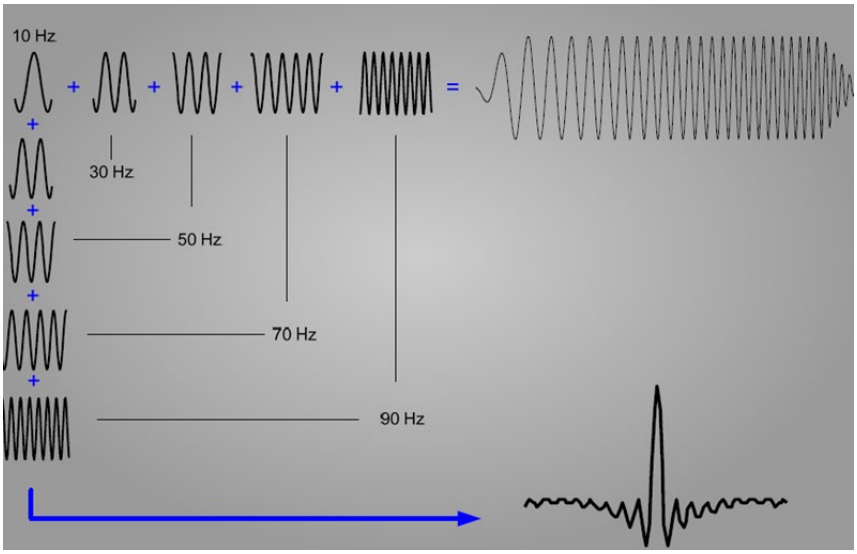


Figura 7, suma de señales sinusoidales de diferentes frecuencias producen la Ondícula de Klauder [5]

Propagación en el subsuelo del Barrido de Frecuencias

El Barrido de Frecuencias emitido por el Vibrador es generalmente mucho más largo en tiempo que los intervalos entre las reflexiones en las diferentes capas del subsuelo, entonces las reflexiones individuales no pueden ser distinguidas en la salida del geófono, y es necesario procesar la señal recibida para comprimirla hasta lograr una Ondícula relativamente estrecha (tipo spike) mediante el proceso de: "croscorrelación".

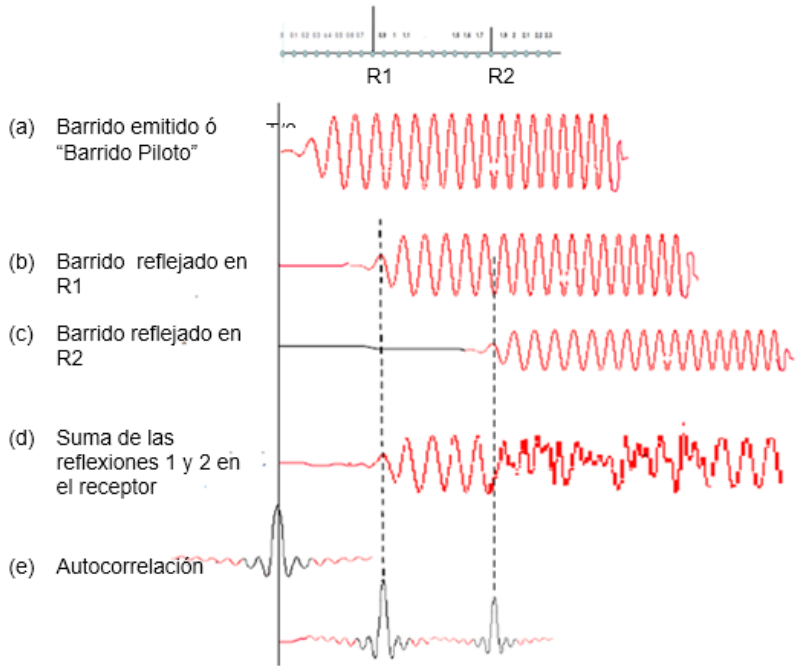


Figura 8, Barrido emitido en T/0 y reflejado en dos capas del subsuelo [5]

En la Figura 8 representamos los índices de reflexión en función del doble de tiempo (para comparar tiempos con las reflexiones de la sísmica horizontal), en dos capas del Subsuelo: R1 y R2, como lo hicimos en la figura 4.
El barrido se inicia en el tiempo T/0 (Time Break), figura 8(a). Este será el **Barrido Piloto** para Correlar los datos adquiridos.

La reflexión en R1 comienza a llegar a nuestro receptor, figura 8(b). Luego llega a este mismo receptor la reflexión proveniente de R2, figura 8(c), superponiéndose a la que todavía está siendo recibida de R1, figura 8(d).

La Autocorrelación es la correlación de la señal emitida y grabada en un canal auxiliar consigo misma, figura 8(e). Como se observa esta Ondícula es simétrica y centrada en T/0, por lo tanto es de "Fase Cero", lo que nos indica que no se trata de un fenómeno causal ya que existiría una reacción previa a la acción. Esto se debe a la operación matemática de Correlación y distingue a esta Ondícula de la obtenida con fuentes impulsivas, que si es causal y de "Fase Mínima".

El producto de Crosscorrelar el Barrido Piloto con la traza de la figura 8(d) se muestra en la traza de la figura 8(f). Como vemos la Ondícula es similar a la auto-correlada y su amplitud varía de acuerdo a la magnitud del evento reflejado. El tiempo doble de recepción del evento debe ser el pico del lóbulo central de la ondícula.

Instrumental de Correlación

La operación matemática de correlación, no hace mucho tiempo atrás, era realizada por un costoso y secreto instrumental: el Correlador. Hoy en día

la misma "Work Station" que maneja el registrador realiza por software esta operación.

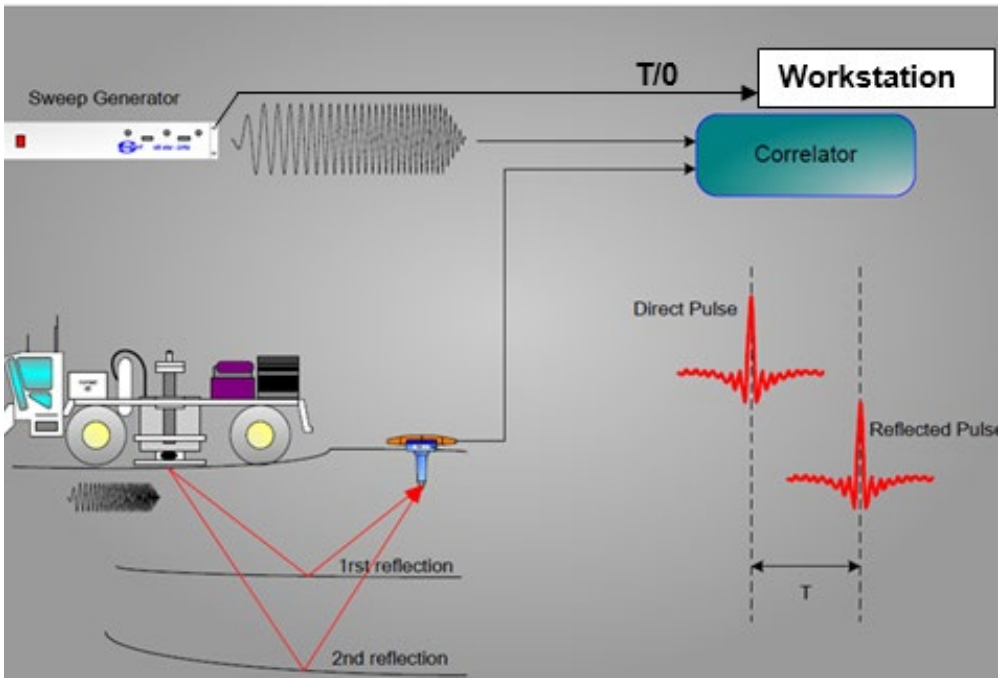


Figura 9, Proceso de Correlación en el instrumental de adquisición [5]

Como se observa en la figura 9, el Correlador (Workstation), recibe desde la unidad "Encoder" del Sistema de Control Electrónico de los Vibradores (en este caso el D.P.G. de Sercel Ve464), las señales: T/0 (Tiempo Cero o Time Break) y el Barrido de Frecuencias (Sweep Generator) que servirá de Barrido Piloto de Correlación.

La correlación del barrido anterior consigo mismo, genera el llamado por Sercel: "Direct Pulse" que nosotros llamaremos: "Barrido Auto-correlado"

La traza sísmica Cross-correlada con el Barrido Piloto genera el llamado por Sercel: Reflected Pulse".

Fase Mínima de la Energía Impulsiva y Fase Cero de la Vibracional

Ya hemos dicho que la Ondícula de las Fuentes Impulsivas es de "Fase Mínima" y la Ondícula de Fuentes Vibracionales es de "Fase Cero", por lo tanto los tiempos para la misma reflexión de un punto del subsuelo, será mayor para la fuente impulsiva.

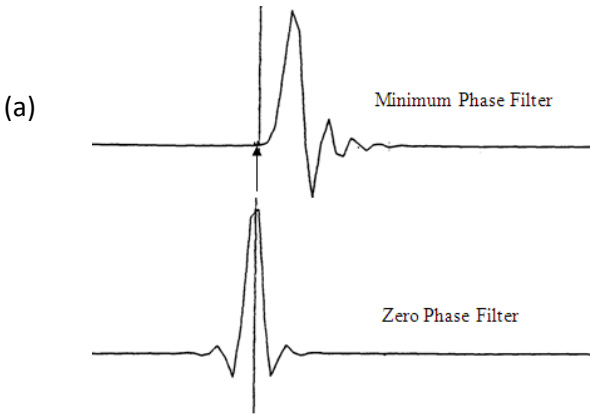


Figura 10, Impulso (spike) después de pasar: (a) por un filtro de Fase Mínima;(b) por un filtro de Fase Cero

NOTA: La Correlación convierte los Datos de Salida en "Fase Cero" ya que este proceso reconoce el momento (tiempo) en que el Barrido de Referencia se refleja en c/traza sísmica: "si modificamos los Datos de entrada por acción de un determinado filtrado y modificamos el Barrido de Referencia en la entrada al correlador con ese mismo filtro, el producto de correlación será el mismo (ocurre en el mismo tiempo)".

En definitiva, la correlación elimina toda fase previa, pero el dato final queda en "Fase Mixta" ya que los "delays" introducidos por la respuesta de Fase Mínima del terreno y del Geófono no son movidos durante la correlación de fase cero.

En una traza sísmica los tiempos de una reflexión para un mismo horizonte profundo, serán más largos para explosivos (utilizando filtro anti-alias de Fase Mínima o Fase Lineal) que para vibradores.

Espectros de Amplitud y Fase

Cuando aplicamos la Transformada de Fourier para pasar del dominio del tiempo al de la frecuencia, obtenemos los Espectros de Amplitud y los de Fase" de cada señal transformada.

La Transformada de Fourier aplicada a la Fórmula (I) de la Convolución nos llevaba a:

(III) $$Y(f) = X(f) \times H(f)$$

Dónde: Y (f), X (f) y H (f) son las respectivas Transformadas de Fourier de y (t), x (t) y h (t).

En el dominio de la frecuencia, la Señal de Salida "Y (f)", es sencillamente igual al producto de la Señal de Entrada "X (f)" por la Función Transferencia "H (f)", donde:

$$X(f) = |X(f)|\, e^{-j\varphi} \qquad H(f) = |H(f)|\, e^{-j\alpha} \qquad Y(f) = |Y(f)|\, e^{-j\beta}$$

Las expresiones de las funciones transformadas al dominio de la frecuencia, nos muestran que se encuentran compuestas por el producto de: un valor absoluto ó "Amplitud en función de la Frecuencia" (Espectro de Amplitud) y una función compleja angular o "Fase en función de la Frecuencia" (Espectro de Fase).

$|X(f)|$, $|H(f)|$, $|Y(f)|$ } **Espectros de Amplitud** — $\varphi(f)$, $\alpha(f)$, $\beta(f)$ } **Espectros de Fase**

Reemplazando en la ecuación (III) nos queda:

$$|Y(f)|\, e^{-j\beta} = |X(f)|\, e^{-j\varphi}\, x\, |H(f)|\, e^{-j\alpha} = |X(f)|\, x\, |H(f)|\, .\, e^{-j(\varphi+\alpha)}$$

Por lo tanto el Espectro de Amplitud de la Señal de Salida es igual al producto de los Espectros de Amplitud de la Señal de Entrada por el de la Función Transferencia:

$$|Y(f)| = |X(f)| \times |H(f)|$$ **Espectro de Amplitud**

El Espectro de Fase de la Señal de Salida es la suma de los Espectros de Fase de la Señal de Entrada y de la Función Transferencia.

$$\beta(f) = \varphi(f) + \alpha(f)$$ **Espectro de Fase**

Como vimos para el caso del Impulso de Dirac o "spike":

(IV) $$Y(f) = 1 \times H(f) = H(f) = |H(f)|\, .\, e^{-j\alpha}$$

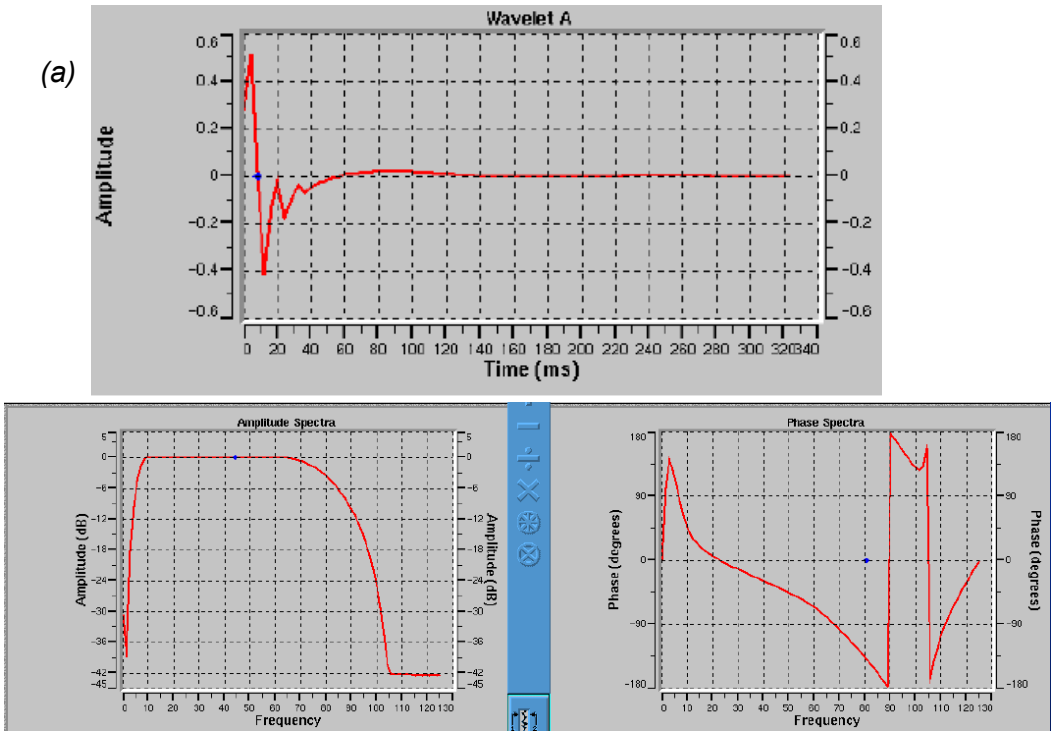


Figura 11, (a) Ondícula de Fase Mínima; (b) Espectros de Amplitud y Fase de (a) [3]

La figura 11 es un ejemplo donde una Ondícula de Fase Mínima como la mostrada en (a), es convertida en los Espectros de Amplitud y Fase.

Barrido Sísmico

Antes de definir los distintos tipos de Barridos de Frecuencia, deberemos dar por conocido algunos de los parámetros que lo caracterizan.

Rango de un Barrido:

Se define como "Rango del Barrido", a la diferencia entre la máxima y la mínima frecuencia del barrido:

$$\Delta F = f_{máxima} - f_{mínima} = 100 - 10 = 90 \text{ Hz.}$$

Frecuencia Media del Barrido:

Se define como: "Frecuencia Media del Barrido", al valor obtenido de la media aritmética:

$$Fmedia = (f1 + f2) / 2 = (10 + 100) / 2 = 55 \text{ Hz.}$$

NOTA: Veremos luego que, el Rango del Barrido y la Frecuencia Media del Barrido tendrán influencia en la "Ondícula de Klauder" (producto de un barrido autocorrelado).

Pendientes de Inicio y Final de Barrido (Start and Final Tapers)

Al ser el Vibrador un vehículo que transforma energía eléctrica en mecánica (transmite una fuerza al terreno: "Ground Force"), la principal necesidad de colocar "tapers" en el inicio y final del barrido de frecuencias, es

para que todas las unidades vibradoras comiencen y finalicen gradualmente y similarmente la ejecución de la fuerza en el terreno. Antiguamente se empleaban "tapers" más largos que los necesarios para manejar la inercia mecánica, con el fin de disminuir los Lóbulos Laterales de la Ondícula de Klauder, sacrificando algunas frecuencias del barrido que hubiesen aportado bastante a la calidad del dato sísmico.

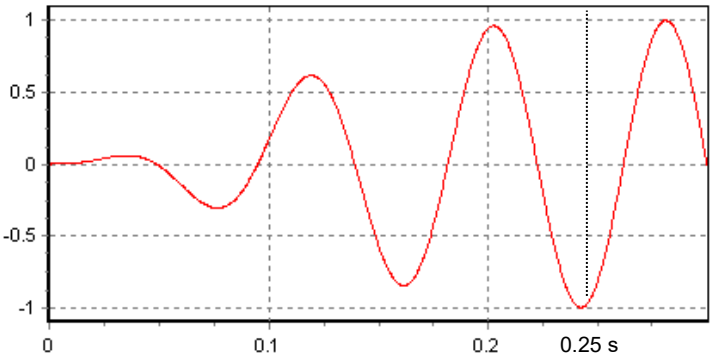


Figura 12, Zona de aplicación del "Initial Tape 0.25 s" [4]

En la figura 12 se muestra la parte inicial de un barrido de frecuencias donde se aplicó un "taper" de 0,25 segundos de duración. Se observa cómo crece gradualmente la amplitud del barrido hasta llegar a los 0,25 seg., donde alcanza el 100% de su amplitud.

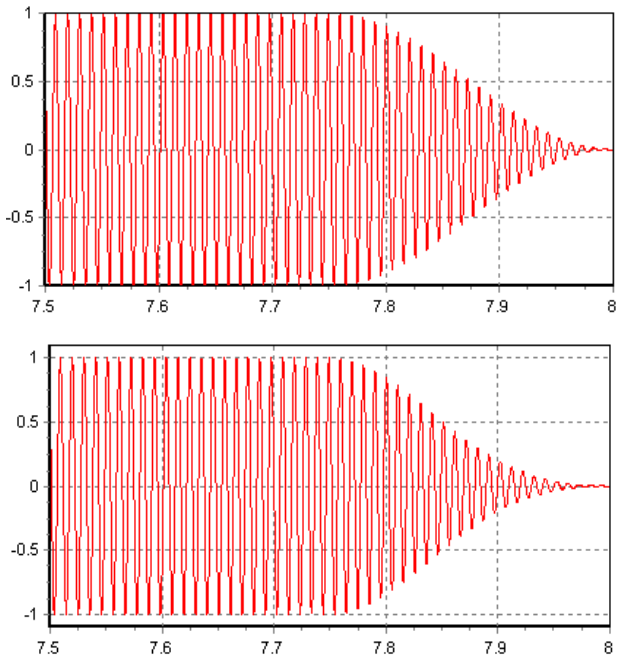
NOTA: Si empleamos geófonos de 10 Hz. de frecuencia natural de resonancia como receptores sísmicos, deberíamos llegar a esa frecuencia con el 100 % de amplitud del barrido, por lo tanto habrá que comenzar el barrido con una frecuencia inferior a 10 Hz para llegar al 100 % de amplitud antes de los 10 Hz.

En la figura 12 hemos seleccionado una frecuencia inicial de 7 Hz para llegar al final del "taper inicial" ligeramente por debajo de 10 Hz.

Cuando se usen barridos logarítmicos habrá que tomar medidas adicionales por el rápido tránsito de dicho tipo de barrido por las bajas frecuencias.

Tipos de "tapers"

En la mayoría de los Controladores Electrónicos de los vibradores, se pueden elegir 2 tipos de "Tapers": Coseno y Blackman.



(a) (b)

Figura 13, "Final Tapers": (a) Cosine; (b) Blackman [4]

Para mejor compararlos, en la figura 13 se muestran los "tapers" finales (0,25 segundos) con (a) Coseno y con (b) Blackman. Este último tipo es el que mayormente se está empleando, pero se pueden ensayar durante la Prueba de Parámetros, el que mejor se adapte al terreno. Particularmente no he encontrado que el tipo de "taper" altere la respuesta del Vibrador, las demás deficiencias del método son muy superiores a esta pequeña diferencia de comienzo/final de un barrido.

Utilizaremos para todos los Tipos de Barrido el mismo Rango de Frecuencias (finicial: 10 Hz y final: 100 Hz), para facilitar la explicación y sin considerar algunas sugerencias antes hechas. Tiempo del Barrido (8 segundos), Tapers (inicial/final: 0.25 segundos).

Tipos de Barridos

Existen varios tipos de barridos sinusoidales, tendientes a emitir las componentes de frecuencia que más nos interesan, presumiendo un mejor rendimiento para un determinado terreno. La variación de las componentes sinusoidales del barrido dependen del tipo de barrido elegido, y los principales tipos son:

- Barridos lineales.
- Barridos Logarítmicos.
- Barridos Exponenciales.
- Barridos Diseñados externamente

También estamos considerando condiciones ideales de barridos, donde no se generan frecuencias armónicas ni otros tipos de distorsiones.

Sabemos que cualquiera sea la composición del Barrido de Frecuencias Sinusoidales ("Ground Force", puesto el barrido sobre el Terreno): **"la respuesta recibida por los Geófonos contendrá los mismos componentes de frecuencias emitidas por los Vibradores"**.

Describiremos los Tipos de Barridos mediante sus respuestas:

- Frecuencia versus Tiempo: para observar como varían las componentes de frecuencia del barrido en función del tiempo de ejecución del mismo.
- Ondícula de Autocorrelación: para apreciar cuan parecido al "spike" será la ondícula con que se manifestarán las reflexiones de los horizontes profundos del terreno.
- Espectro de Amplitud: para visualizar el énfasis que se ha empleado para vibrar cada componente de frecuencia del barrido.

Barridos Lineales (Linear Sweeps)

Se denomina "Lineal", porque matemáticamente responde a la "ecuación de una línea recta":

Barrido Lineal: $f(t) = f_{inicial} + k_x t$

Donde:
k: constante que determina la inclinación de la recta.
$f_{inicial}$: frecuencia inicial, valor donde la recta corta al eje de "ordenadas" (frecuencia); en el origen del eje de abscisas (tiempo = 0 segundos):

$$f(t) = f(0) = f\,\text{inicial} = 10\ \text{Hz}.$$

Al tratarse de una Línea Recta, a iguales incrementos de tiempos (Δt) se obtienen iguales incrementos de frecuencias (Δf).La constante "k" se calcula:

$$k = \Delta f_1 / \Delta t_1 = \Delta f_2 / \Delta t_2 = \Delta f_n / \Delta t_n = \text{constante}$$

$$k = 90\ \text{Hz}/ 8\ \text{seg.} = 45\ \text{Hz} / 4\ \text{seg.} = 11{,}25\ \text{Hz/seg}$$

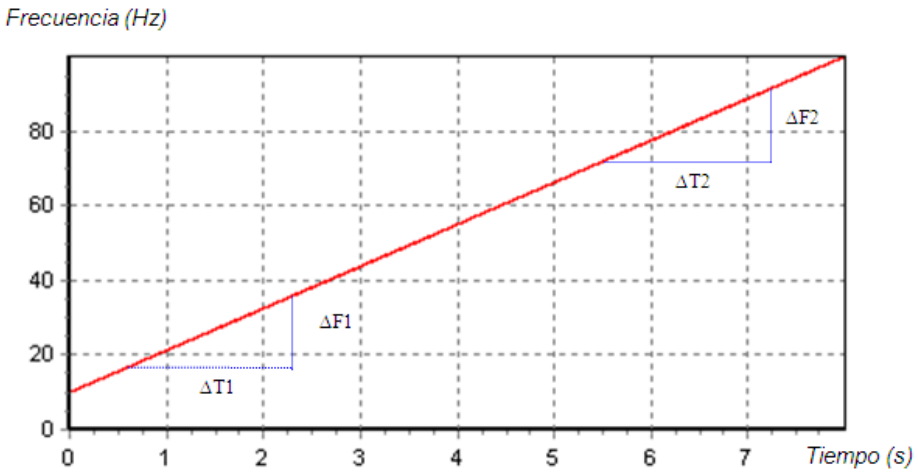


Figura 14, Variación Lineal de la Frecuencia del Barrido respecto al Tiempo [4]

Ejemplo: Calcular la frecuencia del barrido a los 6 segundos.

$$f(6) = 10 + 11{,}25 \times 6 = 77{,}5 \text{ Hz.}$$

En la figura 16(a) se muestra la ondícula característica del barrido lineal para el rango elegido. La amplitud del Lóbulo Central es mucho más grande que la de sus Lóbulos laterales (3,5 veces aprox.). El ancho del Lóbulo Central es suficientemente estrecho (menor a 10 milisegundos).

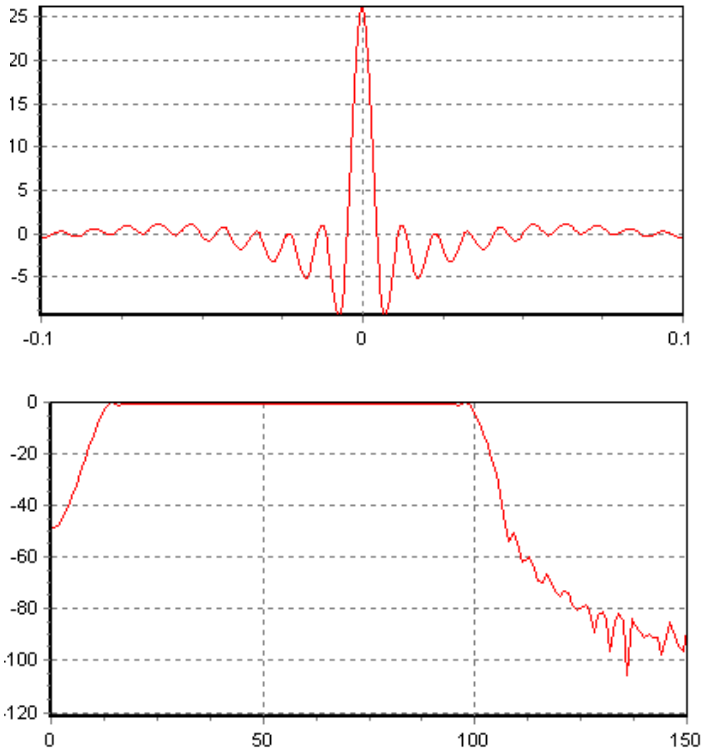


Figura 15, (a) Autocorrelación del Barrido Lineal, (b) Espectro de Amplitud del Barrido Lineal [4]

La figura 15(b) muestra que todas las frecuencias del barrido (fuera de la zona de "Tapers"), tienen la misma amplitud emitida, por lo tanto toda atenuación recibida en la ondícula, será debido a la atenuación o función filtro de la tierra, si consideramos que no existen deficiencias en la aplicación de este barrido.

Barridos no Lineales

Existe una gran variedad de Tipos de Barridos, donde la frecuencia ya no cambia linealmente con el tiempo, sino que sigue: o una función conocida no lineal del tiempo o una variación diseñada a nuestro antojo.

Los "barridos no-lineales" más empleados, que siguen una función del tiempo conocida son: los Barridos Logarítmicos y los Barridos Exponenciales.

También existen Barridos especiales como los "Random Sweeps" (barridos aleatorios), utilizados en áreas muy sensibles a las vibraciones y que utilizan variaciones de frecuencias y amplitudes del barrido de muy corto tiempo, para no generar efectos de resonancia en las estructuras cercanas.

Barridos Logarítmicos

En la Figura 16, se muestra la curva de variación de la Frecuencia vs. Tiempo de un barrido logarítmico de 6dB/Octava, donde se aprecia que a incrementos iguales de frecuencia ($\Delta f1 = \Delta f2$) no se obtienen iguales incrementos de tiempos ($\Delta T1 < \Delta T2$): "Empleamos menos tiempo en barrer las frecuencias más bajas que en barrer las frecuencias más altas" o en otras palabras: "gastamos más energía en barrer altas frecuencias".

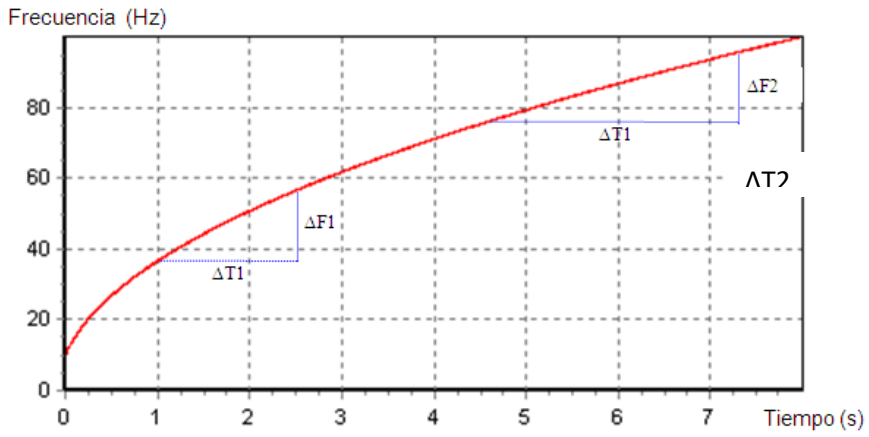
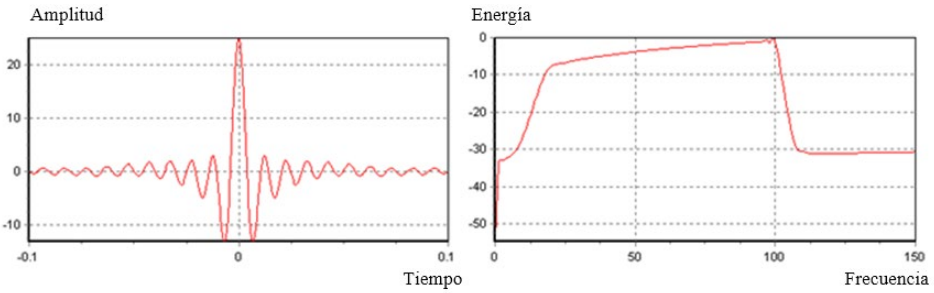


Figura 16: Variación Logarítmica de la frecuencia respecto al tiempo: "6 dB/Oct" [4]

En la figura 17(a) la Ondícula del Barrido Logarítmico muestra un Lóbulo Central tan estrecho como en el Lineal aunque la relación de amplitud entre el Lóbulo Central y los Laterales ha disminuido (ahora es de aproximadamente 2,4 veces) y podrían interpretarse como tres reflexiones consecutivas de un mismo horizonte.

La Figura 17(b) muestra que la amplitud del espectro es mayor cuando mayor es la frecuencia del barrido expresando el mayor aporte de energía suministrada a las altas frecuencias en detrimento de las bajas frecuencias.



(a) (b)

Figura 17, (a) Autocorrelación del Barrido Logarítmico, (b) Espectro de Amplitud del Barrido Log [4].

NOTA: *El barrido logarítmico era bastante empleado en Vibradores para compensar la atenuación que produce el terreno en las componentes de alta frecuencia. Debido al gran Rango Dinámico que manejan los Sistemas de Adquisición (120 dB o más), resulta más práctico compensar atenuaciones durante el Procesamiento de los ¨Datos ya adquiridos, ya que también el barrido logaritmo aumenta la amplitud de los lóbulos laterales de la Ondícula, y pueden confundirse estos lóbulos en reflexiones del subsuelo.*

Barrido Exponenciales

De una manera similar, podemos ver en la Figura 18, como en un Barrido Exponencial (en la figura se desarrolló un: T^2) para el mismo Rango de Frecuencias y Longitud de Barrido (8 segundos):

$$\text{Para} \quad \Delta f1 = \Delta f2$$
$$\Delta T1 > \Delta T2$$

Para este tipo de barrido: "gastamos más energía barriendo bajas frecuencias que barriendo altas frecuencias". Este tipo de barrido, es generalmente utilizado en sísmica, cuando se quiere resaltar la penetración en el terreno (que logran las bajas frecuencias), sin disminuir el contenido de componentes de altas frecuencias (no se lo utiliza frecuentemente).

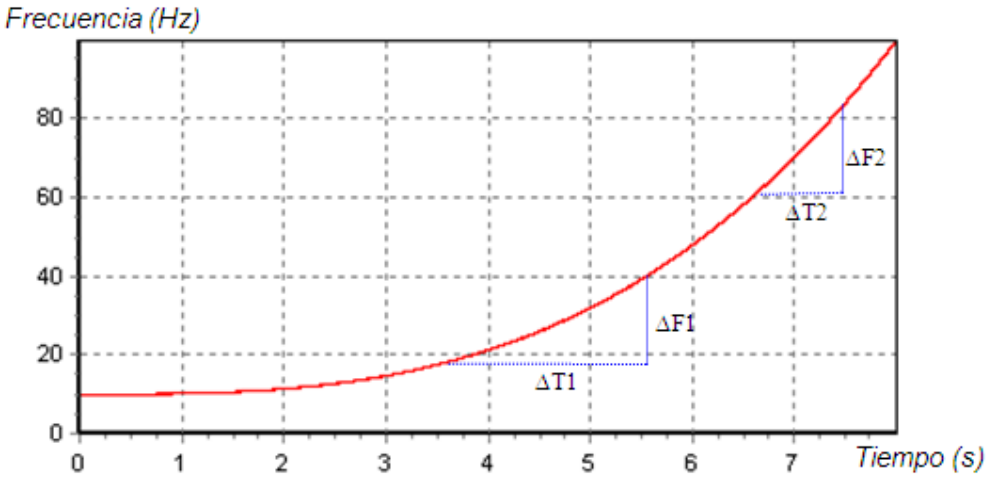


Figura 18: Barrido Exponencial de T² [4]

La Figura 19, muestra la Ondícula del Barrido Exponencial "T-Power" con un exponente de: "2", donde se observa el mismo ancho del Lóbulo Central que los anteriores y una muy alta relación de amplitud con los Lóbulos Laterales.

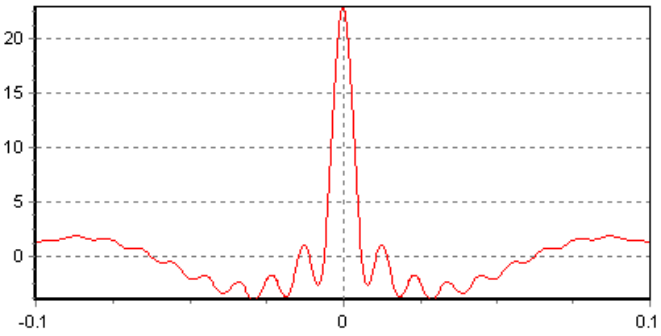


Figura 19, Ondícula del Barrido Exponencial [4]

La figura 20 corresponde al Espectro de Amplitud del Barrido T-Power, apreciándose el aporte de energía en las bajas frecuencias del barrido en detrimento de las altas frecuencias.

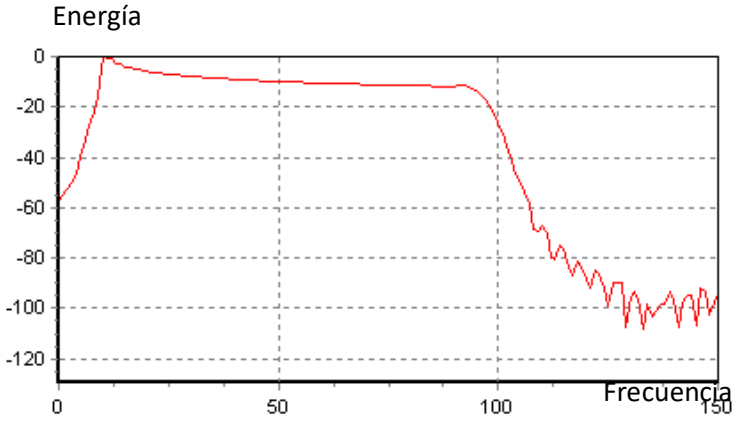


Figura 21, Espectro de Amplitud del Barrido T-Power [4]

Barridos diseñados externamente (Custom sweeps)

Todos los Controles Electrónicos poseen la posibilidad de utilizar un "sweep" externo, diseñado para satisfacer una necesidad geofísica específica. Por ejemplo: para poder generar muy bajas frecuencias en un Vibrador Convencional, se deberá generar esas frecuencias a muy baja amplitud para que no se superen los límites de: Caudal, Desplazamiento de la Servoválvula, etc.

El siguiente barrido cumple con dicho objetivo. La Figura 22 corresponde a una curva Frecuencia vs Tiempo, donde un Barrido de 18 segundos emplea los primeros 7,5 segundos en barrer frecuencias de 1 a 7 Hz en forma no-lineal y el resto del tiempo en barrer de 7 Hz a 85 Hz en forma lineal.

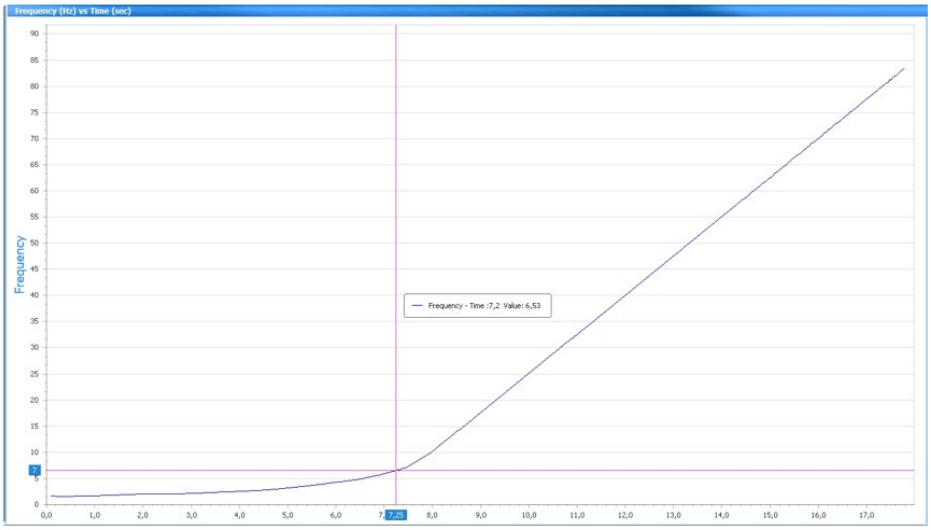


Figura 22, Barrido Custom Curva Frecuencia vs tiempo [5]

La Figura 23 es la Curva Amplitud vs Tiempo del Barrido anterior, donde se aprecia el aumento exponencial de la amplitud de la señal hasta los 7,5 segundos para mantenerse la amplitud constante desde allí hasta los 18 segundos.

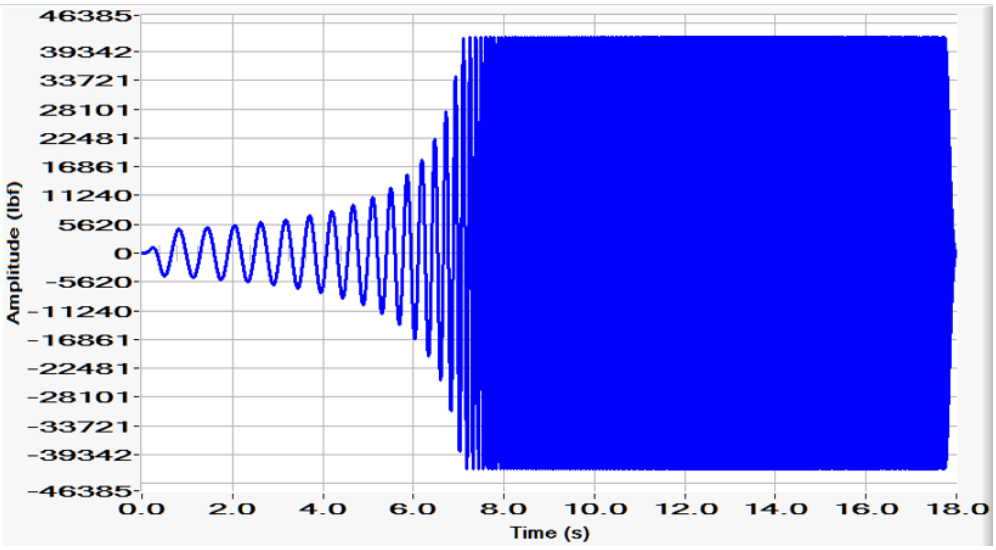


Figura 23, Barrido Custom Curva amplitud vs Tiempo [5]

La Figura 24 corresponde al Espectro de Amplitud del Barrido, donde se aprecia que el total de las frecuencias poseen el mismo nivel de energía, porque las frecuencias más bajas fueron emitidas durante mayor cantidad de tiempo que las altas.

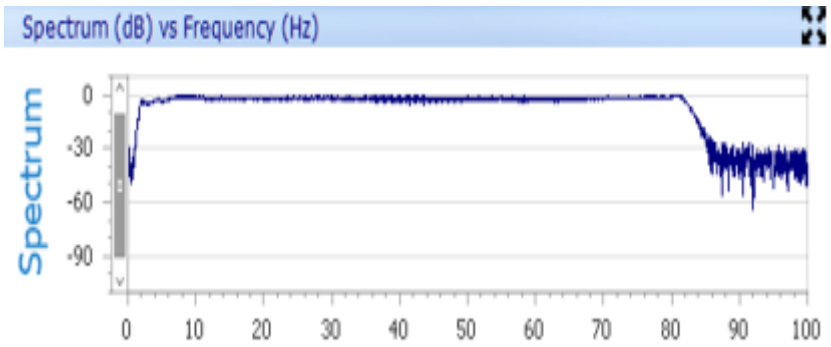


Figura 24, Barrido Custom: Espectro de Amplitud [5]

Auto correlación y ejemplo de correlación gráfica

Si el barrido emitido fuera recibido por nuestras trazas sísmicas sin diferencias de amplitudes ni de fases (totalmente ideal), el proceso de correlación consistiría en cross-correlar una señal consigo misma, se trataría entonces de una "Auto correlación".

En las Figuras 22 mostramos un ejemplo de correlación gráfica en donde la Traza Sísmica (Figura 22-b) es una réplica exacta de la señal emitida pero recibida luego de un tiempo "t = 5T".

El tiempo: "T", es el tiempo de toma de muestra para la digitalización de la señal sísmica analógica (de la Traza Sísmica y del Operador de Correlación), generalmente este tiempo o "Sample Rate" es de 2 milisegundos.

La Figura 22-c, es el "Operador de Correlación" colocado en el comienzo (t = 0) (que representa a la señal emitida y que debe ser identificada dentro de la "Traza Sísmica") El primer coeficiente a obtener de la ondícula (Figura 22-a), se encuentra al comienzo del tiempo de barrido (t = 0) En este momento el punto "C1" de la Ondícula de Correlación (mostrada en forma idealizada en la Figura 22-a), es obtenido aplicando la matriz correspondiente, que para esta caso es:

C1 = (O1 + O2 + O3 + O4 + O5) x 0 + O6 x D1 + O7 x D2 + O8 x D3 + O9 x D4 + O10 x D5 + O11 x D6

Las primeras muestras del Operador de Correlación (O1-O5) se multiplican en este ejemplo con un valor cero de amplitud de la Traza Sísmica (en realidad nunca es "cero" porque siempre existirán ruidos de diferentes orígenes (armónicas por ejemplo) cuyas muestras correlacionarán con las muestras del Operador de Correlación), pero generalmente el valor de amplitud de C1 es bajo.

La Figura 22-d muestra el segundo paso de correlación donde el Operador de Correlación se ha desplazado un tiempo desde el origen "T" correspondiente a un período de muestreo. En este instante se calcula el punto "C2" de la Ondícula de Correlación (Figura 22-a) el cual es obtenido del cálculo siguiente:

C2 = (O1+O2+O3+O4) x 0 + O5 x D1 + O6 x D2 + O7 x D3 + O8 x D4 + O9 x D5 + O10 x D6 + O11 x D7

En este paso las muestras "ceros" de la Traza Sísmica que enfrentan las muestras del Operador de Correlación son menores y "C2" aumenta ligeramente de amplitud.

Luego se suceden los desplazamientos del Operador de Correlación equivalentes a: "2T", "3T", 4T, cuyas sumas de productos generan las amplitudes "C3", "C4" y "C5"como resultado de la correlación, hasta que para "5T" las muestras correspondientes al Operador de Correlación enfrentan a muestras similares de la Traza Sísmica (de igual amplitud en el ejemplo pues se trata de una Autocorrelación) Para este caso el valor de la amplitud de la correlación es "C6":

C6 = O1xD1+O2xD2+O3xD3+O4xD4+O5xD5+O6xD6+O7xD7+O8xD8+O9xD9+ O10xD10+O11xD11

En este caso la amplitud de "C6" es la máxima posible de obtener indicando el instante de coincidencia entre el Barrido emitido con el Barrido recibido.

El resto de los pasos de correlación son previsibles y muestran la repetición de valores o **simetría** en la Ondícula. La correlación termina cuando el valor de desplazamiento del Operador de Correlación "nT" es igual al tiempo de escucha (Listen Time) elegido.

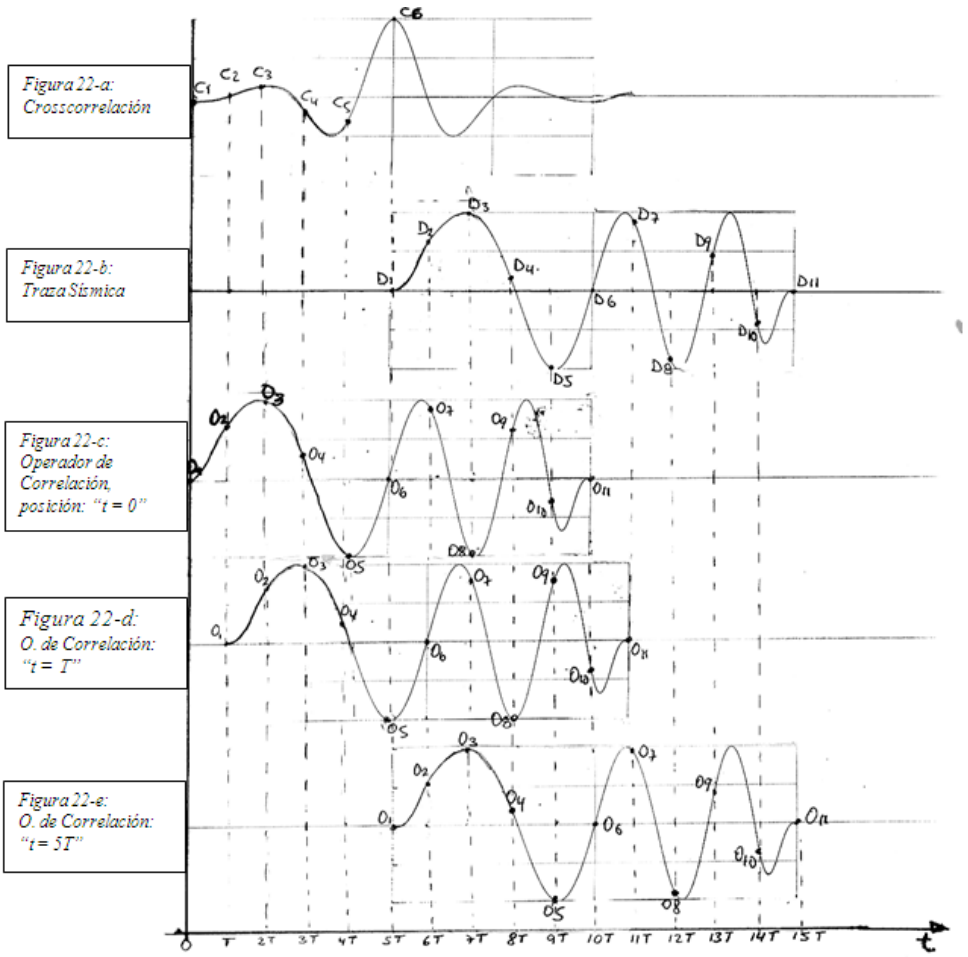


Figura 25: Correlación Gráfica [9]

Ejemplo:

Para 4 segundos de "Listen Time" con un "Sample Rate" de 2 ms. existirán

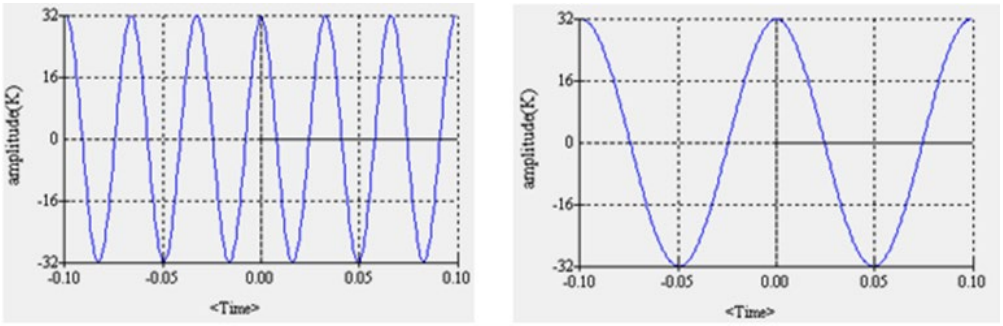
N = Listen Time / T = 4 / 0.002 = 2000 pasos de correlación

El ejemplo anterior, es una buena imagen de la **"Ondícula de Klauder"** u ondícula obtenida de autocorrelar el Barrido Piloto del vibrador. Como vemos esta es diferente a la "Ondícula de Fase Mínima", característica de todo fenómeno físico causal. El contenido de Frecuencias de la Ondícula está acotado a aquellas frecuencias que son comunes a la Traza Sísmica y al Operador de Correlación convirtiendo al proceso de correlación en un poderoso y efectivo filtro de frecuencias.

Características de la Ondícula de Klauder

Ya conocemos dos de las características que utilizaremos para evaluar la calidad de la Ondícula generada en el Barrido de Frecuencias u Ondícula de Klauder que son: Rango del Barrido (ancho de banda) y la Frecuencia Media del Barrido.

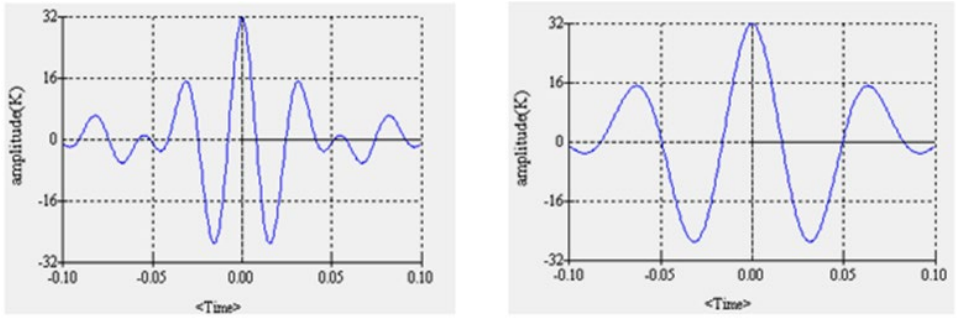
Las Figuras 26 (a) y (b), corresponden a autocorrelaciones de una única frecuencia, f = 30 Hz para (a) y f = 10 Hz para (b).
En ambos casos la ondícula de autocorrelación, es simplemente una onda sinusoidal. Observar que en Figura 26-a, el período es T = 33 mseg y que en la Figura 26-b es T= 100 mseg, confirmando las frecuencias de señales sinusoidales. Los "lóbulos laterales" poseen amplitudes similares a los "valles intermedios" y al "lóbulo central", ya que el ancho de banda es "ΔF = 0 octavas", pero el **ancho del lóbulo central** es menor en 26-a ya que la "frecuencia media" y única, es mayor que en 26-b (33 y 100 mseg respectivamente).



(a) (b)

Figura 26, (a) Frecuencia 30 Hz (⊿F=0 Oct Fm=30Hz); (b) Frecuencia 10 Hz (⊿F=0 Oct; Fm=10 Hz) [4]

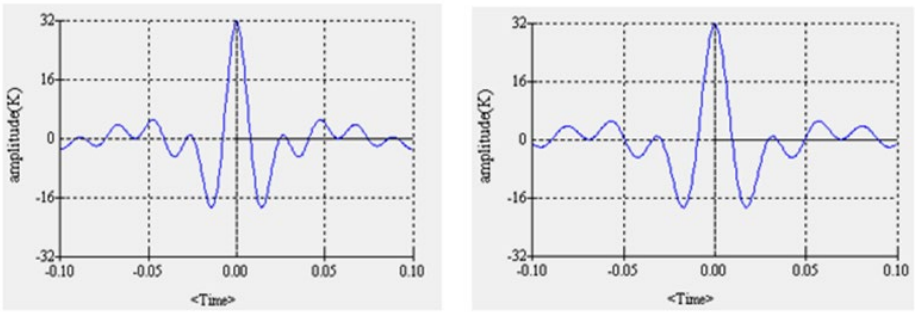
Las Figuras 27 (a) y (b) corresponden a autocorrelaciones de barridos diferentes pero de anchos de bandas iguales: "ΔF = 1 octava" en ambos casos. Es fácilmente observable como han disminuido la amplitud de los "lóbulos laterales y valles". También el "ancho del lóbulo central" en (a) es menor que en (b) pues la frecuencia media es de 30 Hz (ídem 26-a) en el primer caso y 15 Hz en (b).



(a) (b)

Figura 27, (a) Frecuencia 20-40 Hz (⊿F=1 Oct; Fm=30Hz); (b) Frecuencia 10-20 Hz (⊿F=1 Oct; Fm=15 Hz) [4]

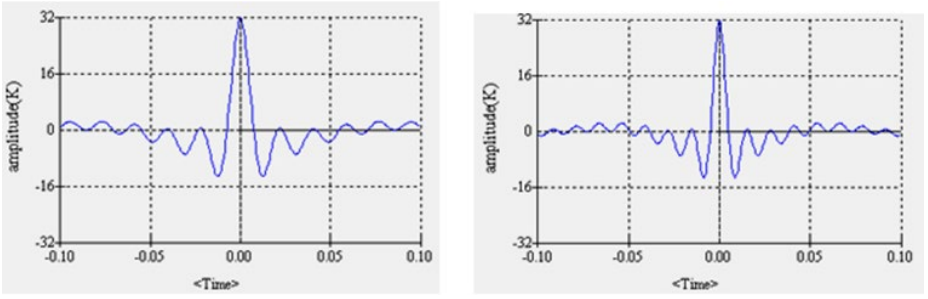
Las Figuras 28 (a) y (b), corresponden a barridos diferentes pero de "anchos de banda" iguales:
"ΔF = 2 octavas" en ambos casos. La amplitud de los "lóbulos laterales y valles" ha disminuido en forma importante pero el "ancho del lóbulo central" permanece igual en 28-a (Fmedia = 30 Hz) y disminuyó en 28-b (Fmedia = 25 Hz).



(a) *(b)*

Figura 28, (a) Frecuencia 12-48 Hz (⊿F=2 Oct; Fm=30Hz); (b) Frecuencia 10-40 Hz (⊿F=2 Oct; Fm=25 Hz) [4]

Las Figuras 29 (a) y (b), son autocrrelaciones de barridos de "anchos de banda" iguales de: "ΔF = 3 octavas", donde la amplitud de los "lóbulos laterales y valles" son bastantes bajos con respecto al "lóbulo central". En 29-a el "ancho del lóbulo central" se mantiene similar a los anteriores (fmedia = 31 Hz.) pero es más chico en 29-b, ya que la "frecuencia media" aumentó a 45 Hz.



(a) *(b)*

Figura 29, (a) Frecuencia 7-56 Hz (⊿F=3 Oct; Fm=31 Hz); (b) Frecuencia 10-80 Hz (⊿F=3 Oct; Fm=45 Hz) [4]

Finalmente llegamos a la Figura 30, que corresponde a la autocorrelación de un barrido de 3,5 Octavas de ancho de banda y con una frecuencia central de 51 Hz. Esta Ondícula de Klauder es bastante selectiva ya que se aproxima al "spike" (ancho de pulso tendiendo a "0" sin lóbulos o valles laterales con demasiada amplitud).

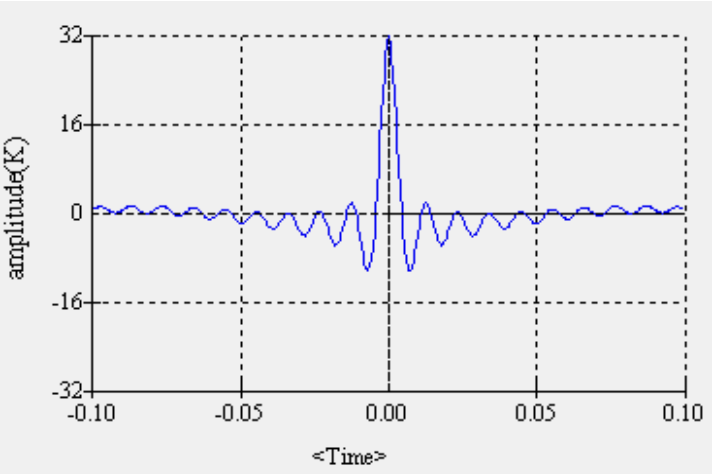


Figura 30, Barrido = 6 – 96 Hz (ΔF=3,5 Oct; Fm = 51 Hz) [4]

NOTA: Siempre que las condiciones de respuesta sísmica lo permitan, deberíamos pretender vibrar un barrido cuya correlación sea parecido al de la Figura 25. Existen algunas complicaciones por el cual la "Ondícula de Crosscorrelación" real, difiere de esta "autocorrelación" del "Barrido Piloto".

Frecuencias Armónicas

Las Frecuencias Armónicas son también generadas durante el barrido sísmico, debido a la respuesta alineal del conjunto vibro-terreno. Hemos desarrollado el modelo mecánico-eléctrico que los representa, por lo tanto ahora trataremos el tema más expeditivamente.

Si: "$X(f_0)$" es nuestra señal de entrada en el dominio de la frecuencia, siendo "f_0" la única frecuencia emitida (señal sinusoidal), la señal de salida "Y" contendrá a la señal "fundamental: fo" y a sus armónicas: $2f_0$, $3f_0$, $4f_0$,.., nf_0 con atenuaciones de amplitud que dependerán de las características del conjunto vibro-terreno.

Salvo trabajando en HFVS (High Fidelity Vibrator Seismic), en las demás operaciones con vibradores, las componentes armónicas de un barrido pueden ser consideradas como "ruidos especiales" pues "correlacionan" perjudicialmente con la señal Piloto.

En la Figura 31, vemos de manera tridimensional la gráfica "Frecuencia vs. Tiempo vs Armónicas".

La componente "Fundamental", identificada por tener atenuación: "0 dB" (color: rojo-negro), corresponde a un Barrido Lineal, de 18 Hz. de frecuencia inicial y 96 Hz. de frecuencia final y una longitud de barrido de 12 segundos.

La pendiente de la recta de la Frecuencia Fundamental (también considerada: "Primer Armónica":

$$\Delta F / \Delta T = (96 - 18) / 12 = 6,5 \text{ Hz/seg}$$

La recta superior a la "Fundamental" posee el doble de pendiente y corresponde a la "Segunda Armónica" del barrido, la siguiente recta corresponde a la "Tercera Armónica" y tiene una pendiente tres veces mayor a la fundamental.

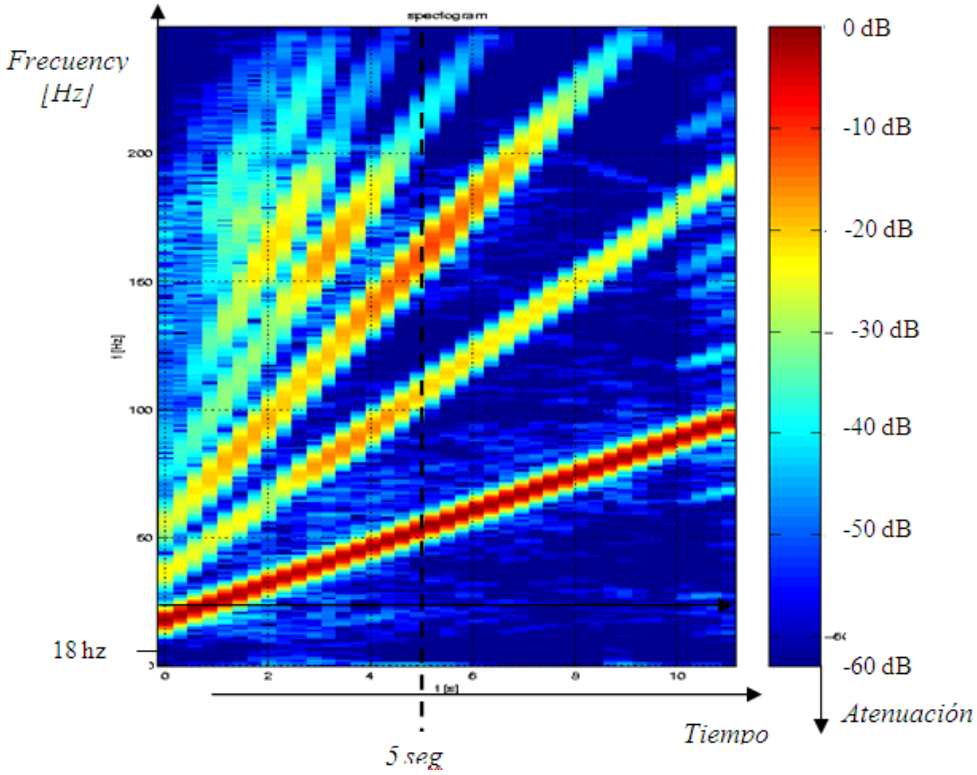


Figura 31: Fundamental + Armónicas en un Barrido Sísmico [7]

Ejemplo: ¿Cómo se compone las Fuerzas intervinientes en el Vibrador para t = 5 segundos?

- La frecuencia "Fundamental" es de: 18 + 6,5 x 5 = 50,5 Hz.
- La "Segunda Armónica" es de: "2 x 50,5 = 101 Hz, y esta posee una amplitud de –20 dB debajo de la Fundamental (color: amarillo-marrón; unas 10 veces menos fuerza que la fundamental).
- La "Tercera Armónica" es de: "3 x 50,5 Hz = 151,5 Hz" y posee una amplitud mayor que la anterior y es de aproximadamente: -15 dB por debajo de la fundamental (color: naranja-amarillo; unas 5,6 veces menos fuerza que la fundamental)
- La "Cuarta Armónica" es de: "4 x 50,5 Hz = 202 Hz" y posee una amplitud de -40 dB por debajo de la Fundamental (color: celeste; unas 100 veces menos de fuerza que la fundamental)
- Las demás armónicas resultan totalmente despreciables.

Lo anterior significa que, si la Fuerza Total del Vibro fuese seteada a 60000 lb, la fuerza ejercida sobre el terreno a los 5 segundos del inicio del barrido sería de una frecuencia de 50,5 Hz y estaría compuesta por:

$$60000\ \text{lb.} = \underbrace{\text{FND} + \text{FND}/10 + \text{FND}/5{,}6}_{\text{2da. Armónica - 3ra. Armónica}} + \underbrace{\text{FND}/100}_{\text{4ta. Armónica}} =$$

Armónica

$$60000 = \text{FND}\,(1 + 0{,}1 + 0{,}18 + 0{,}01) = \text{FND}\,(1{,}29)$$

$$\text{FND} = 60000\ /1{,}29 = 46512\ \text{lb}$$

Amplitud Fundamental = 46512 lb
Amplitud Segunda Armónica = 4651 lb.
Amplitud Tercera Armónica = 8382 lb.
Amplitud Cuarta Armónica = 465 lb.
60000 lb.

La Distorsión Armónica (HD) generada para T = 5 segundas se calcula como:

$$\text{HD (5s)} = 100 * \frac{\text{Fuerza Bruta – Fuerza Fundamental}}{\text{Fuerza Fundamental}} =$$

$$= 100 * (60000 – 46512) / 46512 = 29\ \%$$

¿Porque correlacionan las Frecuencias Armónicas?

Comprobaremos como correlacionan las frecuencias armónicas generadas con el barrido piloto:

Consideremos que un Barrido de 10 a 80 Hz es emitido por los Vibradores y que este se refleja en un horizonte del subsuelo. La traza correlacionada lo muestra con un importante ruido que precede al Lóbulo Central de la Ondícula (en azul en figura 32). El Lóbulo Central es producido porque la Correlación obtiene su máximo valor, como coincidencia de la "Pilot Sweep" con el Barrido reflejado y constituido por la Fundamental (en verde) más las Armónicas incorporadas en el proceso (segunda armónica en azul y tercera armónica en amarillo). Llamamos al punto central del Lóbulo Central: tiempo "$t = T_0$".

El proceso de Correlación gráfica muestra como el Barrido Piloto, 4 periodos de muestreo antes de detectar el tiempo de reflexión T_0, o sea para $t = T_0 – 4\ T_m$, empieza a correlacionar con componentes armónicas (ver correlación gráfica). En este tiempo, la componente de 60 Hz del Barrido Piloto, correlaciona con los 60 Hz de la Tercer Armónica y la de 80 Hz con igual componente de la Segunda Armónica y generando alguna amplitud de ruido en la traza dependiente del valor de las amplitudes de las armónicas.

Un periodo de muestreo después: $t = T_0 – 3\ T_m$, la componente de 60 Hz del Barrido Piloto correlaciona con la Segunda Armónica.

En: "$t = T_0 - 2\,T_m$", las componentes de 30 Hz y 40 Hz del Barrido Piloto, correlaciona con la Tercer y Segunda Armónicas respectivamente.

En "$t = T_0 - 1\,T_m$", la componente de 20 Hz del Barrido Piloto correlaciona con la Segunda Armónica.

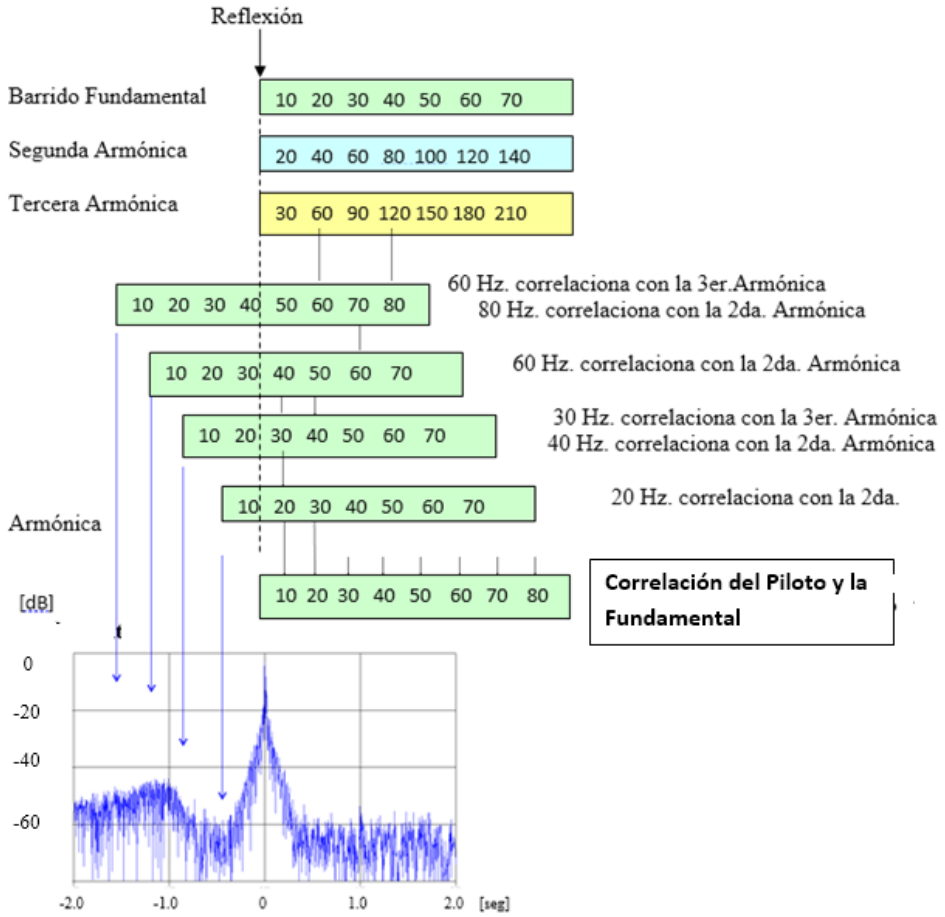


Figura 32: Correlacionado de Armónicas de un "up-sweep" en una traza sísmica [9]

La parte inferior de la Figura 32, en azul, es la Envolvente de una "Crosscorrelación" (obtenida de un Force Meter), donde se aprecia como la parte anterior al "lóbulo central" es donde se producen los ruidos de correlación debido a las "Armónicas" generadas en un "Barrido Ascendente" (up-sweep) que correlacionan con la Piloto antes que lo haga el mismo barrido. De la misma manera podría demostrarse que en un "Barrido Descendente (down sweep), las armónicas generadas correlacionan con el Piloto luego de que lo haga el mismo barrido con lo cual haría dificultosa el reconocimiento del lóbulo central de la ondícula.

Los valores de "Frecuencias Armónicas" generados, aceptables sísmicamente, son las que producen crosscorrelaciones por debajo de 40 dB (-40 dB en la Figura 28) con respecto a la amplitud del lóbulo central. Cuando estos valores de armónicas son superados, deberemos aconsejar a nuestros Clientes, la disminución de la Fuerza del Barrido de nuestros Vibros, con lo cual haremos disminuir la amplitud de las armónicas.

TECNICAS DE BARRIDOS

Como la energía generada por un solo vibrador generalmente no es suficiente para producir una buena respuesta del subsuelo y si el "stacking" tampoco es suficiente, se utilizan más de un vibrador por posición (VP: Vibrator Point). Una flota de 4 vibradores de 60.000 lb fue frecuentemente usada en Argentina.

Para mejorar la operatividad en la adquisición con vibradores, se suelen utilizar durante un proyecto sísmico más de una flota de vibradores, de tal manera que mientras una flota está vibrando la otra flota se está trasladando de posición. A esta técnica se la denominó **"Flip-Flop"**.

Flip - Flop

En esta técnica que utiliza dos o más flotas de vibradores, el barrido de la otra flota de vibradores debe comenzar una vez finalizado de adquirirse el VP anterior.

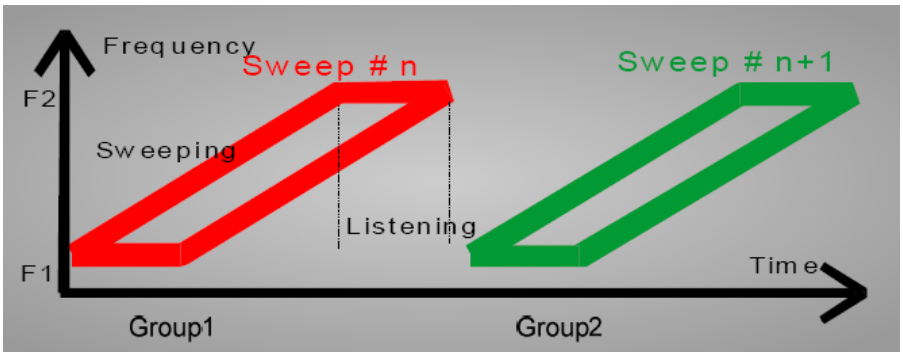


Figura 33, técnica de barrido Flip-Flop" [5]

Los datos adquiridos con Flip Flop se correlacionan uno después del otro utilizando el barrido Piloto grabado en un canal auxiliar.

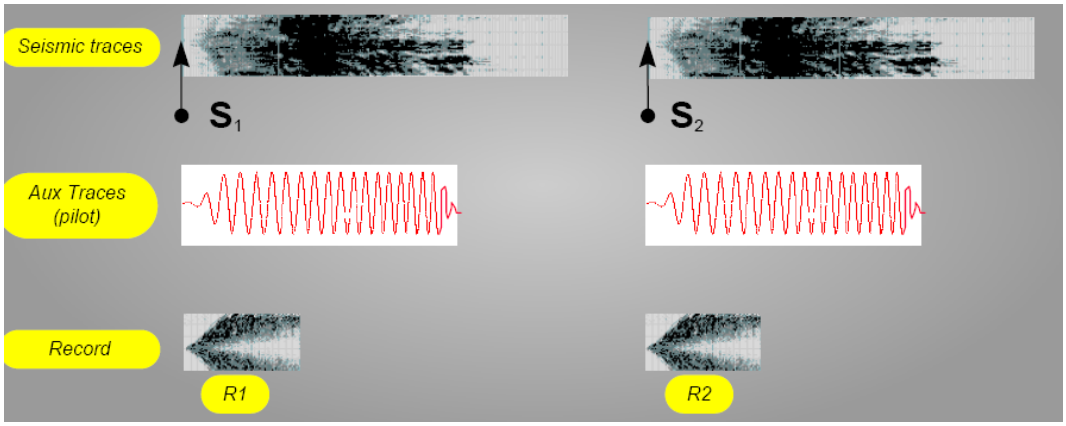


Figura 34, correlacionado de los datos adquiridos en Flip Flop [5]

Con Flip-Flop las frecuencias armónicas de un barrido no se mezclan con el barrido siguiente. En la siguiente figura vemos como un barrido lineal "n" de frecuencia inicial "F1" y final "F2", genera las armónicas "H2", "H3" y "H4" que pueden correlacionar con dicho barrido "n". El barrido "n+1" es una repetición del anterior pero entre ambos no existe ninguna vinculación, los separa el "listen time".

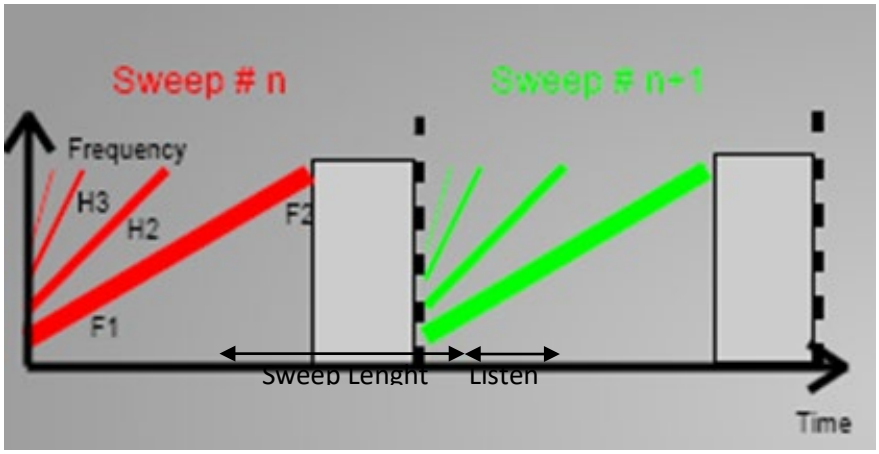


Figura 35, frecuencia vs tiempo de dos barridos consecutivos con Flip Flop [5]

En la correlación de grupos de vibradores operando en FlipFlop, los ruidos producidos por la correlación del Barrido Piloto con las armónicas de ese barrido, aumentan los lóbulos laterales anteriores al lóbulo central de la ondícula. No existen ruidos de armónicas generadas por el barrido del otro grupo.

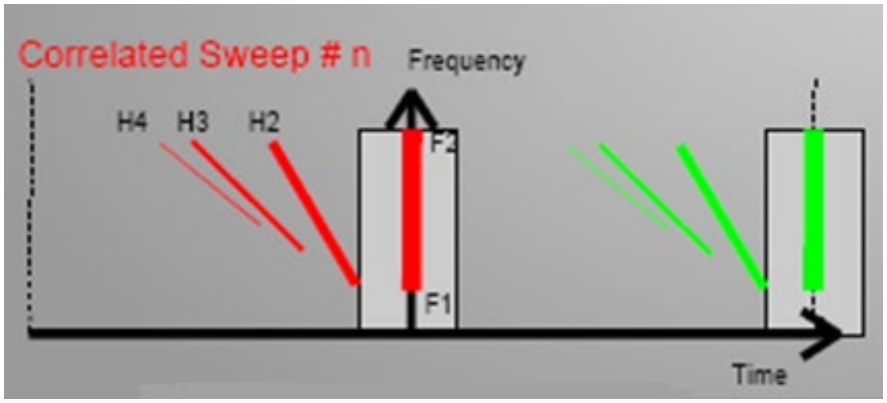


Figura 36, correlación de grupos en Flip Flop [5]

Barridos Simultáneos

La necesidad de aumentar la operación con vibradores y disminuir costos, logró que se inventaran técnicas muy ingeniosas y prácticas que se denominó: "Barridos Simultáneos. Los métodos más empleados con barridos simultáneos son: **"High Fidelity**" y **"Sleep Sweep"**

También estas técnica permiten ser utilizadas en "emisión puntual", que conjuntamente con una "recepción puntual", permiten aumentar la frecuencia espacial ($k = 1/\lambda$) en la adquisición sísmica, para eliminar ruidos aliados a los

datos. Los Sistemas Nodales resuelven la implementación de la recepción puntual pero la fuente de emisión puntual con vibradores presupone utilizar un solo vibrador por VP y la operatividad (costos) no sería aceptable.

H.F.V.S (High Fidelity Vibrator System)

Los autores desarrollaron el HFVS, definiéndolo como un "sistema de alta fidelidad", porque: beneficia al dato sísmico adquirido con vibradores, con un ancho de banda que se extiende más allá de las frecuencias del barrido, generando una estable y predecible ondícula con menores lóbulos laterales de distorsión armónica.

En esta técnica muchos uno de los principales problemas de utilizar vibradores: Las Distorsiones Armónicas", son aprovechadas para extender el ancho de banda de la adquisición sísmica.

Cuando utilizamos Vibroseis, el dato sísmico se expresa por la siguiente Convolución:

$$\text{(I)} \qquad \text{DATO} = \text{GF} * \text{TIERRA}$$

La "Ground Force" (GF) es la fuerza con que reacciona el terreno acoplado con la Plancha del vibrador, ante un Barrido Sísmico.

La GF es normalmente estimada, sumando pesadamente las aceleraciones generadas en el sistema actuador del vibrador (Masa de Reacción y Plancha) durante el barrido. Esta fuerza, denominada "Weighted Sum" (WS), se considera de igual magnitud y de sentido opuesto a la GF:

$$\text{(II)} \qquad -GF = WS = W_{rm} * Acc_{rm} + W_{bp} * Acc_{bp}$$

La figura 37 volvemos a emplear un diagrama en bloques del Control Electrónico de un Vibrador, conectado con el sistema actuador del mismo. Podemos ver como las señales provenientes de los acelerómetros de Masa de Reacción y de Plancha son escaladas por el valor de las masas de sus cuerpos y sumadas para generar la WS (Amplificador Sumador). Finalmente la WS es filtrada de sus componentes armónicas para transformarla en "WS Fundamental", esta es la señal utilizada por el Vibrador, para controlar la amplitud y la fase del barrido.

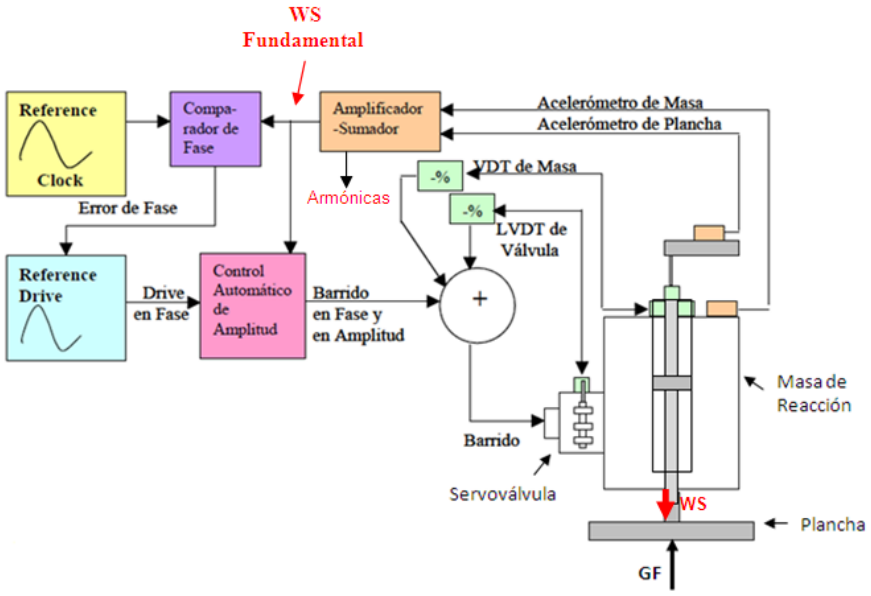


Figura 37: Diagrama en bloque del Control electrónico y Actuador de un Vivrador sísmico [9]

En base a la igualdad (II), la GF es una señal que se mantendrá en fase con la señal de Referencia del Vibrador (REF), dentro de tolerancias aceptables. A su vez la señal REF, es utilizada en el Equipo de Adquisición como "Operador de Correlación" (Pilot Sweep) en sísmica convencional con Vibradores.

La realidad indica que la igualdad entre WS y GF puede ser considerada válida hasta frecuencias cercanas a 50 Hz, para frecuencias mayores de barrido, las amplitudes y fases suelen ser muy distintas entre ambas, dependiendo del tipo de superficie vibrada.

Para conocer la diferencia entre WS y GF, podemos considerar que ambas son producto de la Fuerza Hidráulica (HF) que la Servoválvula ha generado en el Sistema Actuador. Entonces:

$$\text{(III)} \qquad GF = HF * T_A$$

La GF es la Convolución de la Fuerza Hidráulica generada por el Barrido con la Impedancia ofrecida por el Terreno (T_A).

$$\text{(IV)} \qquad WS = HF * T_B$$

La WS es la Convolución de la Fuerza Hidráulica generada por el Barrido con la Impedancia ofrecida por la estructura metálica de la Plancha (SM: Stilt Motion).

Dividiendo en el dominio de la frecuencia entre (III) y (IV) y operando:

$$\text{(V)} \qquad GF = WS * \frac{T_A}{T_B} = WS * T_C \text{ (donde } T_C = T_A/T_B)$$

Reemplazando la GF y operando en (I):

$$\text{(VI)} \qquad \frac{\text{DATO}}{\text{WS}} = \frac{\text{TIERRA}}{T_C}$$

La División en el dominio de la frecuencia ha eliminado la Fuerza Hidráulica (HF, desconocida) pero ha dejado una función transferencia: T_C, también desconocida. La fase de esta función transferencia puede ser estimada desde su espectro de amplitud mediante la Transformada de Hilbert. Finalmente "T_C" puede ser removida durante la "Deconvolución tipo Spike", deduciendo su espectro de amplitud desde los mismos datos sísmicos.

Entonces vemos que en (VI) que si Deconvolucionamos el DATO con la WS obtenemos la imagen del subsuelo (TIERRA). Esto presupone que deberemos obtener desde el mismo Vibrador la señal WS de cada Barrido para poder utilizarla en la Deconvolución, donde el Barrido Fundamental más las Armónicas generadas serán utilizadas, aumentando la amplitud y el espectro de las reflexiones.

En la sísmica convencional se utiliza como "Operador de Correlación" la "True Reference" (REF), que es la señal Fundamental del Barrido emitido, que filtra las armónicas que se producen más allá de su frecuencia final (Ff en la Figura 38), pero ahora la fuerza bruta WS se constituye en el Operador de Correlación y el contenido armónico (no filtrado por el instrumento de adquisición) será parte de la señal emitida y correlará enriqueciendo la fidelidad de la Ondícula (las distorsiones armónicas son parte de la señal sísmica y no ruido).

La Banda Pasante con HFVS se extiende hasta la frecuencia de corte del Filtro Antialiasing (para un periodo de muestreo de 2 ms, la Frecuencia Antialias del Sercel 408/428 es: 0.8 * Fn = 0.8 * 250 Hz = 200 Hz).

La figura 38 representa las curvas Tiempo vs. Frecuencia de un Barrido Lineal de frecuencia inicial "Fi" y final "Ff". La alinealidad vibro-terreno genera frecuencias armónicas (2da. 3ra. y 4ta armónica).

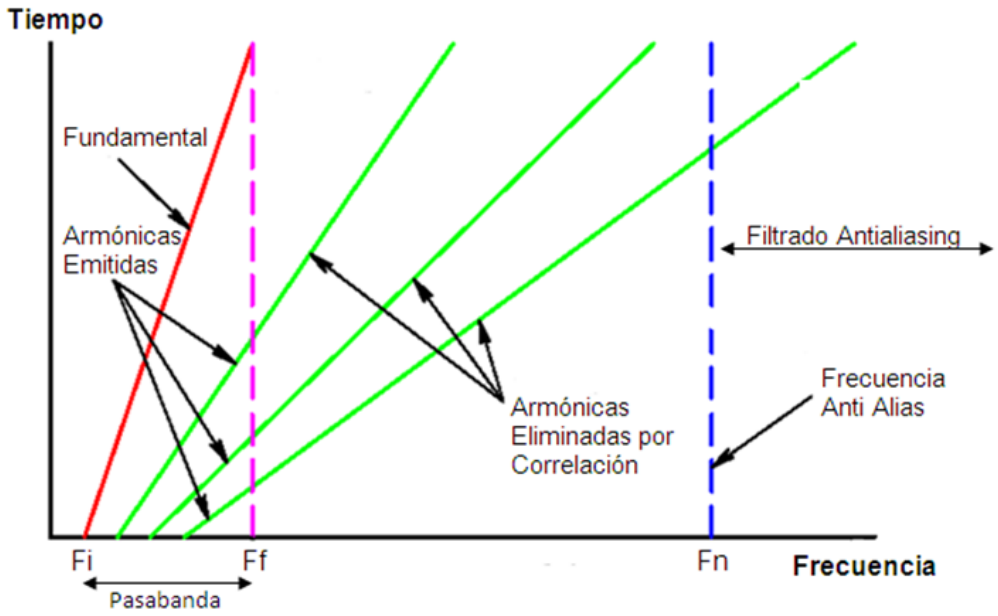


Figura 38, pasabanda en un barrido convencional correlacionado [9]

La necesidad de adquirir datos sísmicos con muy alta densidad espacial, hacen necesario la **emisión puntual** (un vibrador por VP, eliminando el arreglo de vibradores), para mejorar la resolución de las estáticas de la fuente por: cambio en la velocidad de la capa superficial del terreno o cambio en la elevación del mismo, etc.

El sistema HFVS permite la aplicación de fuentes puntuales, utilizando un solo Vibrador para adquirir información sísmica si la energía emitida (ampliada con la contribución de las armónicas) es suficiente para obtener una buena imagen del objetivo. Sin embargo muchas veces será necesario aumentar la energía emitida utilizando múltiples vibradores, en este caso HFVS permite: "introducir al terreno más energía recuperable en menos tiempo". HFVS utiliza varios pasos de procesamiento para la "separación" e "inversión" del dato sísmico, cuando la contribución simultanea de múltiples fuentes es adquirida mediante un común "file". Para que todos los vibradores trabajen en la misma banda de frecuencias y al mismo tiempo, se debe emplear una "codificación de fases" para que la componente de cada vibrador pueda ser "separada" del dato compuesto grabado en el "file".

Si vamos a emplear 4 Vibradores simultáneamente, deberemos vibrar como mínimo 4 barridos por posición.

	V #1	V#2	V #3	V #4
Barrido #1	90°	0°	0°	0°
Barrido #2	0°	90°	0°	0°
Barrido #3	0°	0°	90°	0°
Barrido #4	0°	0°	0°	90°

La tabla de arriba muestra la codificación típica de las fases de los cuatro vibradores durante cada barrido. El proceso de resolver el "dato compuesto" en la contribución particular de cada fuente en el dato, se denomina "Separación".



Figura 39: Ejemplo (de los autores) de 3 fuentes de emisión simultáneas [6]

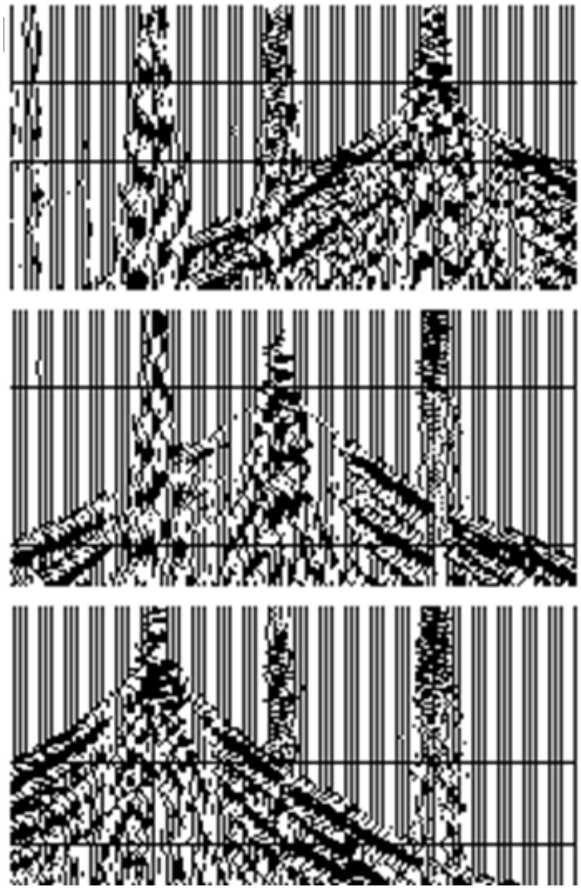


Figura 40: Ejemplo del proceso de separación de las contribuciones individuales [6]

Operar con HFVS (ejemplo con electrónica Pelton)

La principal dificultad en emplear este sistema de adquisición, lo constituye el gran esfuerzo "técnico-administrativo", para la recolección y ordenamiento de los datos producidos, previo a la mezcla de las "source signatures" de los vibradores con los "raw records" grabados por el Instrumento de Adquisición.

Las "source signatures" e información auxiliar, son recolectadas de las "flash memories" de la unidad Pelton VSS en "Seg-2 format" en cada vibrador y deben ser convertidas al formato de nuestro procesador (ejemplo: Omega).

Los "raw records" adquiridos por el sismógrafo, mediante sus "file numbers", deben asociarse con los datos de los vibradores por intermedio del: "Pelton Index numbers", contenidos en la unidad Pelton Encoder.

Los trabajos previos administrativos más rigurosos consistirán en:

- Identificar y eliminar todos los "void files".
- Resolver todas las discrepancias en los "Pelton Index Numbers". El "PX file" es un registro que vincula al "file number" con el "Pelton Index number", generalmente se pueden perder perder o duplicar estos registros y la secuencia deberá corregirse manualmente.
- Corregir los probables errores en el "Observer Log".

- Cada vibrador debe ser cargado (downloaded) individualmente con los "sweeps" de acuerdo a lo posición que ocupa en el arreglo. Si un vibrador es reemplazado, debe contar con igual programación.
- Se deben chequear los "checksum" para garantizar que se han cargado los sweeps correctos en cada vibro. (fases de 0 y 90º, por ejemplo).
- El programa Encoder, debe ser seteado para grabar el "Index Nº" en un archivo. El archivo de la VibPro se llama "PX file" y es el que indica la correspondencia entre el registro grabado en SEG D con la "motion signals" de las PCMCIA cards de las Pelton VSS (directorio: /Pelton/VibPro/Encoder/Data).
- Si el Recording System no graba los "SEG D Files Nº" en los "PX files", se debería utilizar el "timestamp". En el PSS string se graba el GPS timestamp (fields 271-277 del VM file). Este tiempo permite el "matching" con los tiempos del "Observer Log".
- Es recomendable trabajar con una "spread sheet" creada a tal efecto de asegurar la correcta relación de "PX file" con el correcto "SEG D File Nº".
- Las unidades **VSS Card,** anexadas a cada VibPro de cada vibrador, contiene 2 tarjetas "flash memories" (en duplícate mode). La tarjeta puede acumular hasta 1352 sweeps de 16 segundos. Se necesita habilitar el VSS window para conocer el: "card status", pero solamente este muestra la cantidad de "sweep starts" recibidos pero no se muestran la cantidad de sweeps grabados

Si las VSS cards necesitan ser formateadas, debe tenerse en cuenta que trabajan en DOS y que trabajan con formatos FAT 16 y que con FAT 32 no funcionan. Por lo tanto deberán emplearse software "Window 98" y no con superiores.

SLIP SWEEP:

Este método fue introducido por Petroleum Development Oman en 1966. El concepto básico de esta técnica, se basa en que cada componente de frecuencia de un barrido, debe recorrer el mismo doble camino entre el terreno vibrado y el horizonte más profundo del cual se quiere obtener imagen (generalmente se llega mucho más profundo, por si acaso). El tiempo en que ocurre lo anterior lo tenemos previsto y es el "listen time" (donde hubiese llegado la última componente del barrido a la estación receptora). Por lo tanto podríamos pensar que luego de la emisión de una componente (la frecuencia inicial del barrido, por ejemplo) y luego del tiempo de espera (listen time), podríamos volver a emitir tal componente. Si esto fuese así estaríamos ahorrando un tiempo muy grande.

Ejemplo: en un barrido de 12 segundos de longitud y 4 de escucha, utilizando "Flip Flop" podríamos estar emitiendo cada 16 segundos, en cambio utilizando "Slip Sweep" podríamos hacerlo cada "slip time" que podría llegar a ser de 4 segundos (listeneing time). En Slip Sweep el barrido de otro grupo comienza durante el VP anterior luego de un "slip time".

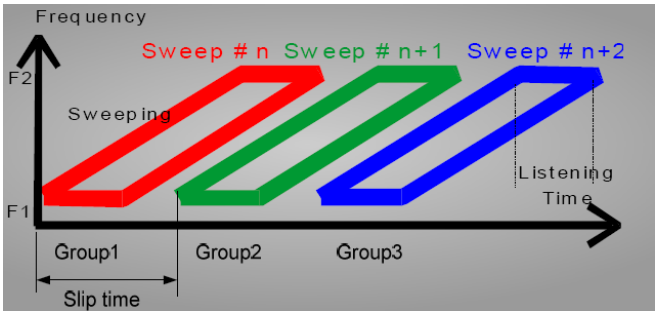


Figura 41, técnica de barrido Slip Sweep [5]

En Slip Sweep las frecuencias son separadas en el proceso de correlación. El mínimo tiempo requerido entre dos barridos (slip time) es el "listen time". Si bien no hay un máximo de tiempo, cuanto más corto es el "slip time" mayor es la producción.

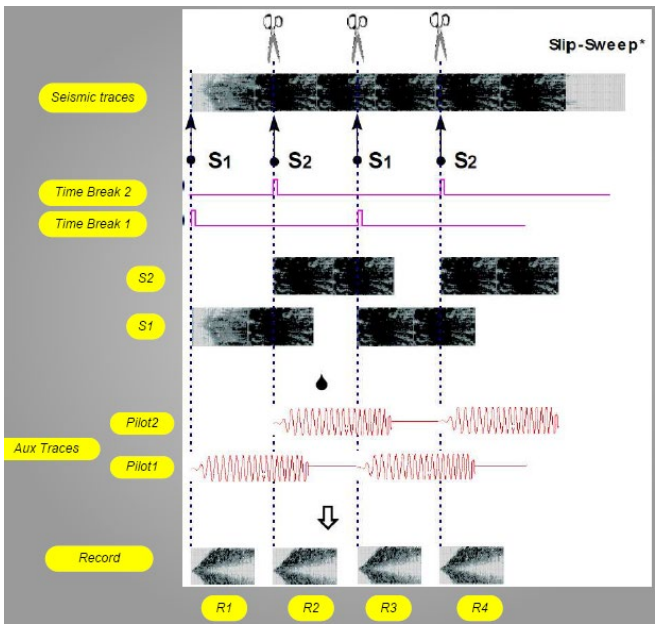


Figura 42, proceso de correlación en Slip Sweep [5]

En Slip Sweep el registro es continuo y solamente pueden ser separados (con superposición) empleando los "Time Breaks" grabados en canales auxiliares. Luego los registros son correlacionados individualmente. Por lo tanto con Slip Sweep los datos no pueden ser sumados en el registrador.

Con Slip Sweep las frecuencias armónicas de un barrido se mezclan con el barrido siguiente. En la siguiente figura vemos como un barrido lineal "n" de frecuencia inicial "F1" y final "F2", genera las armónicas "H2", "H3" y "H4". Vemos también como algunas armónicas del barrido "n+1" interfieren con el barrido "n".

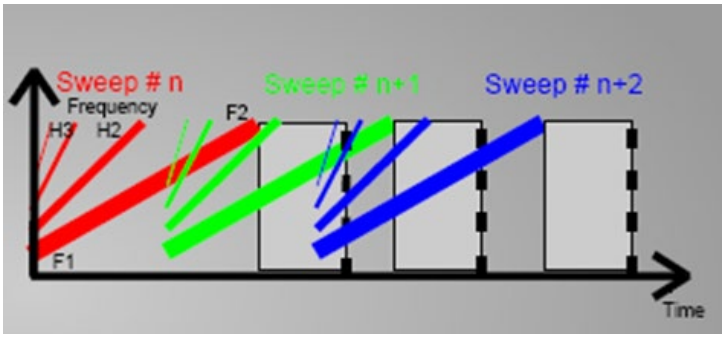


Figura 43, frecuencia vs tiempo de tres barridos consecutivos con Slip Sweep [5]

Como vimos anteriormente, en un "up-sweep", algunas componentes armónicas correlacionan con la señal Piloto produciendo "ruidos de correlación" previos al lóbulo central de la ondícula. En Slip Sweep, algunas armónicas producidas en el barrido "n+1" correlacionan dentro del lóbulo central distorsionando a la ondícula.

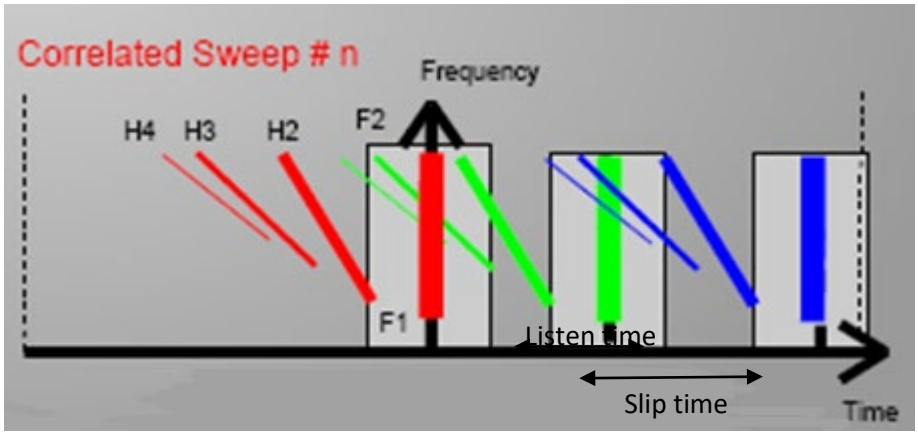
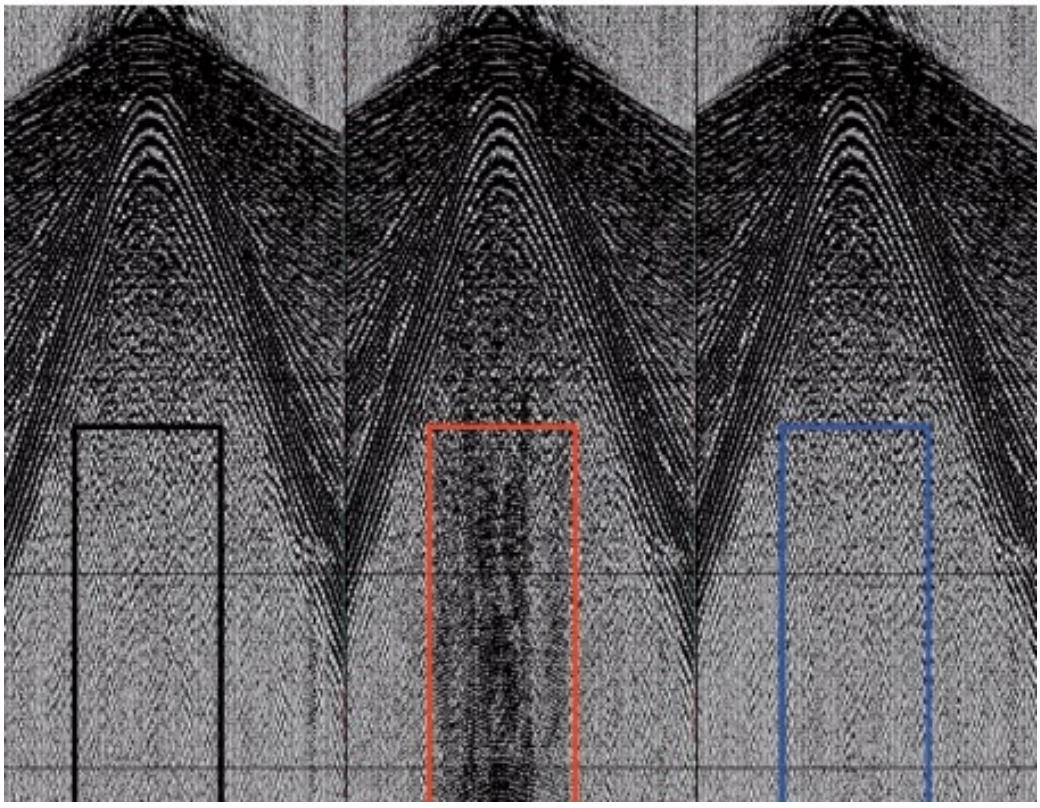


Figura 44, correlación con Slip Sweep [5]

Como conclusión diremos que si queremos disminuir las interferencias trabajando con Slip Sweep, debemos aumentar el Slip time (Slip time > Listen Time), pero debemos también evaluar los procedimientos que existen para recomponer el dato correlacionado con este método que permite filtrar las interferencias producidas (Harmonic Noise Reduction), tal como se muestra en los siguientes VPs.



(a) *(b)* *(c)*

Figura 45, (a) Método Convencional; (b) Slip Sweep; (c) Slip Sweep Procesado [8]

Bibliografía consultada:

1. *Peter Lang – Petty Ray Geophysical – "Vibroseis" – May 1977*
2. *Robert L. Geyer – Journal of the Canadian Society of Exploration Geophysicist – "The Vibroseis"*
3. *Albin John Carlson – "Communication Systems"- 1980 Copyright ©MCMLXXV, by McGraw-Hil Book Co., U.S.A.*
4. *Pelton "Sweep" program graphics.*
5. *Sercel Ve432 Training Course.*
6. *High Fidelity Vibratory Seismic (HFVS) Method for Acquiring Seismic Data, K.p. Allen, M.L. Johnson, J.S. May, Mobil E& P Technical Center.*
7. *Harmonic Noise Reduction, Julien Meunier and Thomas Bianchi, CGG 2004.*
8. *Analysis of the Sleep Sweep Technique, Julien Meunier (CGG), Pascal Nicodeme (Total/Fina/Elf), Salvador Rodriguez (Institut Francais du Pétrole).*
9. *Curso de entrenamiento en adquisición sísmica e interpretación de los sistemas de control electrónico empleados, P.R. Concetti, WesternGeco 2002.*

CAPITULO 12: POLARIDAD S.E.G. EN EL INSTRUMENTAL SÍSMICO

Introducción

La Sociedad de Exploración Geofísica (S.E.G.) dictó en 1975, una serie de recomendaciones y normativas para estandarizar la industria, abarcando: el Formato de Grabación de los Datos (SEG-A hasta SEG-D y SEG-Y) y la Polaridad de Grabación en Cinta Magnética de la onda sísmica analógica producida por Fuente de Energía Impulsiva y Vibracional. Pero en 1993, la SEG tuvo que volver a modificar las recomendaciones sobre la polaridad de las fuentes vibracionales, debido a los avances técnicos sobre el control de amplitud y fase de los vibradores, mediante la Suma Pesada (Weighted Sum) de los Acelerómetros de Masa de Reacción y de Plancha (Baseplate).

Los tres pasos recomendados para colocar en SEG la polaridad de la señal sísmica grabada son:

1. Polaridad del Instrumento utilizado como reproductor de grabación o monitor (pantalla o papel).
2. Polaridad del sistema geófono-cables-registrador,
3. Polaridad del Operador de Correlación (cuando se usan Vibradores).

1. Polaridad del monitor o Sistema de reproducción

La SEG recomienda en 1975, utilizar una cinta magnética patrón de polaridad certificada, la cual denominaron: “Scribe Tape”, a fin de validar gráfica o analíticamente al monitor utilizado en la reproducción de dicha cinta.

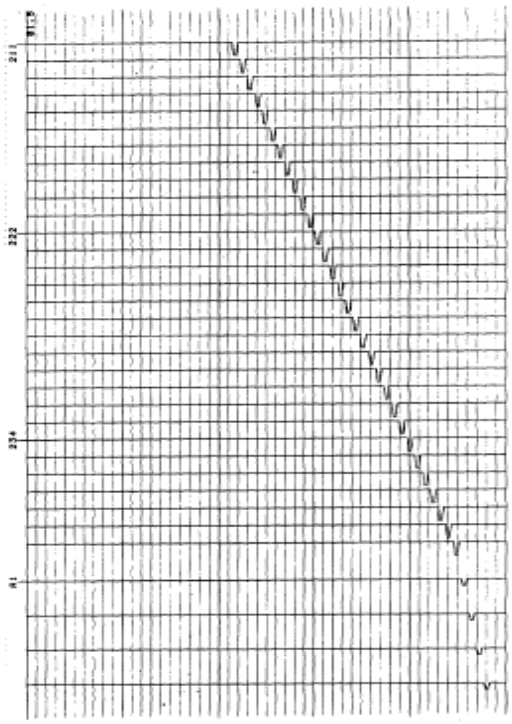


Figura 1, Monitor papel del "Scribe tape", donde se aprecia que la reproducción de los números negativos, producen deflexiones hacia abajo (break down) en las trazas sísmicas de datos y auxiliares [1]

La "Scribe Tape" es un cartridge donde la SEG ha grabado varios canales de datos y auxiliares con números negativos secuenciales simulando "primeros arribos de refracción" (first breaks arrives).
La figura 1 fue copiada del boletín de la SEG de 1993, indicando Polaridad Normal SEG del sistema reproductor porque las trazas del Monitor papel cortan hacia abajo al reproducir números negativos.

Ahora ya no es necesario usar esta cinta patrón y los sistemas de adquisición utilizan "Tape Emulators" para grabar en "hard discks", DVDs. etc. Varios softwares pueden garantizar hacer un "dump" sobre un pulso grabado en una traza sísmica y saber si corresponde a un número negativo o positivo (por ejemplo: el Testif-i by Verif-i).

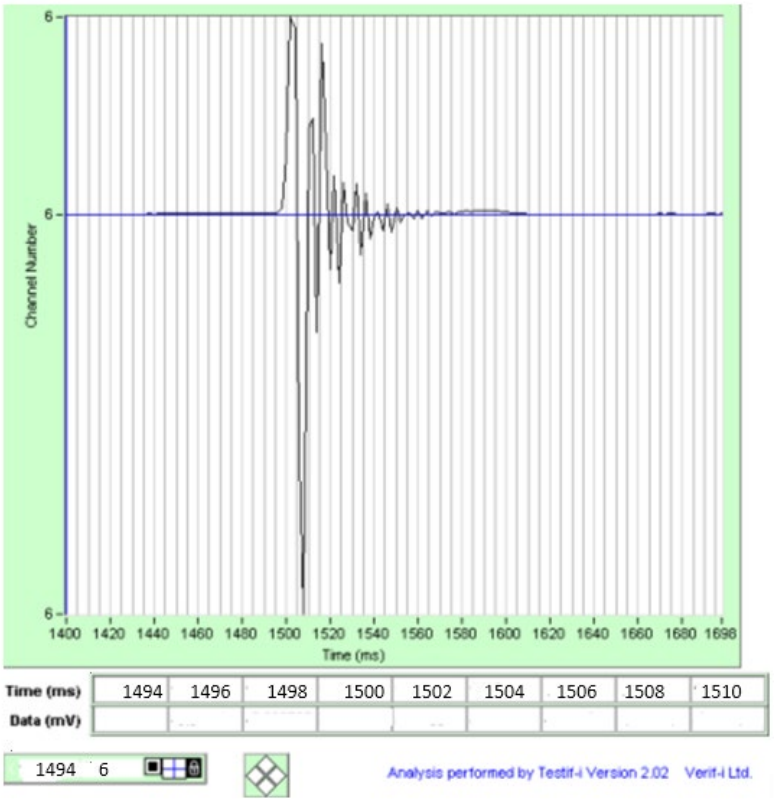


Figura 2: Evaluación del Testif-I del "Tap on the Top Test" [3]

La figura 2 corresponde a un monitor del Testif-i en respuesta a un "golpe de arriba hacia abajo" (pulso), aplicado sobre un geófono del tendido sísmico. La gráfica muestra una deflexión "hacia arriba" de la "traza 6" en respuesta al pulso, indicando que fue grabado como un "Número Positivo".

2. Convención de Polaridad SEG para Fuentes de Energía Impulsiva

La SEG en 1975 recomendó el Estandard de Polaridad para Fuentes Impulsivas indicado por:

"Los primeros arribos de refracción (first breaks), correspondientes a una interface de índice de reflexión positivo, deben ser grabados como Números Negativos".

Resulta fácil determinar con explosivos si los primeros arribos generan números negativos o positivos.
Si bien esta norma fue originalmente recomendada para sísmica marina utilizando Hidrófonos de Presión, luego lo universalizó para Geófonos con explosivos.

Los primeros arribos (refraction first arrives) lo generan la onda sísmica refractada que mueve a la superficie del terreno y a los geófonos de "abajo hacia arriba" (upward case motion), los geófonos convierten en voltajes

eléctricos análogos a la velocidad de ese movimiento y ese voltaje finalmente debe ser grabado con Números Negativos en el medio de grabación utilizado.

Para realizar un test de polaridad sin una adquisición sísmica, podríamos golpear directamente a los geófonos del terreno, pero es mucho más práctico golpearlos de "arriba hacia abajo" (downward case motion), y como este movimiento es opuesto al de los "first breaks", este test debe ser grabado con números positivos tal como lo vimos en la Figura 2.



Figura 3, Respuesta impulsiva generada por un Geófono durante un "Tap on the Top Test" [3]

3. Convención de Polaridad SEG para Fuentes Vibracionales

En 1993 la SEG finalmente extendió las recomendaciones de polaridad para Vibroseis, pero hasta entonces existía una anarquía en la interpretación de que parámetros emplear, ya que se trataba de correlar los datos sísmicos recepcionados con un operador sinusoidal y había 360 grados que podían ser elegidos. Recién la SEG se animó a recomendar una polaridad, cuando los vibradores empezaron a emplear la "Weighted Sum" (WS) para el control de la Fase del Barrido Emitido.

La WS es teóricamente igual en magnitud a la Fuerza de Reacción del Terreno o "Ground Force" (FG), pero de sentido inverso.

$$(I) \quad WS = -FG = Accrm * Weight\ Mass + Accbp * Weight\ Plate$$

Donde:

Accrm: Reaction Mass acceleration during a sweep.
Accbp: Baseplate acceleration during a sweep.

El procedimiento para polarizar los vibradores según SEG, consiste de varios pasos y estos son:

3.1 Weighted-sum Polarization.
3.2 Pilot of Correlation Polarization

3.1 Polaridad de la Weighted-Sum (WS)

Como hemos visto en capítulos anteriores, la WS es la suma de los Acelerómetros de Masa y de Plancha multiplicados por sus pesos. Esta señal se encuentra accessible en todos los vibradores para ser utilizadas en estas pruebas y podemos llevarlas hasta un conector del Cable de Similaridad (Take-out), colocando esta señal en lugar del geófono que ocupaba dicho conector. Luego deberemos polarizar la WS sobre el conector para que los "tap on the top test" sobre cada Acelerómetro (plancha y Masa) nos generen igual respuesta que el geófono, es decir: se graben como Números Positivos".

NOTA: Algunos Vibradores presentan una WS filtrada en su conector de salida, pero también existe instrumental (como el Pelton DSS) que toman la señal de ambos Acelerómetros sin filtrar y los suman para obtener una WS sin filtrar.

La respuesta de cada Acelerómetro al "tap on the top test", tal como se observa en la ecuación (I), es medida por la WS (un Acelerómetro es golpeado y el otro permanece en reposo).
Se trata entonces de dos tests que ocupan dos registros grabados distintos y que luego deben ser reproducidos para conocer su polaridad.

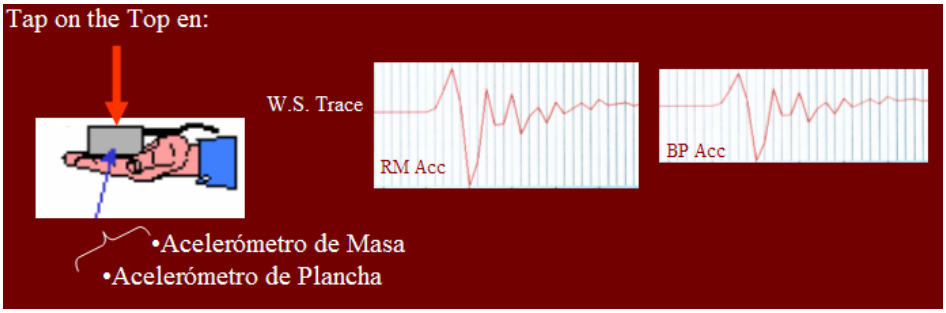


Figura 4: Respuesta Impulsiva de los Acelerómetros ante los "tap on the top test" [3]

La Figura 4 muestra la reproducción de cada registro donde la traza de la WS deflexiona "hacia arriba" (idem geófono).

Esta comprobación solo es necesaria practicarla con un solo Vibrador, ya que la "Hardwire Similarity" extenderá las evaluaciones de las WS de todos los vibradores conectados.

3.2 Polaridad del Operador de Correlación = Pilot Sweep

Una vez completado los pasos anteriores y permaneciendo la señal de WS conectada al cable de registración, procedemos a ejecutar y grabar un Barrido Sísmico.

NOTA: Debemos asegurarnos que tanto la WS como la señal "Operador de Correlación" (True Reference o Piloto de Correlación) tengan los mismos filtros. También deberemos asegurarnos que la señal VCE Reference Phase = 0 grados en el vibrador.

La recomendación de la SEG dice: "Polarizar el Operador de Correlación para ponerlo en fase con la "Weighted-Sum" (WS) durante el barrido.

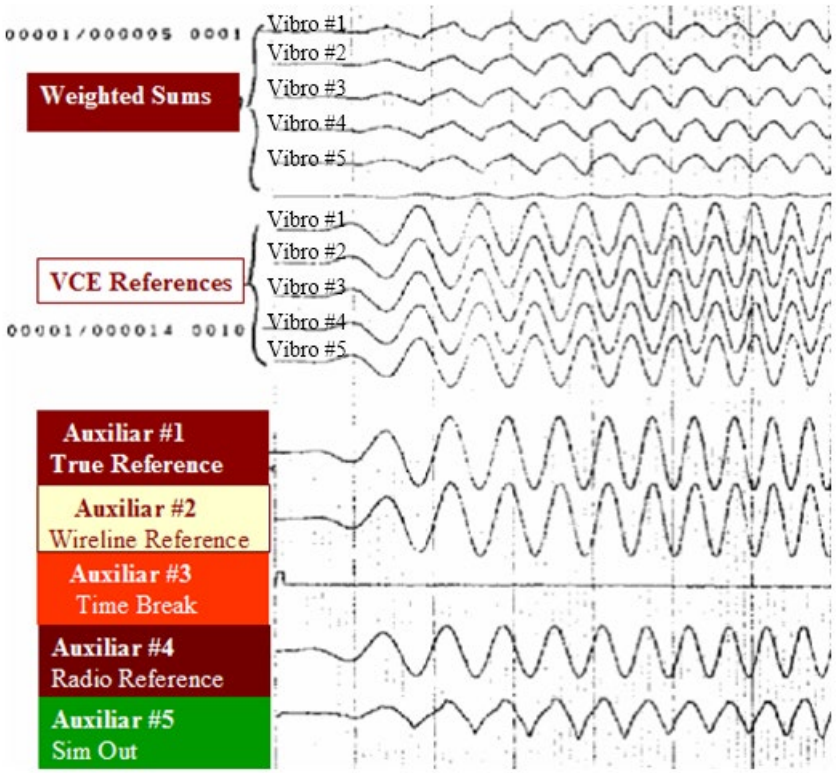


Figura 5, Prueba de similaridad por cable (hardwire similarity) [3]

La figura 5 corresponde a una prueba de Similaridad por Cable que permite extender el test de polaridad a todos los vibradores.
El canal Auxiliar #1 corresponde al Operador de Correlación (o True Reference) y este se encuentra en fase con las WS de los 5 Vibradores.
Pero cuando mejoramos la precisión de medida, ayudados por técnicas de procesamiento, vemos que en realidad las WSs se encuentran en fase con el Auxiliar #2 (Wireline Reference), ya que las salidas de las WSs de los Vibradores están filtradas de armónicas en el Vibrador y debimos aplicar en la unidad Encoder del Sismógrafo el mismo filtro para compararlas.
En cambio si las WSs hubiesen sido obtenidas del DSS (instrumental de Pelton auxiliar), allí no habría fitro aplicado a las WSs y podrían ser comparadas con el Auxiliar #1.

Para poner en fase el Auxiliar #1 o Auxiliar #2 con las WSs, deberemos modificar el parámetro "ESG Phase" (en las VibPro Pelton), donde seleccionaremos 0 o 180 grados según lo determine el test.

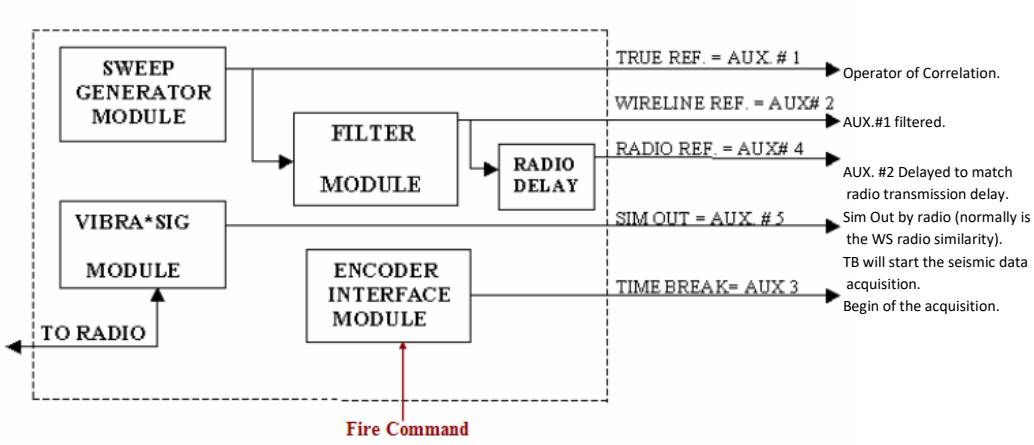


Figure 6: Señales de salidas de la unidad Encoder Pelton del Equiipo de Adquisición [4]

La Figura 6 es un esquema de las salidas del Encoder del VibPro Pelton (ESG), donde vemos que el Auxiliar #2 es la señal "True Reference" filtrada con el mismo filtro que poseen las salidas de similaridad de las WSs, por supuesto que el Auxiliar #1 es el que se utiliza en el proceso de correlado del dato sísmico.
El Canal Auxiliar #4 "Radio Reference", también proviene de la "True Reference" pero además de ser filrtrado (ídem Auxiliar #2) pasa por un "delay" para poder compararse con la señal de similaridad radial emitida por el Vibrador (Auxiliar #5) para su QC.

Operando con los DSS (Distributed Similarity System)

En el caso de emplear la caja Auxiliar DSS (Distributed Similarity System), una por cada vibrador, esta se conecta con las señales de los Acelerómetros de los vibradores internamente al control electrónico (VCE), que no tienen ningún filtro de armónicas aplicado, esta unidad calcula la WS con la suma pesada de los acelerómetros y a su vez se conecta vía cable, con el Equipo de Adquisición donde se graban tanto la WS como los acelerómetros individuales y la "VCE Reference". Posteriormente un programa como el Testif-i los procesa y genera la Figura 7.

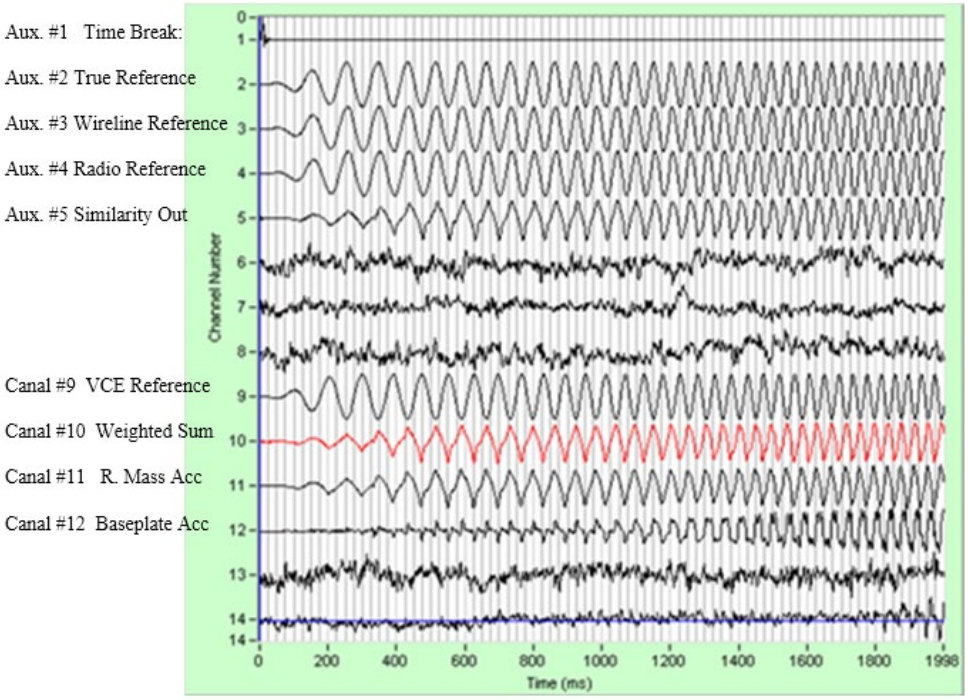


Figura 7, procesamiento del Testif-i de la similaridad utilizando el DSS [3]

En la Figura 7, el Canal #10 contiene a la WS y su fase debe ser comparada con el Canal Auxiliar #2 (True Reference = Señal Piloto de correlación).

4. Additional checking: Pulse Vibrator Test

La mayoría de los Controladores Electrónicos de los Vibradores, poseen una función de test denominada PULSE, que permite también probar la polaridad del Vibrador En la ejecución de este test, el Vibrador realiza una reacción impulsiva donde la Masa de Reacción se mueve "hacia arriba" y la Plancha "hacia abajo". En el ejemplo elegido el Pulso se revierte a los 500 ms del anterior.

Conectando la Caja DSS de Pelton entre el Vibrator y el Equipo de Adquisición, podemos hacer el siguiente análisis:

1. Pilot Sweep: salida de la señal Piloto de Correlación del Encoder del Sismógrafo
2. Weighted Sum (WS): Salida de la señal Weighted Sum del Vibrador.
3. Baseplate Accelerometer: Salida de la señal de Acelerómetro de Plancha del Vibrador.
4. Baseplate Velocity Geophone: Salida de un Geófono Externo colocado sobre la Plancha.
5. Reaction Mass Accelerometer: Salida del Acelerómetro de Masa del Vibrador.

6. Weighted Sum (WS): Señal calculada mediante la suma de las señales (3) y (5).

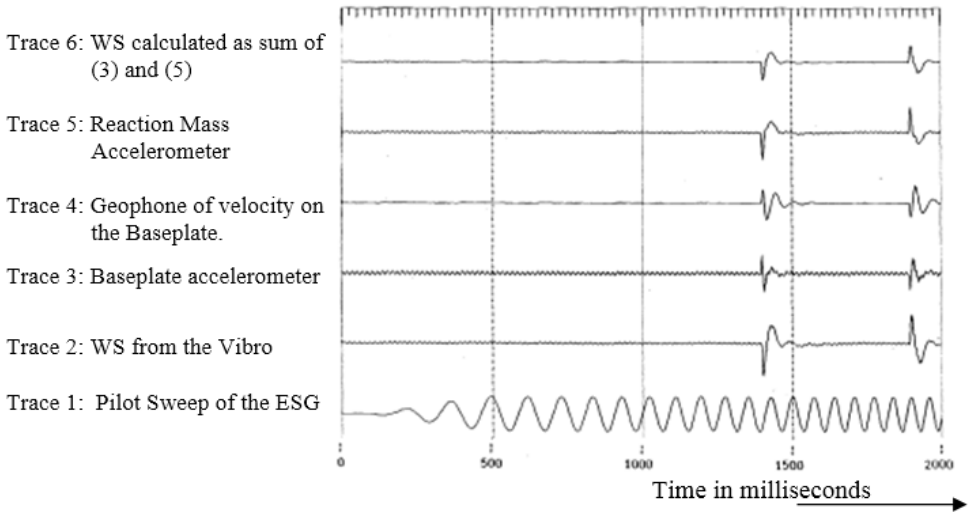


Figure 8: Screen obtained from a Pulse test [2]

La Figura 8 nos indica que:

- Trace 3: La Plancha (Baseplate) se mueve "hacia abajo" (downward), coincidiendo con un "tap on the top" test equivalente en el geófono, grabándose como un número positivo y la traza flexionando "hacia arriba".

- Trace 4: Como el Geófono esta acoplado al Baseplate (Plancha), posee la misma polaridad que el Acelerómetro de Plancha (Baseplate).

- Trace 5: La Masa de Reacción se mueve "hacia arriba" (upward), entonces el movimiento es inverso al de "tap on the top" test, se graba como un número negativo y la traza deflexiona "hacia abajo".

- La "Weighted Sums" (WS), es la suma de los acelerómetros (3) and (5) y la traza muestra una deflexión "hacia abajo" debido a que la aceleración del acelerómetro de Masa es multiplicado por un peso mayor que el de Plancha.

Bibliografía consultada:

1. *SEG Technical Standards Committee, Polarity Recommendations (Thigpen et al, 1975).*
2. *Report to the SEG Technical Standards Committee Regarding Polarity Convention for Vibratory Source/Recording* Systems by Robert A. Brook, Ralph A. Landrum, and John J. Sallas *(May 4, 1993).*
3. *Test de Polaridad realizados en Argentina.*

CAPÍTULO 13: COMPARACIÓN DE FUENTES DE ENERGÍAS SÍSMICAS

Dinamita vs Vibros Pesados vs Minivibros ([1])

CREWES Research Report — Volume 20 (2008)

El "CREWES Project" fue realizado en el 2008 en Spring Coulee, Alberta-Canada, donde se adquirieron tres 2D 3-C líneas sísmicas con diferentes fuentes de energía (IVI-mini vibroseis de 18000 lb, Vibroseis de 52000 lb y Explosivos).
Se compararon 54 posiciones registradas con los tres tipos de fuentes:

- (DYN): SP con 2 Kg de explosivo a 15 metros de profundidad.
- (HV): VP con 4 barridos de 12s con 2 Vibradores de 48000lb (4 – 130 Hz).
- (MV): VP con 4 barridos de 11s con 1 IVI mini Vibroseis (10 - 200 Hz).

Los datos fueron adquiridos con un ARAM System y con geófonos SM7 10 Hz 3-C. Las estaciones receptoras fueron colocadas cada 10 metros las fuentes cada 30 metros. La cantidad de trazas registradas fue de 652.

(1) Los Minivibros poseen una estructura mucho más pequeña que los normales o pesados, con lo cual son mucho más "enviroment friendly" (similar a los golpeadores). Por ejemplo los INOVA UniVib PLS-236, pesan 27,500 lb (casi la mitad que los grandes) y fueron aceptados en Colombia para trabajar en áreas sensibles donde no se permitía el trabajo con vibradores pesados.



(a) (b)

Figura 1, (a) Vibroseis Mertz M26HD/623 (Holdown 60000 lb); (b) Univib PLS-236 (Holdown 25000 lb)

Comparación a nivel de registro individual (raw shot gathers)

- La experiencia muestra que las amplitudes de los registros RAWs son más consistentes con vibros pesados (HV) que con dinamita (DYN), posiblemente debido a los diferentes medios (arcilla, arenas, areniscas, arcilla) donde se ha cargado el explosivo.

- Los registros con minivibros (MV) muestran menor amplitud en las reflexiones y mucho mayor ruido aleatorio con respecto a las otras dos fuentes, aunque hasta 1,5 segundos la señal aparece claramente.

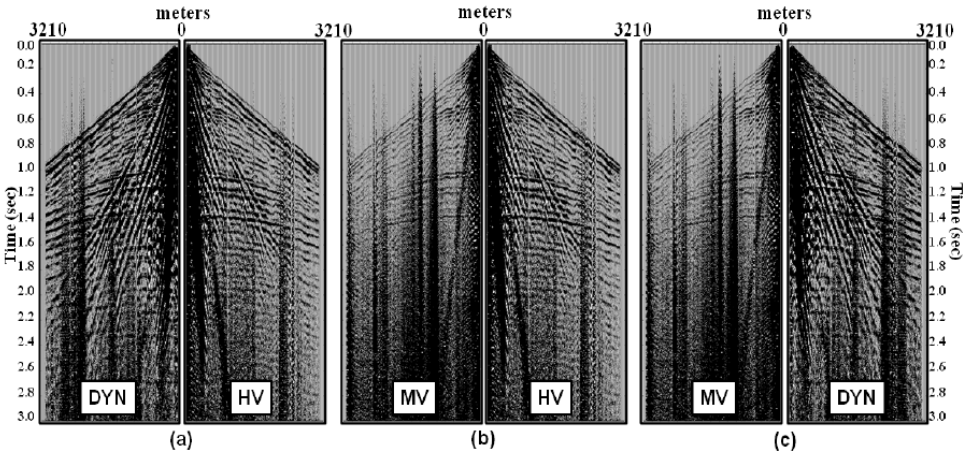


Figura 2, comparación de registros RAW: (a) Dinamita vs. Vibros pesados; (b) Minivibradores vs. Vibros Pesados; (c) Minivibradores vs. Dinamita [1]

Comparación a nivel de Stack no migrado (unmigrated stacked sections)

- En la parte más superficial del apilado (0 – 0,5 seg.), se observa una ligera mejor continuidad y fuerza de los eventos con mini-vibros que con las otras dos fuentes.

- Entre 0,6 – 0,8 seg. los eventos se ven mejor resueltos para vibradores pesados y los mini-vibros superan a la dinamita.

- Entre 0,8 – 1 segundos los eventos con mayor resolución y con mayor continuidad lateral se presentan con dinamita. Los eventos con mini vibradores aparecen con menor amplitud o desaparecen a esta profundidad.

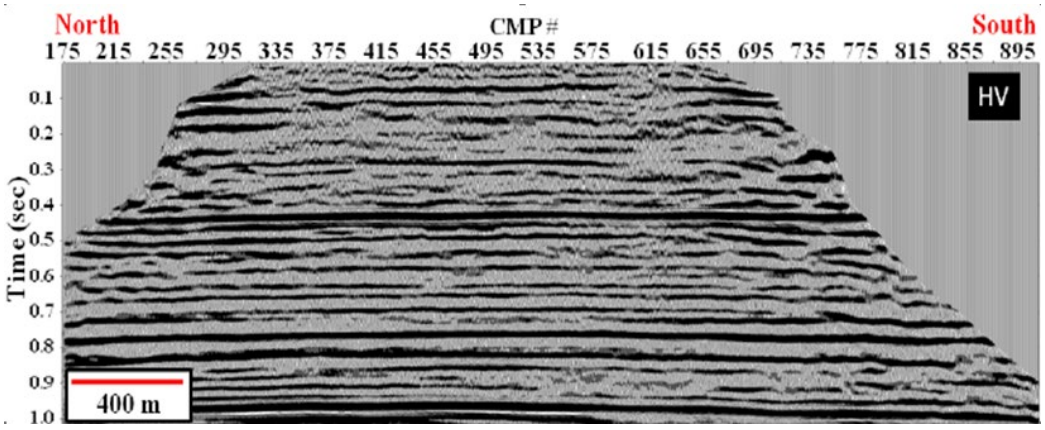


Figura 2, Stacking de Línea vibrada con Vibros Pesados [1]

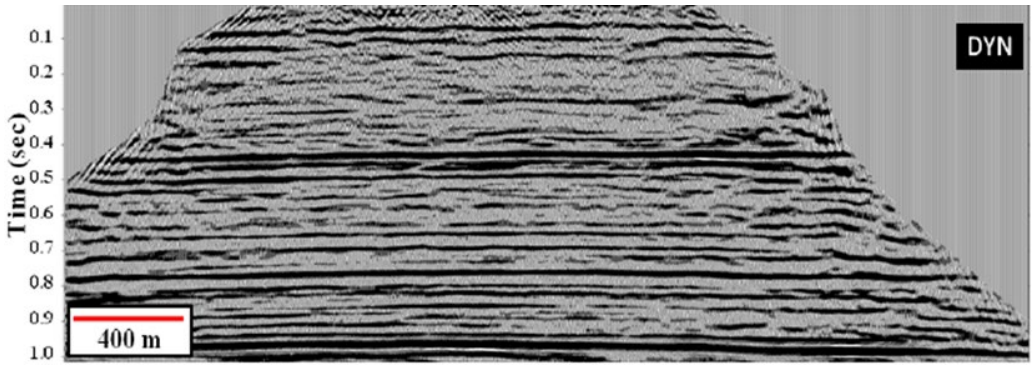


Figura 3, Stacking de Línea Registrada con Explosivos [1]

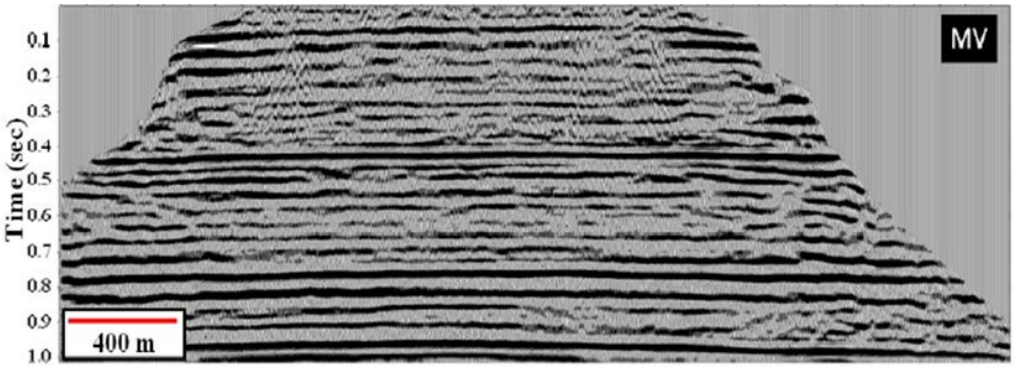


Figura 4, Stacking de Línea vibrada con Mini-Vibros [1]

El espectro de amplitud correspondiente a las tres fuentes (average Fourier amplitude spectrums) fue procesado para una misma ventana de tiempos correspondiente al área de interés. En la figura 10 se observa que hasta los 50 Hz las tres curvas son similares aunque en el rango de 0-20 la amplitud es menor para los mini vibros.

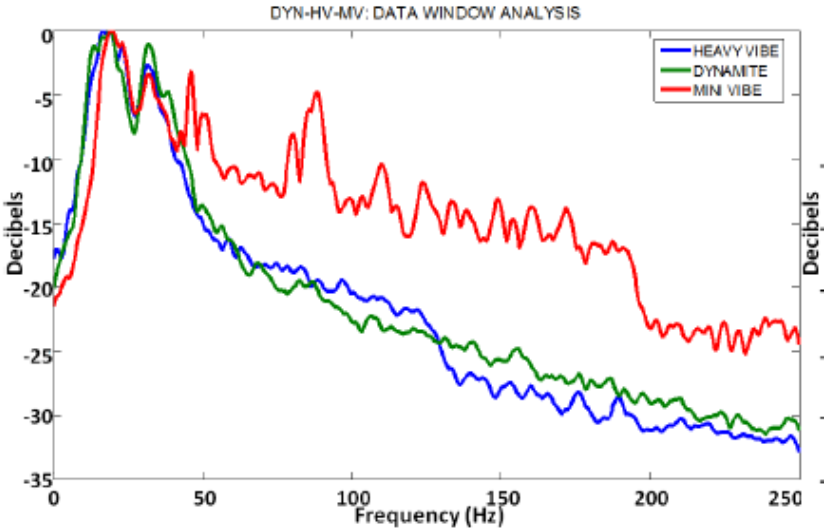


Figura 5, espectro de amplitud en una ventana de 0,5-1.5 s en registros RAWs [1]

Para frecuencias mayores a 50 Hz la amplitud de los mini vibradores es mucho mayor que para las otras dos fuentes debido a ruidos de alta frecuencia (especialmente ondas Rayleigh).

Conclusiones de los autores de los ensayos:

- Mini vibradores: los datos indican una penetración máxima de 1,5 s y con baja resolución. En general los mini vibradores generan imágenes aceptables del subsuelo cuando estas corresponden a horizontes someros. Agregan: los mini vibradores no son eficientes para la generación de ondas S.

Nota: de acuerdo a los datos aportados por los autores, la energía seleccionada y provista por los mini vibradores ha sido bastante menor que la de los vibradores pesados, con lo cual las comparaciones subestiman las posibilidades de los mini vibradores.

- Las secciones finales con dinamita y vibros pesados son similares en carácter y en resolución. A nivel de "shot" tanto en contenido de frecuencias como en amplitud, los datos con dinamita son mejores que los vibradores pesados. Es de observar que la calidad de los registros individuales con dinamita son variables y dependientes de las condiciones del "wheathering". En general, considerando la calidad del dato sísmico, la dinamita y los vibros pesados son comparables, por lo tanto el criterio para seleccionar alguna de estas dos fuentes debe ser el económico y/o el de HSE.

Dinamita vs Vibros Pesados vs Golpeador Digipulse

Línea de prueba en el Bloque Junín de la faja petrolífera Orinoco. Alberto David Acuña Britos Venezuela, 2008 ([2])

Una línea de prueba 2D fue adquirida con tres fuentes de energía diferentes: Explosivos, Vibradores y un Golpeador Digipulse.

Se compararon 360 registros (120 de cada fuente), de un tendido "split spread" de 120 canales con 25 metros de separación entre estacas receptoras y también 25 metros de separación entre estacas fuentes (fold: 60) en "stack array".

- 120 registros con 1 Kg de explosivo a 12 metros de profundidad.
- 120 registros con 6 barridos de 12 s con 1 Vibrador (no especifica fuerza). El barrido de 10 a 140 Hz fue logarítmico de 3dB/Octava.
- 120 registros con Digipulse: 10 impactos apilados por emisor.

El autor pudo realizar las comparaciones entre explosivo y Digipulse a nivel registro pero no las pudo comparar con los datos adquiridos con vibradores al desconocer el factor de escala que aplica el proceso de correlación. Las trazas leídas para el proceso correspondieron a una ventana libre de ruidos (libre de ground roll y aérea).

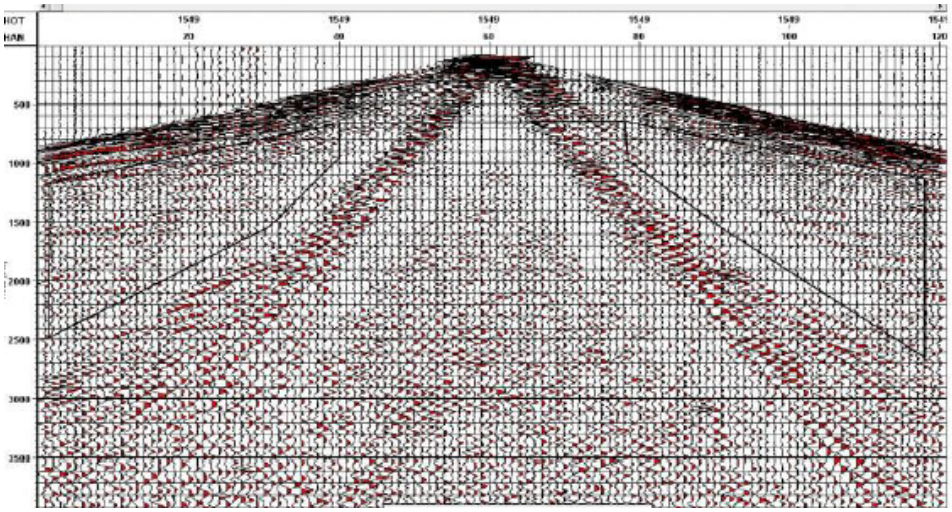


Figura 6, RAW record donde se indica la ventana donde se leyeron trazas [2].

Se obtuvieron los valores RMS de las trazas correspondientes a 4 Shot Points de cada fuente (Digipulse y Explosivos), sobre la ventana marcada en la figura 11, obteniéndose la amplitud de las mismas mostradas en la figura 12.

- Las trazas que fueron adquiridas con explosivos en general poseen un valor RMS 16 dB superior a iguales trazas e igual punto de disparo obtenidas con diez impactos sumados del Digipulse. Aquí también se observa una variedad en la calidad de los registros individuales con

explosivos, dependiente de las condiciones del "wheathering" y del acople explosivo-terreno.

- Con Digipulse las amplitudes RAW son más consistentes, registro a registro, que con explosivos.

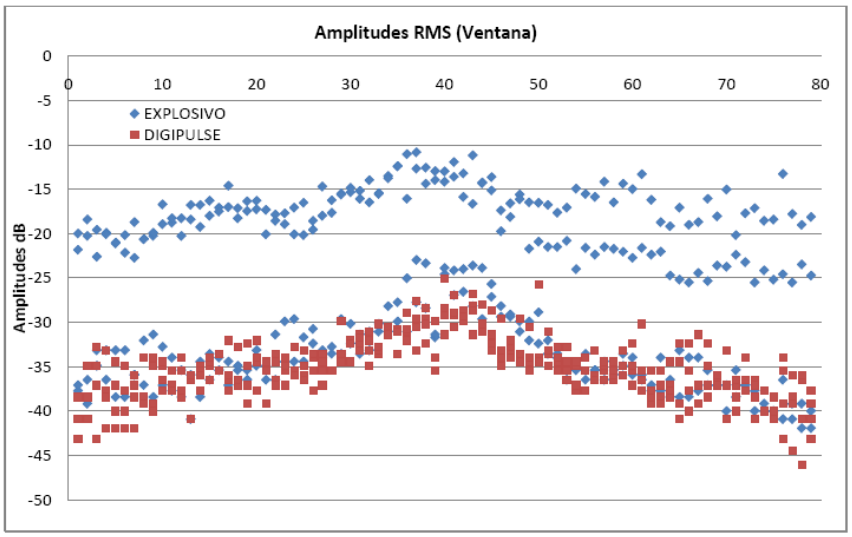


Figura 7, valores RMS de las trazas correspondientes a 4 puntos emisores [2]

Luego las tres líneas obtenidas con las tres diferentes fuentes de energía, fueron procesadas hasta obtener secciones finales migradas. De estas secciones los autores tomaron ventanas, que contienen las reflexiones consideradas como objetivo, y obtuvieron los espectros de amplitud correspondientes a las tres fuentes.

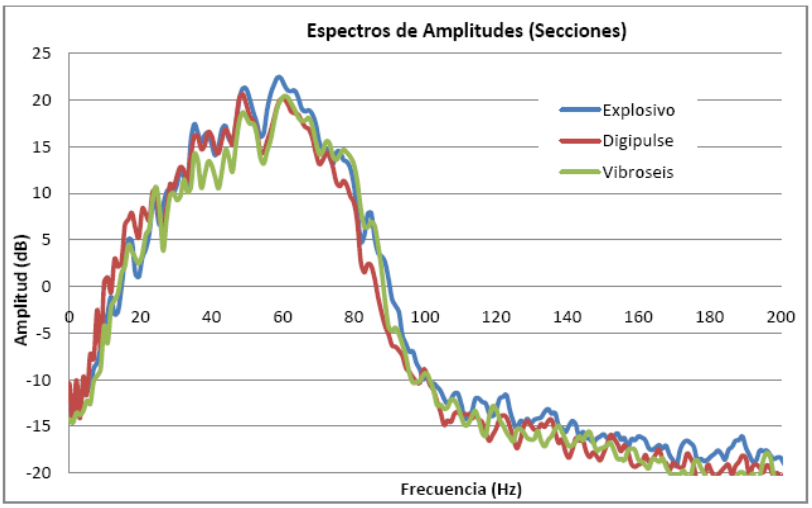
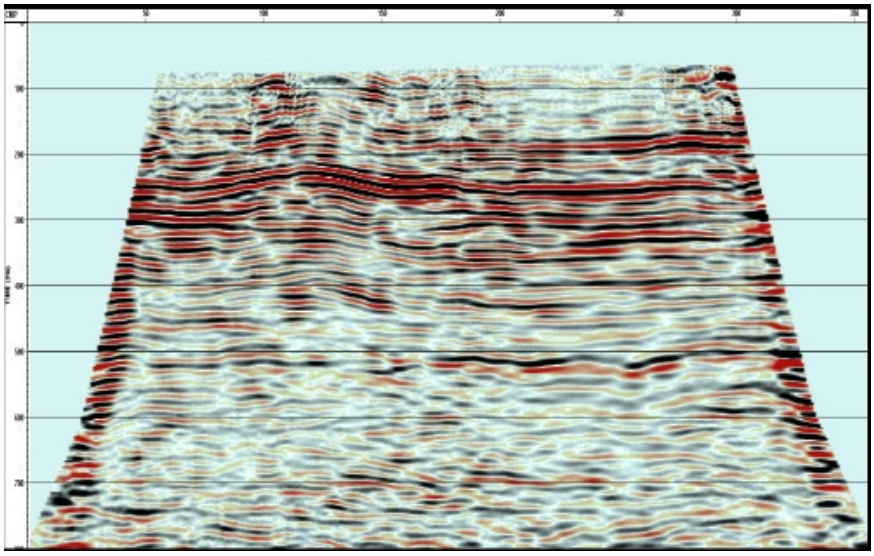


Figura 8, espectro de amplitud de las secciones migradas [2]

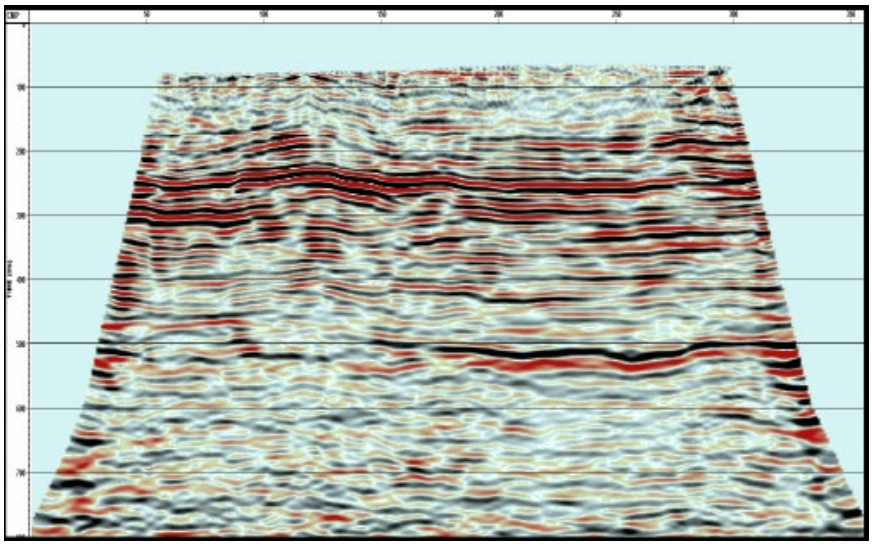
Existen pequeñas diferencias entre los espectros, al finalizar el procesamiento de los datos: el Digipulse genera ligeramente mejores respuestas en las frecuencias más bajas; el explosivo es ligeramente superior para frecuencias medias y altas.

NOTA: considero que durante el procesamiento de los datos, las respuestas naturales de las fuentes fueron modificadas, y las comparaciones obtenidas pueden ser discutidas.

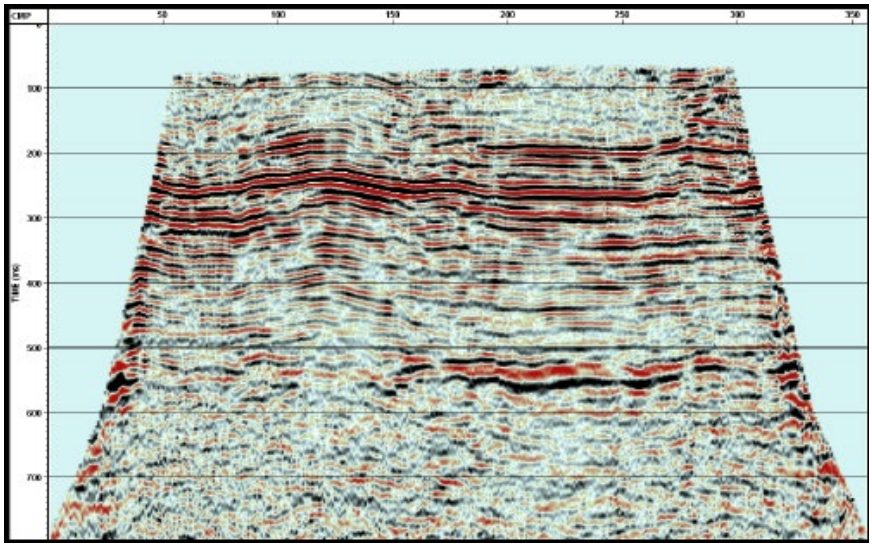
En la figura 9 se muestran las secciones migradas.



(a) Sección migrada con explosivos [2]



(b) Sección migrada con Digipulse [2]



(c) Sección migrada con vibroseis [2[

Figura 9, secciones migradas: (a) Explosivos, (b) Digipulse, (c) Vibroseis

Conclusiones:

Observando las secciones anteriores, consideran que la mejor respuesta se obtiene con explosivos pero que las diferencias con las otras dos fuentes no son tan importantes como para decidir su empleo. Por lo tanto y para definir estos horizontes someros, el factor costo (punto 4) e impacto ambiental (punto 5) llevaría a seleccionar el empleo del Digipulse, con una previa evaluación de fuerza del impacto y cantidad de sumas de impactos.
Finalmente el proyecto se realizó con explosivos porque resulta muy difícil asumir riesgos en la adquisición sísmica.

Mini Vibros vs. OnSeis

Source and receiver comparisons from Priddis and Hussar. Malcolm B. Bertram, J. Helen Isaac, Kevin W. Hall, Kevin L. Bertram and Gary F. Margrave. University of Calgary ([3])

En el invierno canadiense en Priddis (cercanías de Calgary), la Universidad de Calgary realizó una comparación de Fuentes de energía empleando mini-vibros y golpeadores electromagnéticos Onseis.



EnviroVibe (IVI Inc.) *OnSeis (Yeniseigeofizika OJSC)*

Figura 10, mini-vibroseis y dual Onseis operand en el proyecto Priddis [3]

Una línea 2D fue adquirida con estaciones receptoras cada 2,5 metros (un geófono SM-24 por estación) y estaciones emisoras (VP/SP) cada 10 metros. El registrador utilizado fue un Aram/Aries.
Los parámetros de las Fuentes utilizados fueron los siguientes:

EnviroVibe	**OnSeis**
Hold down: 15000 lb	Dual electro-magnetic impact units
Sweep per VP: 4	Impacts per shot point: 16
Sweep Length: 20 s	
Sweep Linear: 10-200 Hz	

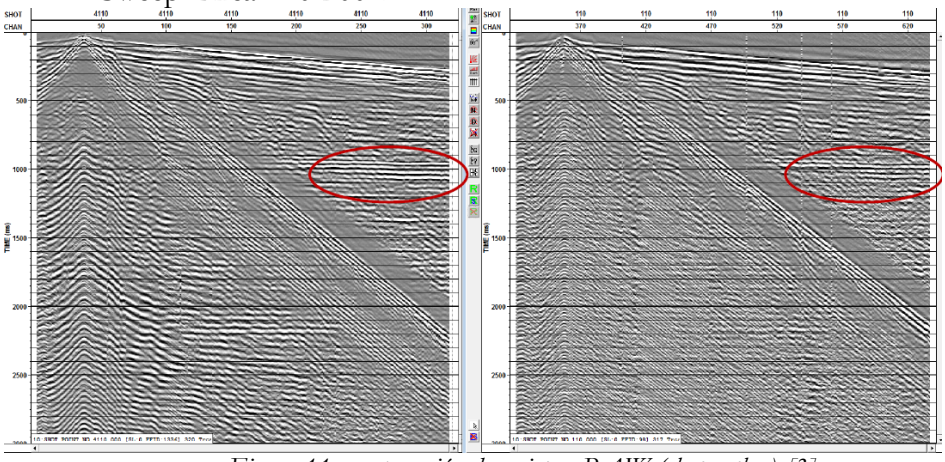


Figura 11, comparación de registros RAW (shot gather) [3]

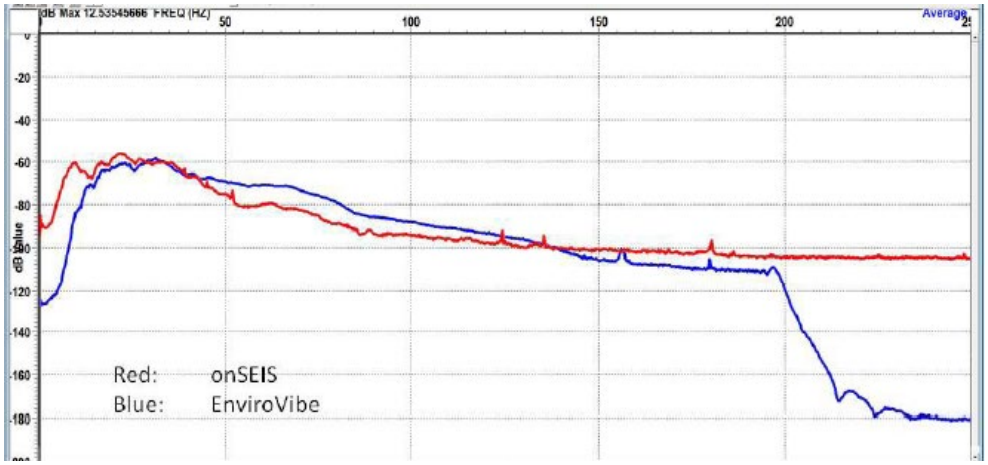


Figura 12, espectro de los registros RAW (shot gathers spectrums) [3]

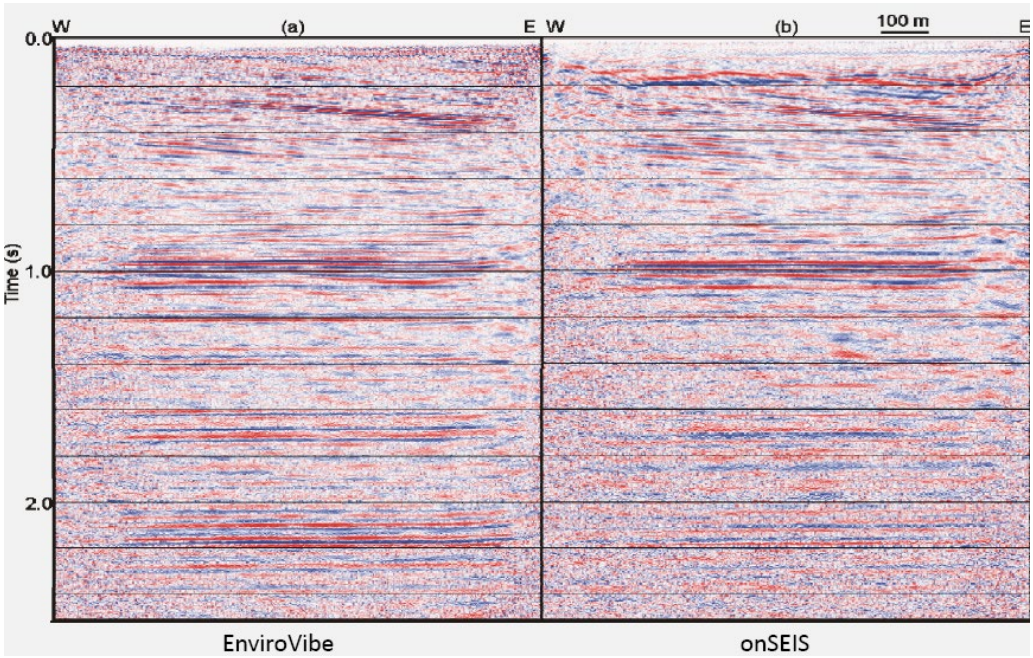


Figura 13, secciones sumadas sin filtrado [3]

Conclusiones:

- Los autores concluyen que los datos obtenidos son aceptables para las dos fuentes hasta los 2 segundos, aunque las secciones sumadas muestran mejores resultados con OnSeis que con mini-vibro para los horizontes más someros y para horizontes más profundos prevalece el mini-vibro sobre el OnSeis.
- El espectro del registro RAW muestra el aporte en bajas frecuencias del OnSeis aunque el mini-vibro genera más amplitud entre 40 y 130 Hz.
- El ciclo de tiempo en ambas operaciones (cycle time) es prácticamente idéntico, aunque considero que eligieron los parámetros para que esto así sucediera.
  Para un "listen time" de 4s y un retardo entre barridos/impactos de 2s:
  - EnviroVibe cycle time: 4 sweep $_x$ (20s + 4s + 2) = 104s
  - OnSeis cycle time: 16 impact $_x$ (4s + 2s)= 96s

3.4: Explosivos vs. Vibradores vs. OnSeis

The sinchronized electromagnetic impulsive source. Bill Pramik and Lee Bell, Geokinetics. Leading Edge October 2011 ([4])

La empresa Geokinetics ha desarrollado el OnSeis, fuente impulsiva electromagnética ([5]), bajo licencia de la Empresa Rusa: **"**Geotechnocenter Branch Yeniseigeofizika OJSC", quien le provee del Sistema Actuador (modelo Yenisey Kem-1). Aquí Geokinectis presenta las pruebas realizadas para comparar esta fuente con los explosivos y vibroseis.

Comparación 3.4.1: Surat Basin

Aquí comparan una sísmica 2D adquirida con explosivos en 1983 con explosivos y con proceso final (no proporcionan parámetros), contra dos adquisiciones posteriores: una empleando un vibroseis de 60000 lb con una fuerza del 50% (30000 lb) y una segunda empleando dos unidades OnSeis simultáneamente con 4 impactos sumados.

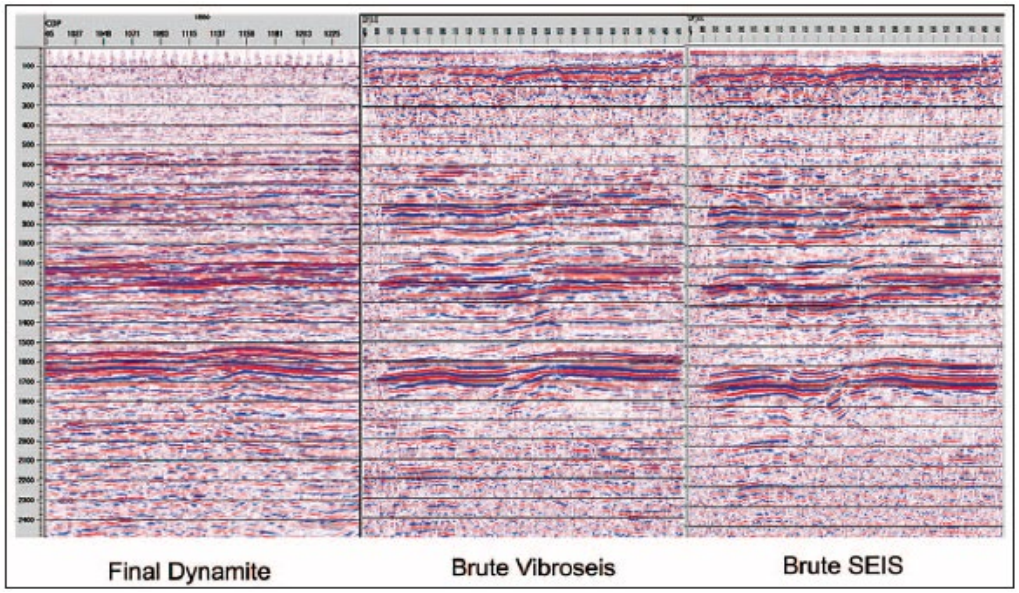


Figura14, comparación de adquisiciones sísmicas: explosivos, vibroseis y On-seis [4]

En la figura 14 se observa que la penetración de la adquisición con OnSeis es comparable con la de las otras dos fuentes.

Comparación 3.4.2. Houston, Texas – USA en 2008

Aquí el resultado fue que: que dos unidades duales OnSeis (total 4 unidades), produjeron el mismo nivel de energía que un vibrador de 60,000-lb con un barrido de 8 – 128 Hz de 80-s de duración.

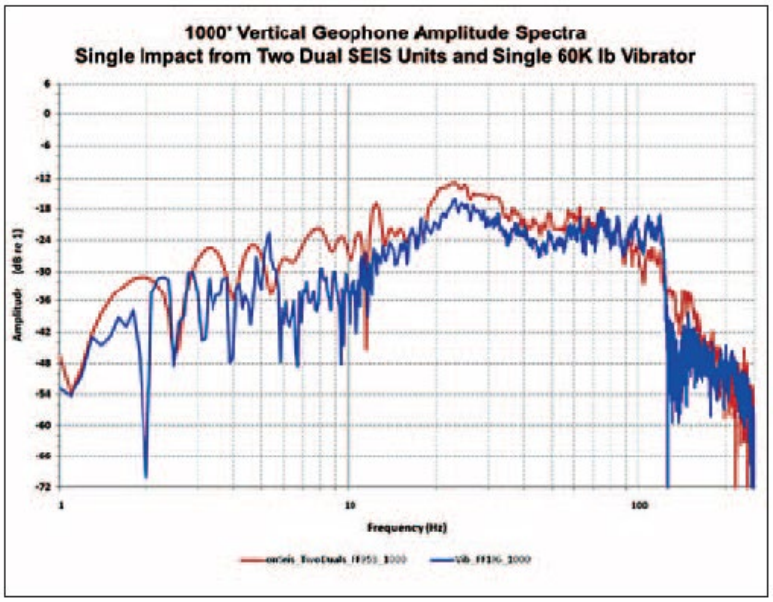


Figura 15, Espectro de Amplitud Absoluta de un geófono vertical ubicado a 1000 pies de profundidad para un simple impacto de dos Dual OnSeis units (red) and un simple Vibrador de 60,000 lbs (blue) [4]

La Figura 15 muestra el espectro de potencia de la señal sísmica recibida por un geófono colocado a 330 metros de profundidad sobre la línea sísmica donde se realizó el ensayo mencionado. En rojo aparece el espectro de potencia del Dual OnSeis y en azul el del vibrador, ambos espectros muestran similares niveles de amplitudes, aunque puede apreciarse una mayor contribución de bajas frecuencias con OnSeis, en donde el vibrador todavía puede vibrar y por supuesto más allá donde el vibrador no puede llegar a tan bajas frecuencias.

Si bien se trató de un objetivo muy somero, para ese nivel de imagen el ahorro de tiempo ha sido mayúsculo: 5 segundos contra 85 segundos de tiempo de adquisición.

Comparación 3.4.3.: Surat Basin Queensland, August 2010

Aquí se compara la adquisición de una línea 2D con minivibros y con Onseis.

Se emplearon dos mini vibros (no indican fuerza) barriendo de 10 a 120 Hz en 6 segundos y una fuente dual OnSeis sumando cuatro impactos (4 pops) en cada estaca.

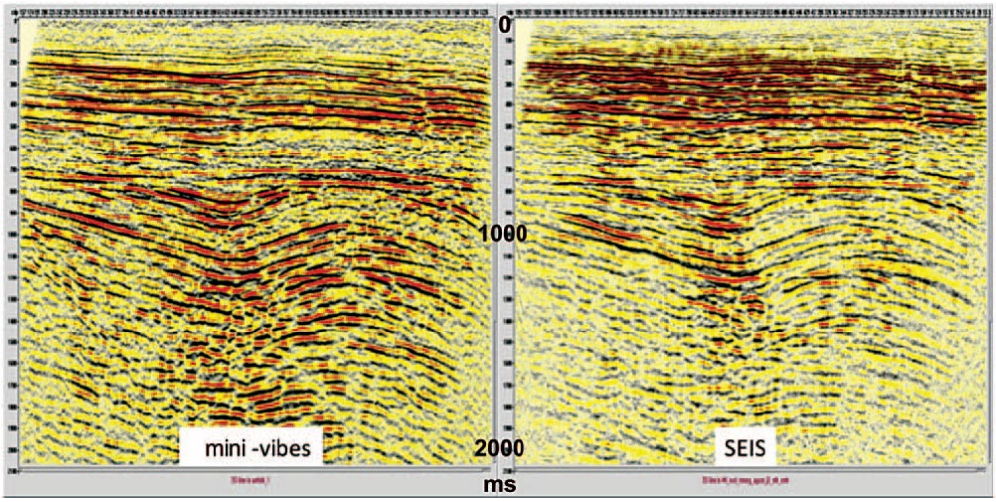


Figura 16, comparación de secciones obtenidas con mini-vibros y On-seis [4]

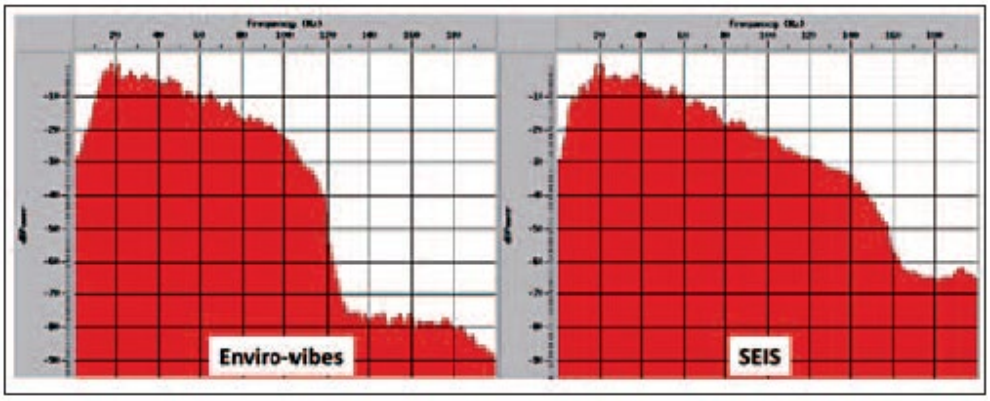


Figura 17, comparación de espectros entre mini-vibros y onseis [4]

Las secciones con mini-vibros y Onseis de la figura 17, muestran buena penetración para el horizonte de interés (700 ms) para ambas fuentes. Se observa mejor penetración en los min vibros para profundidades mayores.

En la figura 18 los espectros indican una mayor extensión del mismo para los OnSeis, tanto en baja como en alta ya que los mini vibros tienen la banda limitada a 10-120 Hz.

4 Conclusiones finales

Considerando las experiencias anteriores y mi propia práctica en la materia, me atrevo a escribir las siguientes conclusiones:

4.1 Penetración

El explosivo es la fuente de energía de mayor penetración en el terreno a prospectar; en general su espectro de amplitud supera a las demás fuentes impulsivas a igual ancho de banda.

La calidad de los registros individuales se conservan mucho más con vibradores y golpeadores que con explosivos ya que con este último, suele ser muy variable debido al acople de la carga al terreno y a las diferentes características elásticas del Wheathering.

Para horizontes someros, los mini vibradores y golpeadores generan datos de similar calidad a los obtenidos con explosivos y vibradores pesados, pero son mucho más económicos y menos agresivos al medio ambiente.

4.2 Ancho de banda

Las fuentes impulsivas emiten el mayor ancho de banda posible, extendiendo el ancho de banda, con respecto a las vibracionales, una octava o más por su aporte de bajas frecuencias. Con fuentes impulsivas sería útil emplear acelerómetros como receptores para extender las componentes de la onda sísmica hasta frecuencias cercanas a DC, ya que los geófonos de 10 Hz de frecuencia de resonancia, atenúan las bajas frecuencias (12 dB/octava).

Las fuentes impulsivas electromagnéticas permiten sumar unidades y barridos sin perder ancho de banda por su gran precisión en el inicio de los impactos.

Para frecuencias superiores a 120 Hz, las fuentes impulsivas siguen siendo las más confiables de emplear.

4.3 Relación señal/ruido

El explosivo sigue siendo el que mejor relación señal/ruido produce. Tanto en vibradores, mini vibradores y golpeadores, tal relación depende de la cantidad de unidades empleadas y/o de la cantidad de sumas de eventos que son necesarias para mejorarla.

4.4 Posibilidades y costos

Como vimos, en general el costo de una operación con explosivos es mayor que utilizando otras fuentes de energía, aunque muchas veces la rapidez con que los datos son adquiridos (posteriores a la carga del explosivo), hacen que la operación con explosivos sea económicamente rentable.

Recordemos que con vibradores y mini vibradores, necesitamos barrer un tiempo adicional al "listen time" y a su vez sumar eventos, lo que genera tiempos de adquisición mucho mayores que con explosivos.

Los vibradores pesados continúan siendo la fuente de energía preferida para operar sobre superficies planas y desérticas, donde la rapidez en la adquisición, por falta de obstáculos y/o procedimientos de adquisiciones simultáneas (slip sweeps, HFVS, etc.) los convierte en imprescindibles.

Con golpeadores nos ahorramos el tiempo de barrido (sweep lenght) y si pudiésemos disponer de varias unidades, también nos ahorraríamos las sumas de eventos.

4.5 Seguridad y medio ambiente

Es evidente que operar con explosivos es la que mayor riesgo involucra en toda su etapa de utilización: traslados, depósitos, manipulación detonación. Actualmente es muy difícil operar en áreas urbanas o sensibles (respecto a estructuras o napas freáticas u oleoductos, pozos, etc.). Existen condiciones donde otra fuente de energía que no sea explosivo no puede ser empleada: horizontes sísmicos profundos y de poco espesor, superficies montañosas y/o terrenos escarpados, bosques frondosos, etc., donde deberá ser utilizado eligiendo el procedimiento más seguro para evitar accidentes y daños ambientales. Si se pudiera prescindir del "tiempo de pozo" (uphole time), el sistema "Cut to Fit" permitiría una operación muy segura en la operación con explosivos, mucho más que utilizando Detonadores Electrónicos (ver "cut to fit" en ([6])).

Los mini vibros permiten operar en zonas donde los vibradores pesados no son permitidos.

No cabe duda que los golpeadores electromagnéticos son los que menor impacto ambiental generan, ya que se mueven sobre móviles pequeños (Morooka rubber tracked crawler), cuyas orugas de goma producen muy poca presión sobre la superficie y un moto-generador pequeño y muy poco ruidoso. Su paso y su actuación casi no dejan huellas visibles.

5. Bibliografía consultada

1 *Seismic source comparison for compressional and converted wave generation at Spring Coulee, Alberta. Part I and II: Heavy vibroseis-dynamite-mini vibroseis comparison, Gabriela M. Suarez and Robert R. Stewart.*

2 *Estudio Comparativo de Fuentes de Energía Sísmica sobre la faja petrolífera del Orinoco. Alberto David Acuña Brito. Universidad Simón Bolivar, Decanato de Estudios Profesionales, Coordinación de Ingeniería Geofísica.*

3 *Source and receiver comparisons from Priddis and Hussar. Malcolm B. Bertram, J. Helen Isaac, Kevin W. Hall, Kevin L. Bertram and Gary F. Margrave. University of Calgary.*

4 *The synchronized electromagnetic impulsive source. Bill Pramik and Lee Bell, Geokinetics Leading Edge October 2011.*

5 *Fuente de Energía Sísmica Impulsiva Electromagnética. Pacifico R. Concetti, 2013.*

6 *Prueba de Explosivos empleados en Prospección Sísmica. Víctor Pelayes, Daniel Lorenzo, George Cariz, Pacifico Concetti y otros. Congreso IAPG 2003.*

CAPÍTULO 14: ENSAYOS DE MOVIMIENTO DE PARTICULAS EN VIBRACIONES SISMICAS

Introducción

Este Anexo es parte de un artículo presentado en el VI Congreso de la Exploración de Hidrocarburos del I.A.P.G. (Instituto Argentino de Petróleo y Gas), desarrollado en Mar del Plata en noviembre de 2008.

A solicitud de Clientes y autoridades locales y nacionales, se han realizado estudios de Impacto Ambiental por acción de Vibradores, en áreas consideradas críticas. La realización de un proyecto sísmico dentro de zonas urbanas o suburbanas, generalmente se encuentra con una opinión pública adversa suponiendo daños sobre sus bienes inmobiliarios y los representantes públicos necesitan pruebas irrefutables sobre el impacto ambiental que producirán la acción del barrido sísmico sobre construcciones civiles tales como: viviendas, monumentos, cañerías de todo tipo, etc. También en áreas tales como: Yacimientos de Hidrocarburos, Aeropuertos, Viñedos, Manzanares, etc., razones de seguridad, falsas expectativas, intereses sectarios necesitan ser refutados por una demostración científica. Muchos proyectos sísmicos fueron ejecutados luego de obtener los permisos de "Medio Ambiente" municipales-provinciales-nacionales que ensayos similares a los aquí relatados justificaron.

El estudio consiste en medir la "Velocidad de Movimientos de Partículas de Terreno o Estructuras", porque podrían ser afectadas por la acción de: Vibradores, Tránsito de Camiones en Ruta y otros Generadores de micro sismos. Los valores de velocidad obtenidos se compararon en el mismo instrumento con curvas de máxima tolerancia, correspondientes a normas internacionales, que aconsejan para cada tipo de construcción, cual es el límite de velocidad de movimiento de partícula del terreno que la sostiene es capaz de soportar, en función de la frecuencia (medida en hertzios) de la onda sísmica interviniente.

Las Normas empleadas fueron: "USBMRI 8508 & OSMRE", aconsejada por la: "United States Bureau of Mines (USBM)", la "United States Federal Office of Surface Mining and Reclamation Enforcement (OSMRE)", la alemana "DIN 4150" y la española: "Criterio Prevención (UNE 22381)"

He participado de varias experiencias midiendo la Velocidad de Desplazamiento de Partículas, para justificar ante entidades gubernamentales y privadas operaciones con Vibradores, algunas de las cuales fueron:
Zonas Urbanas: Cabimas (Venezuela), General Roca (Río Negro), Cutralcó y Plottier (Neuquén), Comodoro Rivadavia y suburbios (Chubut).
Aeropuertos: de Comodoro Rivadavia y del Neuquén.
Yacimientos en Producción.
Manzanales: de Neuquén y Río Negro.

Clasificación de las Estructuras

La clasificación de estructuras mostrada a continuación, es prácticamente aceptada en toda la industria petrolera mundial.

3. Estructuras Altamente Sensibles
    a. Cañerias de agua, canales abiertos, pozos de agua sin entubar y depósitos abiertos de agua aterraplenados de tierra (embalses).
    b. Cabezas de Pozos de Petróleo.
    c. Bienes Culturales Sensibles (incluye Cementerios).
    d. Estructuras potencialmente vulnerables (ejemplo: casas de adobe).

4. Estructuras Medianamente Sensibles
    a. Cañerías de gas y tuberías de alta presión.
    b. Pozos de agua entubados.
    c. Tanques de agua enterrados, cisternas enterradas
    d. Diques o embalses de agua hormigonados.
    e. Puentes.
    f. Propiedades Domésticas.

5. Estructuras Poco Sensibles
    a. Edificaciones sólidas: oficinas, edificios industriales, etc.
    b. Tuberías de baja presión
    c. Rutas y Caminos.
    d. Canales de Riego.
    e. Líneas Telefónicas o de Transmisión Eléctrica Enterradas.
    f. Estructuras de Acero de importante porte.

Reconocer el tipo de estructuras que se encontrarán en las proximidades de las vibraciones, es la primer evaluación a realizar, significa recorrer las posiciones donde se encuentran estas estructuras para programar su medida.

El Instrumento de Medida

Existen varios instrumentos disponibles para realizar los ensayos de movimiento de partículas del terreno y aquí mencionaremos dos de ellos: el Everlet V de Vibra-Tech Engineers, y otro más moderno: el SafeGuard Seismic Unit 3000 de Geosonics, que son esencialmente microcomputadora con memoria sólida, que computa los datos recibidos externamente desde un Geófono de Velocidad de Tres Componentes y un Micrófono de Presión.

Tanto el Geófono 3C como el micrófono son colocados sobre el Punto donde se quiere medir el movimiento de partículas y la energía del ruido recibido.



Figura 1, SafeGuard Seismic 3000 y Geófono 3C [2]

A los diferentes eventos los hemos iniciado automáticamente, "seteando" al Everlet para que comience la toma de datos cuando el nivel de las vibraciones recibidas por el Geófono 3C supere un determinado nivel (Source: Geophone; Trigger Level: determinado p/cada evento)

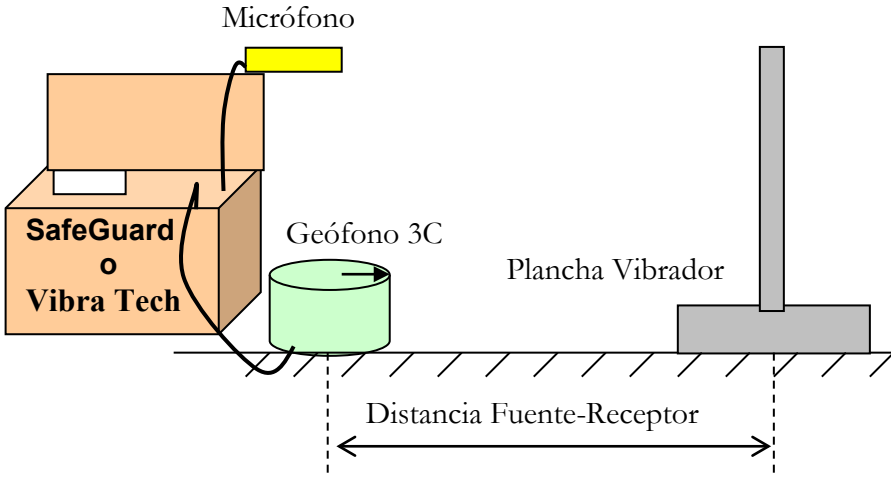


Figura 2: Esquemático de la operación de medida [3]

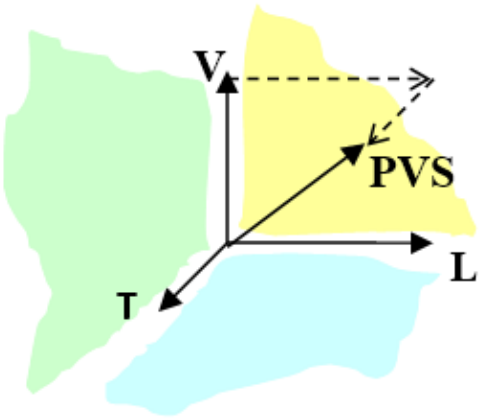
En general el o los Vibradores disparan la adquisición del Instrumento al excitar al Geófono 3C, y este adquiere c/u de las ondas recibidas en c/componente del Geófono 3C y del Micrófono durante el tiempo establecido (Record Time: especificado durante el "seteo").

Al concluir el evento, la pantalla del Everlet/SafeGuerd muestra:

- El valor máximo pico de velocidad: PVS (Peak Value Sum: Suma vectorial de los valores picos de c/componente que produce el máximo valor de Velocidad durante el tiempo de adquisición).

  Ejemplo:

  PVS: 13.00 mm/s
  Micro: 117.8 dB



$$PVS = \sqrt{T^2 + V^2 + L^2}$$

Figura 3, Diagrama vectorial 3D [1]

T, V y L son los "valores Picos" o Amplitudes instantáneas de los vectores de velocidad: Transversal, Vertical y Longitudinal. PVS es la Amplitud del Vector Suma de los anteriores valores picos.

Los valores picos T, V y L, son los máximos de cada componente y generalmente ocurren a diferentes tiempos y frecuencias de vibración. En cambio el valor "PVS" (Peak Vector Sum) es el valor pico máximo del Vector Suma de las tres componentes.

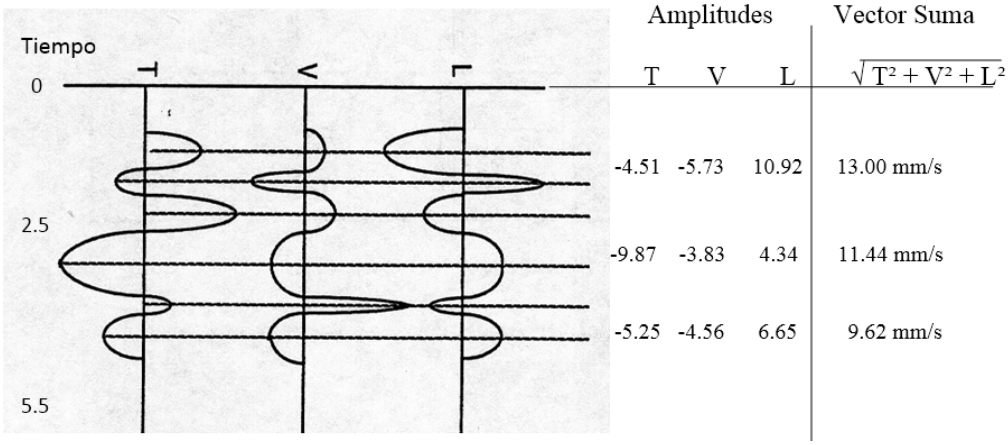


Figura 4, Valores instantáneos de las señales de velocidad recibidas en c/Componente del Geófono [1]

Los valores mostrados en pantalla del Vector Suma (PVS), suelen ser suficiente para no demorar las pruebas y continuar con las tareas de medida en el campo. Luego con mayor comodidad se bajan los registros obtenidos para analizar el total de los valores obtenidos y organizar el resumen.

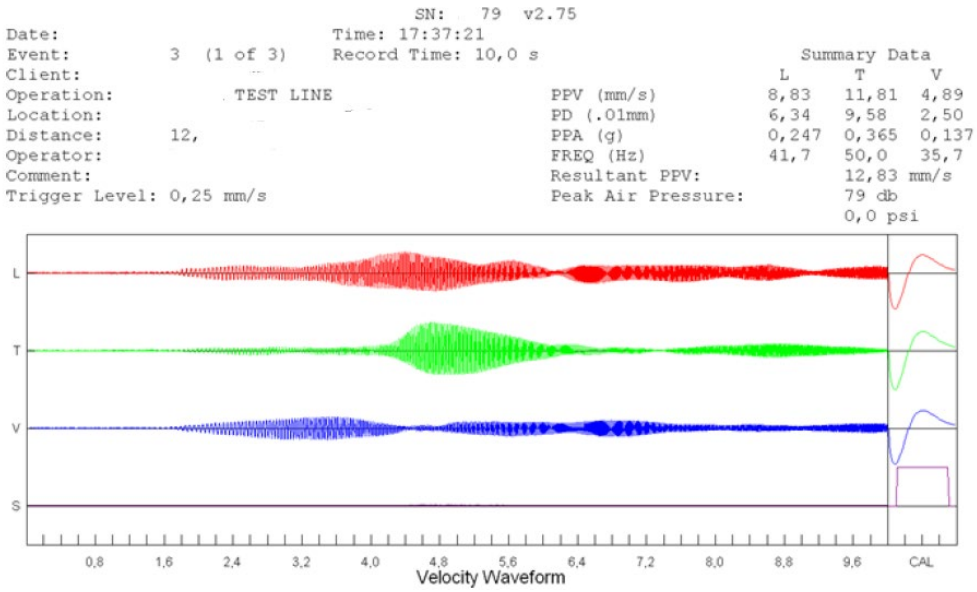


Figura 5, Resultados registrados del Evento 3 con el SafeGuard [2]

A manera de ejemplo la Figura 5 muestra, un evento obtenido con 4 Vibroseis, vibrando simultáneamente a 22 metros del geófono 3C, con las señales analógicas recibidas en c/ Componente de Velocidad que corresponden a c/u de los tres ejes coordenados: Transversal, Vertical y Longitudinal. En el encabezamiento figuran los valores numéricos siguientes (los datos del Cliente y lugar se borraron para evitar problemas futuros):

- Trigger Level: 0.25 mm/s; es el valor de velocidad necesario para disparar la registración del evento.
- PPV: valores pico de velocidad (en mm/s) de cada componente para el mayor PVA, (resultant PPV).
- PD: valores pico del desplazamiento de c/componente, calculado en centésimas de milímetro (0.01 mm).
- PPA: valores pico de aceleración de c/componente, calculado en términos de gravedad terrestre (g: 9,81 m/s2).
- FREQ: frecuencia a la cual c/componente llega a su PPV medida en Hertzios (Hz).
- Resultant PPV: es el valor calculado de PPS en mm/s.
- Peak Air Pressure: es la presión captada por el micrófono (79 dB).

Los valores de PD y PPA son obtenidos de aproximaciones gráficas sobre la señal de velocidad para cada componente. Por ejemplo, los valores de

Desplazamiento son determinados considerando como un triángulo rectángulo a ¼ de ciclo de la onda de velocidad pico.

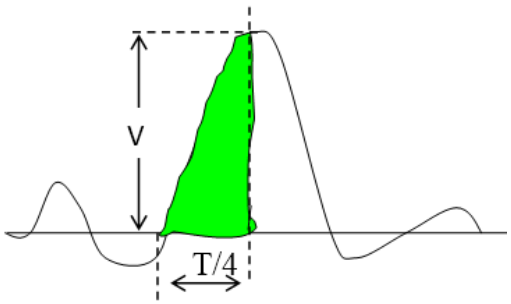


Figura 6: Método gráfico de cálculo [1]

Desplazamiento (D) = Velocidad x Tiempo = Área de un cuarto de sinusoide de velocidad:
D = Área del triángulo = base x altura /2 = T/4 x Pico Velocidad/ 2 = Pico Velocidad x T/8

Nivel de Presión de Aire

El Micrófono fue "seteado" para capturar presión de aire con peso Lineal, sin filtrar la presión continua (DC) que es la que se filtra para obtener un valor de tolerancia del oído humano. Este peso es utilizado para medir cargas sobre las estructuras.
Dentro de un radio de 5 metros alrededor del Vibrador, los niveles de ruido ambiente provocado por un vibrador en operación de vibrado, superan el límite permitido para una exposición permanente del oído humano: 86 dB. Más allá de este radio los niveles se mantienen por debajo de este valor dependiendo de la orientación del viento.

- Para ese mismo radio de 5 metros, el nivel de presión del aire cuando uno o más vibradores se encuentran en operación de vibrado, supera en algunos casos los 120 DB, para luego caer por debajo de 110 dB para distancias de 10 metros.

En la Figura 7 vemos las señales captadas por el Micrófono de Presión y por c/u de los Geófonos Componentes durante el total del tiempo de adquisición, que fue de 10 segundos aunque se observa que el Barrido del Vibrador fue de menor duración (el Sweep Length fue de 8 segundos).

El Everlet memoriza los últimos 0,25 segundos antes del inicio del Evento, para tener una evaluación de señal – ruido previo al mismo. Tener en cuenta que el Evento se dispara cuando el nivel del desplazamiento de partículas supera un determinado umbral, que el Vibrador comienza su barrido con un "taper" y entonces este "pre-evento" nos permite aproximarnos al real comienzo de la emisión de nuestra Fuente de Energía.

El tener una visión completa y analógica de las diferentes componentes de velocidad durante el total de la duración del evento, nos permite una

evaluación más criteriosa de la respuesta del terreno ensayado, detectando: duración de las magnitudes importantes, coincidencias de altas amplitudes en las componentes, etc.

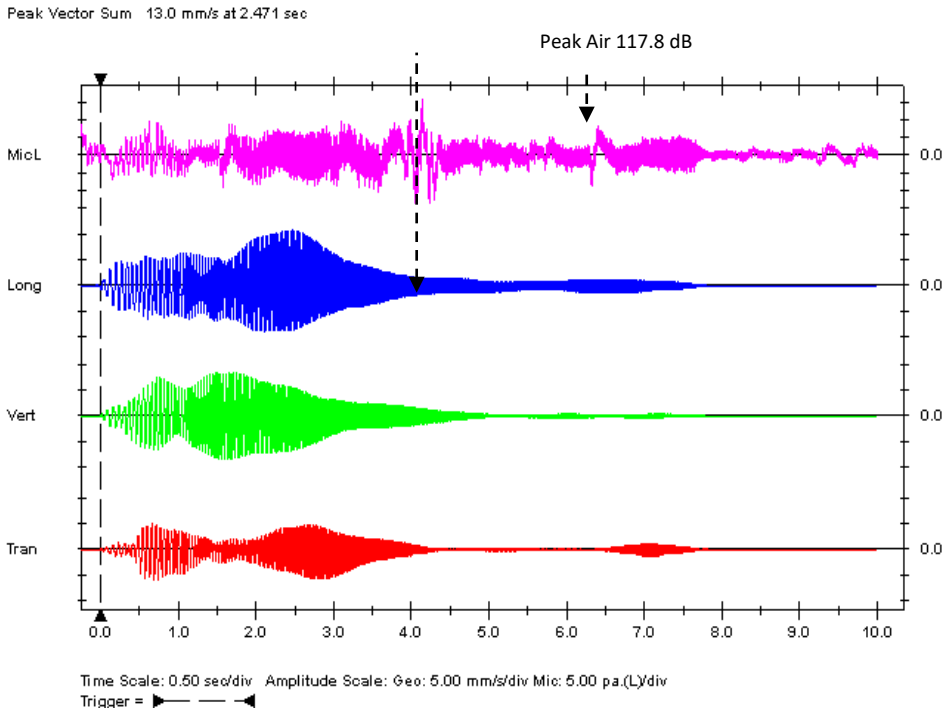


Figura 7: Sismograma de un Evento con el Everlet [1]

Criterios de Prevención

Existen diferentes normas internacionales para el "Control de Daños sobre Construcciones" de distinta naturaleza, en función de la velocidad de desplazamiento de partículas, provocadas por algún sismo u otro generador de emisión sísmica (en nuestro caso Vibradores Sísmicos)
Existen varios criterios y pueden emplearse los que se consideren convenientes pues se trata solamente de superponer gráficos sobre los puntos que reflejan "velocidad de partículas vs. Frecuencias".

- Estándar Americano: Criterio USBM RI 8507 & OSMRE.
- Estándar Español: Criterio Prevención (UNE 22381).
- Estándar Alemán DIN 4150 (esta es la que más se adapta a ondas vibracionales).

En la Figura 8, vemos representados los valores picos de velocidades para distintas frecuencias y para las tres componentes del mismo Evento del ejemplo. Como aquí se ha empleado un "Barrido Sísmico lineal" para producir el movimiento de partículas, los valores picos de velocidad corresponden a las frecuencias del barrido sísmico ciclo a ciclo (de 10 a 100 hertzios). El criterio aquí utilizado corresponde al de las Normas ya mencionadas: OSMR (línea continua más tolerante) y la USBM RI 8507

(línea de puntos, más exigente por aplicarse a construcciones con paredes de yeso y/o muros de piedras sin amalgama)
Podemos asegurar que ninguna amplitud supera las líneas de peligro de daño, ya que todos los puntos se encuentran por debajo de los umbrales establecidos (para el tipo de construcción regular en USA.)
La curva de la Figura 8 nos indica que las velocidades de desplazamiento de partículas son más peligrosas a baja frecuencia, pero que nuestro Evento, según este criterio, **"no"** ha superado los límites especificados para ninguna componente de frecuencia recibida:

- El límite aceptado para las Amplitudes de Velocidad, para frecuencias comprendidas entre 3 y 15 Hz. es de: 20 mm/seg, pero disminuye a 12 mm/seg tratándose de paredes de yeso.
- Luego la curva se vuelve lineal: desde 12 a 30 Hz. para construcciones sólidas, 9 a 35 Hz para construcciones de yeso y de 15 a 35 Hz para construcciones de muros sin amalgamar, la aceptación del aumento de amplitud en la velocidad crece linealmente con la frecuencia.
- Desde 30 Hz hacia las altas frecuencias (desde los 35 Hz para las construcciones de yeso o muro sin amalgamar) la curva máxima de aceptación se fija en 50 mm/seg.

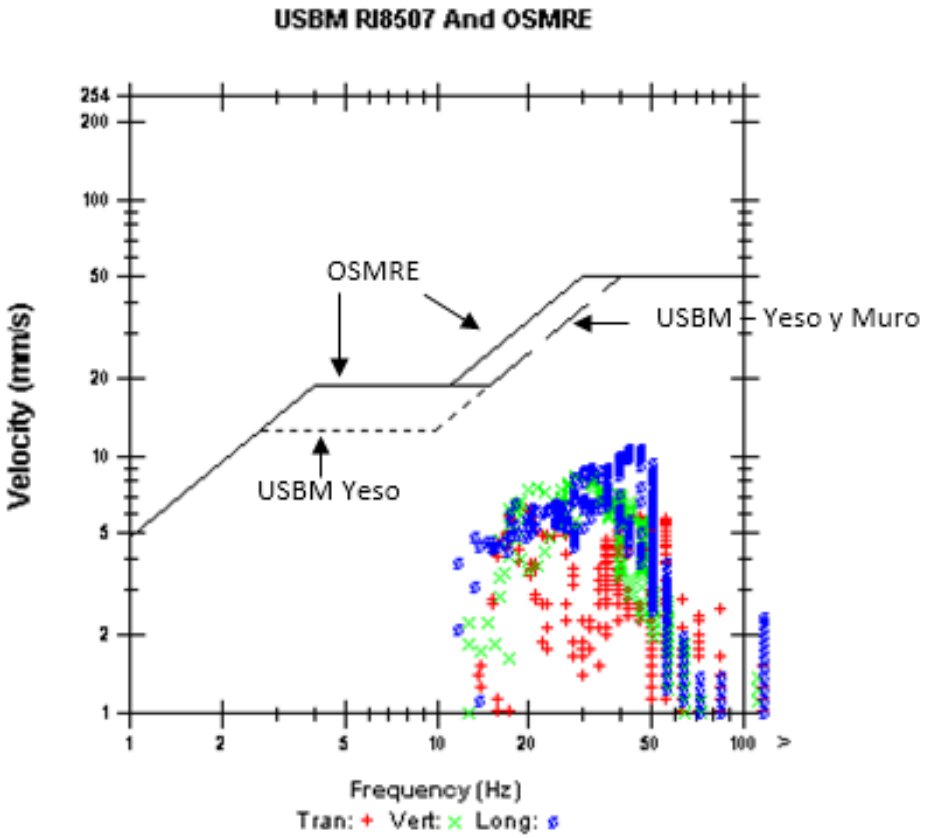


*Figura 8: Criterio USBM RI8507 y OSMRE (*contenido en el software del Everlet) [1]*

Como vemos en la Figura 8, la mayor amplitud de este Evento corresponde a la: Componente Longitudinal (Geófono Horizontal orientado mirando al

Vibrador, en color azul y forma circular) que alcanzó un valor máximo de 10,92 mm/seg para una frecuencia de 43 Hz (límite permitido: 50 mm/seg) Para no quedarnos con este único criterio, comparamos las anteriores amplitudes con el Criterio de la Norma Alemana DIN 4150 y la Española UNE 22381, que superpondremos a la figura 8 para obtener la Figura 9 y 10. Vemos que las condiciones impuestas por la Norma alemana y española son más exigentes que la norteamericana.

Estándar Alemán: Criterio DIN 4150 (único criterio en el SafeGuard)

El Criterio DIN 4150, es el aceptado para evaluar ondas vibracionales sinusoidales.

Para frecuencias comprendidas entre 0 y 10 Hz. el límite para Estructuras Sensibles (L3) es de 3mm/seg (para el anterior criterio todo límite superaba los 5 mm/seg). Luego la velocidad de prevención límite para L3, crece linealmente, llegando a 7,5 mm/seg a los 50 Hz, para luego crecer más suavemente y llegar a una velocidad de 9 mm/seg a los 100Hz.

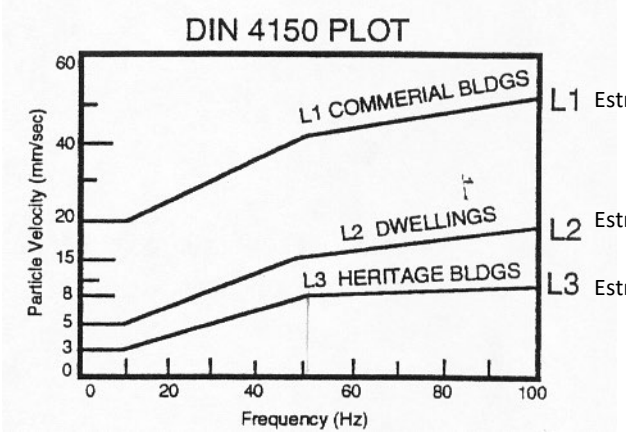


*Figura 9-: Estándar Alemán DIN 4150 (*Everlet y SafeGuard) [1 y 2]*

Para el mismo evento anterior, el Estandar DIN 4150, determina que entre 10 y 50 Hz, muchas componentes superan la Curva de máxima tolerancia L3 pero no así a la de L2.

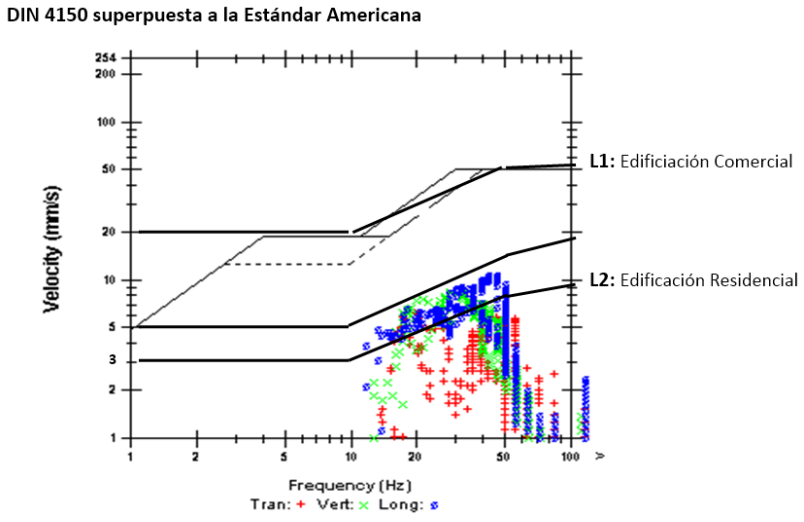


Figura 9-b, Superposición Criterios DIN 4150 y Estándar Americano

Estándar Español: Criterio Prevención (UNE 22381)

Utiliza un Criterio similar a la DIN dividiendo en los mismos tipos de Estructuras anteriores:
Estructuras Poco Sensibles (I), Estructuras Medio Sensibles (II) y Estructuras Sensibles (III)
En la Figura 10-b vemos la superposición de los valores límites con el gráfico de la Figura 8 del estándar americano donde se observa que:
Se extienden las exigencias para bajas frecuencias de vibrado hasta 15 Hertz pero aumentan los valores de tolerancia y que para altas frecuencias son más permisivos, duplicando los valores anteriores para igual situación en 100Hz.

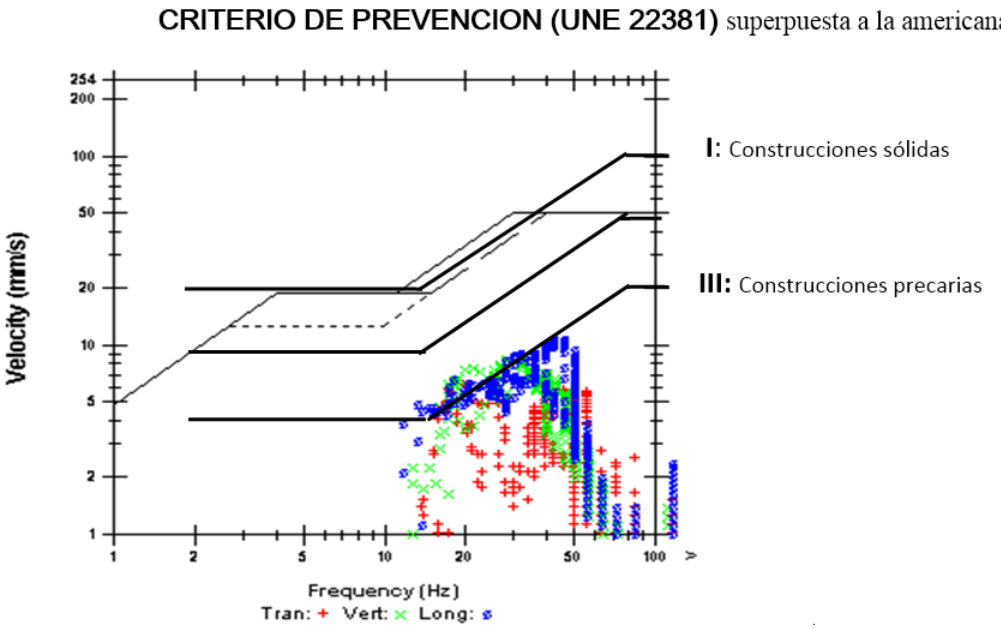


*Figura 10, Estándar Español UNE 22381 (*Everlet User manual)*

Para nuestro Evento-Ejemplo, resulta evidente que el único Vibrador (de 60 Klb) utilizado en este Evento, no debería utilizarse a menos de 5 metros de cualquier construcción con una Fuerza del 80 % (respecto a 60 Klb), Veremos a continuación que aconteció con otros Eventos empleando diferentes fuerzas y distancias para luego generalizar una propuesta de distancias segura de vibrado.

Evento Realizado en Área suburbana de Maracaibo - Venezuela

Varios eventos fueron realizados en diferentes locaciones manteniendo parámetros previos y cambiando o la cantidad de Vibroseis o la Fuerza de Salida del Vibrador o la distancia al punto a medir. En la mayoría de las experiencias hemos empleado Vibradores AHV-IV-362 y RHV-321 los

cuales poseen un "Hold down Weight de 60000 lb" y cuya fuerza de salida fue variada porcentualmente a este peso. El control electrónico empleado fue Pelton Advance II y VibPro.

La tabla siguiente es un ejemplo de una locación en Maracaibo (Venezuela), donde se utilizaron un total de 4 vibradores y se compararon las respuestas obtenidas a diferentes distancias (0,3; 5; 7,5 y 10 metros), vibrando con 2 y con 4 vibradores y con dos diferentes barridos.

- Barrido de 3 a 20 Hz de 8 segundos, para intentar generar máxima energía en las frecuencias más peligrosas de producir movimiento de partículas superficiales.

- Barrido de 8 a 96 Hz de 8 segundos, que es el barrido que se utilizará en el proyecto sísmico.

1).- 4 Vibradores de 267 Knewtons (60.000 lbf) Barriendo 8-96 Hz durante 8 segundos Lineal									
Distancia	Geofono Transversal			Geofono Vertical			Geofono Longitudinal		
metros	mm/seg	Hz.	"G"	mm/seg	Hz.	"G"	mm/seg	Hz.	"G"
0,3	28,96	5	0,87	115,82	57	9	34,54	3	1,1
5	2,79	17	0,09	11,43	47	0,66	10,67	21	0,34
7,5	3,68	32	0,09	3,81	43	0,16	13,97	28	0,30
10	2,41	23	0,08	3,68	47	0,17	6,89	20	0,09
2). 2 Vibradores de 267 Knewtons (60.000 lbf) Barriendo 8-96 Hz durante 8 segundos Lineal									
0,3	23,88	4	0,8	113,79	51	8,59	46,74	2	1,33
5	13,72	19	0,25	14,99	47	0,93	13,34	16	0,24
7,5	5,33	30	0,16	2,79	51	0,12	5,84	18	0,11
10	4,45	8	0,08	2,54	47	0,12	3,94	4	0,07
3).- 4 Vibradores de 267 Kilo Newtons (60.000 lbf) Barriendo 3-20 Hz. Durante 8 Segundos Lineales									
0,3	4,57	34	0,13	15,88	34	0,58	5,59	16	0,09
5	7,87	12	0,08	4,32	10	0,13	8,34	23	0,27
7,5	2,67	21	0,07	2,16	17	0,05	7,24	20	0,2
10	1,65	28	0,05	2,16	8	0,04	4,83	21	0,08
4).- 2 Vibradores de 267 Kilo-Newtons (60.000 lbf) Barriendo 3-20 Hz.durante 8 segundos Lineales									
0,3	5,97	7	0,07	19,18	32	1,27	14,86	12	0,16
5	7,11	19	0,15	7,24	2	0,12	14,35	14	0,16
7,5	4,06	27	0,11	2,03	9	0,05	7,11	21	0,11
10	1,91	32	0,07	1,91	18	0,05	5,84	15	0,07

Tabla I, *Locación ensayada con 2 y 4 Vibros*

Resumen de experiencias y Curva de valores máximos medidos

El total de las experiencias realizadas, nos indican que el valor máximo de PVS para cada distancia ensayada vs. Cantidad de Vibradores y Fuerza emitida fue:

- 1 metro PVS = 90 mm/seg, 1 Vibrador al 80%
- 5 metros PVS = 43 mm/seg, 1 Vibrador al 80%
- 10 metros PVS = 23 mm/seg, 4 Vibradores al 80%
- 20 metros PVS = 12 mm/seg, 4 Vibradores al 80%

En la curva se han volcado los valores máximos de PVS obtenidos para todos los Eventos que hasta ahora he participado y se ha trazado el límite de 3 mm/seg que las Normas DIN aconsejan como máximo para vibrar ante Edificaciones Precarias a frecuencias menores a 10 Hz (para la española, frecuencias menores de 15 Hz).

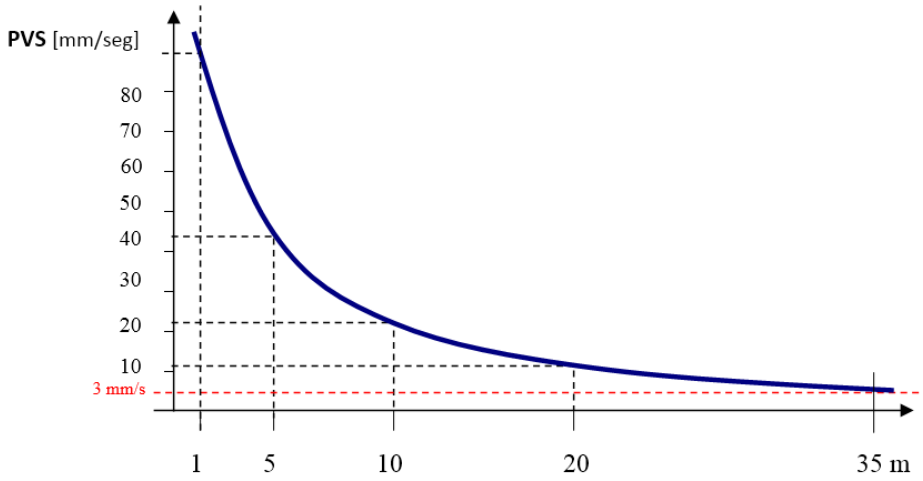


Figura 12: Curva de valores máximos de PVS

Como consecuencia podríamos decir que: tomando distancias mayores a las aquí mostradas, estaríamos en condiciones de establecer la distancia mínima necesaria para vibrar, teóricamente sin riesgos, ante diferentes estructuras. Por ejemplo para estructuras precarias utilizando 4 Vibradores de 60000 lb, deberíamos vibrar al 80% a una distancia mínima de 50 metros (ver distancia de seguridad establecida en Alberta-Canadá, Tabla 2).

Del estudio de las tablas de valores producidas en todos los eventos, inferimos que para distancias de 1 a 5 metros los valores mayores de PVS se obtienen con un solo Vibrador, pero para distancias mayores a 10 metros los valores máximos se obtienen con 4 Vibradores
La Figura 13 muestra la distribución de Vibradores sobre el terreno y las distancias útiles para especular en una explicación a la observación anterior.

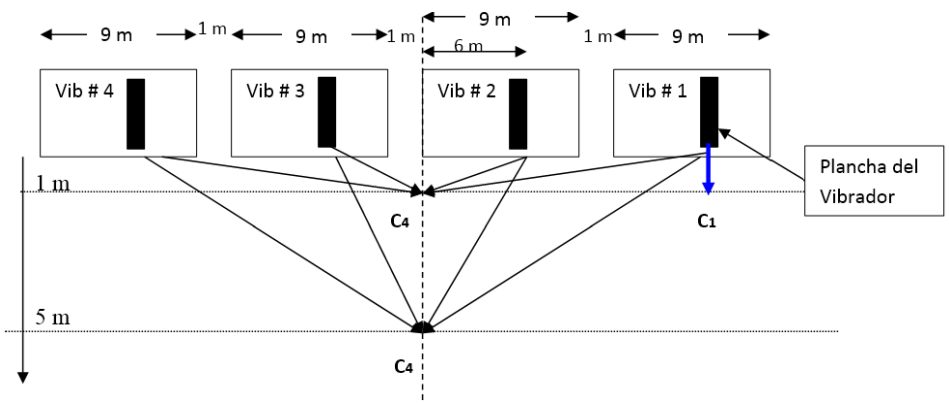


Figura 13: Distancias de los Vibradores al Punto de medida del Evento

Cuando se trata de un Vibrador, nuestro punto de medida se encuentra exactamente a esa distancia de la Plancha del Vibrador, en cambio cuando colocamos nuestro punto de medida en el Centro del Dispositivo de Emisión, este se encuentra a:

- Para 1 metro: 6 metros de los Vibros 2 y 3 y a 16 metros de los Vibros 1 y 4
- Para 5 metros: 8 metros de los Vibros 2 y 3 y a 17 metros de los Vibros 1 y 4
- Para 10 metros: 12 metros de los Vibros 2 y 3 y a 19 metros de los Vibros 1 y 4
- Para 20 metros: 21 metros de los Vibros 2 y 3 y a 26 metros de los Vibros 1 y 4

Cuando se trata de 4 Vibros, el Geófono de 3 Componentes está recibiendo simultáneamente y sumando, 4 Ondas con diferentes fases, por lo tanto el resultado no es el de una suma algebraica, produciéndose atenuaciones en el valor instantáneo suma de cada componente de velocidad adquirida.
Cuanto más grande es la distancia al centro del arreglo mayor es la aproximación de fases instantáneas en las componentes que llegan al Geófono 3C, comprobándose que a distancias mayores a 10 metros, el PVS de 4 Vibradores es mayor que el de un solo Vibrador. Vemos como la curva de la Figura 12 se aproxima a una hipérbola y esta tiende a decrecer mucho más lentamente con la distancia y parece, dentro de las distancias ensayadas, tender asintóticamente al valor de una velocidad de movimiento de partículas de terreno de: 3 mm/seg (si hubiésemos medido partículas a mayores distancias veríamos a la curva decrecer asintóticamente hacia el eje de 0 velocidad). La velocidad de 3 mm/s coincide exactamente con la velocidad límite para construcciones precarias de la mayoría de las curvas cuando la frecuencia de la onda recibida es menor a 10 Hz.

Aumentando aún más las distancias, podemos explicarnos algunos fenómenos que nos han ocurrido, cuando dañamos, durante las operaciones con vibradores, estructuras ubicadas a mayor distancia que a otras estructuras más cercanas a los 4 Vibradores.

Para mayores distancias, podemos aproximarnos a la siguiente lectura:
PVS de 4 Vibros a largas distancias = 4 PVS de 1 Vibro a esa misma distancia

Experiencia en un Yacimientos en producción

En un el Yacimiento en Producción, tuvimos que realizar una minuciosa determinación de Movimiento de Partículas, sobre las distintas estructuras cercanas a las Líneas 2D a registrar:

- Pozos en Producción.
- Pozos Inyectores de Agua.

- Cañerías de Media y Baja Presión y estructuras menores.

En base a la clasificación establecida anteriormente, consideramos que todas las Estructuras son de Poco a Medianamente Sensibles, por lo tanto adoptamos esta segunda definición por ser la más comprometida (curvas L2 en la Norma DIN 4150).

Se registraron 62 eventos sobre las cercanías de las estructuras más críticas, a distancias que van desde 6,25 metros hasta 60 metros, vibrando con 2 y 4 Vibradores de 60,000 lbs en la mismas posiciones, con un Barrido Lineal de 18 segundos de frecuencias de 6 a 150 Hz, obteniendo los valores que contiene la Tabla 2.

Event	Flag	Distance	Vib Qty	Force %	L	T	V	PPV	Freq.
2	1128	10	4	70	13,4	9,28	7,81	15,37	41,7
3	1129	22,5	4	70	8,83	11,81	4,89	12,83	50
4	1130	35	4	70	3,11	3,75	3,18	4,06	35,07
7	1131	47,5	4	70	2,54	2,03	1,59	2,92	50
9	1132	60	4	70	1,78	1,02	1,4	1,84	25
11	1128	10	4	40	8,95	6,92	3,75	9,33	62,5
12	1129	22,5	4	40	4	3,68	1,97	4,95	41,7
13	1130	35	4	40	3,43	1,02	1,4	3,56	62,5
14	1131	47,5	4	40	1,14	0,7	0,89	1,21	35,7
15	1132	60	4	40	1,02	0,59	0,83	1,08	27,8
22	1127,5	4	2	70	23,62	52,77	20,45	59,06	62,5
23	1128	10	2	70	10,48	5,52	5,59	11,3	41,7
24	1129	22,5	2	70	6,22	7,62	3,4	9,59	41,7
25	1130	35	2	70	2,29	1,46	1,97	2,54	50
26	1131	47,5	2	70	1,84	1,08	1,4	1,91	35,7
27	1132	60	2	70	1,33	1,14	0,89	1,59	27,8
21	11275	4	2	40	12,57	25,59	6,16	26,23	83,3
20	1128	10	2	40	5,72	5,14	3,24	6,35	41,7
19	1129	23	2	40	5,4	6,86	2,92	7,3	41,7
18	1130	35	2	40	1,52	1,91	1,14	2,16	50
17	1131	47,5	2	40	1,08	0,95	0,76	1,21	50
16	1132	60	2	40	0,83	0,64	0,51	0,89	41,7
28	1089	6,25	4	70	29,4	34,48	13,5	37,91	41,7
29	1089	12,5	4	70	12,38	5,72	7,2	14,1	50
30	1089	25	4	70	2,6	1,4	1,65	2,79	41,7
31	1089	37,5	4	70	3,24	1,84	1,97	3,75	62,5
32	1089	50	4	70	1,78	0,76	1,78	1,91	25
33	1089	62,5	4	70	1,78	1,21	1,27	1,78	35,7
45	1089	6,25	4	40	10,16	11,68	8,5	12,13	41,7
46	1089	12,5	4	40	15,68	11,18	10,67	16,57	41,7
47	1089	25	4	40	1,27	0,89	0,95	1,52	50
34	1089	6,25	2	70	22,16	21,65	13,6	25,15	31,3

Tabla II, parte de los 62 eventos registrados

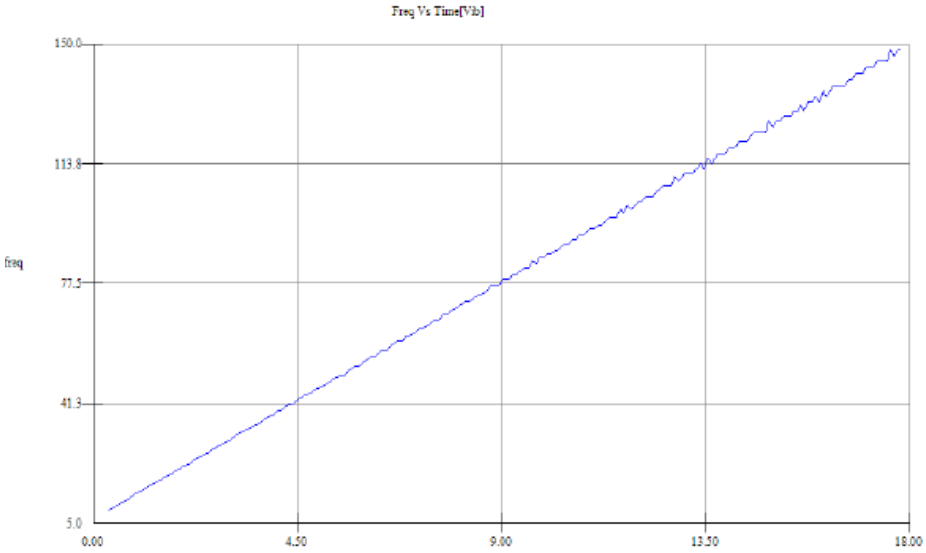


Figura 14, Barrido Lineal de 18 segundos desde 6 a 150 Hz.

Con los valores del Vector Suma de cada Evento (PPV), se confeccionaron las curvas de la Figura 15, donde se aprecia que:

- Hasta los 19 metros la acción de 2 Vibros genera mayor PPV que la de 4 Vibros, porque existen menos ondas sísmicas que llegan con diferencia de fase a la posición de medida.

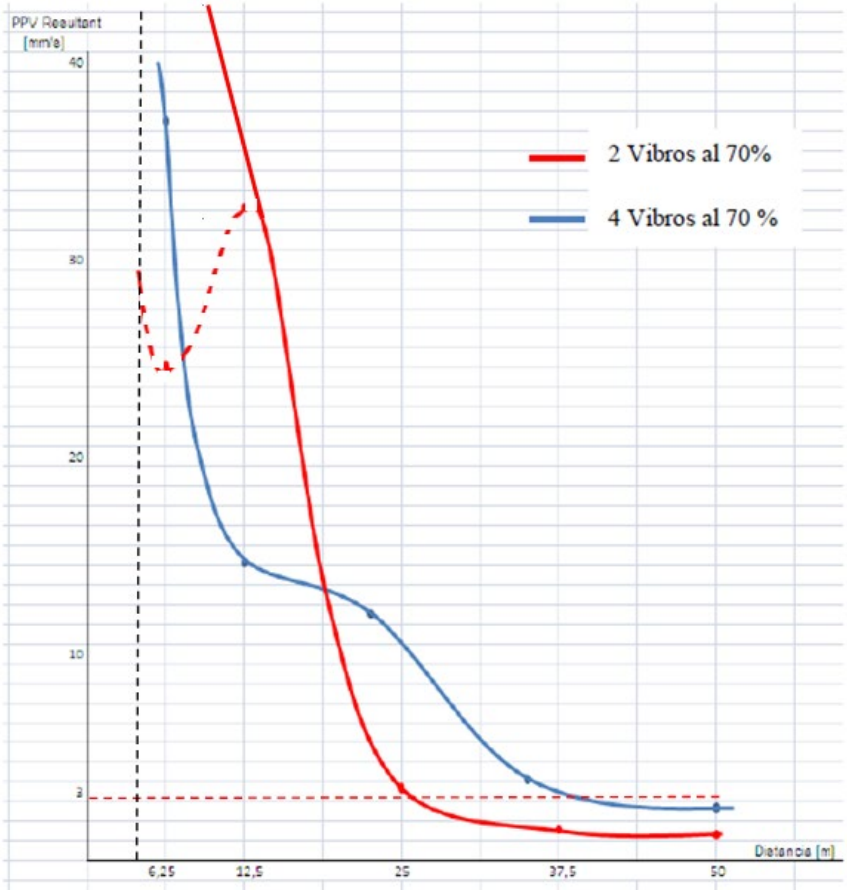


Figura 15, Curvas PPV vs Tiempo de 2 y 4 Vibros en la misma posición

- Con 2 Vibros, a partir de los 25 metros los PPV son inferiores a 3 mm/s y con 4 Vibros lo hace a los 40 metros.

Distancias de seguridad adoptadas en otras operaciones

Instalación	Distancia
Ductos enterrados y en superficie	10 m
Baterías	50 m
Locaciones de Pozos (en actividad)	50 m
Tanques	10 m
Torres y Líneas Eléctricas	10 m
Puestos de Campo	100 m
Yacimientos	100 m

Tabla III, Distancias Mínimas a Instalaciones adoptada por Total Austral S.A.

Structure	# Vib	High drive	Low drive
High sensitivity structures			
Wellhead, SWICC water pipeline	5	60 m	55 m
Uncased water well, culturally sensitive structure (Including grave yard)	3	55 m	40 m
Potentially vulnerable structure (mud house)	1	30 m	30 m
Medium sensitivity structures			
High pressure Gas line or pipeline	5	24 m	24 m
Cased water well, buried cistern. Barn or dam, graveyard, bridge. Domestic property	3	24 m	12 m
	1	20 m	12 m
Low sensitivity structures			
Offices and industrial premises	5	10 m	5 m
Pipeline (all except high pressure) Rail road track, Irrigation channels or canals	3	10 m	5 m
Substantial steel structure. Telephone or telecom line and pole. High-tension power line and pole. Buried telephone line or electric line.	1	10 m	5 m
Paved road Graded road		N/A	N/A

Tabla IV, distancias de seguridad adoptadas en Alberta (Canadá)

Observaciones Adicionales:

Las medidas de eventos generados por: Tránsito de Camiones con Acoplados Cargados sobre asfalto deteriorado, Bombas de Extracción Petroleras, Plantas de Bombeos, etc. producen movimiento de partículas a velocidades menores de 1.5 mm/seg para distancias muy pequeñas (2 metros). Estos valores no son comparables con los obtenidos por la acción de vibradores, por tal razón no me he detenido en mostrar este tipo de eventos ya que no representan ningún peligro para ningún tipo de edificación comparada con la acción de los Vibradores Sísmicos.

En la adquisición sísmica en plena ciudad de General Roca (Río Negro), el Cliente aceptó los riesgos de afectar instalaciones (las mayorías casas), ya que gran parte de la ciudad se asienta sobre aportes diluviales poco consolidados. Todas las instalaciones cercanas a las líneas sísmicas, fueron previamente recorridas para conocer el estado inicial de esas instalaciones, con escribanos que fotografiaban y tomaban notas de las anomalías existentes. Dos empresas constructoras fueron contratadas para reparar los daños generados por las vibraciones sobre 65 instalaciones,





Foto 1 y 2, Vibrando por General Roca – Río Negro (1996)



Foto 3, midiendo movimiento de partículas en Comodoro Rivadavia (2003)



Foto 4, Medida de Movimiento de Partículas en la boca de un Pozo [2]

Bibliografía Consultada:

1 *Everlet V, Everlet Ve User Manual – Vibra-Tech Engineers, que incluyen los Criterios de Prevención mencionados en este artículo.*

2 *SafeGuard Seismic 3000 – Geosonic*

3 *WesternGeco: Vibroseis Operation Safe Distance Experiences.*

CAPÍTULO 15: LA ESTIMULACIÓN HIDRÁULICA Y LA MICROSÍSMICA

MICROSÍSMICA

Introducción a la Microsísmica

Este capítulo trata de explicar y resumir conceptos y técnicas que son empleadas durante las operaciones de Hidrofracturas (fracking), en pozos de hidrocarburos no convencionales y el simultáneo monitoreo de los microsismos generados durante los diferentes eventos. Los conceptos fueron adquiridos en presentaciones presenciales y virtuales de Peter M. Duncan, informes de otros especialistas y la experiencia de haber supervisado el monitoreo de microsísmica en el campo de operaciones.

Según Peter Duncan:

"La sísmica pasiva, especialmente el monitoreo de la Microsísmica, es a la sísmica convencional como un estetoscopio lo es a un sonar".

"El conjunto de operaciones y esfuerzos que deben realizarse durante una perforación horizontal para luego ejecutar la fractura hidráulica de la formación, se parece a un circo cuando llega a la ciudad".



Figura 1, cuando el circo llega a la ciudad- Peter Duncan [2]

La microsísmica es un continuo 4D al escuchar atentamente los sonidos emanados por la Tierra para luego diagnosticar que es lo que está sucediendo allí abajo. Las técnicas que aplica la sísmica pasiva no solo permite obtener

una imagen del reservorio y de sus cañerías, sino que nos muestra como los fluidos se mueven a través de las tuberías.
En nuestro caso, el monitoreo de microsísmica tiene por objeto registrar lo que sucede en el subsuelo durante los procesos de Estimulación Hidráulica, en uno o varios pozos de una locación y nos referenciaremos a la formación "Vaca Muerta" de la Cuenca Sedimentaria Neuquina. La energía sísmica desarrollada durante estos eventos, son similares pero menos intensas, que las que se producen durante los terremotos.

En las últimas décadas se ha podido implementar la microsísmica con estaciones receptoras en superficie, empleando ristras de geófonos verticales, ahorrando tiempo y costos al evitar emplear pozos auxiliares de monitoreo y geófonos embalados para soportar la presión y temperatura del pozo. Para tener similares resultados empleando receptores en superficie, es necesario una combinación de: gran cantidad de apilamiento de datos (stacking) y una completa imagen del frente de onda incidente (full waveform imaging).

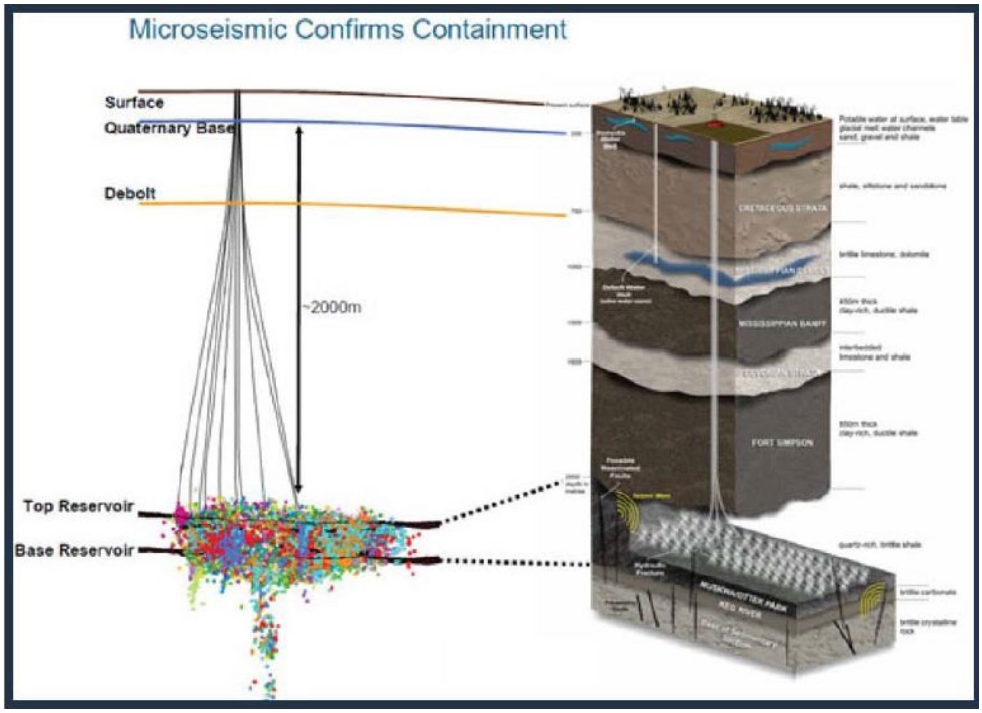


Figura 2, gráfico de fracturas en un estrato cuyo tope es 2000 metros [2]

La Microsísmica confirma la contención de la fracturación de la roca dentro de los límites necesarios para su aprovechamiento, sin afectar otras áreas cercanas.

Debido a estas nuevas técnicas de explotación de reservorios no-convencionales, U.S.A. hoy se ha convertido en el primer productor de hidrocarburos superando a Arabia Saudita (junio de 2015).

Fundamentos de la microsísmica

El monitoreo de la microsísmica tiene como objetivo determinar en qué tiempo y espacio se produjeron las fracturas en el subsuelo. El tiempo (horario), permite relacionar en qué etapa de la estimulación hidráulica ocurrió fractura y el espacio consiste en ubicar la locación donde estas ocurrieron, dimensionando el volumen de abertura logrado.

La técnica más sencilla de comprender el tema, es la que se ha utilizado para analizar los sismos naturales, mediante el análisis de tiempo de arribos de las Ondas P y S (Traditional P&S Picking), ya que la fractura de la roca genera también Ondas P y S.

Utilizando una ristra de geófonos 3C en un pozo, a una profundidad no muy alejada del evento, se puede determinar la ubicación del mismo (fractura por ejemplo), conociendo: (1) las velocidades de la capa del subsuelo donde se desarrolló tal evento (Vp y Vs) y: (2) conociendo los tiempos transcurridos desde el inicio del mismo.

Las velocidades pueden ser estimadas a partir de sondeos sónicos o un calibrado mediante disparos a través del medio estratificado. En el caso de la recepción en superficie, utilizamos el tiempo de inicio del punzado (T0), que consiste en la detonación de una pequeña carga de explosivo para perforar el caño, y medimos los tiempos de arribos: a los geófonos colocados en la superficie del pozo (uphole) y a las distintas estaciones receptoras en superficie, determinando así la velocidad promedio Vp del subsuelo

Microsísmica con Geófonos en Pozos

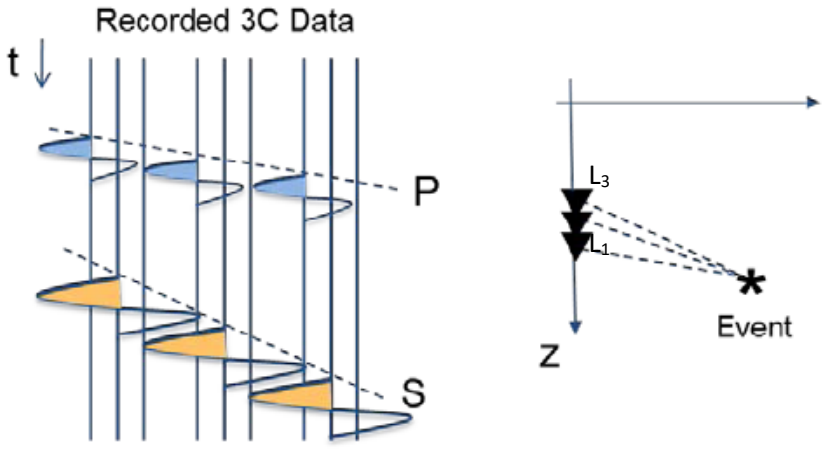


Figura 3, ristra de 3 geófonos 3C colocados en un pozo, reciben las ondas sísmicas P y S provenientes de un evento sísmico [2]

En la Microsísmica de Pozo, los tiempos de arribo "tp" y "ts" no se conocen por no tener referencia del inicio del evento, solo se miden las diferencias de los tiempos de arribos de las Ondas P y S:

$$\Delta t = tp - ts.$$

La distancia de un geófono al evento "L" es:

$$L = Vp * tp = Vs * ts$$

Las Ondas S son más lentas que las P:

$$ts = tp + \Delta t$$

Reemplazando:

$$Vp * tp = Vs * (tp + \Delta t) = Vs * tp + Vs * \Delta t$$

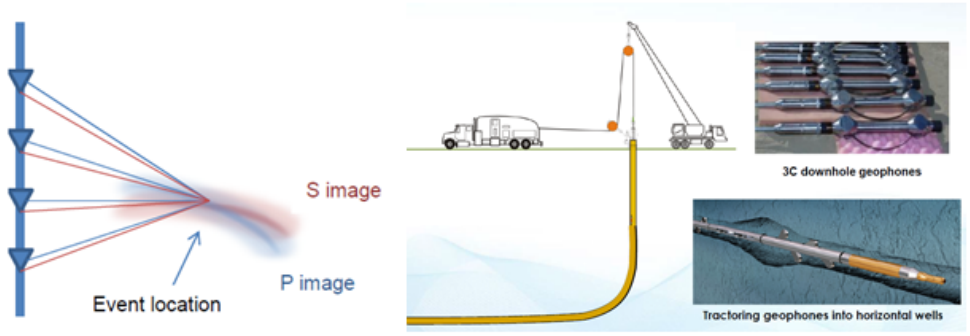
Despejando "tp":

$$tp * (Vp - Vs) = Vs * \Delta t$$

$$tp = Vs * \Delta t / (Vp - Vs)$$

Vemos que conociendo las velocidades de las ondas en el medio donde se propagan y midiendo la diferencia de tiempos de arribo, se pueden determinar los valores de "tp" y "ts" y así calcular la ubicación aproximada del centro del evento, según la posición de cada geófono 3C de la ristra de geófonos. Cada valor obtenido representa un radio vector con origen en cada geófono, con la orientación conocida previamente durante el calibrado y que concurren al lugar donde se desarrolló el evento, que por no ser puntual, le debemos asignar una locación puntual, que es donde se intersectan los Lp con los Ls.

$$L_{1p} = Vp * tp_1$$
$$L_{1s} = Vs * ts_1$$
$$L_{2p} = Vp * tp_2$$
$$L_{2s} = Vs * ts_2$$



(a) (b)

Figura 4, (a) diferentes distancias a la locación del evento según la ubicación de cada geófono; (b) geófonos de pozo [2]

Microsísmica con Geófonos en Superficie

Tal como se anticipó, a fin de disminuir los importantes costos que la microsísmica con geófonos de pozo genera, Peter M. Duncan introduce en 2003 una técnica que denominó PSET (Passive Seismic Emission Tomography), que utiliza los geófonos de superficie de la clásica adquisición sísmica 3D. Por supuesto que no llegan o llegan muy atenuadas a la superficie las Ondas S, por lo tanto los geófonos utilizados en superficie son de una sola componente (vertical), clásicos de una sísmica 3D. Con una buena extensión de las líneas receptoras (apertura) y con un alto apilamiento de datos (stacking), las Ondas P alcanzarán para localizar las fracturas.
Por lo general se utiliza una apertura (longitud de líneas sísmicas) dos veces mayor que la profundidad en donde se desarrollan las fracturas, y un "fold" (sumas) que origine una relación Señal-Ruido posterior al "stack" de 3 o mayor.
La gran apertura de la recepción contribuye a un mejor aprovechamiento del frente de onda generado en cada fractura, esto no se logra con geófonos 3C de pozos sino se poseen dos pozos de monitoreo para obtener redundancia de arribos de buenas Ondas P y S. Tal es así que el PSET ahora se está implementando para arreglos de geófonos de pozo, para evitar el picado de arribos de Ondas P y S que depende de la habilidad del "picador de arribos" o la utilización de complicados algoritmos para estimarlos.

En la figura 5 se muestra el tendido sísmico de 10 líneas en modo de estrella con centro aproximado en la boca del pozo central, de los 5 pozos que se han horizontalizados a la profundidad central de la formación que se pretende fracturar. Cada una de las líneas sísmicas debería tener una longitud de dos veces la profundidad de los pozos horizontalizados, pero no todas las líneas pueden ser extendidas en la superficie linealmente y con la abertura pretendida, ya sea por razones topográficas o para no introducirse en áreas no permitidas.

Las líneas sísmicas están compuestas por ristras de geófonos convencionales para sísmica 3D, distribuidos en estaciones receptoras espaciadas, por ejemplo, cada 25 metros.

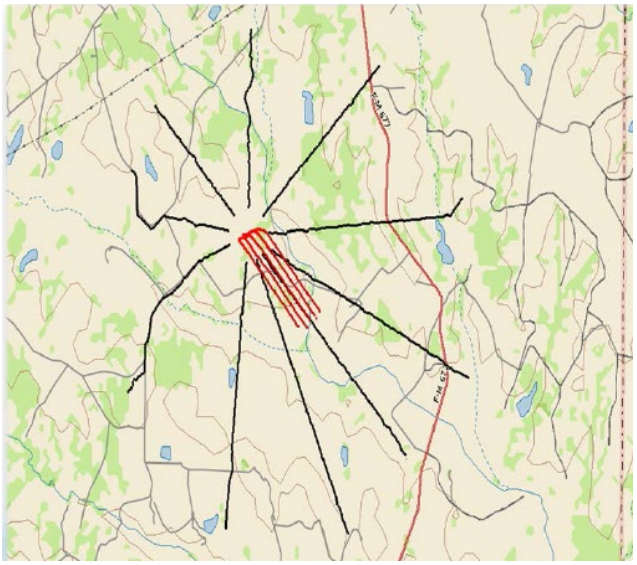


Figura 5, 10 líneas sísmicas en superficie en forma de estrella y en el subsuelo 5 pozos horizontales [1]

Las líneas sísmicas deben permanecer activas y el equipo de adquisición debe permanecer continuamente grabando los eventos que reciben los geófonos de superficie, para no solo registrar datos de los microsismos generados durante la estimulación hidráulica, sino también para detectar los datos recibidos durante el punzado, usados para determinar la velocidad Vp que se aplicará durante el procesamiento.
Como muchos Sistemas de Adquisición Sísmica no pueden generar un único registro continuo, se divide la grabación en registros continuos, por ejemplo de 30 segundos, es decir 2 "files" o registros por minuto. Es por esto que para asegurar la registración de la microsísmica, es indispensable sincronizar el Sistema de Adquisición con el reloj o pulso PPS de tiempo GPS.

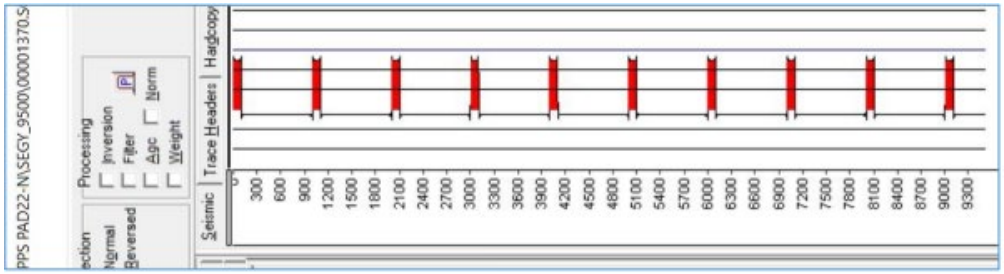


Figura 6, Registro sincronizado con el pulso GPS (1 pulso cada segundo) del G3i [12]

Los pulsos PPS del GPS se repiten cada segundo y poseen un ancho de 100 milisegundos. El "Start Data" o comienzo del registro, se encuentra sincronizado con el tiempo GPS y un pulso cada segundo se podrá observar en el Canal Auxiliar correspondiente.

Para establecer la Velocidad de las Ondas P con que se procesará la microsísmica, se necesita medir el tiempo de viaje de las ondas sísmicas producto de los punzado (upholes), para tal motivo se coloca un geófono

magnético sobre la base metálica del pozo central y una ristra de geófonos agrupadas sobre la superficie del terreno próxima al pozo central.

Para conocer el tiempo del Disparo del Punzado (T0), se debe acceder al camión de la contratista que realiza el punzado (wireline truck) y conectarse con la salida del "pedal" con que el operario envía lo orden de disparo a la carga explosiva que perforará al conjunto caño-cemento-formación. También se puede realizar una bobina manual sobre el cable de salida de dicho camión para utilizar el pulso de corriente inducido. Cualquiera de las dos opciones (o las dos) se utilizan como Canal auxiliar en el Sistema de Adquisición.
Otra opción utilizada, es colocar un GPS SYNCH que es un receptor GPS que anotará el tiempo en que el operador de "wireline" oprime la pedalera de disparo; los tiempos pueden ser luego leídos descargándolo de la memoria de este instrumental.

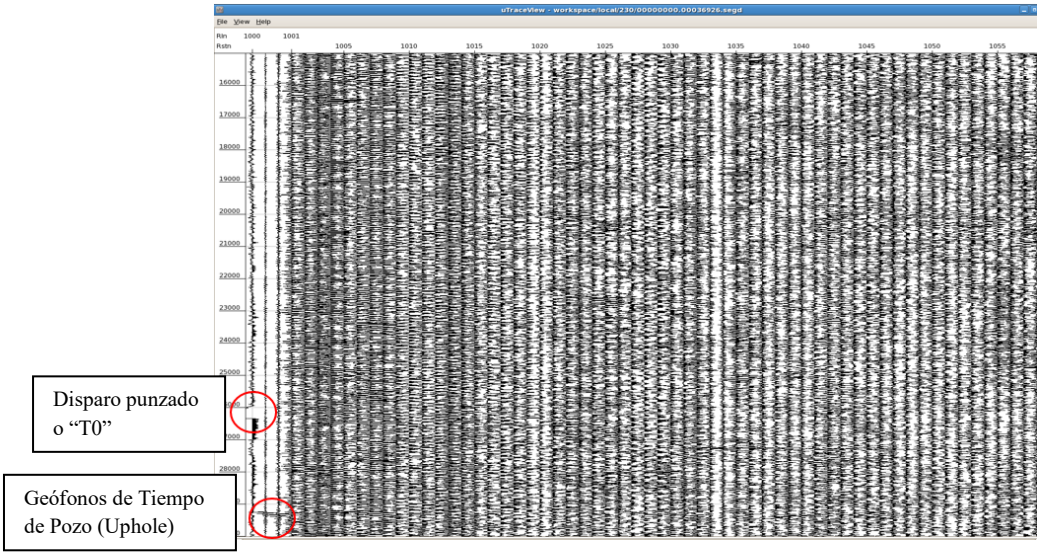


Figura 7, Canales Auxiliares durante un Punzado del G3i [12]

También se graban y se procesan todos los ruidos generados que permitirán diseñar los filtros adecuados para atenuarlos durante el procesamiento de los datos, donde las referencias que el Observador de la Microsísmica ha escrito en su reporte (Observer Log), detectando la naturaleza de dichos ruidos y los tiempos en que estos han ocurrido, serán utilizados.

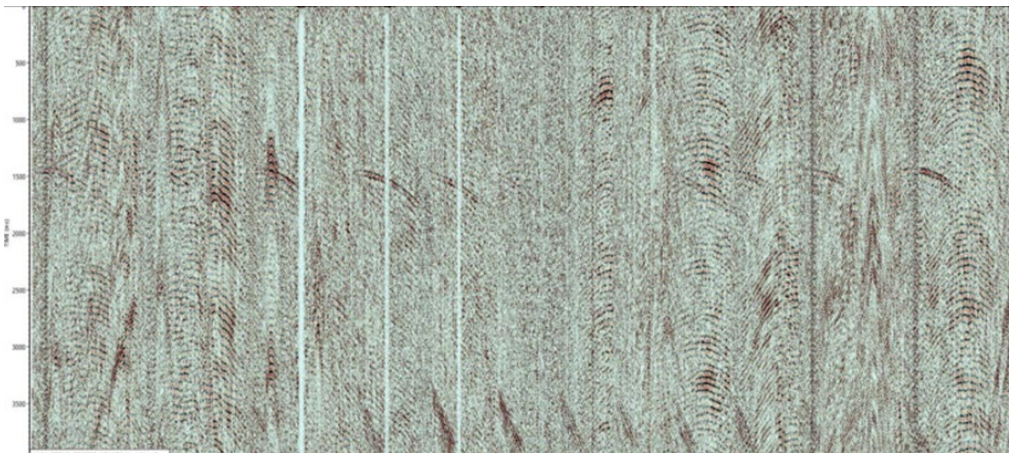


Figura 8, Monitor de un Registro Sísmico de 12 líneas en superficie, obtenido durante la fractura de un pozo a 3000 metros de profundidad [12]

Durante el procesamiento de la microsísmica, una manera de detectar un evento sísmico válido entre tantos datos grabados, es comparar la energía promedio por ventanas de tiempo sobre los datos adquiridos: una ventana más larga (LTA: long term average) continua a otra más corta (*short term average*, STA).

Si el valor promedio capturado en el STA es mayor que los niveles de fondo en el LTA, esto producirá un radio STA/LTA mayor a "1" y estableciendo un valor límite mayor a "1" se podrá detectar que un evento puede haberse producido. De esta forma se puede ir filtrando la enorme cantidad de datos grabados para sustraer los datos útiles.

En la figura siguiente se aprecia que:

- En "A" y en "B", donde solamente se ha grabado ruido, la relación del promedio de energía:
  STA/LTA ~ 1.
- En "C" se reconoce un evento porque la relación del promedio de energía:
  STA/LTA >> 1
- En "D" no se diferencia promedio de energía entre STA y LTA y la relación será:
  STA/LTA ~1

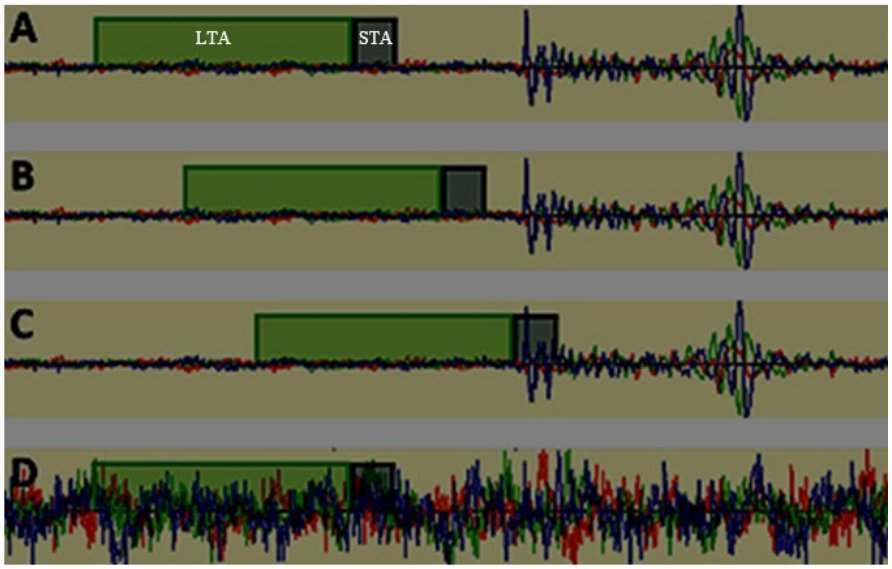


Figura 9, ventanas de tiempo de promedio de energía: STA y LTA [4]

ESTIMULACIÓN HIDRÁULICA

Aprovechando el haber supervisado una Microsísmica y haber presenciado las tareas desplegadas en la Estimulación Hidráulica de varios Pozos horizontalizados en la Formación Vaca Muerta de la cuenca Neuquina, a continuación relato cada paso de este complejo proceso. Tuve que recurrir a varios informes y diferentes artículos relacionados a la Estimulación Hidráulica, para comprender el total de las operaciones desplegadas, que se detallan al final del capítulo.

La Formación Vaca Muerta

Para explicar la Estimulación Hidráulica, tomaremos como ambiente de referencia a la Formación Vaca Muerta, ya que es la principal roca generadora de la cuenca Neuquina, con un potencial sin precedentes como reservorio "no convencional" de Shale Gas & Oil.
Su gran potencial se debe a sus características geológicas y su ubicación geográfica. La formación Vaca Muerta tiene una superficie de 30 mil km2, de los cuales YPF posee la concesión de más de 12.000 km2.

Las rocas de la formación son a la vez: "rocas madres y rocas reservorios", ya que el hidrocarburo en ellas contenido no ha podido emigrar de la formación por su muy baja permeabilidad, ya que se tratan de Lutitas Bituminosas formadas principalmente por granos que tienen un tamaño menor a 0.002mm, dispuestos en una textura laminada y con gran cantidad de contenido orgánico (COT superior al 2%). Para aumentar la permeabilidad debemos fracturar horizontalmente esta formación.
Este tipo de sistema petrolero se conoce como acumulación no convencional, dado que no es regido por la flotabilidad de los hidrocarburos frente al agua ni por la Ley de Darcy, como es el caso de los reservorios convencionales. Por dicho motivo, las acumulaciones no convencionales son continuas, de escala regional, independientes de la presencia de trampas estructurales y/o estratigráficas.

La roca de una formación posee una presión interna (presión poral) que es proporcional a la densidad de la formación. La densidad de las Lutitas generalmente varía entre 2,2 y 2,65 dependiendo de la profundidad o del grado de compactación.

$$p = h\rho g$$

Una determinada roca se caracteriza por un gradiente de fractura (fracture gradient) que permite conocer que presión es necesaria para fracturarla a una determinada profundidad. Las Lutitas de la formación "Vaca Muerta" poseen un Gradiente de Fractura en los bordes de cuenca de: 0,5 psi/foot y en su centro: de 1,1 psi/foot (11 a 25 KPa/m).
Por lo tanto para fracturar la formación a 3000 metros (3000/0,305= 9840 ft) de profundidad, será necesario ejercer una presión de fractura mayor de: 1,1 * 9840 = 10820 psi.



(a) (b) (c)

Figura 10, (a) ubicación de la Cuenca Neuquina; (b) Lutita bituminosa; (c) Estratos laminados [9]

Perforación direccional de pozos

La perforación direccional de pozos puede definirse como la técnica de desviar una perforación a lo largo de una trayectoria previamente establecida, desde un punto de partida en la superficie hasta una ubicación objetivo en profundidad, definidos ambos por un sistema de coordenadas establecido.

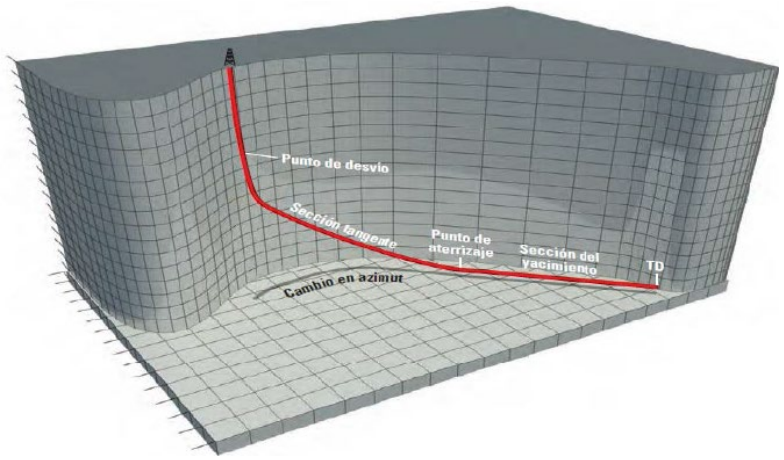


Figura 11, Referencias tridimensional para guiar la perforación del pozo [5]

Esta técnica nos ha permitido introducirnos horizontalmente dentro de la formación Vaca Muerta y fracturar la misma prácticamente en todo su espesor.

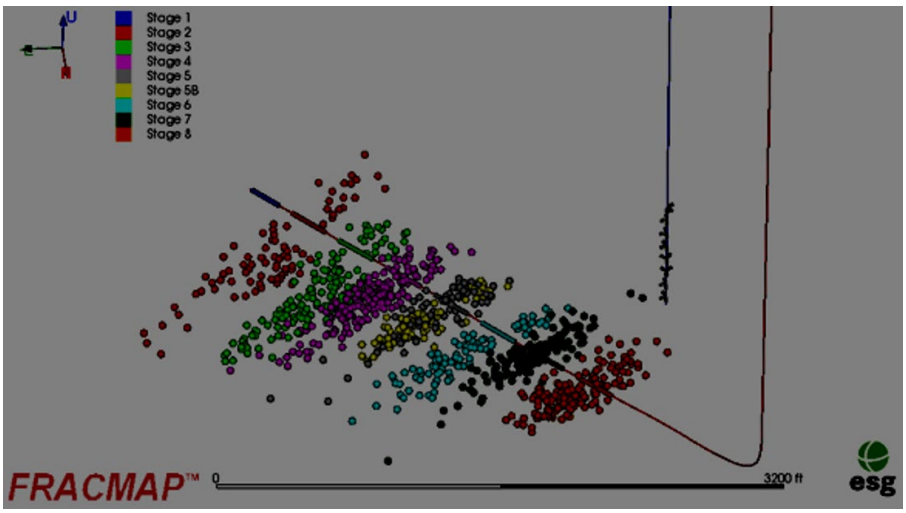


Figura 12, Ubicación de Eventos Microsísmicos para un mapa de Fracturación Hidráulica Horizontal [4]

El interés inicial en la perforación direccional controlada, surgió como una necesidad de recuperación de pozos cuya perforación se había bloqueado y se debían desviar sus trayectorias.
En 1930 se realizó la primera perforación direccional controlada en Huntington Beach (California, USA), accediendo desde una plataforma en tierra hasta unas arenas bituminosas en el mar. Pero realmente tuvo el reconocimiento de las Compañías Operadoras y Contratistas en 1934, cuando un pozo direccionado logró controlar un pozo eruptivo (wild well) en Texas (USA).

Los primeros tiempos y durante muchos años se utilizó en la perforación direccional, una cuña de desviación denominada: "Whipstock", que es una sección acodada que se introduce entre las paredes del pozo y el barreno y que permite desviarlo de su vertical.

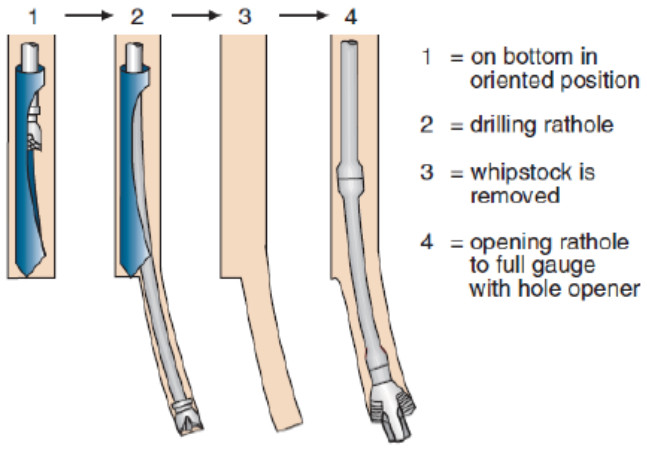


Figura 13, cuña o "whipstock" utilizado para desviar el pozo [5]

Actualmente se utilizan Sistemas Rotativos Direccionales (RSS: Rotary Steereable System) que permiten la rotación continua mientras se controla la

dirección de la broca. La herramienta posee una unidad de desviación muy cercana a la broca que aplica una fuerza sobre el barreno, por intermedio de tres patines que chocan contra la pared del pozo, desviando su dirección en forma controlada, mientras toda la barra de perforación gira.

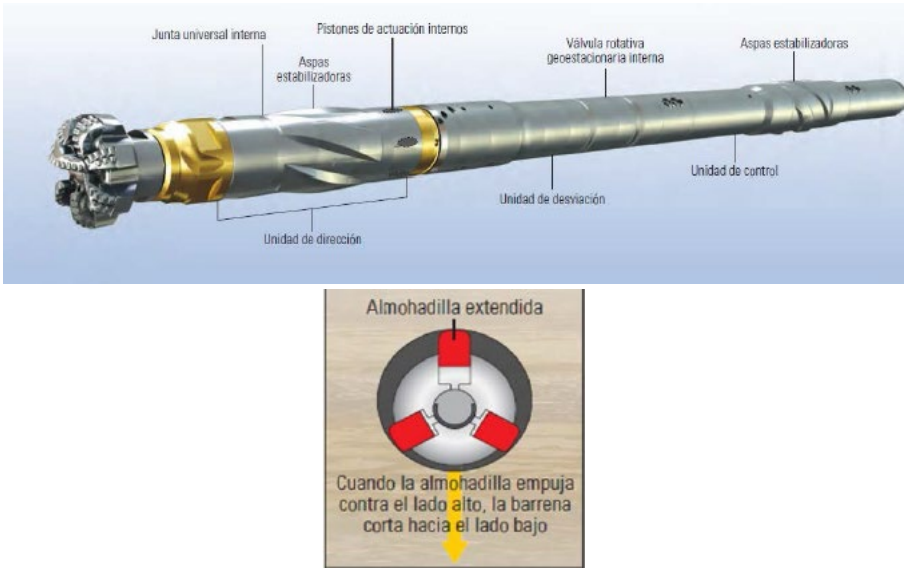
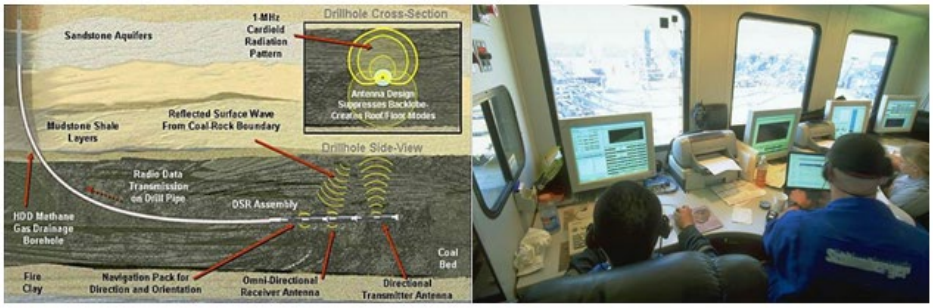


Figura 14, Sistema RSS donde el desvío del pozo ocurre sin dejar de perforar [5]

Desde la Sala de Control en la superficie del pozo, se corrige la inclinación y dirección de la perforación, gracias a los sensores (acelerómetros y magnetómetros) que posee la herramienta y que transmite en tiempo real hacia la sala de control.

En la siguiente figura se observa como un transmisor con su antena cercana a la broca, genera una onda acústica de 1 MHz de frecuencia que es reflejada en los límites físicos o paredes del estrato donde se desplaza la broca y que es recibida por los sensores del "Navigation Pack" quienes comunican los tiempos de emisión y arribo de las ondas permitiendo controlar la dirección y orientación de la perforación.



(a) (b)

Figura 15, (a) emisores y sensores en la perforación horizontal; (b) cabina de manejo y control de la perforación [5].

La formación Vaca Muerta en su zona central se encuentra en promedio a 3000 metros de profundidad y un espesor aproximado de 300 metros. Para fracturar la formación se perforan varios pozos, que generalmente comienzan

con perforación vertical hasta llegar a una profundidad cercana al tope de la formación a fracturar. Los diferentes pozos han perforado próximos en superficie (ejemplo: 10 metros de boca a boca de pozos consecutivos), pero se desvían para llegar a la profundidad de horizontalización separados lo suficiente para que las fracturas cubran el mayor espacio posible sin gran solapamiento (por ejemplo 300 metros). La extensión horizontal de los pozos perforados puede alcanzar también 3000 metros.

Entubado de pozos

El pozo debe ser entubado en toda su extensión a fin de contener las paredes descubiertas durante la perforación y sobre todo, en los primeros 300 a 400 metros, para evitar contaminación con los acuíferos de agua dulce.
Para completar la aislación, los diferentes tubos de acero instalados, deben ser cementados para solamente dejar abierto el orificio central.

En la figura 16 se observan los distintos diámetros de los caños de acero introducidos hasta llegar a la formación que se quiere explotar.

Se siguen los procedimientos del American Petroleum Institute (www.api.org), que cuenta con un programa aprobado por el Instituto Nacional Norteamericano de Normas (ANSI), que acredita una larga historia en la elaboración de normas técnicas.

La Formación Vaca Muerta de la Cuenca Neuquina, a diferencia de lo que ocurre con otras formaciones de "shale", se encuentra a una gran profundidad (promedio de 2500 metros) y alejada de todo centro urbano, evitando mayores conflictos sociales y con el medio ambiente al aplicar y supervisar las regularizaciones establecidas.

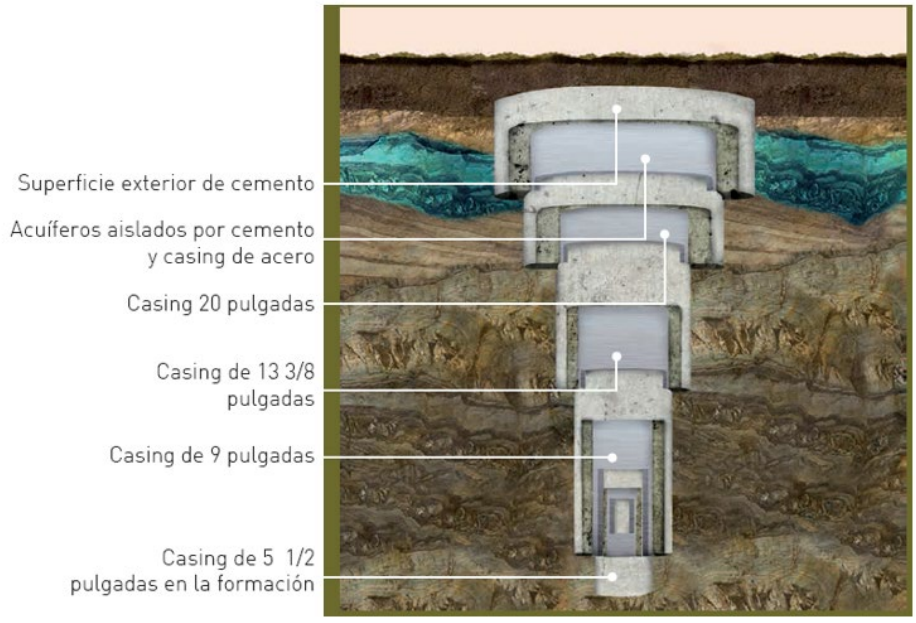


Figura 16, pozo entubado con distintos diámetros de caños de acero y cementados (IAPG) [7]

Operaciones durante la Estimulación Hidráulica

La Estimulación Hidráulica comprende múltiples y diferentes procesos. El método o procesos que describiremos se denomina "Plug and Perf" (P&P, o de entrada limitada) y es el método de fracturamiento preferido y más empleado en pozos no convencionales, que permite la estimulación hidráulica simultáneamente en varios puntos de una misma etapa punzada.

Las siguientes son las tres principales operaciones en una estimulación hidráulica en pozos no convencionales horizontales.

1. Punzado o perforación del conjunto "caño-cemento-formación".
2. Fractura de la formación por estimulación hidráulica.
3. Taponamiento de la punta del pozo y aislamiento de cada etapa.

1. Punzado de los pozos

El punzado es la etapa previa a la fractura hidráulica de la formación y consiste en perforar la tubería metálica y el cemento para penetrar en la formación. El punzado con cargas explosivas perforará el conjunto caño-cemento-formación y por los orificios generados luego se introducirá a muy alta presión, una combinación de: agua, arena y aditivos químicos para quebrar y apuntalar a la roca fracturada.

Como en el Capítulo 8, se ha tratado el tema "explosivos", consideramos conocido el tema partiendo ahora del moldeado del explosivo para armar "cargas huecas".

También el punzado es muy importante para la Microsísmica, ya que permitirá conocer la velocidad promedio del subsuelo (desde el lugar del evento hasta la superficie), por conocimiento con bastante precisión el tiempo de inicio de la explosión (T0), y los tiempos de arribos a los geófono de boca de pozo (upholes) y a cada estación receptora de las líneas sísmicas 3D. El procesamiento de los tiempos obtenidos nos permitirá obtener una buena ley de velocidad promedio Vp.

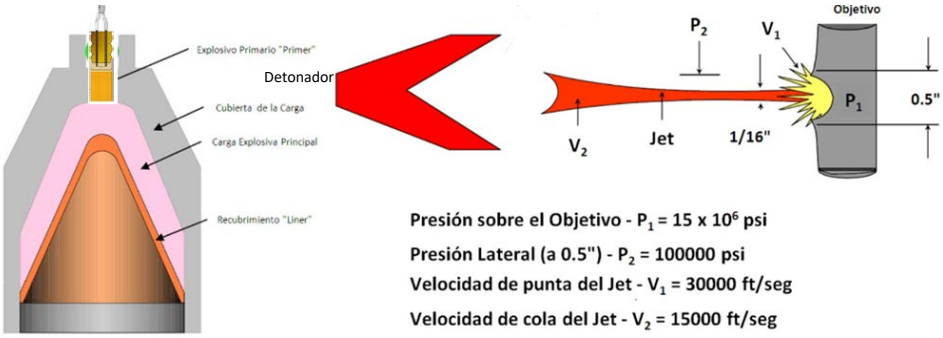
1.1 Cargas explosivas moldeadas

Los explosivos (por ejemplo el TC 53) se moldean para que generen una detonación muy direccional y potente para la mejor penetración en el punzado de los pozos, según el tipo de operación realizada. En la siguiente tabla se muestra la terminología que Halliburton emplea para sus cargas moldeadas:

TIPOS DE CARGAS DE PENETRACION PROFUNDA	
DP	Deep Penetrating
SDP	Super Deep Penetrating
DP/LD	Deep Penetrating /low debris
Millennium charge	Trade Name Premium DP
dominator charge	Trade Name Special DP
TIPOS DE CARGA DE AGUJERO GRANDE	
BH	Big Hole
BH/LD	Big Hole/low Debris
SH	Super Hole
SH/LD	Super Hole/Low Debris
Mirage charge	Trade Name Special BH/LD
Excalibre Charge	Trade Name Hybrid BH/DP for Dual Casing Applications

Figura 17, Terminología de las formas del moldeado de cargas según Halliburton

La siguiente figura corresponde a una carga hueca tipo "DP", donde en (a): se muestra como fue moldeado el explosivo identificándose los demás componentes, y en (b): como se genera el "Jet" de gases y partículas, al explotar la carga.



(a) (b)

Figura 18, (a) Carga Perforante DP; (b) Velocidades y presiones aproximadas del Jet [8]

La carga hueca DP posee la forma mostrada en la figura 18(a), donde el explosivo principal (TC53, por ejemplo) se encuentra comprendido entre la Cobertura de Acero de la carga explosiva y el Recubrimiento o "Liner" constituido por una placa de Cobre o Cobre-Plata. Cuando se produce la detonación, el Explosivo Principal en su expansión, presiona y colapsa al "Liner" pulverizándolo y cuyas partículas convergen a lo largo de un eje cónico formando un "Jet" de muy alta velocidad (llegando a superar los 9000 m/s), generando una presión puntual entre 3 – 15 * 10^6 psi. Debido al gradiente de velocidad del Jet entre su base y su punta, se genera su alargamiento y mejor penetración en el objetivo.

Las cargas moldeadas son contenidas en tubos de acero de paredes gruesas que soportan las explosiones y que pueden ser luego re-utilizados. Estos tubos se los denominan: "Portadores Huecos" o simplemente: "Cluster de Cañones".
Los portadores de cargas huecas o Clusters, descargan el "Jet" a través de los Tapones Plásticos atornillados, lo que permite recuperarlos para volver a cargarlos posteriormente. Generalmente las cargas empleadas no son mayores a 30 gramos de explosivos.

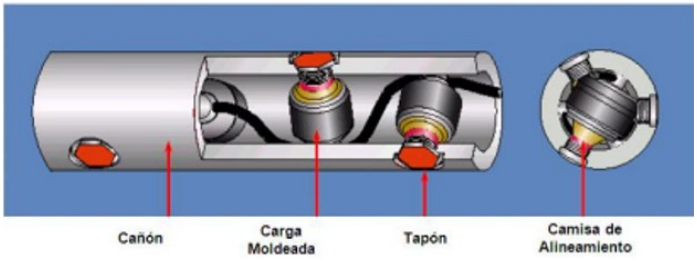


Figura 19, Cluster o cañón de 3 cargas explosivas desfasadas 120 grados [8]

En función de las necesidades de fractura de la formación, toda la longitud de los pozos horizontales a estimular, se dividen en etapas y en cada una de esas etapas se punzarán varias veces, por ejemplo 10 veces y por lo tanto se deben preparar en superficie 10 Clusters (generalmente separados 30 cm uno del otro), para que no se tenga que subir y bajar las barras de los pozos una y otra vez. Por ejemplo, si la longitud del pozo horizontalizado es de 2000 metros y se divide en 28 etapas de fracturación, cada etapa abarcará una longitud de 70 metros y entonces se ejecutarán 10 punzados igualmente distribuidos en cada etapa, donde se deberán desplazar los cañones "7 - 0.3" metros luego de cada punzado hasta completar la etapa y subir los "clusters" explotados para su recarga.

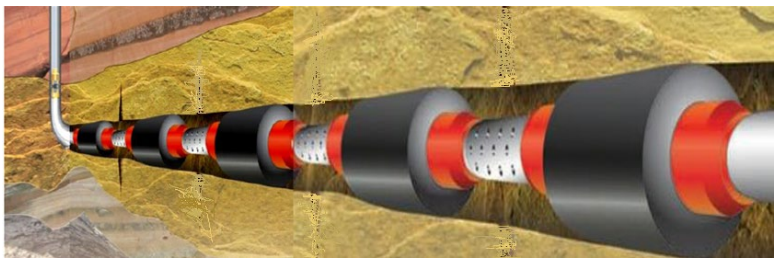


Figura 20, se muestran 5 Clusters, 4 ya disparados y el último disparándose en la última etapa [1]

Como producto del cañoneo o punzado, los ductos perforadas contendrán gran cantidad de escombros (debris) que pueden afectar seriamente a la inyectividad de fluidos en el pozo y que deben ser removidos. La estimulación hidráulica posterior al punzado, lavará parcialmente los escombros y los ácidos y otros componentes químicos contenidos en el fluido de bombeo, accionarán para disolverlos.

2. Fracturación Hidráulica

Una vez realizado el punzado de una etapa, se retira la cadena de Clusters y se procede a la Hidrofractura de la formación, que consiste en inyectar un 98% de agua dulce a gran presión, conjuntamente con gran cantidad de agente de sostén o de apuntalamiento (en inglés: "proppant") y un 2% de aditivos químicos.

Los productos agentes de sostén más comunes son:

- Arena.
- Arenas recubiertas en resina (curado completo).
- Cerámicos.
- Bauxitas.



Figura 21, diferentes tipos de agentes sostén [11]

La arena, es el agente de sostén más económico y generalmente provee suficiente conductividad de fractura para presiones de cierre menores a 8.000 psi, según sea la malla designada para la fractura hidráulica. Su gravedad específica es cerca de 2,65. La utilización de arenas nacionales bajan considerablemente los costos involucrados en el proceso de fracturación, al no tener que importar miles de toneladas de arenas del exterior, ya que cumple con las especificaciones recomendadas internacionalmente a excepción de la redondez, cuya norma internacional posiblemente debería adaptarse a los resultados prácticos obtenidos con las arenas nacionales.

La preparación del fluido de fractura es una tarea muy importante porque deberá transportar el agente de sostén (en nuestro caso arena nacional) e introducirlo en la fractura de la roca para sostener la fractura luego de finalizar el bombeo del fluido.

Aproximadamente 12 componentes químicos son utilizados para: que no se pierda demasiada presión por rozamiento en las cañerías del pozo, para diluir

las partículas metálicas que quedaron en el camino de las perforaciones realizadas (debris), para mantener la viscosidad del agua a alta temperatura, etc. Todos los fluidos introducidos son recolectados al final del proceso durante el reflujo producido al retirar o al absorberse los tapones utilizados para separar las etapas y aproximadamente un 60 % pueden ser re-utilizados en próximas fracturas y el resto introducido en pozos profundos para su depósito final.

Cada compañía de servicios posee su propio método de preparación del fluido de fractura pero el más empleado es el denominado **"Slickwater"** (agua resbaladiza) que permite transportar granos de arena más finos al bajar su gravedad específica permitiendo aumentar la concentración de este agente de sostén y la cantidad y velocidad del fluido que lo transporta.

Por ejemplo: si la formación es gasífera, se podrá utilizar un agente de sostén de Malla 100 (indica que los granos de arena serán de un diámetro aproximado de 0,150 mm o 0.0059 pulgadas) y podrán ser bombeados a una taza de 70-90 bpm (barriles por minuto; 11-14 metros cúbicos por minuto) introduciendo 227.000 kg (500 Klb) de arena por etapa fracturada.

La siguiente figura explica los acontecimientos que ocurren durante la estimulación hidráulica de una etapa:

- Al inicio del bombeo hidráulico, la presión sube hasta que se fractura la formación (**Presión de ruptura**). Durante el bombeo la presión en el fondo del pozo es la suma de la presión de superficie, más la presión hidrostática ejercida por la columna de agua, menos todas las fricciones del sistema. Las fricciones son estimadas según datos teóricos.

$$P_F = P_S + P_H - P_{fricción}$$

- Fracturada inicialmente la formación y durante el bombeo la presión disminuye, porque el fluido invade las fracturas generadas y se estabiliza, en un valor de presión de propagación, o de extensión, de fractura (**Pext**). Generalmente se mantiene el bombeo hidráulico 2 horas, para introducir el material de sostén (arenas) para apuntalar las fracturas abiertas.

- Cuando se interrumpe el bombeo del fluido, la presión que impulsaba el fluido baja drásticamente y tampoco hay más fricciones en el sistema, por lo tanto la presión de fondo baja y es igual a la presión de superficie más la presión hidrostática. La presión así calculada es la presión adentro de la fractura (siempre y cuando haya una buena comunicación pozo-fractura), es lo que se denomina: **ISIP**, *Instant Shut In Pressure*.

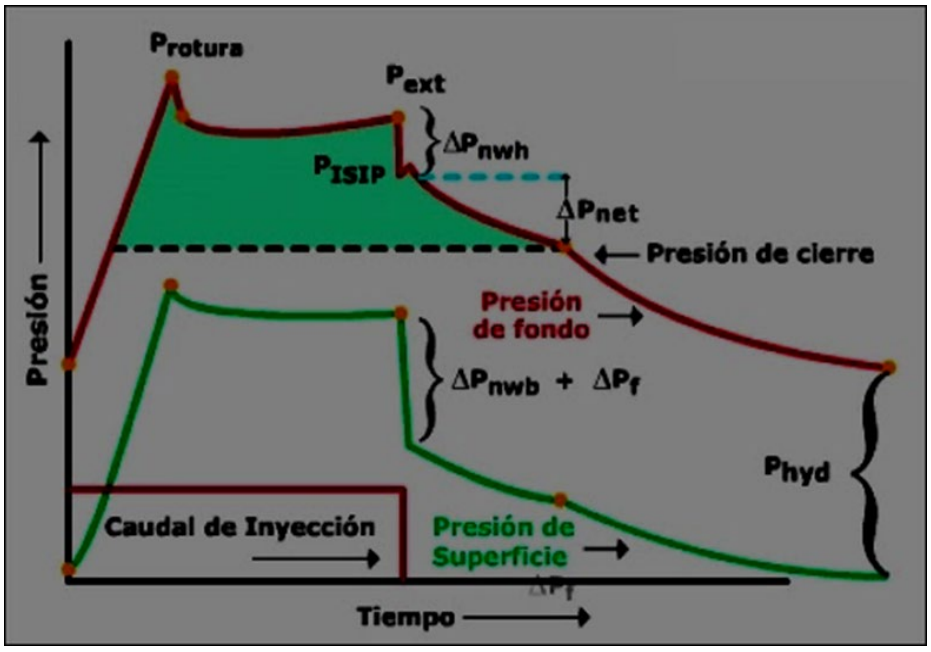


Figura 22, grafico de Presión de Fondo y Presión de Superficie vs Tiempo [6]

ISIP: es la presión medida inmediatamente después de finalizada la inyección y proporciona una medida de la presión en la fractura en el pozo mediante la eliminación de las contribuciones de la fricción del fluido.

- Cuando se para el bombeo, el fluido que se encuentra en el pozo pasa lentamente a la formación por efecto de la perdida de fluido (*leak off*), lo que implica una disminución de la presión. Aquí el agente sostén o contenedor (arenas), deberá detener el cierre de las paredes de la fractura, si no existiera agente sostén, si estos no fueran efectivos, la fractura se cerraría a una **Presión de Cierre**.

- Después de este momento el fluido que invadió la vecindad de la fractura sigue difundiéndose en el reservorio y la presión sigue disminuyendo hasta estabilizar en la presión de reservorio. El mecanismo de disminución de presión cambia, y el punto de cierre puede ser visto como un quiebre en la pendiente de la presión.

La Presión Neta representa la diferencia entre la presión dentro la fractura y la presión de cierre (ISIP – P.Cierre = Presión Neta). Físicamente es la presión que se necesita para que la fractura quede abierta y se propague. Si la presión neta es cero es porque la fractura está cerrada. Podríamos considerar un valor promedio de 700 psi para la Presión Neta para mantener abierta la fractura.

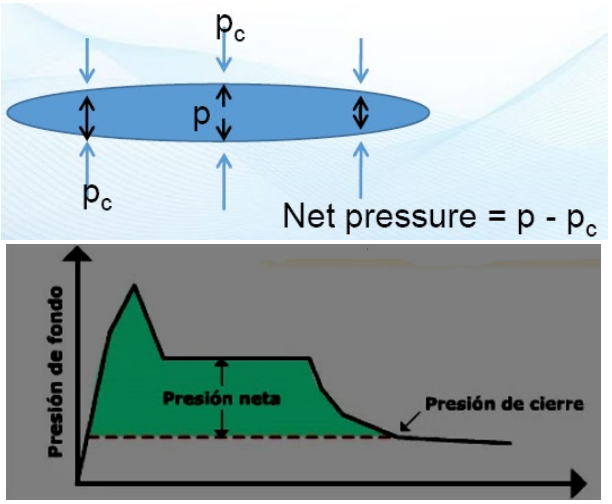


Figura 23, Presión Neta es la diferencia entre la presión exterior e interior de la formación [6]

Las fracturas hidráulicas se propagan muchos más extensamente en sentido horizontal (150-200 metros) que en el vertical (80 metros).

Otras consideraciones durante la fracturación de la formación:

a) Previo a la fractura el fluido de la formación ejerce una presión radial sobre el pozo.

b) Una vez fracturada un área horizontal y simétrica alrededor del pozo, toda la zona afectada fluirá verticalmente y se generará una presión axial.

c) Agotadas las capas de fluidos quedará una remanencia de presión sobre los extremos de los límites del área fracturada.

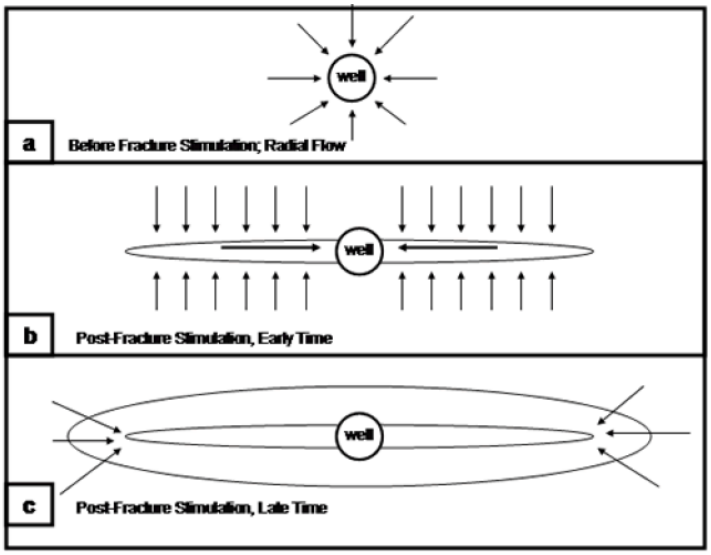


Figura 24, diferentes presiones de la formación en función de la operación y tiempo [1]

Lo ocurrido durante una estimulación hidráulica real de una etapa, es reportado y graficado por la Compañía de Servicios a su Cliente.
El siguiente gráfico muestra lo sucedido entre las 10:50 y las 13:10 horas, midiéndose: Presión (psi) de fondo, Caudal del Fluido, Concentración de Arena, Introducción de Aditivos.

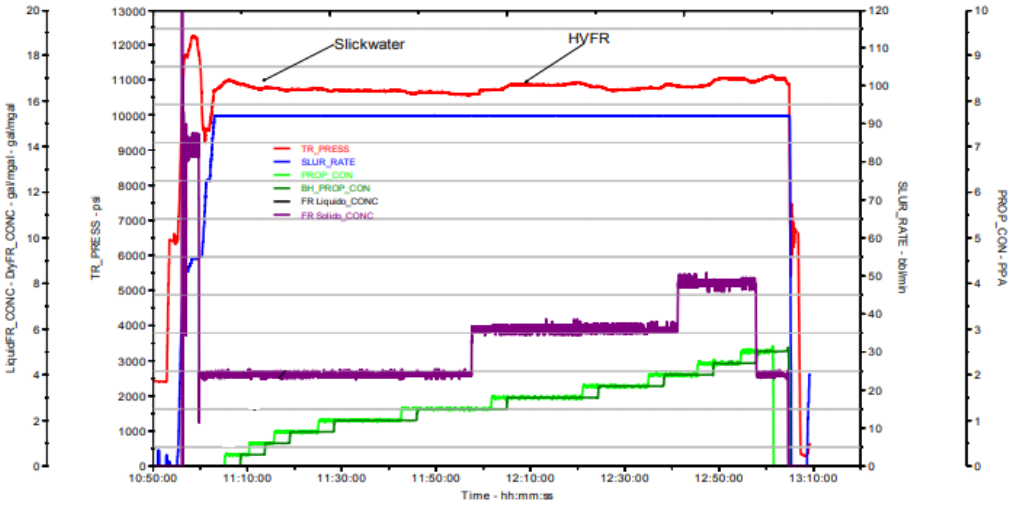


Figura 25, resultado gráfico obtenido luego de una fractura de una etapa [1]

- La presión de fondo, a las 10:50 hs, llegó hasta las 12.000 psi y fracturó la formación Vaca Muerta.

- La presión baja y se estabiliza a Pext ~10.500 psi hasta que se interrumpe el bombeo y baja a la P_{ISIP} ~ 6500 psi.

- El agua con aditivos es bombeada a un promedio de 90 bbl/m (90 barriles por minuto) desde las 11 hasta las 13 horas cuando se interrumpe el bombeo (Slur Rate, curva azul). El volumen aproximado de agua más aditivos bombeados fue de:

  90 bbl/m * 159 litros/bbl * 120 m = 1,72 Mlitros = 1720 m^3

  Referencia: una pileta olímpica se carga con 2500 a 3000 m^3 de agua.

- La arena natural o "elemento de sostén" (proppant) introducido con el fluido, posee una concentración inicial de ~ 0.4 pp/a y se va incrementando en ~ 0,2 pp/a en intervalos de tiempos variables que van desde 3 a 20 minutos controlado para una mejor distribución a medida que se fractura la formación.

- El total de arena introducida en esta etapa fue de: 5930 bolsas (1 bolsa = 44 Kg).

  5930 * 44 = 261.000 kg

  PPA: contenido de arena en libra masa sobre volumen de fluido que la transporta. Por ejemplo 0.4 PPA = 23.000 Kg de arena en 56.000 litros de agua.

- Para reducir la fricción de la arena (proppant), se introduce también un aditivo FR (Friction Reducer) desde las 12 horas, para luego aumentar su concentración con nuevos aditivos HVFR (High Viscocity Friction Reducers) al aumentar la concentración de arena en el fluido.

3. Taponamiento de las etapas de Fracturas

Una vez finalizada la fractura de una etapa, es necesario aislar el tramo fracturado para poder proceder con la etapa (tramo) siguiente. Para realizar este aislamiento es necesario utilizar "tapones" que obstruyan el paso de fluidos hacia la etapa fracturada. Estos tapones son bajados hasta la sección horizontal de la etapa del pozo fracturada mediante bombeo hidráulico y en su posición son asentados contra las paredes mediante un comando eléctrico que los hace expandir. La hermeticidad se logra bombeando y desplazando una bola que se asentará en el tope del tapón.



Figura26, distintos tipos de tapones de aislamiento [13]

Actualmente se utilizan tapones solubles, donde el cuerpo y su respectiva bola, están hechos de material que se disuelve completamente en el fluido del pozo (agua dulce), eliminando el proceso de molienda comúnmente requerido con tapones convencionales y todos los costos y los riesgos operacionales que esto representa. Depende del tipo de tapón soluble el tiempo en el que el tapón se disuelve (48, 72 horas, etc.).
La operación de aislamiento con moderada frecuencia suele fallar y recién se comprueba cuando se intenta estimular hidráulicamente el tramo punzado y la presión de fondo cae por pérdida en el tapón; en este caso debe repetirse la operación de taponamiento.

Temores por la sismicidad generada durante la Estimulación Hidráulica

El temor de la fracturación y/o inyección de fluidos dentro de una formación profunda, ha y sigue siendo motivo de verdaderas discusiones y conflictos. Los terremotos de cualquier magnitud generan pánico en la población y la actividad que nos ocupa tiene posibilidades de generar micro terremotos sensibles a los sentidos humanos en superficie.

Como antecedente-ejemplo, Peter Duncan muestra que sucedió en 1962 en un Arsenal militar enclavado en las Montañas Rocallosas, donde se inyectaba residuos tóxicos en una formación de un pozo a 3671 metros de profundad. En un área de 8 Km alrededor del pozo se produjeron 700 terremotos de distintas intensidades entre 1962 y 1963, llegándose a producir 40 terremotos en el mes de marzo de 1963, asociándolos a la inyección en el pozo. Durante 1964 se suspendió la inyección en el pozo y los terremotos pasaron a tener un promedio mensual menor a 10.
Durante 1965 se volvió a inyectar fluidos en el pozo (máximo volumen de inyección: 9 millones de galones por mes) y la cantidad de terremotos se incrementó hasta llegar a 80 por mes, que podría corresponder al pico de inyección.

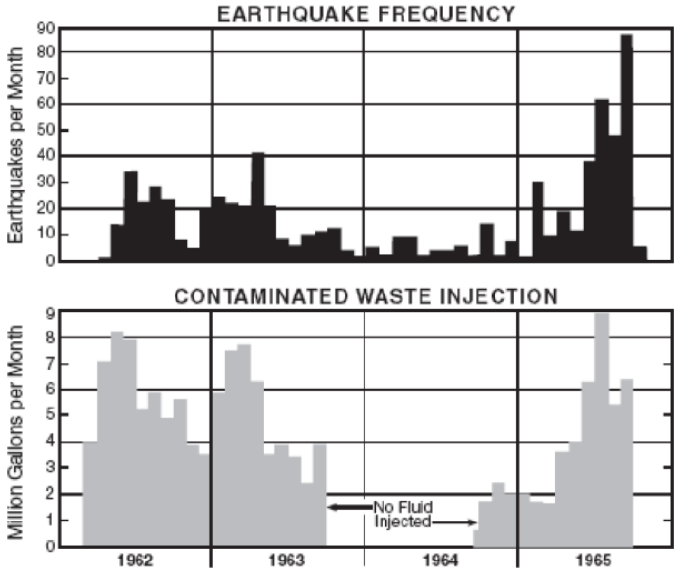


Figura 27, sismos producidos por inyección de fluidos a 3671 metros de profundidad en USA [1]

Para conocer las posibles consecuencias de los microsismos (o sismos) generados durante la estimulación hidráulica, se miden y se comparan estos con eventos ya conocidos mediante: la energía irradiada en Kilo-Julios y la Magnitud de Momento provocado.
La Magnitud de Momento es una magnitud logarítmica que se utiliza para medir terremotos y que supera los valores que mide la escala de Richter.

La siguiente tabla compara los distintos eventos en orden de magnitudes e indica que los valores correspondientes a Magnitud de Momento en

diferentes microsísmicas (a diferentes profundidades, sobre diferentes rocas, etc) se encuentran: entre -4 y 0,5 que corresponden a las más bajas de las energías de dicha tabla.

Magnitud Momento /	Energía (KJ) /	Evento
-3.5	0.00035138	
-3	0.00197829	
-2.5	0.01113778	
-2	0.06270569	
-1.5	0.35303305	
-1	1.98757607	
-0.5	11.19005329	
0	63.00000000	
0.5	355.00000000	
1	1998.65000000	
1.5	11252.39950000	
2	63351.00918500	
2.5	356666.18171155	
3	2008030.60303603	

Acontecimiento
Presionar una tecla de la PC
Latido del corazón
Caida de una manzana desde 2 metros
Explosión de un pequeño cañón de aire comprimido
Potente tiro de piedra con gomera
Explosión de un petardo
home-run hit
Disparo de un rifle calibre 0,5
Explosión de 15 gramos de TNT
Choque de un coche a 56 km/h
1 kg de dinamita
Bomba convencional de la 2da. Guerra Mundial
Explosión en cantera
Caida de un rayo
57 litros de gasolina

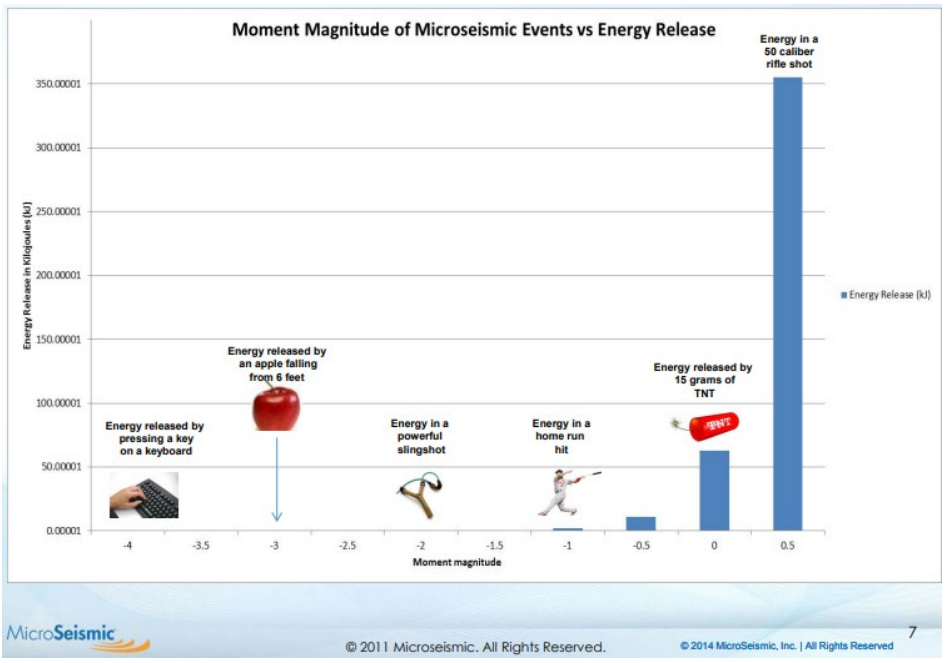


Figura 28, grafico comparativo de eventos de la Tabla anterior [1]

Bibliografía consultada:

1. *Interpretación del curso dictado por Peter M. Duncan en Buenos Aires, auspiciado por el AAGGP y UGA Seismic.*
2. *Full Wave Imaging of Downhole Microseismic; using all the data, by Peter M. Duncan, February 2015.*
3. *Applied Seismology Consultant (ASC), an Itasca International Company.*
4. *Microsísmica ESG Solution.*
5. *Ingeniería de la Perforación de Pozos de Gas y Petróleo, Volumen IV: Técnicas de Perforación Direccional de Pozos – Juan Herrera Heber, Universidad Politécnica de Madrid- España (2020).*
6. *Propiedades de la Mecánica de Roca aplicada al Fracturamiento Hidráulico, M. Madrid Ing en Petróleo Universidad de Oriente, Venezuela, portaldelpetroleo.com.*
7. *Fractura Hidráulica, Fracking, Informativo IAPG.*
8. *Punzados Tecpetrol.*
9. *Analogía entre la Formación Vaca Muerta y Shale Gas/Oil Plays de EEUU Andres Askenazi, Pedro Biscayart, Matías Cáneva, Soledad Montenegro y Marcos Moreno, YPF S.A. SPE International.*
10. *Ingenieros Juan Longhino y Juan Palandri, compartiendo experiencias y procesos.*
11. *Arenas más allá del acatamiento a las normas, por Victoria Florencia Peñaranda (Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo),*
12. *Informe de Estimulación por Fractura Hidráulica en Formaciones no convencionales. Experiencia sobre Vaca Muerta. Ingeniera Miriam Skalany, Dirección de Protección Ambiental, Gobierno de Mendoza 2018.*
13. *Tecnología de tapones solubles y tecnologías de fibra óptica combinada con coiled tubing, Petrotecnia .6 -2018.*

14 ANEXO "A": CONCEPTOS BÁSICOS Y UNIDADES

FUERZA vs. PESO

Muchas veces los diferentes "Sistemas de Medidas", ayudan a generar confusión cuando nos referimos a las especificaciones del Vibrador, no permitiendo entender fenómenos sencillos.
Las "Leyes de Newton" permiten definir el concepto de "Fuerza", de allí que la unidad de medida de fuerza en el Sistema "MKS" y "SI" llevan su nombre:

Primera Ley de Newton:
"Para que un cuerpo se mueva de su posición de equilibrio, debe de ejercerse sobre él una Fuerza".
Consecuencia: De no existir fuerza, no existiría movimiento.

Segunda Ley de Newton:
"Una fuerza "F" aplicada a un cuerpo de masa "m", le comunica a este una aceleración de magnitud "a" de la misma dirección y sentido".

$$F = m * a$$

Consecuencia: La Fuerza y la Aceleración son magnitudes vectoriales. Es decir tienen: Amplitud, Dirección y Sentido. En cambio la Masa, es una magnitud escalar y posee solamente Amplitud.

Tercera Ley de Newton:
"A toda fuerza (acción) se le opone siempre otra fuerza (reacción) de igual amplitud y dirección pero de sentido contrario"
Consecuencia: Todo cuerpo inercial se encuentra en equilibrio dentro de la naturaleza (con criterio restringido y no relativo).
La "Ground Force" es la fuerza de reacción del terreno sobre el que apoya la plancha del vibrador, a la fuerza generada por el vibrador.

Definición de Peso:
"Es la Fuerza a la cual es sometido un Cuerpo de Masa "m", por acción de la Gravedad Terrestre. Por lo tanto la gran masa de la Tierra "M" le ocasiona a todo cuerpo terrestre de masa "m" una aceleración de valor "g" (aceleración gravitatoria, cuyo centro de aplicación es el Centro de la Tierra).
De acuerdo a la Segunda Ley de Newton:

$$\textbf{Peso (Weight): } W = m \times g$$

Donde:
"W": es el Peso que se mide en "Newton" en el Sistema M.K.S.
"m": es la Masa del Cuerpo que se mide en "Kilogramos" en el Sistema M.K.S.
"g": es la Aceleración Local de la Gravedad Terrestre que se mide en "metros / segundos2"

El Sistema M.K.S. (Metro, Kilogramo, Segundo) o simplemente SI (Sistema Métrico), es el que se ha prácticamente constituido en el "Sistema de Medida Internacional" (SI). Debemos recordar que con el valor escalar "kilogramos" se está definiendo la "masa de un cuerpo" (invariable de la posición en el universo que ocupe), pero que el vector "Peso" (expresado en Newton), dependerá del valor de la "Aceleración Local de la Gravedad" (un mismo cuerpo pesa distinto en dos posiciones distintas).
Generalmente para definir el peso teórico de un cuerpo, se emplea el valor de la aceleración de la Fuerza Gravitatoria Promedio a Nivel del Mar: (g = 9,81 m /seg2). En este caso y por tratarse de una constante, definimos el peso de cualquier cuerpo físico por el valor en kilogramos, es decir por el valor de su masa. Pero cuando necesitemos comparar fuerzas, no debemos olvidar utilizar los valores en "Newton" del sistema MKS.

El "Sistema de Medidas Americano" utiliza la misma medida "Pound: lb." tanto para Fuerza como para el Peso y por lo tanto se hace más sencillo manejar las ecuaciones de fuerzas presentes en el estudio del Vibroseis. Por lo tanto trabajaremos con ambos sistemas de medidas, para familiarizarnos con ellos ya que la bibliografía existente la continua mezclando.
Ejemplo:
Dados los siguientes valores para las masas del sistema de actuación de un vibrador AHV –362, averiguar sus pesos en "Newton" y en "Pounds"

Masa de Reacción (RM): 3505 Kg.
Baseplate (BP): 1694 Kg

1 Newton = 4,45 lb.

Peso RM = 3505 Kg * 9,81 m / seg2 = 34.384 Newton = 34,38 kNewton = 7728 lb.

Peso BP = 1694 Kg * 9,81 m / seg2 = 16.618 Newton = 16,62 kNewton = 3735 lb

HIDRAÚLICA BÁSICA

Presión: P = Fuerza Aplicada [Newton] /Área de aplicación [m2]

Presión hidrostática Ph = Peso x altura = Peso x h = ϱ g h
(Ejercida por una columna de fluido de densidad: "ϱ" y altura "h")

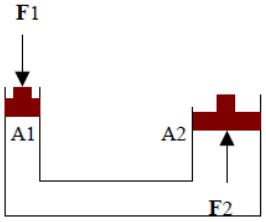
Densidad de un cuerpo: ϱ = Masa [kg] / Volumen [m³]
Por definición se determina que la densidad del agua es de: ϱa = 1000 kg/m³

Peso Específico de un cuerpo: γ = Peso [Newton] /Volumen [m³]

Conociendo la diferencia entre Masa y Peso: γ = ϱ x g
Siendo "g" el valor de la aceleración de la gravedad terrestre al nivel del mar

Principio de Pascal

"La presión exterior en un punto de un fluido (líquido o gaseoso), se transmite por igual en todas direcciones."



Pressure 1 = Pressure 2

$$\frac{\text{Force 1}}{\text{Area 1}} = \frac{\text{Force 2}}{\text{Area 2}}$$

Principio de Arquímedes

"Todo cuerpo total o parcialmente sumergido en un fluido, experimenta un empuje de abajo hacia arriba, igual al peso del volumen de fluido que desaloja"

Ejemplo:

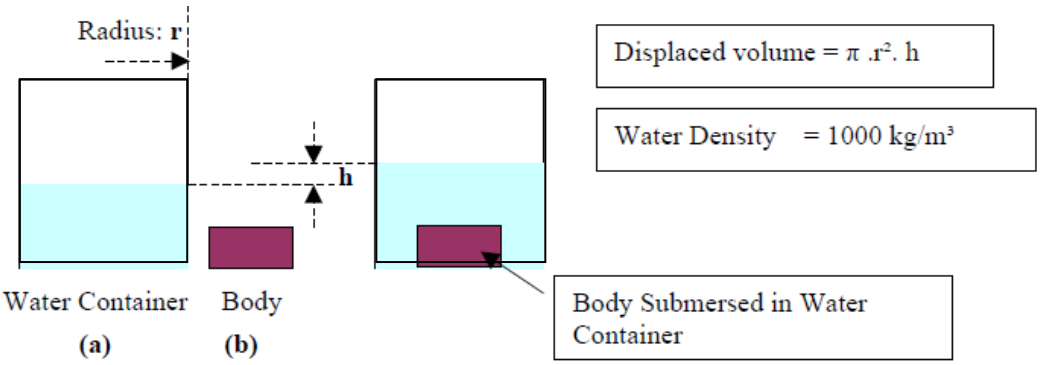
Un recipiente cilíndrico de Radio "r" de 0,5 metros, contiene agua al nivel mostrado en (a), luego se sumerge un cuerpo sólido y el nivel se incrementa al mostrado en (b) (diferencia de niveles entre (a) y (b): "h" = 0,3 metros)

Pregunta: ¿Cuánto pesa el cuerpo sumergido?

Volumen desalojado = 3,14 x 0,25 m^2 x 0,3 m = 0,235 m^3

Densidad del agua: ϱa = 1000 Kg / m^3 = [masa / volumen]

Masa = ϱa x volumen = 1000 x 0,235 = 235 Kg



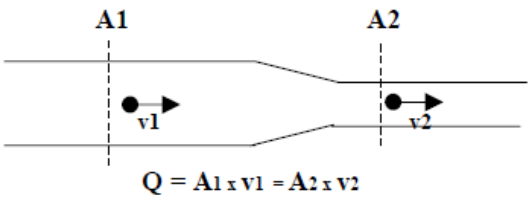
Ecuación de Continuidad en Fluidos en Movimiento

"El caudal permanece invariable sí sobre un circuito hidráulico se varia el espesor de su tubería"

En el esquema mostrado la velocidad "v2" deberá ser mayor que la "v1" en valor igual a la diferencia en las áreas (A1 = n * A2, entonces v2 = n * v1)

Caudal Hidráulico: Q = Área tubería x velocidad del fluido = Volumen transportado /segundo

En el esquema mostrado la velocidad "v2" deberá ser mayor que la "v1" en valor igual a la diferencia en las áreas (A1 = n * A2, entonces v2 = n * v1).



Flow rate: Q = Area x velocity [m^3 /sec]

Teorema de Bernoulli

"En un fluido perfecto (sin rozamiento interior), incompresible y en régimen estacionario, la suma de las energías: de presión, cinética (o velocidad) y potencial (o de altura) en cualquier punto de la vena líquida es constante".

Energía = Fuerza*distancia = Presión*Área*distancia = Presión* Volumen = Presión*Masa / Densidad

Porque:

$$F = P*A$$

Volumen = Área x distancia, $V = m / \varrho$)

$P1\ m/\varrho + ½\ mv1^2 + mgh1 = P2\ m/\varrho + ½\ mv2^2 + mgh2$

Dividiendo todo los miembros por: m / ϱ

$$\mathbf{P1} + ½\ \varrho\ \mathbf{v1^2} + \varrho\ \mathbf{g}\ \mathbf{h1} = \mathbf{P2} + ½\ \varrho\ \mathbf{v2^2} + \varrho\ \mathbf{g}\ \mathbf{h2}$$

Useful Equivalences of Units of Measure

Units of Length, Distance, or Displacement

1 meter	39.37 inches (")	3.28 ft (')
1 inch	2.54 centimeters	
1 foot	30.48 centimeters	

Units of Area or Surface

1 square centimeter	0.155 square inches
1 square inch	6.452 square centimeters

Units of Volume

1 liter = 1,000 cubic centimeters	0.264 gallons
1 gallon	3.785 liters

Units of Mass

1 kilogram	2.205 pounds (mass)
1 pound (mass)	0.453 kilograms

Units of Force

1 Newton	0.225 pounds (force)
1 pound (force)	4.45 Newton

Units of Pressure

1 kilopascal	0.145 psi (pound / sq. inch)	1000 Newton / cubic meter

1 psi (pound / sq. inch)	6.89 kilopascal
1 atmosphere	101.325 kilopascal
1 bar	100 kilopascal

LA ONDA SINUSOIDAL

Señal:

Descripción de cómo un parámetro varia con respecto a otro parámetro. En nuestro caso todas las señales son funciones del tiempo en estado permanente, es decir que para cada instante "t", existe un determinado valor específico de dicha función y libre de transitorios.

Sistema:

Cualquier proceso que produce una señal de salida en respuesta a una señal de entrada.

Sistema lineal:

Es el sistema que cumple con 2 propiedades matemáticas en forma obligatoria y una tercera opcional:

- 1) Homogeneidad: La multiplicación de la entrada x(t) por una constante "K" corresponde al cambio de la salida y(t) por la misma constante:

$$K*x(t) \rightarrow K*y(t)$$

- 2) Aditividad: La suma de dos señales de entrada produce la suma de las señales de salidas:

$$x_1(t) + x_2(t) \rightarrow y_1(t) + y_2(t)$$

- Corrimiento de Fase Invariante (opcional): si la fase de la señal de entrada es modificada, la fase de la señal de salida se modifica en igual fase:

$$x(t + s) \rightarrow y(t + s)$$

Señal de Entrada Vibracional

La sinusoide

Si el vibrador vibra en una única frecuencia sinusoidal, la señal de entrada x(t) será representada por la siguiente expresión trigonométrica del tiempo:

$$\mathbf{x(t)} = A.\ \text{sen}\ (w\ t + \theta)$$

Donde :

A : Amplitud pico o máxima de la señal sinusoidal (Radio Vector)
w = 2 π f: Velocidad Angular con que gira el radio vector "A"
θ: Fase Inicial del Radio Vector para "t = 0 " (al inicio del tiempo del fenómeno)

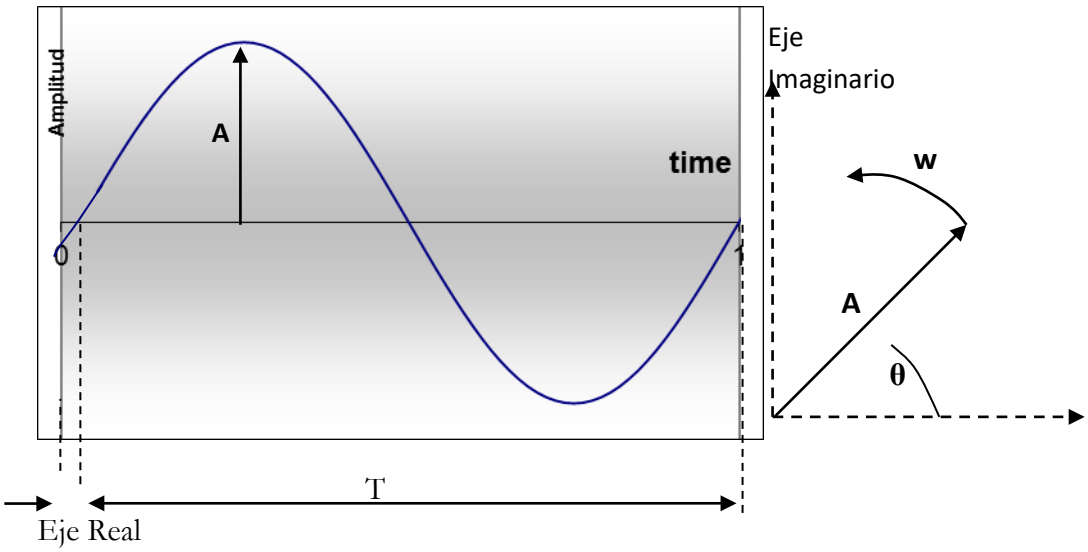


Figura 11: Onda Sinusoidal, (a) Amplitud vs. Tiempo; (b) Diagrama Vectorial

Por lo tanto para una fuente de energía vibracional de una única frecuencia, la Convolución quedará expresada como:

(VIII) $\quad y(t) = Ax.\text{sen}(wot + \theta x) * h\ (t)$

La Transformada de Fourier de x(t) es :

X(f) =`Transformada [Ax. Sen (wot + θx)] = Ax. Cos (wot + θx)

Donde:

Espectro de Amplitud de X(f) = |X(f)| = **Ax**

Espectro de Fase: argumento X(f) = **θx =** Δt.w

Para esta sencilla señal de entrada sinusoidal podemos dibujar los Espectros de Amplitud y Fase de X(f).

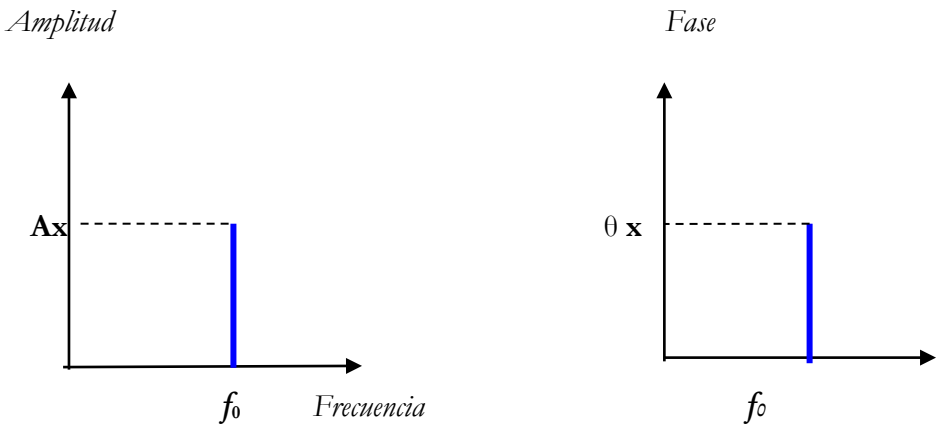


Figura 12: Espectro de Amplitud y de Fase de x(t) = Ax .cos(w₀t + θ x)

La Transformada de (VIII) es: Y(f) = X(f) x H(f)

Ya se puede deducir que:

"La señal de salida y(t) también será sinusoidal y de la misma frecuencia "fo" que la señal de entrada" (considerando que la respuesta del terreno es lineal e invariante en el tiempo y que no se exceden sus límites elásticos)

La Amplitud y la Fase serán alteradas por la Función Transferencia:

(IX) $Y(f) = \underbrace{|\,H(f)\,|\,.\,Ax}_{\mathbf{Ay}}\,.\,\text{Coseno}(\underbrace{wot + \theta x + arg}_{\boldsymbol{\theta y}})$

| H(f) | : es la amplitud de la función transferencia

arg.[H(f)] : la fase de la función transferencia

Por lo tanto la señal de salida quedará después de aplicarle la Transformada Inversa de Fourier:

$$y(t) = Ay\,.\,\text{sen}\,(wot + \theta y)$$

Como vemos la señal recibida es también sinusoidal, con la misma frecuencia (f_0) que la sinusoide emitida pero su amplitud y fase se han modificado.

Seguramente si pensamos geofísicamente, la amplitud de la señal recibida "Ay" es menor que la emitida "Ax" ya que el terreno se comporta como un atenuador de energía y que a su vez modifica la fase de la señal de entrada en "arg.[H(f)]".

ANEXO B: BROCHURES Y ESPECIDICACIONES DEL INSTRUMENTAL SÍSMICO

GEÓFONO SMT-24

SM-24 ST Upright Geophone

Where Quality Data Starts

Features



- Standard specification, low-distortion geophone
- Extended spurious over 240 Hz, allowing full bandwidth at 2-ms sampling
- Backwards compatible with SM-4 and SM-4 LD Superphone™ range
- 3-year non-prorated warranty

The SM-24 ST Upright geophone element is designed to offer cost effective performance in seismic exploration based upon field-proven I/O Sensor technology. Low distortion, combined with durable specifications, provide high-fidelity data in 2-D and 3-D surveys. The extended bandwidth allows the full potential of 2-ms/24-bit recording systems to be realized.

Applications: 2-D & 3-D seismic exploration with bandwidth from 10 Hz up to 240 Hz.

Implementation: Can be installed in a variety of I/O Sensor geophone cases.

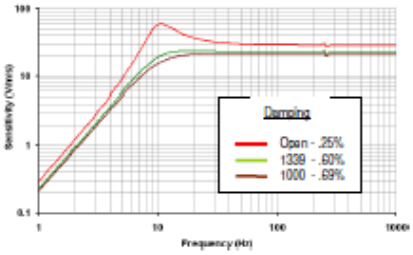
I/O

SENSOR Nederland b.v.

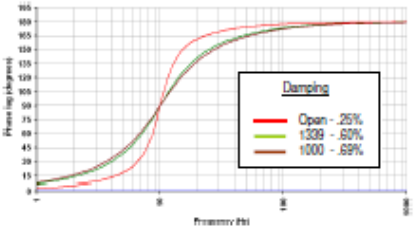
Specifications: SM-24 ST Upright Geophone

Frequency		
Natural frequency	10 Hz	
Tolerance	± 5%	
Maximium tilt angle for specified Fn	10°	
Typical spurious frequency	>240 Hz	
Distortion		
Distortion coil to case velocity with 17.78mm/s (0.7 in/s) p.p.	<0.1%	
Distortion measurement frequency	12 Hz	
Typical distortion (string of 12 in series, measured at 12 Hz)	0.03 %	
Damping		
Open circuit (typical)	0.25	
Damping calibratio- shunt resistance	1,339 Ω	
Damping with calibration shunt	0.6	
Tolerance with calibration shunt	± 5 %	
Sensitivity		
Sensitivity	28.8 V/m/s	(0.73 V/in/s)
Tolerance	± 5 %	
RtBcfn	6,000 Ω Hz	
Moving mass	11 g	(0.38 oz)
Max coil excurstion p.p.	2 mm	(0.08 in)
Coil Resistance		
Standard	375 Ω	
Tolerance	+/- 5 %	
Physical Characteristics		
Diameter	25.4 mm	(1 in)
Height	32 mm	(1.26 in)
Weight	74 g	(2.6 oz)
Operating temperature range	-40°C to +100°C	(-40°F to +212°F)
Warranty Period*	3 years	

Geophone Response Curve – SM-24 ST 10 Hz



Geophone Phase Lag – SM-24 ST 10 Hz



* Warranty excludes damage caused by high voltage and physical damage to the element case.

All parameters are specified at +20°C in the vertical position unless otherwise stated.

Ordering Information

SM-24 ST

SM-24ST/U-B 10 Hz 375 Ohm (upright basic unit with insulating disc) P/N 1004137

Europe
I/O Sensor Nederland bv
Fax +31 71 561 7145
Phone +31 71 560 1234

United States - Stafford, TX
Input/Output Inc.
Fax +1 281 879 3626
Phone +1 281 933 3339

England
Input/Output Inc.
Fax +44 1603 415143
Phone +44 1603 481020

Web Site
www.geophone.com
www.i-o.com

© 2006. Input/Output, Inc. All rights reserved. Information subject to change without notice.

SYSTEMA SERCEL 428

428XL Specifications

Central unit architecture

Client-server architecture: clients can be located anywhere and access server through the web. Server is connected to line interface LCI-428.

Server

Workstation :	Sun or PC desktop or laptop, depending on configuration, no screen required • Blade 2500 mono-processor dual disk 4 GB for impulsive operations and vibroseis up to 4000 channels @ 2 ms • Blade 2500 bi-processor dual disk 8 GB for vibroseis operation above 4000 channels @ 2 ms
Operating system:	Solaris 8, Linux Red Hat WS4
Software:	e-428 Server Software, performing data computation, storage and handling of local or remote clients

Client

Station:	PC desktop or laptop, local or remote
Screens:	Up to 3 per client
Operating system:	Windows 2000, XP, Linux
Software:	e-428 Client software, performing operator interface and parameters display

LCI-428

Field units management, up to 10,000 channels real time @ 2 ms.

Up to 10 LCI-428 can be linked together to handle up to 100,000 channels real time @ 2 ms.

Operating voltage:	110-220 VAC, 50/60 Hz
Power consumption:	6.7 W
Operating temperature:	0 to +45°C
Storage temperature:	-40° to +70°C
Dimensions (HxWxD):	2U 19" rackable, 86.1 x 483 x 420.7 mm (19 x 16.5 x 3.4 in.)
Weight:	4.1 kg (9.0 lbs.)

Performances

Performances are easily scalable, depending on server workstation configuration.

Processing capabilities

- Correlation before or after stack
- Vertical or diversity stack
- Spike editing: zeroing or clipping
- Alternate or simultaneous multi-source operation
- Slip sweep
- HFVS

Transmission capabilities

Line data rate:	8 Mbps, compatible with 408UL equipment 16 Mbps, 428XL equipment only
Transverse data rate:	TCP-IP protocol, 100 Mbps Ethernet-based transmission

Hardware capabilities

SEG-D files are stored temporarily in the server disk prior to be transferred to tape or NAS or QC tools, allowing acquisition to continue during taping incident (tape recording fault tolerant), and allowing SEG-D to be annotated with source and receiver QCs.

Maximum record length:

Depending on server memory	8 GB allows 10,000 channels 4 fleets vibroseis, 24s acq. length @ 2 ms
Real-time links:	eSQC Pro for data QC SGA for specific trace analysis
Play-back:	eSQC Pro Plotter

Storage capabilities

Tape drives:	Listed in compatibility list
NAS	

Sercel

Ahead of the Curve™

428XL

FDU-428

Functions:	• Data transmission with CRC control • 24 bits A/D conversion • D/A conversion with programmable bit stream
Input impedance:	
Differential mode	20 kΩ // 77 nF
Common mode	105 kΩ
Full scale input levels	
@ G1600	1.6 V RMS
@ G400	400 mV RMS
Offset:	0 (digitally zeroed)
Crosstalk:	> 130 dB
Low-cut filter:	None
High-cut filter:	0.8 FN (linear or minimum phase)
Stop band attenuation:	> 120 dB (above Nyquist)
Sample rates:	4, 2, 1, 0.5, 0.25 ms
Word size:	24 bits
Time standard:	True synchronous system
Interval between FDUs:	@ 8 Mbps: up to 110 m with ST+ cable, 90 m with WPSR cable @ 16 Mbps: up to 90 m with ST+ cable, 75 m with WPSR cable

Power consumption:	120 mW @ 8 Mbps, 132 mW @ 16 Mbps
Noise (3-200Hz) :	
@ G1600	450 nV RMS
@ G400	145 nV RMS
Instant dynamic range:	130 dB
System dynamic range:	140 dB
Distortion:	-110 dB
Gain accuracy:	< 0.1%
Phase accuracy:	20 µs
CMRR:	110 dB
Operating power voltage	22 to 50V DC
Dimensions (HxWxD):	82.5 x 71.4 x 194 mm (3.2 x 2.8 x 7.6 in.)
Weight:	0.35 kg (0.77 lbs.) with ST+ cable
Operating temperatures:	-40° to +70°C
Storage temperatures:	-40° to +70°C
Water depth:	15 m (for WPSR) 1 m (for ST+)

DSU3-428

Functions:	• Acceleration measurement and data transmission with CRC control
	• 24 bits digital acquisition
Full scale:	5 m/s²
Tilt max value:	+/- 180°
Noise (10-200Hz):	0.4 µm/s²/√Hz
System dynamic range:	120 dB @ 4 ms
Sampling rate:	4, 2, 1, 0.5, 0.25 ms
Bandwidth:	0 - 800 Hz (up to 1600 Hz with degraded specifications)
Distortion:	-90 dB
Amplitude calibration accuracy:	+/- 0.25%
Orthogonolaty calibration accuracy:	+/- 0.25%
Power consumption:	285 mW @ 8 Mbps, 300 mW @ 16 Mbps
Static sensor tests:	Tilt, gravity, noise
Dynamic sensor tests:	Distortion, gain, phase
Dimensions (HxWxD):	159.2 x 70 x 194 mm (6.2 x 2.7 x 7.6 in.)
Weight:	0.43 kg (0.9 lbs.)
Operating temperatures:	-40° to +70°C
Storage temperatures:	-40° to +70°C
Water depth:	15 m (for WPSR)
	1 m (for ST+)

LAUL-428

Functions:	• FDUs, DSUs and line management, data transmission with error recovery and temporary storage
	• 50 V line power supply
	• Tests
Tests capabilities	• Power supply
	• Data transmission
	• Field tests (resistance, tilt, leakage, noise, CMRR)
	• Instrument tests (noise, distortion, phase, gain, CMRR, crosstalk)
Operating power voltage:	10.5 to 15 VDC, 2 battery connectors, to allow uninterrupted operation during battery replacement
Power consumption:	2.8 W (Idle: 320 mW)

Maximum number of FDUs/DSUs between LAUs (@ 2 ms):

Cable length between FDUs/DSUs	8 Mbps	16 Mbps
5 m	60/20	102/40
10 m	60/20	90/40
15 m	60/20	81/40
20 m	60/20	74/40
25 m	60/20	68/40
30 m	60/20	64/40
35 m	60/20	60/40
40 m	59/20	57/40
45 m	56/20	55/39
50 m	54/20	52/37
55 m	52/20	50/36
60 m	50/20	48/34
70 m	47/20	45/32
80 m	44/20	43/30
90 m	42/20	40/29
100 m	38/20	NA/NA
110 m	37/20	NA/NA

Line data rate:	1000 ch. @ 2 ms @ 8 Mbps, 2000 @ 16 Mbps
Memory:	30 MB local buffer for non-real time mode transmission
Material:	Aluminium
Dimensions (HxWxD):	108 x 93 x 224 mm (4.2 x 3.6 x 8.8 in.)
Weight:	2.4 kg (5.3 lbs.)
Operating temperatures:	-40° to +70°C
Storage temperatures:	-40° to +70°C
Water depth:	15 m

LAUX-428

Functions:	• Ethernet-TCP/IP data transmission and routing (transverse) with error recovery and temporary storage • 50 V line power supply • Tests
Tests capabilities:	• Power supply • Data transmission • Field tests (resistance, tilt, leakage, noise, CMRR) • Instrument tests (noise, distortion, phase, gain, CMRR, crosstalk)
Operating power voltage:	10.5 to 15 VDC, 2 battery connectors to allow uninterrupted operation during battery replacement
Power consumption:	
LAUX-428	6.7 W (idle 1 W)
TREP-428	0.6 W
TFOI-428	1.4 W
Interval between LAUX on transverse:	
Copper wire	up to 6 x 150 m with TREP-428 repeaters and SRHRF cable
Fiber optics	up to 40 km with TFOI-428 interfaces
TREP-428 and TFOI-428 are powered through the line by LAUX-428	
Transverse data rate:	10,000 ch. @ 2 ms
Memory:	3 MB local buffer for non-real time mode transmission
Material:	Aluminium
Water depth:	15 m
Operating temperature:	-40° to +70°C
Storage temperature:	-40° to +70°C
Dimensions (HxWxD):	137 x 312 x 242 mm (5.4 x 12.3 x 9.5 in.)
Weight:	5.5 kg (12.1 lbs.)

LAUR-428

Functions:	• Handles 408UL or 428XL links of FDUs or DSUs • Up to 30 channels each side of LAUR-428 • Slave of a cell handled by master LRU
Tests capabilities:	• Power supply • Data transmission • Field tests (resistance, tilt, leakage, noise, CMRR) • Instrument tests (noise, distortion, phase, gain, CMRR, crosstalk)
RF transmission:	• 30 channels @ 2 ms real-time radio transmission • Bandwidth occupancy 200 kHz • Data rate 256 kbps • Up to 6 W automatically adjusted output power - 215-250 MHz international use - 217-218 MHz & 219-220 MHz USA use - 217-220 MHz Canada use
FCC emission designators:	200 KD1D
Operating power voltage:	10.5 to 15 V DC, 2 battery connectors to allow uninterrupted operation during battery replacement
Power consumption:	
When retrieving	40.6 W with 30 FDUs connected
Sleep mode	2.4 W with receive ON 0.2 W without receiving
Material:	Aluminium
Water depth:	1 m
Operating temperature:	-40° to +70°C
Storage temperature:	-40° to +70°C
Dimensions (HxWxD):	169.5 x 380 x 380 mm (6.7 x 15 x 15 in.) without antenna
Weight:	12.2 kg (26.8 lbs.)

428XL SPECIFICATIONS

LRU

Radio functions:

1 - Communication with another LRU for data transmission with error recovery and temporary storage

- Up to 16 km up to 240 channels* @ 2 ms real-time with Yagi type antenna (8 m mast)
- Up to 24 km up to 60 channels* @ 2 ms real-time with Yagi type antenna (8 m mast)

2 - Master of a cell composed of several LAURs for data transmission with error recovery and temporary storage

- Up to 24 km with Yagi type antenna (18 m mast)
- Up to 8 km with omni-directional antenna (8 m mast)

Cable functions: Full LAUX capabilities

Tests capabilities:

- Power supply
- Radio data transmission
- Cable data transmission
- Field tests (resistance, tilt, leakage, noise, CMRR)
- Instrument tests (noise, distortion, phase, gain, CMRR, crosstalk)

Antenna spectrum monitoring capability

Radio setup: Pocket terminal connection capability

Memory: 3 MB local buffer for non-real time transmission mode

Interval between LRUs or LRU and LAUX on transverse:

- Up to 300 m with ST+ cable
- Up to 250 m with WPSR
- Up to 400 m with WPSRLR

Material: Aluminium

Dimensions (HxWxD): 225 x 380 x 380 mm (8.8 x 14.9 x 14.9 in.)

Weight: 12.6 kg (27.8 lbs.)

Operating power voltage: 10.5 to 15 VDC, 2 battery connectors, to allow uninterrupted operation during battery replacement

* the number of channels increases proportionally with the ratio: (shot time)/(acquisition time)

Power consumption:

Master	23 W
Slave	80 W when retrieving
Sleep	1.2 W

Operating temperatures: -40° to 70°C

Storage temperatures: -40° to 70°C

Water depth: 1 m

RF Frequencies:

- 215-250 MHz International use
- 217-218 MHz & 219-200 MHz USA use
- 217-220 MHz Canada use

RF Output power: RF power management; 6 W nominal

RF Output impedance: 50 Ω

FCC emission designators: 200 KD1D and 800 KD1D

Cable performances:

(Typical @ 2 ms sample rate and 25°C)
Maximum number of FDUs per LRU :

- 120 with up to 30 m interval
- 96 with up to 55 m interval
- 80 with up to 75 m interval

Maximum number of FDUs between LRUs or between LRU and LAU :

- 60 with up to 30 m interval
- 48 with up to 55 m interval
- 40 with up to 75 m interval

All specifications are typical at 25°C

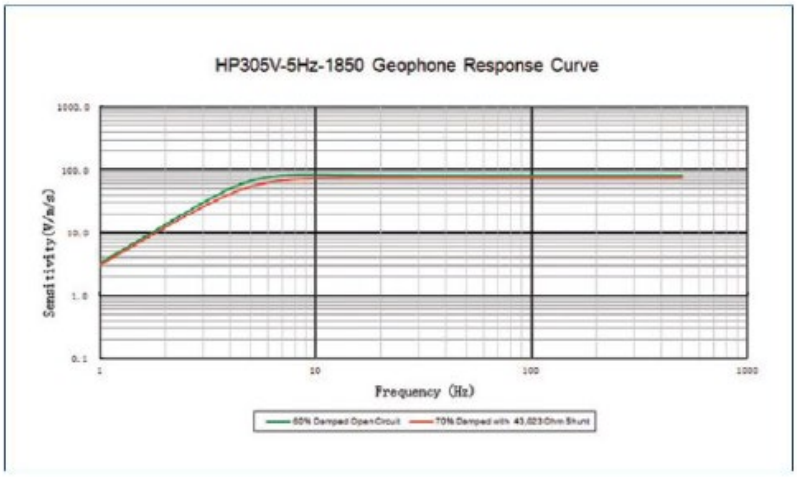
SISTEMA NODAL SMARTSOLO

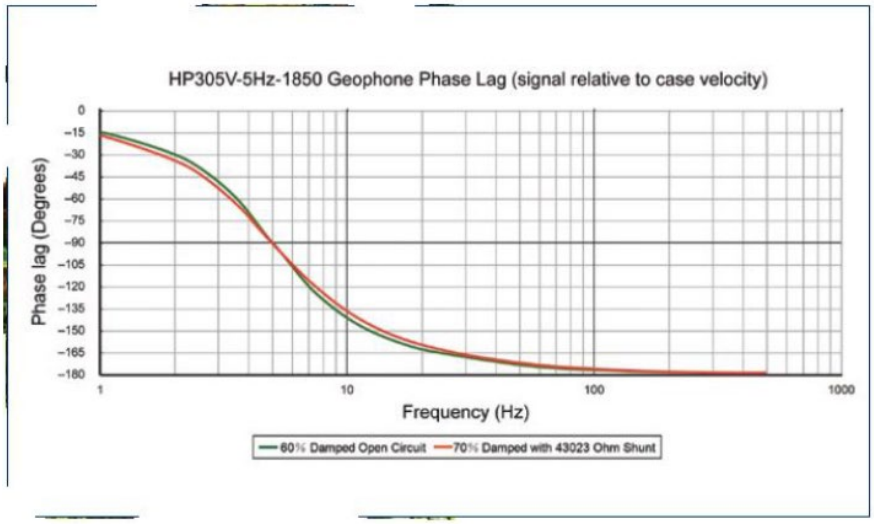


B - Acquisition Performance

(5Hz@22°C,10Hz@25°C, unless otherwise indicated)

Parameters	Specification	
Natural Frequency	5Hz±7.5%	10Hz±3.5%
Resistance	1773ohm±7.5%	1651ohm±7.5%
Distortion	<0.1%@12Hz,17.78mm/s (0.7in/s) p-p, (0°~10°) tilt	<0.15%@12Hz, 17.78mm/s (0.7in/s)p-p,(10°~15°) tilt
Damping	0.7±7.5%	0.7±10%
Sensitivity	76.7V/m/s (1.95 V/in/s) ±7.5%	78.7V/m/s (2.0 V/in/s) ±3.5%





Test Parameters

Instrument Test:
Equivalent Input Noise
Dynamic Range
THD
CMRR
Gain Accuracy

Internal Sensor Test:
Sensor Resistance
Sensor Natural Frequency
Sensor Damping
Sensor Sensitivity
Sensor THD
Sensor Impedance

Test condition:
Preamplifier Gain: 0/6/12/18/24dB
Sample Interval: 1ms/2ms/4ms
Anti-Alias Filter: Linear Phase
Low cut Filter: Disabled, 1Hz

Test Name	Input	TestOscAtten (in dB)	TestOsc WaveForm	Frequency (in Hz)	Input Mode
Equivalent Input Noise	Resistance	[Selected Gain]	Sine	31.25	Difference
Dynamic Range	TestOsc	[Selected Gain]	Sine	31.25	Difference
THD	TestOsc	[Selected Gain]	Sine	31.25	Difference
CMRR	TestOsc	[Selected Gain]	Sine	31.25	Common
Gain Accuracy	TestOsc	[Selected Gain]	Sine	31.25	Difference
Sensor Resistance	TestOsc	NA	Pulse	NA	NA
Sensor N. Freq.	TestOsc	NA	Pulse	NA	NA
Sensor Damping	TestOsc	NA	Pulse	NA	NA
Sensor Sensitivity	TestOsc	NA	Pulse	NA	NA
Sensor THD	TestOsc	NA	Sine	11.72	Difference
Sensor Impedance	TestOsc	NA	Sine	12	Difference
Noise	NA	NA	Pulse	NA	NA

Smart Electronics Especificaciones

(@ 1 ms de intervalo de muestra, 31.25 Hz, 25 ° C a menos que se indique lo contrario.)

Resolución ADC	24bits
Intervalos de muestra	1,2,4 milisegundos
Preamplificador ganancia	0dB a 24 dB, en pasos de 6 dB
Filtro anti-alias	206.5 Hz @ 2ms (82.6% de la frec. Nyquist) seleccionable - fase lineal o fase mínimo
Bloqueo de DC	1Hz a 10Hz, en incrementos de 1Hz, o eliminar CD
Estándar de tiempo de GPS	1ppm
Precisión de tiempo	<20 µs, condicionado por el GPS
Señal de entrada máxima	2.5V peak, con ganancia de 0dB
Ruido de entrada equivalente	1.23µV @ 2ms con ganancia d 12dB
Rango dinámico total	116 dB @ ganancia de 0dB
Distorsión armónica total	<0.0005%
Rechazo de modo común	90dB
Gain Accuracy	<1%

VIBROSEIS INOVA (EX I/O) AHV IV

AHV-IV™ Articulated Hydrostatic Vehicles

I/O's AHV-IV, with its field proven reliability and ability to deliver up to 60,000 lbs of peak force, sets the standard for tire-based vibrator products in the seismic industry today. It is recognized by geophysical contractors worldwide as the industry workhorse.

Our years of experience in designing and manufacturing vibrators have resulted in field-proven durability, ease of maintenance and more efficient operations in all terrains.

- 50,000 lb – 60,000 lb peak force versatility
- Proven PLS (Pre-Loaded Stilt structure)
- Advanced reaction mass assembly
- Simplified hydraulic system which requires less hydraulic hose maintenance
- Reduced hoses and fittings to simply maintenance and ease troubleshooting
- Simplified electrical maintenance



Additional features ensure the safety of crews involved in the acquisition operation.

- Simplified electronic-assisted operator controls
- Enhanced operator visibility
- Articulated, oscillated steering
- Certified roll-over protection system (ROPS)
- Lowest center of gravity in the industry

The AHV-IV, coupled with Pelton Vib Pro™ source controller and Vib Net™ II source control network technologies, delivers high-productivity Vibroseis operations and high-quality seismic data to geophysical contractors and oil & gas companies worldwide.

© 2005. Input/Output, Inc. All rights reserved. Information subject to change without notice. Revised 11/05.

121003E

Page 1 of 3

Specifications — Chassis

INPUT/OUTPUT, INC.

Engine	DDA – Series 60, 12.7 L (425 BHP @ 1,900 RPM)
Air Cleaner	Dry-type, 3-stage with pre-cleaner
Cooling	Water-cooled radiator to +50°C (+122°F) for hot climate and –50°C (–58°F) for cold climate
Air Compressor	12 CFM
System Warning Device	Engine shut-down system for low engine oil pressure, high engine water temperature, and low coolant level
Fuel – Capacity	757.08 L (200 gal)
Drive Pumps	100 cc (6.1 in3); with electric displacement control
Drive Motors	100 cc (6.1 in3)
Frame	Solid-steel frame for maximum strength and reliability; 35° articulated; hydraulic power-steering; 16.5° oscillation center joint
Axles	Inboard planetary axle with enclosed wet disc brakes and differential lock
Transmission	6-speed, power-shift, electronic shift
Cab	Fabricated-steel construction; high visibility with adjustable driver and passenger seat; two, 3-point shoulder belts; air-conditioning, heater, defroster, wiper, dome light, and side-mounted mirrors
Electrical	+24 V start ; +12 V run with 105-amp alternator and two, heavy-duty, +12-V, 8D batteries; battery-disconnect switch
Winch – Capacity	13,608 kg (30,000 lb)
Tire Options	
Logger	170 x 86 x 64 cm (67 x 34 x 25 in); 14 ply
Super Terra Grip	167 x 109 x 64 cm (66 x 43 x 25 in); 14 ply; tubeless
Sand Tire	167 x 112 x 64 cm (66 x 44 x 25 in); 16 ply
Rock Lug	23.5 x 25; tubeless
Buggy	
Length	10.0 m (394 in)
Width	3.4 m (134 in) for 66 x 44 tires; 2.44 m (96 in) for 23.5 x 25 tires
Height (cab only)	3.12 m (123 in)
Wheelbase	4.77 m (188 in)
Turning radius – inside	6.93 m (273 in)
Speed	26 km/hr (16 mph)
Gradeability	60%; 31° forward
Weights	
Gross vehicle	Minimum 25,968 kg (57,250 lb) Maximum* 29,937 kg (66,000 lb)
Hold-down	Minimum 22,838 kg (50,350 lb) Maximum* 29,030 kg (64,000 lb)
Front axle	Minimum 13,789 kg (30,400 lb) Maximum* 15,853 kg (34,950 lb)
Rear axle	Minimum 12,179 kg (26,850 lb) Maximum* 14,084 kg (31,050 lb)

** Desired weight achieved with removable slide-on frame weights.*

© 2005. Input/Output, Inc. All rights reserved. Information subject to change without notice. Revised 11/05.

121003E

Page 2 of 3

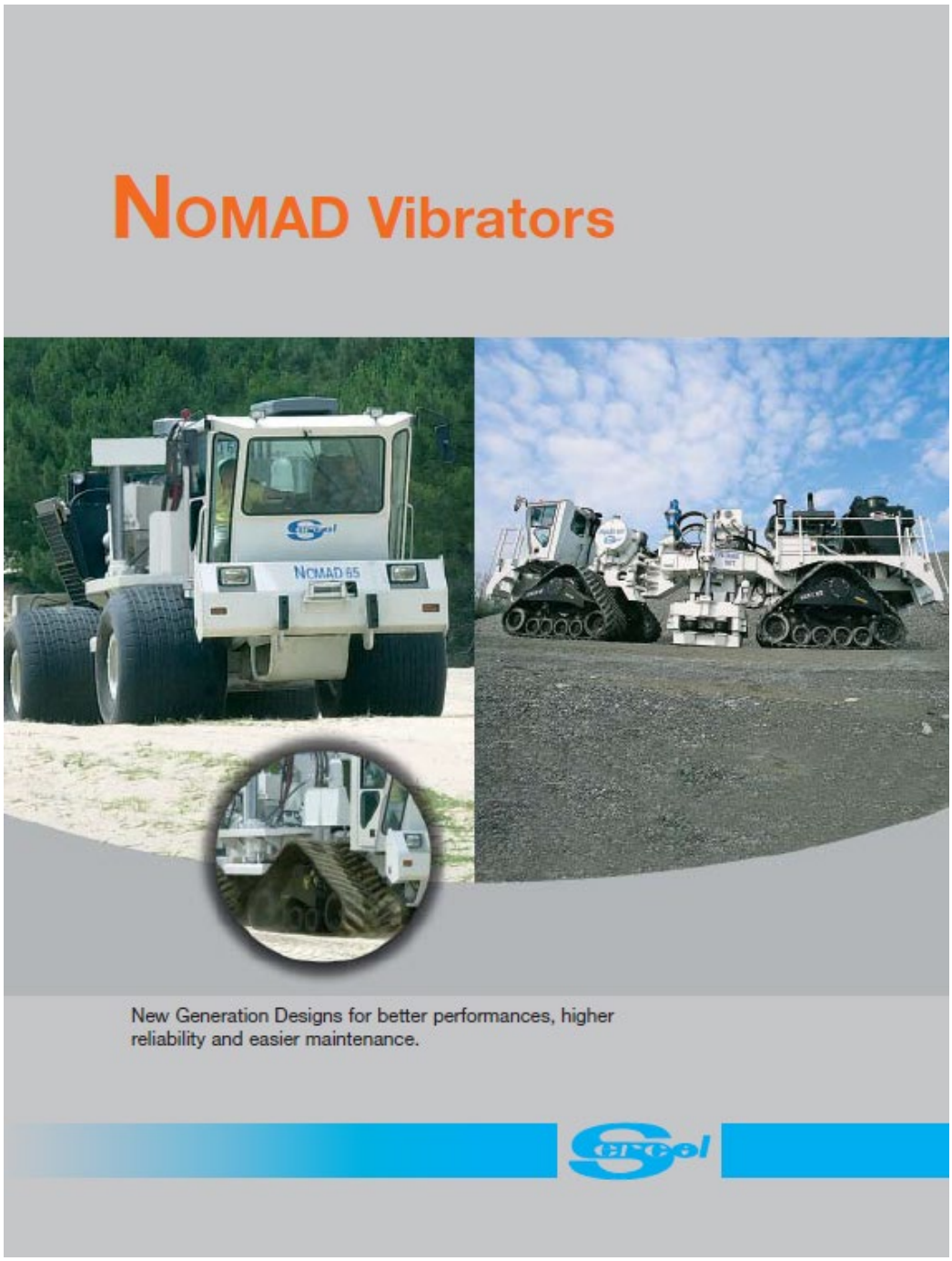
Specifications — Vibrator Actuator	INPUT/OUTPUT, INC.
Model	P-wave vibrator; PLS 362
Peak Force	275 kN (61,800 lbf)
Piston Area	132.9 cm (20.6 in)
Mass Weight	3,683 kg (8,120 lb)
Driven Weight	1,823 kg (4,020 lb)
Usable Stroke	9.83 cm (3.87 in)
Frequency Limit	5 Hz to 250 Hz
Mass Accumulators (2)	1 L (0.26 gal); in-line
Lift Stroke	97 cm (38 in)
Balance Method	Airbags
Isolation Method	Airbags
Hydraulic System	
Pumps (2)	119 cc (7.25 in3); Denison P-7
Servo valve	Atlas 240H (with Pelton-modified DRTM)
Pilot valve	MOOG
Filtration	3-micronabsolute servo filter; 3.5- micronabsolute, high and low pressure, triple element
Accumulators (2)	10 L (2.5 gal); bladder-type
Heat exchanger	Steel core; multi-wing fan; hydraulically-driven
Reservoir	170 L (45 gal)
System	Closed-loop
Base Plate	
Type	Rectangular
Area	2.5 m2 (3,876 in2)
Clearance	46 cm (18 in)

United States – Stafford, TX
Input/Output, Inc.
Fax: 281.552.3150
Phone: 281.933.3339
E-mail: info@i-o.com

Web Site
www.i-o.com

© 2005. Input/Output, Inc. All rights reserved. Information subject to change without notice. Revised 11/05.

VIBROSEIS SERCEL NOMAD



NOMAD 65/65T
Specifications

NOMAD 65 ACTUATOR

RM Weight	4,082 kg ; 9,000 lb
Piston Area	133.4 cm² ; 20.67 in²
Differential pressure	200 bar ; 2,857 psi
Peak Force Output	276 kN ; 62,000 lbf
Usable Stroke	7.62 cm ; 3.0 in
Rated Frequency	7-250 Hz
Balance	Airbag (2)
LVDT	Schaevitz 2000 HR

HYDRAULIC

Pump	Rexroth, Pressure-Compensated 458 l/min (121 gpm)
Servovalve	Atlas with Moog pilot
Filtration	3 Micron Absolute
Accumulators	1 Low Pressure, 1 High Pressure Desurge LP and HP
Oil Reservoir	300 Litres; 79 gallons
Cooler	Oil to Air

BASEPLATE

Size	123 x 213 cm ; 48.6 x 84 in
BP Weight	1,560 kg ; 3,440 lb
Hold-down	278 kN ; 62,412 lbf
Isolation	Airbags (6)
Lift	2 Guide Rods, Two Lift Cylinders
Clearance	50 cm ; 20 in
RM/BP Weight Ratio	2.62

NOMAD VEHICLE

Type	Nomad, 4 x 4 Articulated Frame
Frame	High Strength Steel
Steering	Hydraulic Frame Articulation
Winch (option)	Hydraulic ; 13,600 kg ; 30,000 lb

TIRES AND WHEELS

Size	66 x 44 - 25 16 Ply Firestone, "Sand Tread" Others Available

AIR COMPRESSOR

850 l/min (33 cfm) bi-cylinder compressor safety valve and air dryer

DRIVE SYSTEM (ELECTRONIC CONTROLS)

Type	Hydrostatic
Pump Drive	Flexible coupling
Pumps	SAUER, variable (1) electronically controlled
Motors	SAUER variable displacement (2)
Gear box	2 manual speeds Electronically controlled anti spin
Axles	Outboard Planetary gears ; Operator controlled Differential locking
Brakes	Hydraulic actuated Internal Wet Disc, Spring actuated wet Disc Parking

NOMAD 65 GENERAL

Dimensions and Weights

	NOMAD 65	NOMAD 65T
Length	10.2 m ; 33 ft 7 in	10.64 m ; 34 ft 11 in
Width	3.42 m ; 11 ft 3 in (see Tires)	3.62 m ; 11 ft 10 in
Height	3.26 m ; 10 ft 8 in	3.78 m ; 12 ft 5 in
Front Axle	14,848 kg ; 32,705 lb	20,000 kg ; 44,053 lb
Rear Axle	13,722 kg ; 30,225 lb	18,000 kg ; 39,647 lb
Gross	28,571 kg ; 62,932 lb	38,000 kg ; 83,701 lb
Normal Operating temperatures		
Low temperature	- 12°C ; + 10°F	-12°C ; +10°F
High temperature	53°C ; 127.5°F	53°C ; 127.5°F
Option	Winterization	Winterization
Paint	White	White

ENGINE

Type	VOLVO 1240 VE 4 stroke, water cooled turbo-charged 310 kW@ 2100 rpm Electronic control
Engine Mtng	Rubber isolations
Fuel tank	1,000 litres ; 264 gallons
Air Cleaner	2 stages plus pre-cleaner

Compliant with US and ECC emission standards

ELECTRICAL

Alternator	24 VDC, 140 AMP
Batteries (2)	24 V ; 220 Ah
Battery Box	Steel Construction
Lighting	Cab Interior, Clearance, Running
Electrical circuit	Multiplexed
AC to DC convertors	24 to 12 V 15 Amp

CAB, TWO PERSON

Steel Construction, Fully Insulated, Tinted Glass, Carpeted, Double Doors, Air Conditioner, Heater, Adjustable driver seat with Belt, ROPS certified,
Engine and hydraulic circuit monitoring display
Vibrator rear and underneath monitoring video display

PERFORMANCE

	NOMAD 65	NOMAD 65T
Speed	28 kph ; 17 mph	20 kph ; 12 mph
Gradability	60%, 31 degrees	80%, 39 degrees
Turn Diameter (curb to curb)	20 m ; 66 ft	21.77 m ; 71 ft 5 in

NOMAD 90T
Specifications

NOMAD 90T ACTUATOR

RM Weight	7,130 kg ; 15,730 lb
Piston Area	157 cm² ; 24.33 in²
Differential pressure	255 bar ; 3,643 psi
Peak Force Output	400.3 kN ; 89,995 lbf
Usable Stroke	10.16 cm ; 4.0 in
Rated Frequency	5-250 Hz
Balance	Airbag (2)
LVDT	Schaevitz 3000 HR

HYDRAULIC

Pump	Rexroth, (2) Pressure-Compensated 633 l/min (167 gpm)
Servovalve	Atlas with Moog pilot
Filtration	3 Micron Absolute
Accumulators	1 Low Pressure, 1 High Pressure Desurge LP and HP
Oil Reservoir	400 Litres; 106 gallons
Cooler	Oil to Air

BASEPLATE

Size	200 x 143 cm ; 78.7 x 56.3 in
BP Weight	2,217 kg ; 4,883 lb
Hold-down	356 kN ; 80,000 lbf
Lift	2 Guide Rods, Two Lift Cylinders
Clearance	50 cm ; 19,7 in
RM/BP Weight Ratio	3,1

NOMAD VEHICLE

Type	Nomad, 4 x 4 Articulated Frame
Frame	High Strength Steel
Steering	Hydraulic Frame Articulation
Winch (option)	Hydraulic ; 13,600 kg ; 30,000 lb

TRACKS

Suspensions	hydraulic cylinder and accumulator
Track width	914 mm ; 36 in

AIR COMPRESSOR

air dryer 850 l/min (33 cfm)

DRIVE SYSTEM (ELECTRONIC CONTROLS)

Type	Hydrostatic
Pump Drive	Two out-puts High-elastic engine coupling Maximum power input 700 kW
Pumps	SAUER, variable (1) electronically controlled
Motors	SAUER variable (2)
Gear box	2 manual speeds Electronically controlled antispin

Axles	Outboard planetaries pneumatic controlled diff lock
Brakes	service : hydraulic actuated in board wet disc parking : spring actuated hydraulic release

NOMAD 90T GENERAL

Dimensions and Weight	
Length	10.7 m ; 35 ft 1 in
Width (tracks)	3.20 m ; 10 ft 6 in
Width (overall)	3.63 m ; 11 ft 11 in
Height	3.81 m ; 12 ft 6 in
Wheel base	5.70 m ; 18 ft 8 in
Front Axle	22,250 kg ; 49,009 lb
Rear Axle	21,950 kg ; 48,348 lb
Gross	44,200 kg ; 97,357 lb
Normal Operating temperatures	
Low temperature	- 12°C ; + 10°F
High temperature	- 53°C ; 127°F

ENGINE

Type	VOLVO 1242 VE 4 stroke, water cooled, turbo-charged Max power 368 kW ; 500 HP Engine rpm 1800 electronic control EDC III
Engine mount	rubber
Fuel tank	1,000 l ; 264 gallons
Air cleaner	two stages + pre-cleaner

Compliant with US EPA/Carb tier 2 and EU stage II

ELECTRICAL

Alternator	24 VDC, 100 AMP
Batteries (2)	24 V ; 220 Ah
Electrical circuit	Multiplexed
AC to DC convertors	24 to 12 V 15 Amp

CAB, TWO PERSON

Steel Construction, Fully Insulated, Tinted Glass, Carpeted, Double Doors, Air Conditioner, Heater, Adjustable driver seat with Belt,
Engine and hydraulic circuit monitoring display
Vibrator rear and underneath monitoring video display

PERFORMANCE

Speed	23 kph ; 14 mph
Ground pressure	3 in penetration 49 kg/cm² ; 7 psi (preliminary)
Gradability	60%
Turn Diameter	22.95 m ; 75 ft 4 in

INSTITUTO ARGENTINO DEL PETROLEO Y DEL GAS

Tratado de exploracion sísmica y su instrumental

Maipú 639 (C1006ACG)
Buenos Aires - Argentina
Tel: (54 11) 5277 IAPG (4274)

www.iapg.org.ar

/IAPGinfo

/IAPG_info

/iapginfo

/company/iapg

Shale en ARGENTINA
www.shaleenargentina.org.ar

OFFSHORE EN ARGENTINA
www.offshoreenargentina.com.ar

ISBN 978-987-48865-2-1