

The background of the cover is a photograph of two industrial workers in a factory. They are wearing white hard hats, safety glasses, and orange high-visibility vests over light-colored shirts. They are looking at a tablet or piece of equipment. The scene is filled with industrial machinery, pipes, and structural elements, all slightly blurred to emphasize the workers. The entire image is framed by a semi-transparent white trapezoidal shape with blue and orange diagonal lines at the corners.

NOTA TÉCNICA

Magnitudes de la Onda Sísmica

Ing. Pacífico Roberto Concetti



**CURSOS TÉCNICOS
PARA LA INDUSTRIA**

Agosto de 2017

Introducción

Este artículo se basa en otro similar que he escrito en 2005 para la revista BPI (de la AAGGP¹) y que se tituló: “Rango Dinámico: ¿qué es lo que califica en sísmica?”. Creo necesario recordar y actualizar los datos allí escritos por qué, de ayer a hoy, hubo cambios tecnológicos y se conservan viejas costumbres.

Muchas veces un correcto procesamiento de datos sísmicos, no concluye con una buena imagen del subsuelo prospectado. Pese a los buenos programas de procesamiento que se encuentran disponibles y a la gran capacidad técnica de los procesadores, seguimos presumiendo que los datos a procesar, fueron adquiridos utilizando los parámetros más adecuados, tanto para la fuente de energía sísmica como para el instrumental de adquisición (sensores, y electrónica de adquisición). El terreno donde se desarrolla la exploración sísmica, generalmente no es tan cómodo como la oficina donde procesamos o interpretamos los datos obtenidos, pero, teniendo en cuenta que el costo de re-procesar un proyecto sísmico es insignificante comparado con el costo de re-adquirir dicho proyecto, resulta muy conveniente dedicar más tiempo al conocimiento del instrumental a emplear en la adquisición sísmica, para manejar adecuadamente el rango dinámico disponible sobre el terreno en el cual se desarrolla la actividad.



Figura 1, Instrumental sísmico tendido en la superficie de un proyecto (Brochure I/O)

¹ AAGGP: Asociación Argentina de Geólogos y Geofísicos del Petróleo.

Generalidades

En sismica horizontal, la onda acústica generada transita un largo camino por el subsuelo, gastando energía desde su emisión (la fuente de energía) hasta su detección (la estación receptora). Esa onda resulta contaminada desde su origen con distorsiones y ruidos que no responden a la idealizada ondícula que quisimos generar, luego en su viaje es agredida por diferentes mecanismos que la condicionan aún más: inevitable dispersión esférica, subdivisión de energía por frecuentes y deseables reflexiones-refracciones en cada interface, indeseables (en sismica convencional) conversiones de ondas P en S, etc. Recibimos como respuesta una energía acústica útil muy baja, irreconocible de la emitida, que ha perdido por el camino muchas componentes de frecuencia y a la que se le ha incorporado ruidos aleatorios y coherentes que la superan en magnitud en casi el total de su espectro. En definitiva, la adquisición debe someterse a un arduo proceso de rescate de esa pequeña energía remanente obteniendo finalmente imágenes del subsuelo que no son suficientemente precisas o imágenes que los datos adquiridos no justifican.

Habría una correspondencia entre la evolución del instrumental de adquisición y el procesamiento de la información obtenida, resulta interesante recordar el pasado cercano para comprender y comparar los resultados de las imágenes del subsuelo, obtenidas en las diferentes etapas de ese desarrollo.

La digitalización del dato sísmico.

A fines de la década del 60, se fabricaron los primeros equipos de registración sísmica que grababan digitalmente los datos a partir de muestras discretas de la señal analógica adquirida. Los datos grabados en números binarios, son mucho más fáciles de preservar y de trabajar matemáticamente. La digitalización de la información facilitó enormemente el Procesamiento Matemático de la misma ya que se pudo emplear eficientemente las Series y Transformadas de Fourier que permiten la descomposición espectral de las señales ². Hasta entonces, el fenómeno de adquisición sísmica, desde el arreglo de Geófonos hasta la grabación magnética, era “analógico”.

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 registrador. Inducciones electromagnéticas, pérdidas de aislamiento entre pares (crossfeed), entre estos y tierra (leakage), ruido por microfonismo, etc., degradaban el poco rango dinámico que el instrumento manejaba, aunque los objetivos geofísicos del momento no exigían la resolución actualmente alcanzable.

Jean-Baptiste Joseph Fourier: matemático francés publicó en 1807 y 1811 lo que luego se denominó: “Análisis armónico”

La cantidad de estaciones sísmicas que podían ser conectadas a un cable multipar no llegó a superar los 120 canales.

Podemos recordar entre estos sismógrafos al: DFS-III de Texas Instruments, MDS-10 y MDS-16 de Mandrel y también al DFS-V.

La Telemetría aplicada a la adquisición sísmica

Para mejorar el rango dinámico de la adquisición sísmica se acercó el instrumental electrónico a los geófonos, disminuyendo drásticamente el recorrido de la señal analógica por los cables de registración y dando comienzo a la era de la Telemetría Sísmica, ya que gran parte de la electrónica del equipo de adquisición, fue multiplicada y distribuida en “Cajas” (o unidades remotas) por las líneas de registración. Desde ese momento las unidades telemétricas: preamplificaban, filtraban, muestrean y convierten en dígitos binarios a las señales recibidas de las estaciones receptoras más cercanas. En definitiva, la señal eléctrica recorre ahora menor camino hasta su digitalización quedando menos expuesta a los factores anteriores (entre 6 a 8 canales por caja manejaban los registradores más comunes). Los datos digitalizados eran transmitidos teleméricamente vía cable ó vía radio hacia una Central Electrónica.

Con la transmisión telemétrica se hizo posible la “Registración Sísmica 3D”. Entre los Sismógrafos que pertenecieron a esta camada los más conocidos fueron: DFS-VII de Texas Instruments, el System I de I/O y el Sercel 368.

El Conversor de 24 bits Sigma Delta

Un gran salto de calidad se produjo gracias a la evolución de la industria electrónica, que permitió la implementación de la tecnología Sigma Delta en el desarrollo del Conversor Analógico/ Digital de 24 bits, mejorando el rango dinámico de adquisición de 90 a 140 dB y permitiendo eliminar muchas etapas del instrumental, como ser: el filtrado analógico de la señal, la amplificación de punto flotante (I.F.P), etc.², lo que redujo el consumo de energía en las baterías y permitió aumentar el número de canales de adquisición simultánea en forma telemétrica.

Los sistemas de adquisición más populares fueron: Vision de Mandrel, System II de I/O, Image de I/O y Sercel 308.

Protocolos de redes aplicadas a la adquisición sísmica telemétrica

La tecnología de Internet, generó protocolos de transmisión telemétrica de redes muy eficientes (protocolos TCP/IP, por ejemplo) 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.

² Ver artículo sobre el fundamento teórico del Conversor Sigma Delta de 24 bits

Con esta nueva evolución, se logró un mucho mejor manejo operativo de las estaciones sísmicas de campo con relación a su Central Electrónica permitiendo:

- que cada estación receptora (geófonos) se conectara directamente a una caja electrónica (monocanal), desapareciendo las posibilidades de “crossfeed”.
- un conexionado de cables redundante para evitar detener las operaciones de registración cuando algún cable de línea se cortaba.
- disminuir el peso del equipamiento y disminuir el consumo de baterías por disminución de prestaciones. Para lograrlo redujeron las posibilidades de selección de parámetros (filtros, ganancias) y de tests de performances.

Nuevamente se logró aumentar el número de canales de adquisición.

Los sistemas más populares de esta etapa fueron: Sercel 408 y 428, System IV de I/O, Aram.Aries, etc.

Emisión y Recepción puntual

Con la tecnología anterior, podíamos manejar gran número de canales, quizás unos 10000 canales simultáneamente en tiempo real con un conveniente muestreo temporal que permite un correcto filtrado de frecuencias. No sucedía lo mismo con el filtrado espacial, continuábamos 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 ó 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.

Los Sistemas Nodales³ están constituidos por equipos de adquisición mono-canal que permiten una expansión enorme de estaciones receptoras. Existen diferentes tipos de estos sistemas:

1. Los que necesitan que se les recolecte los datos acumulados “in situ”. Denominados Autónomos o “blind”: ZLand, SmartSolo, etc.
2. Los que sus datos pueden ser leídos a cierta distancia vía radio, permitiendo un cierto grado de control de calidad en pseudo tiempo real. Denominados Autónomos con capacidad de QC o “QC Capable”: Unite de Sercel, WTU-508 de Sercel.

³ Ver artículo sobre “Sistemas Nodales

3. Los que pueden adquirir sus datos total o parcialmente en tiempo cuasi- real, Denominados: “Real time QC” como el RT-2 de Wireless Seismic, el UniQ de WesternGeco y también parcialmente el Sercel 508 XT.

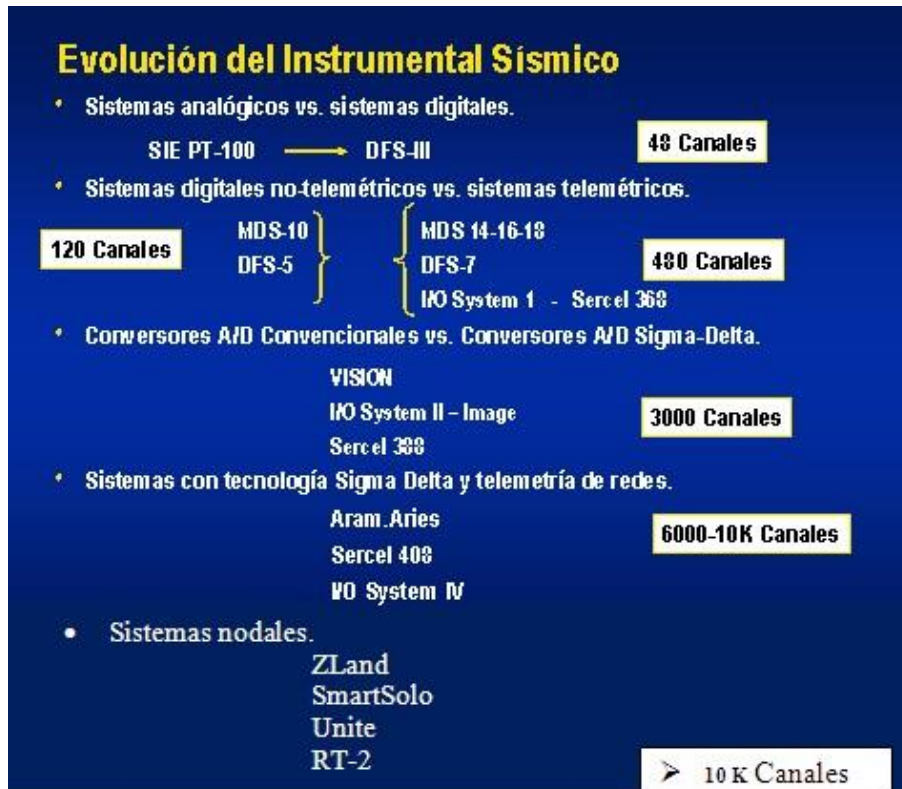


Figura 2: Evolución del Instrumental Sísmico

El Rango Dinámico del instrumental Sísmico

“El Rango Dinámico es una medida en dB (decibeles) de la capacidad del instrumental de adquisición sísmica de manejar señales eléctricas”.

Conocer el rango de las magnitudes de los fenómenos involucrados en la adquisición sísmica, es importante para elegir los parámetros a utilizar en un proyecto. Desde el elemento/elementos utilizado en la estación sísmica receptora hasta su grabación digital, ocurre un manipuleo importante de la señal sísmica. Resumiendo: el geófono genera un voltaje eléctrico, análogo a la velocidad del movimiento del suelo en el cual se encuentra acoplado, dicho voltaje se amplifica en la Caja Electrónica, donde también se filtran algunas componentes de frecuencia no deseadas, luego el Conversor Analógico Digital muestrea y cada muestra la convierte en un número binario de 24 bits. Posteriormente cada muestra es reconvertida a 32 bits (formato IEEE) para ser sumada a otras muestras o ser correladas o ser sometidas a diferentes procesos. Tanto el Geófono como el Preamplificador del instrumento como el Conversor AD, tienen un rango de trabajo, es decir: tienen (o admiten, según el caso) una amplitud mínima y una amplitud máxima.

La SEG (Society of Exploration Geophysicist) en 1988 definió al rango dinámico de un instrumento como: la relación en dB de: la máxima señal sin distorsión que el instrumental es capaz de recibir a su entrada con mínima ganancia de amplificación (mínimo K-Gain) y el ruido interno equivalente a la entrada para máximo “K-Gain”. Esta definición es ambigua ya que ambas condiciones no pueden ser medidas simultáneamente.

Existen diferentes definiciones y nomenclaturas con respecto al Rango Dinámico, pero es importante conocer que nos interesa medir para luego ponerle el nombre adecuado: Rango Dinámico Total, Rango Dinámico Total Disponible, Rango Dinámico Instantáneo, etc.

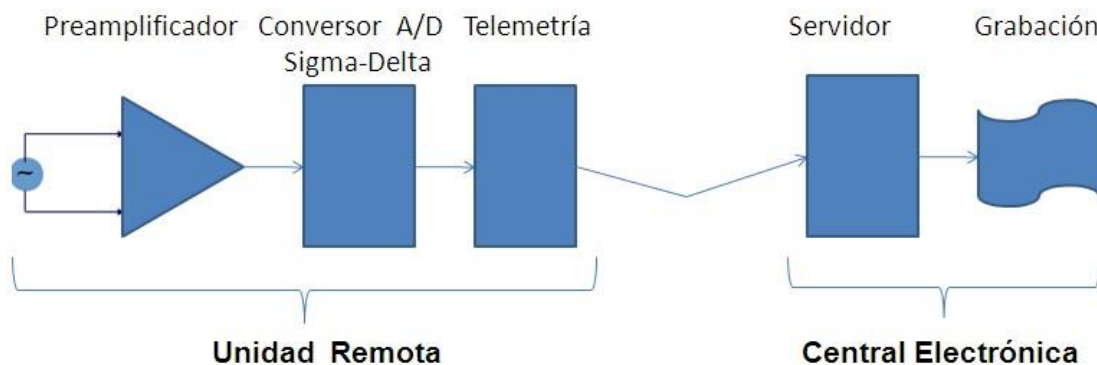


Figura 3, Etapas en la Adquisición Sísmica de Campo

El Convertor Analógico – Digital

Generalmente cuando hablamos del “Rango Dinámico Total” del instrumental sísmico, nos referimos a la capacidad de digitalización del Convertor Analógico Digital (Convertor A/D), ya que aquí se define la representación numérica de la información sísmica recibida.

Definimos el Rango Dinámico del Convertor AD como “la relación en dB entre el máximo y el mínimo valor de voltaje analógico que dicho convertor puede convertir y que es directamente dependiente de la cantidad de bits que posee dicho convertor”:

Ejemplo para un Convertor de 24 bits (1 bit de signo y 23 bits de Mantisa)

$$\text{Rango Dinámico Total} = 20 \log \frac{V_{\text{máx}}}{V_{\text{mín}}} = 20 \log 2^{23} = 138,5 \text{ dB} \sim 140 \text{ dB}$$

En la figura 3 se muestra en bloques, las distintas etapas que componen un instrumental de adquisición sísmica de campo actual. Los voltajes eléctricos que se reciben a la entrada del Convertor AD, fueron previamente amplificados por el Preamplificador del instrumento (Unidad Remota ó Caja Electrónica).

Ejemplo 1: ¿Qué valores de voltajes podrán ser convertidos en números?

En el I/O System II ó Image, podemos simplificar el camino de la señal sísmica desde su recepción hasta su conversión digital tal como lo indicamos en la Figura 4. Un Preamplificador Diferencial de Entrada amplifica la señal en 48 dB (aproximadamente 256 veces) y luego un Conversor Sigma Delta de 24 bits, realiza la conversión A/D donde el valor del “bit” más significativo es: ± 5 voltios (MSB= ± 5 V)

El valor máximo de voltaje que se puede convertir a la Entrada del Conversor es aquel que ocupa el total de los “bits”, desde el MSB al LSB y esto ocurre en este ejemplo para:

$$V_{max} = \pm 10 \text{ V} - \text{LSB} \sim \pm 10 \text{ Voltios} = \pm 10.000 \text{ mV} \text{ (mV = milivoltios)}$$

Un valor mayor a V_{max} satura al Conversor AD y se produce un recorte en la muestra.

El valor mínimo de voltaje que se puede convertir es:

$$V_{min} = \frac{V_{max}}{2^{23}} = \frac{10.000 \text{ mV}}{8.388.608} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ mV} = 1,2 \text{ } \mu\text{V} \text{ (}\mu\text{V = microvoltios)}$$

Un valor menor a 1,2 μV no podrá ser convertido y dicha muestra se perderá.

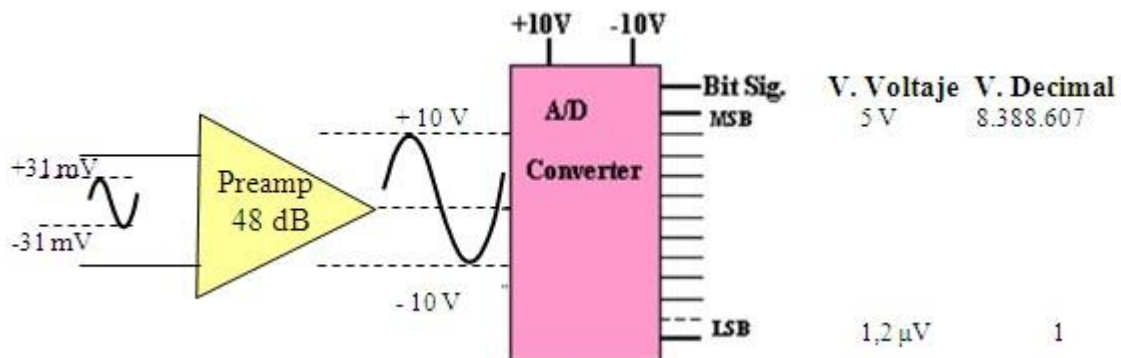


Figura 4, Pre-amplificación y Conversión A/D en un sistema de adquisición sísmica

Ejemplo 2: ¿Qué valores de voltajes de entrada en el I/O System II, se corresponden con los valores máximo y mínimo admitidos por su Conversor AD?

Dependiendo de la ganancia seleccionada en su Preamplificador (ejemplo: 12 y 48 dB), se obtienen los voltajes máximos y mínimos a la entrada de la Caja Electrónica del I/O System II:

$$\text{Para } 12 \text{ dB: } V_{max} = \pm 10000 \text{ mV} / 4 = \pm 2500 \text{ mV}$$
$$V_{min} = \pm 1,2 \text{ } \mu\text{V} / 4 = \pm 0,3 \text{ } \mu\text{V}$$

Para 48 dB: $V_{\max} = \pm 10000 \text{ mV} / 256 = \pm 39 \text{ mV}$
 $V_{\min} = \pm 1,2 \text{ } \mu\text{V} / 256 = \pm 0,004 \mu\text{V}$

NOTA: Los valores máximos y mínimos así calculados, son ligeramente mayores que los especificados por I/O, debido a que las ganancias reales del Preamplificador son mayores que las teóricas, para compensar la caída de voltaje en la circuitería intermedia entre Preamplificador y Conversor AD. Por ejemplo: la ganancia real del Preamplificador para 48 dB es de 321 veces y entonces: $V_{\max} = \pm 31 \text{ mV}$.

Ejemplo 3 ¿Cuáles son los valores de voltaje de entrada: máximos y mínimos del Sercel 408/428 a la entrada del Conversor AD para una Preamplificación de 12 dB? Según las especificaciones del fabricante (Sercel), el valor máximo eficaz a la entrada del Preamplificador es:

$$V_{\max_{\text{rms}}} = \pm 400 \text{ mV}_{\text{rms}} \text{ para K-Gain } 12 \text{ dB}$$

Obtenemos los valores “pico” equivalentes multiplicando los valores eficaces (rms) por raíz de 2:

$$V_{\max_{\text{p}}} = \pm 400 \times \sqrt{2} = \pm 564 \text{ mV}_{\text{p}}$$

Para obtener los valores máximos a la entrada del Conversor AD, debemos aplicarle la ganancia del Preamplificador (12 dB \approx 4 veces):

$$V_{\text{pmax}} = \pm 564 \times 4 = \pm 2256 \text{ mV}_{\text{p}}$$

Este valor de voltaje es el que completa la escala del Conversor AD (full scale)

El valor mínimo que el Sercel 408/428 puede convertir, de acuerdo al Rango Dinámico del Conversor de 24 bits, deberá ser 140 dB más bajo:

$$V_{\text{pmin}} = V_{\text{pmax}} / 2^{23} = \pm 2256 / 8388608 = \pm 0,27 \text{ } \mu\text{V}$$

Por lo tanto el valor mínimo de voltaje a la entrada del Preamplificador deberá ser 12 dB inferior:

$$V_{\text{min}_{\text{p}}} = \pm 0,27 / 4 = \pm 0,07 \text{ } \mu\text{V};$$

$$\text{Expresado en valores eficaces: } V_{\text{min}_{\text{rms}}} = 0,07 / \sqrt{2} = \pm 0,05 \text{ } \mu\text{V}$$

NOTA: Sercel no suministra información sobre los valores máximos y mínimos de su Conversor AD. Considerando que la ganancia aplicada es ligeramente mayor a la teórica podríamos especular que $V_{\text{pmax}} = \pm 564 \times 4,25 \approx \pm 2400 \text{ mV}$ y $V_{\text{pmin}} = \pm 0,29 \text{ } \mu\text{V}$.

Comentario 1:

En la teoría de errores de medidas eléctricas, existe un postulado muy importante: “La medida más cercana al valor real (menor error), es la que se realiza cerca del fondo de escala del instrumento de medida”.

Esto también debe aplicarse al Conversor AD y expresa que: los valores máximos de la señal sísmica, deberían ocupar la mayor cantidad de bits del Conversor A/D, pero sin llegar a saturarlo (3/4 de escala sería aconsejado). Desgraciadamente no todos los sistemas actuales poseen valores de Pre-amplificación para lograr cumplir con este requisito, ya que optaron por simplificar su electrónica para ahorrar energía y hacerlos más livianos.

El Rango Dinámico Disponible

Como todo instrumento electrónico tiene un nivel de ruido interno que enmascara las señales más débiles, deberemos limitar el rango dinámico teórico, anteriormente empleado (que fue de 140 dB), reemplazando el Valor Mínimo de voltaje por el Valor del Ruido Interno.

Entonces nos queda:

$$\text{R.D. Disponible} = 20 \log (V_{\text{máx}} / V_{\text{ruido}})$$

Las especificaciones de los fabricantes indican que:

Para el Sercel 408: Ruido Interno Equivalente a la entrada = 0,250 μ V
(Para $V_{\text{máx}}$ = 400 mVrms - máxima ganancia disponible: Kgain 12 dB), Antialias Filter $\frac{3}{4}$ Nyquist (única opción)

$$\text{Rango Dinámico Disponible} = 20 \log (400000 / 0,250) = 124 \text{ dB}$$

Para el I/O System II, ruido interno equivalente a la entrada es = 0,245 μ V (Para $V_{\text{máx}}$ = 22 mVrms (máxima ganancia disponible: Kgain: 48 dB; Antialias Filter $\frac{3}{4}$ Nyquist).

$$\text{Rango Dinámico Disponible} = 20 \log (22000 / 0,245) = 99 \text{ dB}$$

Para el I/O System II, ruido interno equivalente a la entrada es = 0,190 μ V (Para $V_{\text{máx}}$ = 22 mVrms - máxima ganancia disponible: Kgain: 48 dB; Antialias Filter $\frac{1}{2}$ Nyquist).

$$\text{Rango Dinámico Disponible} = 20 \log (22000 / 0,190) = 101 \text{ dB}$$

Comentario 2:

Los valores de ruido interno son similares tanto para el Sercel 408 como para el I/O System II (para máxima ganancia de preamplificación y frecuencia del anti-alias de $\frac{3}{4}$ de Nyquist) y este valor es superior a los valores mínimos de los voltajes de entrada de ambos sistemas vistos.

El rango Dinámico Disponible es mayor en el Sercel 408 que en el I/O pues el primero posee un $V_{\text{máx}}$ mayor para máxima ganancia (400 mVrms > 22 mVrms),

pero si no existe señal sísmica por encima de 22 mVrms, los bits más significativos del Sercel no se ocuparán y el mayor rango dinámico será solamente teórico.

En la figura 5 se muestra el espectro teórico de la señal sísmica después de su viaje por el subsuelo (curva en azul). Las más bajas frecuencias: o no fueron emitidas o son atenuadas en su amplitud por los receptores convencionales; la absorción de energía del subsuelo atenúa a las más altas frecuencias y el ruido interno del sistema de adquisición acota las amplitudes más bajas de la señal. Queda así definido el Ancho de Banda y el Rango Dinámico Disponible de la Adquisición RAW (sin suma de señales ni proceso posterior).

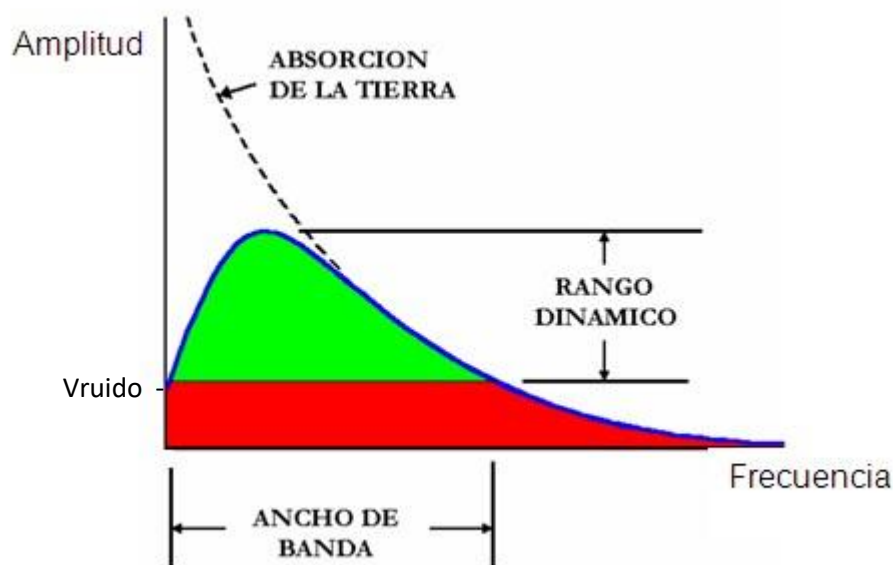


Figura 5, Rango Dinámico Disponible de la señal sísmica

El Procesamiento posterior de los datos sísmicos del registro RAW (suma de barridos, "stack" y demás), permitirán recuperar muchos de los bits aquí perdidos por el ruido interno del sistema de adquisición, es decir que se incrementará el rango dinámico de la adquisición a valores cercanos a los teóricos 140 dB.

Límite de señal recuperable en la Conversión AD

En principio pensaríamos que el valor mínimo de voltaje que se puede recuperar sería el correspondiente al mínimo valor representado digitalmente, es decir el valor del bit menos significativo (LSB). En realidad el límite de recuperación de una señal sísmica, mediante un procesamiento adecuado de la información registrada, es menor que este y corresponde el ruido de cuantificación (quantization noise).

El Ruido de Cuantificación es el ruido que genera el Conversor A/D debido a que utiliza voltajes de referencias discretos para convertir el voltaje de entrada en un número a su salida. Este ruido depende de la cantidad de bits en el que es convertida la muestra analógica y de la frecuencia de muestreo. El Conversor Sigma-Delta de 24 bits, es empleado por todos los instrumentos de adquisición modernos (como los utilizados en nuestros ejercicios) y se caracteriza por una muy alta velocidad de muestreo inicial (256 KHz), convirtiendo inicialmente la muestra a un solo bit, (la muestra es transformada inicialmente en una gran densidad de “0s” y “1s”). El efecto de este mecanismo es que el ruido de cuantificación (“ruido blanco” en conversores convencionales) se disminuye drásticamente dentro de la banda pasante sísmica, por un efecto denominado: “Shaping Filter” (filtrado modelador). Aunque la energía promedio de ruido se mantiene similar a la de los conversores convencionales, este es desplazado fuera del espectro útil y entonces el ruido de cuantificación será mucho más pequeño dentro de la banda de interés sísmico.

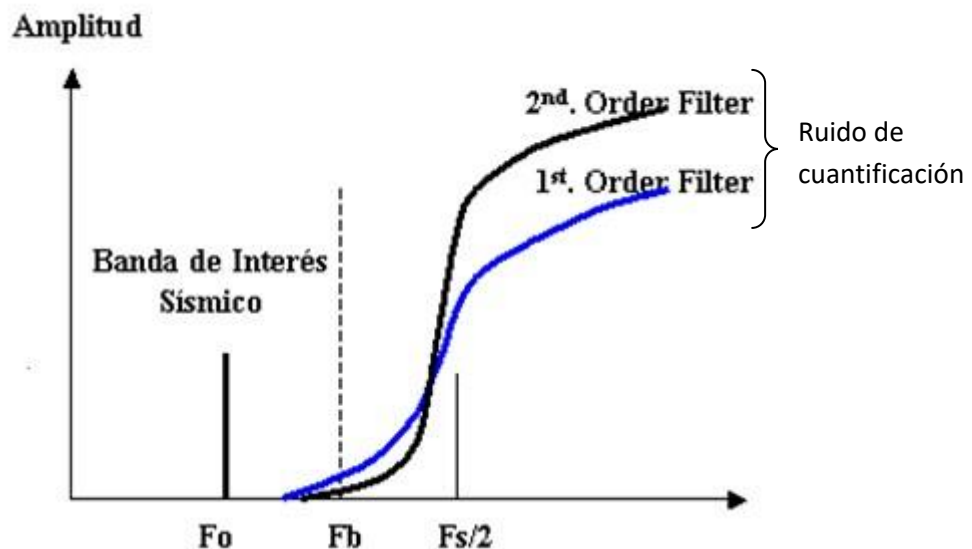


Figura 6, Acción de modelación de ruido (shaping filter)

En general se calcula el valor del ruido de cuantificación para el Conversor Sigma Delta, como el valor del bit menos significativo sobre la raíz cuadrada de 12 ($\sqrt{12}$).

$$\text{Ruido de Cuantificación del I/O System II: } \frac{1,2 \mu\text{V}}{\sqrt{12}} = 0,35 \mu\text{V}$$

$$\text{Ruido de Cuantificación del Sercel 408: } \frac{0,3 \mu\text{V}}{\sqrt{12}} = 0,09 \mu\text{V}$$

El ruido de cuantificación del Sercel 408 es menor que el del I/O System II porque maneja valores de voltajes más pequeños sobre el conversor.

Para compararlo con el ruido interno equivalente a la entrada, al valor obtenido le quitaremos la amplificación aplicada (48 dB para el I/O y 12 dB para el Sercel) y lo expresaremos en valores eficaces.

$$\begin{aligned} \text{I/O System II} &= \frac{0,35}{\sqrt{2} \times 256} = 0,001 \mu\text{Vrms} = 1,0 \text{ nVrms} \\ \text{Sercel 408} &= \frac{0,09}{\sqrt{2} \times 4} = 0,016 \mu\text{Vrms} = 22,5 \text{ nVrms} \end{aligned}$$

Como vemos estos valores se encuentran por debajo del ruido eléctrico interno equivalente a la entrada, en ambos instrumentos y es posible que podamos aproximarnos a estos valores, en caso de existir señales sísmicas tan pequeñas y con un Procesamiento adecuado.

Que niveles de voltajes se generan en las estaciones receptoras

Ya conocemos los valores de los voltajes máximos y mínimos de los instrumentos (se pueden deducir para cualquier instrumento comercial a través de sus especificaciones). Ahora averiguaremos que valores de voltaje se generan en la estación sísmica con geófonos.

Hasta no hace demasiado tiempo, las estaciones sísmicas utilizaban casi con exclusividad: ristras de geófonos conectados en diferentes configuraciones como transductor: “velocidad del movimiento del terreno – voltaje eléctrico análogo”.

En un geófono de velocidad, una bobina de alambre conductor de longitud “l”, se mueve cortando líneas de flujo magnético de densidad “B” arrollada sobre una “forma” cilíndrica. La bobina se encuentra suspendida de resortes que proporcionan la cupla antagónica (ver figura 7) El producto “B x l”, densidad magnética por la longitud de la bobina, es fijo y se denomina: Sensibilidad del Geófono (S). Este valor para el Sensor SM-24 es de:

$$S = B \times l = 28,8 \text{ Voltios/ metro /segundo}$$

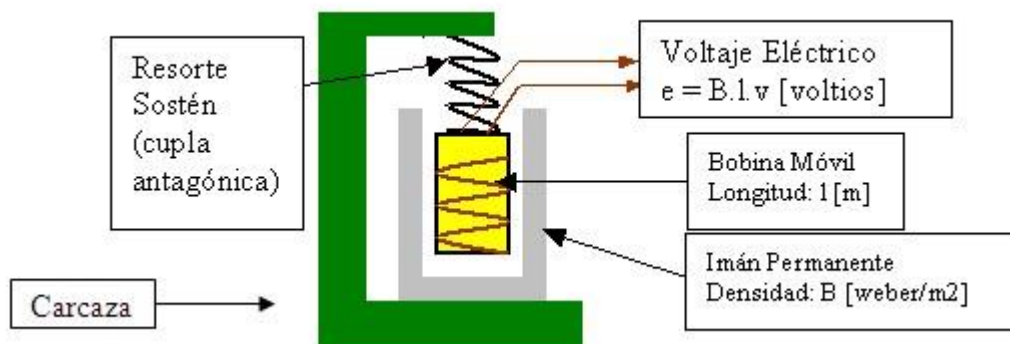


Figura 7, el geófono de bobina móvil e imán permanente

El voltaje que genera el geófono es análogo a la velocidad del desplazamiento de su bobina con respecto a su carcasa contenedora.

El geófono posee un rango dinámico equivalente ó aún mayor que el Conversor AD Sigma Delta. Su límite superior estaría determinado por la aceleración necesaria

para que se desacople del terreno, es decir: $1g$, ($\approx 10 \text{ m/s}^2$) y su límite inferior es: "Background Noise" (ruido estimado que produce la tierra en reposo, sin excitación sísmica).

- Valor estimado de velocidad equivalente a "1 g" para 10 Hz $\sim 450 \text{ mm/s}$
- Valor estimado del ruido de fondo de la tierra en reposo $\sim 0,25 \times 10^{-4} \text{ mm/s}$

Rango Dinámico Teórico del Geófono = $20 \log (450 / 0.000025) \sim 145 \text{ dB}$

-4

Para fabricar un filtrado espacial de los ruidos propagados horizontalmente en 2D, solemos emplear como estación receptora ristras de geófonos. Supongamos que empleamos una ristra en configuración 6x2 (seis geófonos en serie, en paralelo con otros seis geófonos en serie) uniformemente distribuidos.

Si esta ristra poseyera geófonos SM-24 los valores serian los siguientes:

Resistencia de la bobina del geófono: $R_{\text{coil}} = 375 \Omega$

Resistencia de amortiguamiento en paralelo con la R_{coil} : $R_{\text{dump}} = 1000 \Omega$

Resistencia eléctrica total de la ristra (Rristra):

$$R_{\text{ristra}} = [6 \times (375 \parallel 1000)] \parallel [6 \times (375 \parallel 1000)] = \frac{6 \times \frac{375 \times 1000}{375 + 1000}}{2} = 818 \Omega$$

Sensibilidad total de la ristra (Sristra):

$$S_{\text{ristra}} = 6 \times 28,8 \times \frac{1000}{375 + 1000} = 125,7 \text{ Voltios/metro/segundo}$$

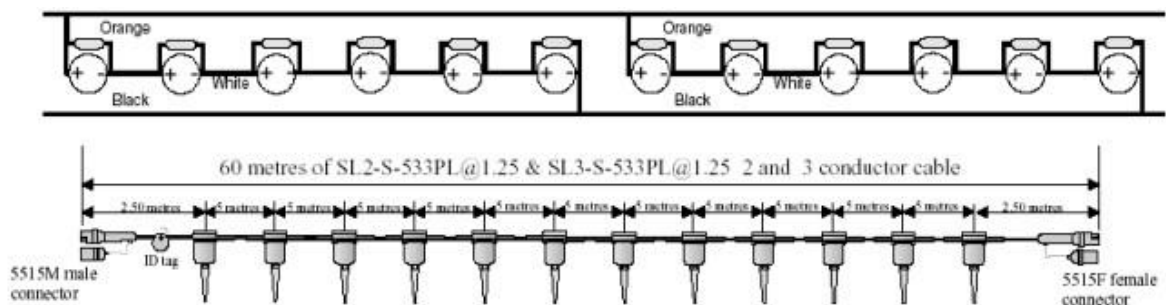


Figura 8, ristra de 12 geófonos en configuración 6 x 2

El rango dinámico de 145 dB 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. Existen pérdidas de aislamiento eléctrico en los cables empleados en la conexión de la ristra y de estos hasta la entrada del Preamplificador del instrumento de adquisición (“leakage” y “crossfeed”).
3. De la falla en la simetría ó balance eléctrico de c/conductor del par (common mode noise), etc.

Cada muestra de voltaje adquirida por nuestro instrumento poseerá una resolución diferente a la total posible (rango dinámico disponible) dependiendo de las causas anteriores y de las componentes del espectro sísmico recibido. A este valor parcial de rango dinámico lo denominaremos: Rango Dinámico Instantáneo ó simplemente: Resolución.

La principal causa de distorsión en un geófono es la no-linealidad del resorte que provee la cupla antagónica a la bobina móvil componente. 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, ver más abajo).

Por lo tanto el Rango Dinámico Instantáneo del Geófono SM-24, debido al efecto de distorsión, es de:

$$R.D.I. = 20 \log (1/0,001) = 60 \text{ dB}$$

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:

$$R.D.I. = 20 \log (1/0,0003) = 71 \text{ dB}$$

Finalmente si consideramos el valor total de la distorsión típica de una ristra de 12 geófonos SM-24, vemos que este baja al orden de los 0,01%.

$$R.D.I. = 29 \log (1/0,0001) = 80 \text{ dB}$$

Los demás efectos mencionados: leakage, crossfeed, inducciones varias, dependerán del buen mantenimiento practicado en las ristras y en los cables que lo transportan hacia el Preamplificador (y en la longitud del cable). Podemos sugerir que en condiciones normales de operación, la resolución ó rango dinámico instantáneo debería estar comprendido entre 60 y 80 dB.

Los sensores de aceleración (generan un voltaje eléctrico análogo a la aceleración diferencial en el movimiento del sensor), permiten aumentar el rango dinámico Instantáneo a valores comprendidos entre 90 y 100 dB y a su vez extienden la banda sísmica hasta valores de 0 Hz (frecuencia de la aceleración de la gravedad).

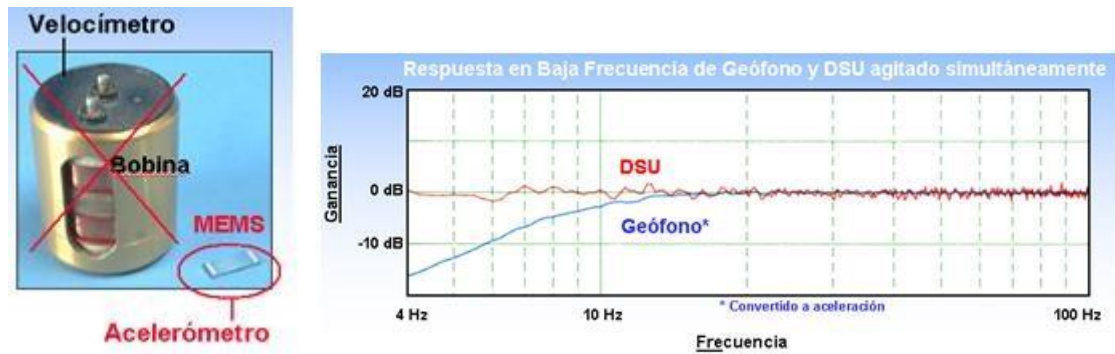


Figura 8, geófono versus acelerómetro piezoeléctrico (MEMS)

Una de las causas de mayor rango dinámico instantáneo de los acelerómetros (MEMS o GACs), es que generan su “cupla antagónica” por realimentación eléctrica negativa y digitalizan el voltaje eléctrico generado, dentro de la misma capsula que contiene al sensor, eliminando los cables que transportaban la pequeña señal analógica de baja frecuencia.

La desventaja de estos acelerómetros, es que se trata de un solo elemento y no permiten arreglos de elementos como lo hace la ristra de geófonos para atenuar ruidos superficiales. Pero si trabajamos en alta densidad espacial con Receptores Puntuales, estos acelerómetros resultan insustituibles y el arreglo lo haríamos por reagrupamiento post-adquisición ó dejaríamos que el posterior “stack” de datos realice el filtrado espacial (suponiendo estacas espaciadas a 5 metros, por ejemplo).

Entre los acelerómetros actuales encontramos a:

- M.E.M.S. Micro Electro Mechanical System (DAS-1 y 3 de Sercel y VectorSeis de Innova)
- GAC: Geophone Accelerometer (WesternGeco Q-Land)

Ejemplo 4: ¿Qué magnitud tendrá el voltaje eléctrico generado por reflexiones sísmicas en las ristras SM-24 de la figura 8?

Por experiencia puedo decir que las reflexiones sísmicas correspondientes a horizontes no muy profundos y offsest cercanos, utilizando fuentes de energía vibroseis (4 vibros de 60000 lbf c/u) y estaciones receptoras ídem figura 7, no generan voltajes eléctricos superiores a 31 mV pico (22mVrms), ya que no he observado trazas recortadas durante las reflexiones adquiridas con I/O System II con un K-Gain de 48 dB.

Por supuesto que la refracción en horizontes someros puede superar ampliamente esta amplitud, pero la señal recortada por el Conversor AD correspondiente al “first break” es puesta a 0 (Zeroed) en proceso; por lo tanto NO debemos bajar el K-Gain para que no se saturé el Conversor AD al momento de los primeros quiebres (first breaks).

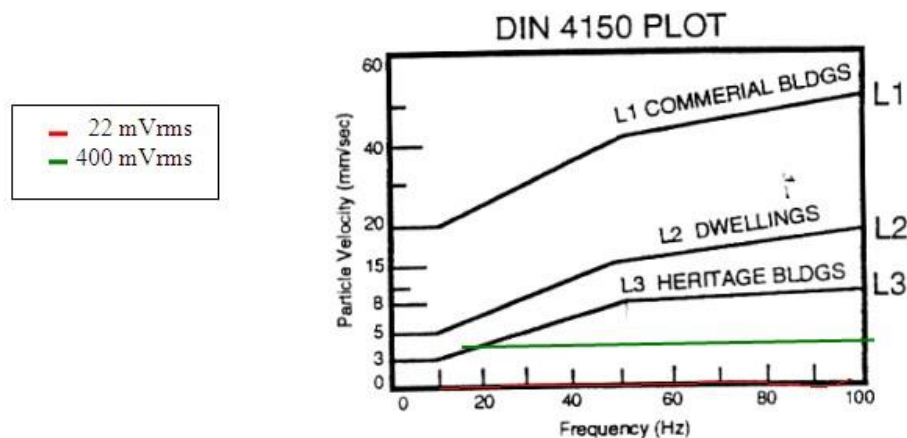
Ejemplo 5: ¿Qué velocidad alcanzan las partículas del terreno en respuesta a una reflexión sísmica que excita a los geófonos de las ristras para un valor de voltaje de 31 mVp y que magnitud relativa representa?

La ristra de la figura 8 genera 125,7 Voltios para una velocidad de movimiento de 1 metro/segundo. Por lo tanto para 31 mVoltios:

$$\text{Velocidad Desplazamiento de partículas} = 31 \text{ mV} / 125,7 \text{ V/m/s} = 0,25 \text{ mm/seg}$$

Si este valor de 0,25 mm/s lo comparamos con el valor promedio del ruido generado por la tierra en reposo decimos que: “la velocidad de movimiento de partículas generada se encuentra 80 dB (10000 veces) por encima del ruido de fondo de la tierra”.

También nos valdremos de la ayuda de normas internacionales de seguridad como la mostrada en la figura 9 y que corresponde a la Norma DIN 4150 (estándar en Alemania) que establece límites de velocidad de movimiento de partículas en función de la frecuencia de excitación, para evitar daños en distintos tipos de estructuras.



- Line 1: Curva de máxima tolerancia para estructuras poco sensibles.
- Line 2: Curva de máxima tolerancia para estructuras medianamente sensibles.
- Line 3: Curva de máxima tolerancia para estructuras altamente sensibles.

Figura 9, Criterio de Prevención Normas DIN 4150

El valor de velocidad de 0,25 mm/s (en rojo) no tiene una magnitud significativa para que pueda ser considerada como peligrosa sobre ningún tipo de edificación, en cambio si hacemos la misma cuenta para el valor de voltaje máximo de 566 mVp (400 mVrms), la velocidad es de: 4.5 mm/s (en verde) y ahora sí esta amplitud produciría un movimiento de partículas del terreno peligroso para las edificaciones precarias entre 10 y 20 Hz aproximadamente.

Ejemplo 6: ¿Qué valor de aceleración alcanzaría un acelerómetro DAS-1 (Sercel MEMS monocanal) para la misma excitación anterior?

Como cualquier onda sísmica puede descomponerse en una suma finita de ondas sinusoidales puras (dentro del espectro sísmico útil), donde la aceleración es la derivada de la velocidad respecto al tiempo ($a = dv/dt$), no existe ningún impedimento en pasar de una magnitud a otra.

En forma práctica podemos realizar la siguiente relación: $Acc = v \times 2\pi f$, los valores de aceleración para una determinada frecuencia resultan de multiplicar la velocidad por $2\pi f$.

Tomando por ejemplo un valor de frecuencia (f) de 25 Hz y reemplazando v por el valor hallado en el ejemplo anterior queda:

$$Acc = 0,25 \times 2 \times 3,14 \times 25 = 39,35 \text{ mm/s}^2$$

Fuente de Energía: Vibroseis

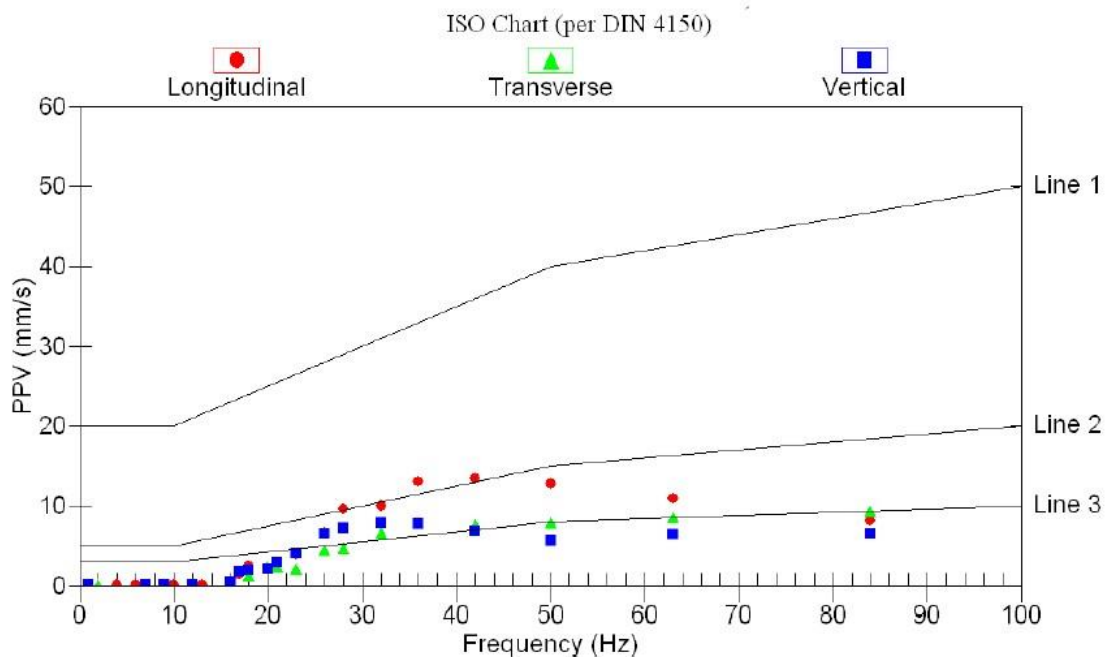
Aprovechando el haber introducido en el Criterio de Prevención anterior (Norma DIN 4150), veamos algunos “ensayos de movimiento de partículas” realizados con 4 Vibradores de 60000 lbs con una Fuerza de Salida de c/vibro del 70% del Holdown (42000 lbs).

La frecuencia del barrido utilizado y el tiempo de barrido fueron los siguientes:

Frecuencia del Barrido Lineal: 6 – 150 Hz.

Tiempo del Barrido: 12 segundos.

En el primer ensayo colocamos un geófono 3C a 10 metros en el centro del arreglo lineal de los 4 vibradores. Resulta evidente que vamos a medir mayormente: “ondas superficiales” (directa y ground roll) y no reflexiones/refracciones y sabemos que estas últimas son de menor amplitud que las primeras.



Distance	Vib Qty	Force %	L	T	V	PPV	Freq.
10	4	70	13.4	9.28	7.81	15.37	41.7

Figura 10, 4 vibradores al 70 % a 10 metros de distancia

En este caso la componente longitudinal fue la de mayor amplitud y estaría superando la Línea 2, poniendo en riesgo a estructuras sensibles y medianamente sensibles.

El valor del PPV (Peak Particle Value) representa el valor máximo total del movimiento de partículas del terreno a una frecuencia del barrido y se obtiene como resultante de la: raíz cuadrada de la suma del cuadrado de las componentes:

$$PPV = \sqrt{L^2 + T^2 + V^2} = \sqrt{(13,4)^2 + (9,28)^2 + (7,81)^2} = 15,37 \text{ mm/s}$$

En este caso el PPV se produjo a una frecuencia de barrido de 41,7 Hz.

Si este evento fuese sentido por la ristra SM4, esta produciría un voltaje de:

$$\text{Voltaje generado en ristra} = 125 \text{ V/m/s} \times 0,015 \text{ m/s} = 1,8 \text{ Voltios}$$

Este valor de voltaje satura el Conversor del I/O System II (para KGain: 24, 36 y 48 dB) pero no al Sercel con preamplificación de 0 dB ($V_{\text{max}} = 2250 \text{ V}_{\text{pico}}$). En este caso, aparte de asegurarnos no tener cerca ninguna estructura sensible ó medianamente sensible cercana a la estación receptora, no deberíamos sumar este canal de datos para no afectar el resultado del VP.

En un segundo evento, los mismos 4 vibradores se encuentran a 35 metros de la misma estación receptora y ahora el PPV es de 4,06 mm/s a una frecuencia de 35 Hz y la ristra con geófonos SM4, estaría generando un voltaje de 0,56 Voltios.

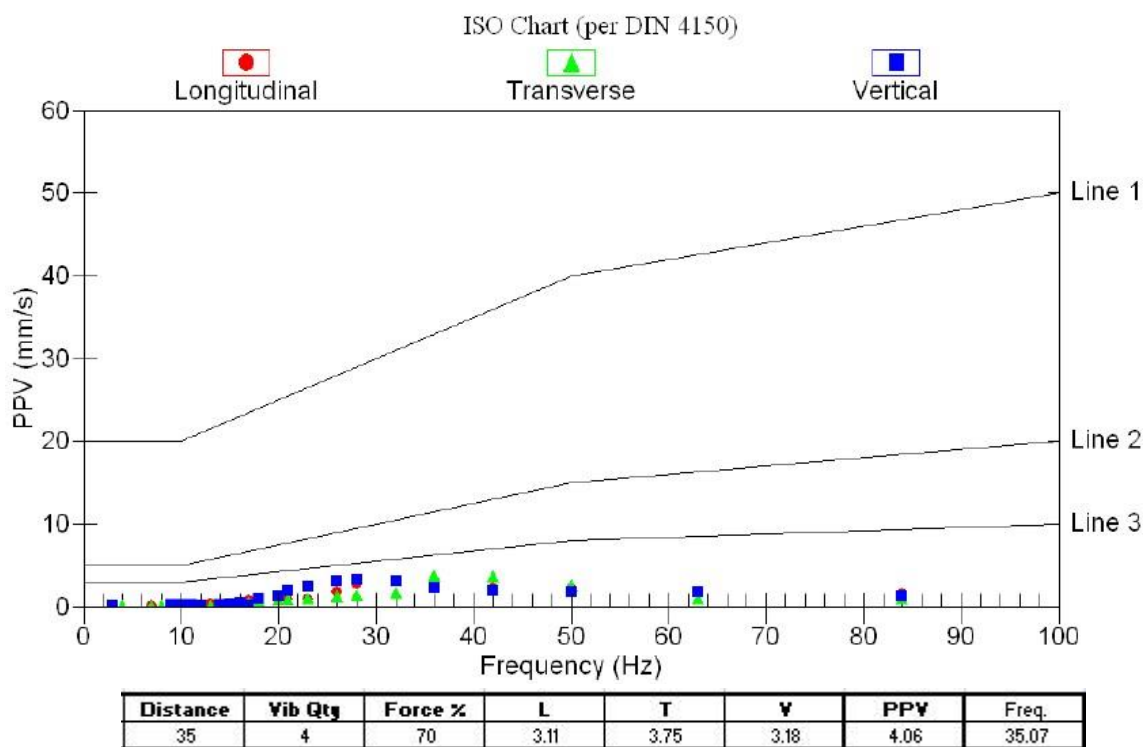


Figura 11, 4 vibradores al 70 % a 35 metros de distancia

Aunque ya no generaríamos daño a ningún tipo de estructuras, todavía el I/O System II estaría saturando su Conversor, pero no lo haría el Sercel 408/428 para ningún valor de preamplificación.

Comentario 3

En los eventos mostrados solamente debemos cuidar de no dañar las estructuras existentes, desde este punto de vista, podemos también bajar la fuerza de los vibradores para no desplazarlos de la estaca.

Lo que no deberíamos hacer, es bajar la preamplificación del instrumental ya que solamente algunos canales serían afectados por recortes de su señal y reduciendo el voltaje máximo a convertir perderíamos algunas de las señales más débiles.

Si en el I/O System II redujéramos la ganancia de 48 dB a 12 dB (64 veces), la V_{max} pico a la entrada del preamplificador será:

$$V_{max}: 31 \text{ mV} \times 64 \approx 2 \text{ Voltios (K-Gain 12 DB)}$$

Este valor no generaría la saturación del conversor cuando los vibradores se encuentran a 10 metros de la estación receptora. Pero ahora la V_{min} admitida será una señal 64 más grande que la que obteníamos con una preamplificación de 48 dB, y en caso de existir, se perderían las señales más débiles:

$$V_{min} = V_{max} / 2^{23} = 2 \text{ V} / 8388608 = 236 \text{ nV} \gg 3,7 \text{ nV}$$

Fuente de energía: explosivos

Con explosivos es mucho mayor el espectro de energía emitido y también puede ser mayor la energía de sus componentes. La experiencia muestra que las amplitudes de los registros RAWs son más consistentes con vibros que con dinamita, debido a los diferentes medios de acoplamiento explosivo-terreno. A su vez la profundidad de la carga y la cantidad de la misma hace muy difícil predecir los efectos causados tal como lo vimos con vibradores.

En general la energía de una carga explosiva produce una mayor energía sísmica y de más ancho espectro (desde 0 a la frecuencia anti-alias del instrumento de adquisición) a la que generan los vibradores.

Si pudiésemos emplear explosivos en nuestra exploración sísmica y, a su vez, utilizar acelerómetros como estaciones receptoras para aprovechar las muy bajas frecuencias generadas con explosivos y que no pueden ser generadas con vibradores, estaríamos completando espectralmente la traza sísmica para someterla al proceso de "Inversión" y obtener los índices de reflexión de las capas del subsuelo, prescindiendo de la sísmica de pozo que, hasta ahora, nos proporcionaban esas bajas frecuencias..

La experiencia también indica que los valores de pre-amplificación deberían bajarse a: 36 dB en el caso de I/O System II y mantenerse en 12 dB en Sercel 408/428.

Comentario final

La mayoría de los conceptos aquí tratados, pueden merecer una mayor justificación geofísica, como ser: ¿Qué magnitud posee la onda sísmica en función de: la fuente de energía empleada, de las características litológicas del subsuelo de la cuenca prospectada, del acoplamiento de los sensores sobre el terreno, etc, etc?

Es evidente que la utilización de receptores digitales mejorará el rango dinámico instantáneo de la señal sísmica pero habrá que verificar que el instrumento de adquisición se encuentre adaptado a manejar los niveles de voltajes generados ya que generalmente se emplea un solo geófono por estación receptora (single sensors), y la Sensibilidad de transducción de los acelerómetros produce voltajes equivalentes al de un geófono de velocidad.

Utilizando los ejemplos anteriores podemos evaluar que un mayor voltaje de entrada admitido por un Instrumento, no implica una mejor utilización del rango dinámico disponible. Algunos instrumentos deben de haber sido dimensionados para recibir una amplitud de voltaje eléctrico superior al que utilizamos en Argentina, ya sea por mayor energía en la fuente sísmica (el explosivo es una alternativa de mayor energía instantánea) y/o por mayor cantidad de geófonos en serie en la estación receptora. En Medio Oriente se suele utilizar arreglos de recepción de hasta 72 geófonos conectados en diferentes configuraciones.

Sobre muchos de los temas aquí tratados, tengo un mayor desarrollo teórico-práctico no incluido en este artículo para no afectar a la generalidad del mismo.

Si alguien desea extender algún tema en particular ó considera erróneos los datos proporcionados, me ofrezco a discutir los mismos o a proporcionarle material propio o de algún colega.

REFERENCIAS

BIP magazine, segunda edición de Noviembre de 2005, editado por la Asociación Argentina de Geólogos y Geofísicos del Petróleo (AAGGP)

Dynamic range and instrumentation – myths, facts and current status – Norman M. Cooper. Mustagh Resources Ltd, 1987.

El Conversor Sigma Delta – Pacífico Concetti – Western Geophysical, 1994.

Seismic instrumental beyond the manufacturer specifications-John GrahamWesternGeco-Gatwick, 2004.

Why accelerometers for digital sensors? - Denis Mougnot, Sercel Carquefou Cedex, France, SEG 2004.

Q-Land, acquisition and processing system across the life of the field - Andreas Laake, Boff Anderson WesternGeco-Gatwick, 2005.

Seismic Data Recording – The Limiting Component – A.D. Beecroft, Albert Stienstra, Sensor Nederland.

Everlet V User Manual, Prevention Criteria's – Vibra-Tech Engineers

I/O System II Performance Manual

Sercel 428 User's Manual and WesternGeco internal discussion.

Nodal Systems, diferentes compañías.

Dynamic range in a seismic channel - Michael L. Abrams and A. Keith Elder - first break volume 31, January 2013.