

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

Tesis

**ESTIMACION ESPECTRAL
DE SEÑALES SISMICAS DE
REFLEXION.**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO GEOFÍSICO

Presentada por

Rogelio Laguna Chavira



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

CON TODO EL AFECTO PARA MI
MADRE,,POR TODO LO QUE ME
HA OTORGADO EN SU VIDA.

A NORMA
CON AMOR.

POR LA PACIENCIA,,APOYO Y
RESPALDO A LAS ACCIONES DE MI VIDA
GRACIAS

A MIS HIJAS E HIJOS

BRENDA PATRICIA
ERANDI VIOLETA
ROGELIO ALONSO

A LA MADRE TIERRA
LE AGRADEZCO LA BONDAD,
QUE TIENE CON LA RAZA HUMANA..

AGRADEZCO EL APOYO DEL DR. ANDRES TEJERO ANDRADE AL
GUIAR ESTE TRABAJO HASTA EL FINAL, A LOS PROFESORES DE
INGENIERIA GEOFISICA DE LA FACULTAD DE INGENIERIA Y DEL
INSTITUTO DE GEOFISICA POR SU COLABORACION EN LA ELABORACION DE
ESTA TESIS.

POR SIEMPRE
LARGA VIDA A LA UNAM...

ÍNDICE

RESUMEN		1
INTRODUCCIÓN		2
CAPÍTULO I		
	<i>ESPECTRO DE POTENCIA DE LA TRAZA SÍSMICA</i>	
I.1	ESPECTRO DE POTENCIA	5
I.2	TEOREMA DE PARSEVAL	11
I.3	TEOREMA DE WIENER-KHINTCHINE	15
I.4	SEÑALES EN GEOFÍSICA	18
I.5	TRUNCAMIENTO DE SEÑALES ANALÍTICAS	22
CAPÍTULO II	<i>TECNICAS PARA LA OBTENCIÓN DEL ESPECTRO DE POTENCIA</i>	24
II.1	METODO INDIRECTO	26
II.2	METODO DIRECTO	29
CAPÍTULO III	<i>APLICACIÓN A LA TRAZA SÍSMICA</i>	
III.1	VENTANAS	31
III.2	SUAVIZAMIENTO DEL ESPECTRO	37
III.3	EJEMPLO SINTÉTICO	39
CAPÍTULO IV	<i>CONCLUSIONES</i>	59
	BIBLIOGRAFIA	63
APÉNDICES		
I	PROGRAMA EN FORTRAN	i
II	EJEMPLOS DE ESPECTROS DE POTENCIA	xvi

RESUMEN.

En esta tesis se desarrolló un programa en lenguaje Fortran para la estimación del espectro de potencia, para obtener el contenido de frecuencias de una señal en este caso sísmica y de energía finita, esta basado en procedimientos que emplean la transformada de Fourier, que en este trabajo se utilizó para datos de tipo discretos, con el manejo de ventanas en el dominio de las frecuencias. En la estimación espectral por este método es indispensable no ocultar, por el efecto de lóbulos laterales y/o negativos pronunciados o inclusive por un truncamiento excesivo de las respuestas espectrales a las señales necesarias para la interpretación de un evento sísmico, como ocurre en la sismología de reflexión y así retirar registros que se superponen a estas como ruido ambiental, onda aérea etc.

Así pues, la selección correcta de una ventana en el tratamiento de datos sísmicos, que en esta trabajo fueron utilizadas varias ventanas para comparar los efectos sobre el espectro de potencia, que principalmente fueron las de Hanning y Hamming, permiten observar la disminución de lóbulos laterales del espectro de potencia suavizado con la posibilidad de dar mayor resolución al espectro obtenido y de esta forma preservar las altas frecuencias y lograr la detección de estructuras geológicas superficiales.

Dentro del algoritmo se calculó función autocorrelación y su transformada, uso de ventanas y fue considerado un filtrado adicional para evitar distorsión del espectro que permita tener mayor resolución, para así dejar pasar la señal en una banda limitada de frecuencias de manera que se tengan registradas las frecuencias que contienen energía de reflexión coherente.

INTRODUCCION

En el método sísmico de reflexión se han aplicado diversas técnicas matemáticas a los sismogramas, en función de las teorías de propagación de onda y del análisis estadístico sobre series de tiempo, para determinar las señales útiles que pudieran estar interferidas por ruido y aplicando el enfoque determinístico y / o estadístico.

Al descomponer las series de tiempo detectadas en armónicos y multiplicarlos por una onda sinusoidal con una frecuencia dada en un intervalo de tiempo, utilizando el análisis de Fourier, se obtiene la densidad espectral de amplitud que elimina las componentes de frecuencias no útiles. La sismología de exploración, requiere especial atención en la elección de las técnicas de campo, ya que la tendencia actual radica en obtener los atributos físicos de la traza sísmica y por esto es necesario señalar la importancia de efectuar una adecuada obtención de los datos de campo, ya que estos son extraídos de esta información a través del procesamiento computacional sísmico.

Ha pasado ya algún tiempo desde que en 1940 Norman Ricker describiera los conceptos básicos del modelo convolucional de sismograma sintético y las bases para la sismología moderna de exploración que hoy en día se presenta con la ayuda de herramientas más sofisticadas, y mucho más accesibles a la interpretación.

En un principio, la ondícula de Ricker se usaba para efectos de modelado rudimentario, esto es, sintetizar la traza sísmica esperada en una capa cuyas velocidades de onda son intermedias.

La versión moderna de la traza sísmica unidimensional sintética fue introducida por R.A. Peterson, W.R. Filipone y B.F. Coker en 1955 gracias al desarrollo del registro sísmico (Backus, 1979).

Así los requerimientos para una buena obtención de resultados se apoyaba en la realización de varias correcciones de campo, asimismo; se debía tener especial cuidado en proveer al

sistema físico de medición de una adecuada razón señal/ruido en los geófonos, además de elegir una ondícula de corta duración y de variación muy pequeña para evitar una distorsión en los datos obtenidos en el campo para obtener un mejoramiento de la ondícula de campo. esta introducción fué debida a Ricker en 1954.

Más tarde y gracias al advenimiento de la grabación magnética, fue posible usar un filtro analógico en el dominio del tiempo para remover el espectro de las reverberaciones marinas de la ondícula .

En la década de los cincuentas, se implementaron dos poderosas herramientas para enfrentar los problemas que representaba el imperfecto modelo, por una parte la gran flexibilidad de la computadora digital, y por otra los conceptos estadísticos de la teoría de las comunicaciones así como los resultados de Norbert Wiener al análisis de las series de tiempo.

Robinson, aplicó esta herramienta al problema de la estimación de la ondícula sísmica directamente a las reflexiones obtenidas en un sismograma. ya en 1957 el proceso era más sofisticado y se tenía diseñado un filtro digital para realizar una contracción de la ondícula y aproximarla a un impulso unitario. de esta manera, las bases para el procesamiento que se usa hoy en día se estaban incubando (Backus, 1979).

A principios de los sesentas, la grabación digital y el proceso de datos sísmicos se introdujo como un proceso de producción dentro de la sismología de reflexión. la versatilidad de las computadoras digitales, permitieron el uso de filtros de procesamiento arbitrarios que se podían adecuar a problemas particulares haciendo más eficiente la aplicación de modelos convolucionales de sismogramas.

A fines de los sesentas y principios de los setentas, se presentó la urgencia de detectar directamente los hidrocarburos, por lo que se alcanzó un desarrollo dramático en la

introducción del mapeo de la porosidad en la estratigrafía sísmica, incrementándose el interés por la comprensión, control y modelado de la ondícula.

Los trabajos de Vail en 1977 se abocaron al valor que tiene la estratigrafía sísmica y la información que podemos obtener de ella y en este contexto se observó la necesidad de mayor resolución. De esta forma los cambios en la impedancia acústica pueden interpretarse de manera más clara. Para conocer el contenido de energía en función de la duración del registro sísmico, se efectúa el cuadrado del módulo de la densidad espectral del mismo que resulta ser el espectro de potencia.

Para concentrar la energía del espectro del lóbulo central se utilizan ventanas, las cuales evitan, también dispersión al definir pocos lóbulos laterales y pequeños, además de poderse realizar un filtrado adicional que otorgue una alta resolución del espectro.

CAPITULO I

I.1 ESPECTRO DE POTENCIA DE LA TRAZA SÍSMICA

El método sísmico de reflexión es generalmente usado para la obtención de la ondícula reflejada que permita extraer las características físicas de amplitud, fase y frecuencia, que representan un efecto directo en la traza sísmica a tratar.

Como es de nuestro conocimiento, la ondícula (traza sísmica) grabada en los trabajos de campo, puede ser modelada desde el punto de vista de la teoría de los sistemas lineales a través del modelo convolucional.

Segundo, el modelo convolucional proporciona un medio para inferir las características estructurales del subsuelo en base a observaciones efectuadas en la superficie.

Tal planteamiento nos conduce a dos problemas clásicos en geofísica: el problema hacia la generalización del sismograma sintético a partir de los procesos y modelos del subsuelo, y el problema inverso para la estimación de las funciones de reflectividad a partir de la traza sísmica observada.

Los principios básicos de reflexión sísmica son ilustrados en la figura (1) la fuente w de energía sísmica esta localizada en la superficie. El viaje de las ondas sísmicas descendentes son reflejadas por las condiciones de la roca estratificada, llamada interfase, ocurre. que parte de la energía regresa finalmente a la superficie en forma de onda ascendente.

La reflexión de la onda sísmica ocurre en la interfase en donde existen cambios en la impedancia acústica, la cual es definida como el producto de la densidad y la velocidad de la roca. Las interfases actúan como una serie de superficies reflectoras, en que cada una de las capas o estratos y transmite y refleja parcialmente la energía sísmica.

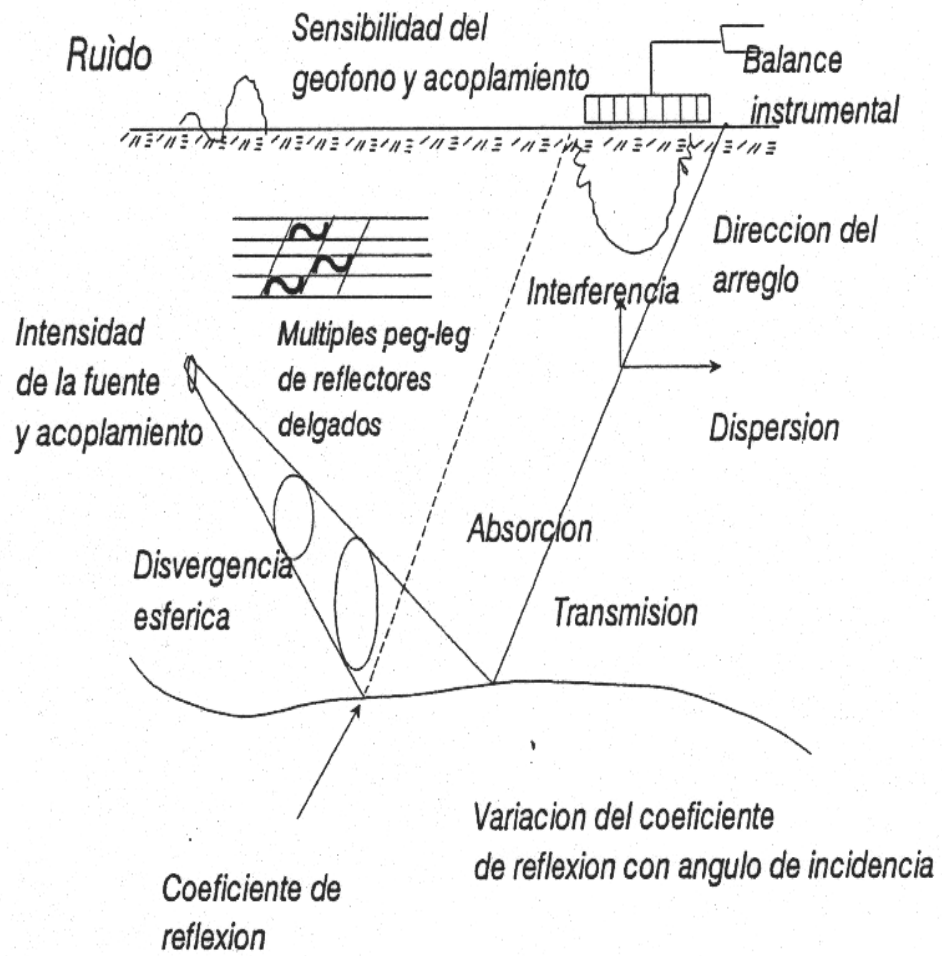


Figura 1 Método sísmico de reflexión

En los trabajos de reflexión sísmica, la energía regresada es predominantemente energía reflejada a partir de interfases con variaciones pequeñas, tal que la señal regresada tiene una alta coherencia en su relación de fase (Robinson, 1978).

Los sismodetectores superficiales reciben las ondas ascendentes como una respuesta del subsuelo a una fuente de energía sísmica w a la que usualmente se le denomina ondícula fuente $w(t)$. Esta señal recibida es representativa de la energía sísmica w a la que usualmente se le denomina de la energía reflejada en las distintas interfases acústicas como una función del tiempo, y por lo tanto constituyen una serie de tiempo, que generalmente se le conoce como reflectividad del subsuelo $r(t)$. La propagación de los disturbios sísmicos en la tierra son modelados usando las ecuaciones del movimiento en un medio elástico. Las ondas, a partir de una fuente puntual, se propagan indefinidamente en frentes de onda esféricos a través de un medio homogéneo e isótropo.

En el modelo convolucional tratamos a la señal sísmica reflectiva $s(t)$, como la convolución de una ondícula fuente $w(t)$, con la reflectividad del subsuelo $r(t)$.

SEÑAL SISMICA = ONDÍCULA * REFLECTIVIDAD

$$s(t) = w(t) * r(t)$$

La ondícula fuente $w(t)$, es la forma de onda que debe ser grabada con nuestro sistema sísmico para las reflexiones en cada interfase plana del subsuelo. La reflectividad $r(t)$, representa el sismograma idealizado que debe ser grabado a partir del subsuelo si la ondícula fuente fuese un impulso perfecto.

La señal sísmica reflectiva $s(t)$, puede verse como la superposición de varias ondículas, cada una tiene la forma de onda $w(t)$, pero con intensidad y tiempo de arribos correspondiente a las múltiples condiciones encontradas en el subsuelo.

Así la traza sísmica grabada $g(t)$, es tratada como la suma de la señal sísmica reflectiva, con ruido aditivo $n(t)$. por lo tanto, la traza sísmica es vista como un ruido, y como una versión filtrada de la reflectividad del subsuelo.

$$\begin{aligned} \text{TRAZA SISMICA} &= \text{SEÑAL SISMICA} + \text{RUIDO} \\ g(t) &= s(t) + n(t) \end{aligned}$$

Sin embargo, el modelo convolucional propuesto caracteriza a los procesos lineales invariantes en el tiempo, los cuales no toman en cuenta que para el caso de un medio multiestratificado, la energía liberada por la fuente en forma de rayos o frentes de onda, experimenta fenómenos de reflexión y transmisión en cada interfase, además de pérdidas por divergencia esférica y absorción, entre otros; que son también variables en el tiempo y la distancia. Como resultado a estos fenómenos, la serie de tiempo recibida puede ser considerada como una suma de ondículas escaladas en amplitud y retrasadas en tiempo. en donde los factores de escalamiento dependen de las propiedades de las capas atravesadas y los retardos en tiempo dependen de la profundidad y de la velocidad de propagación de cada capa.

Por esta razón, se hace necesario citar al modelo convolucional realista que contempla todos los parámetros presentes en la obtención de la traza sísmica que es grabada en la etapa exploratoria de campo.

Es importante hacer notar que la traza sísmica modelada, presenta de manera general las variables que influyen en forma determinante en la obtención de esta señal, como una respuesta a la excitación que provocamos al medio. por ejemplo, cuando se lleva a cabo la inyección de energía al medio, la mayor concentración estará localizada en el punto de tiro. sin embargo, se ha comprobado experimentalmente que cuando la onda esférica, producida por la detonación, se expande a partir de la fuente, sufre pérdidas por la propagación de las ondas o pérdidas por expansión que son inversamente proporcionales a la distancia que la onda ha viajado. Paulatinamente hay ciertas pérdidas por absorción debido a la disipación

por fricción de la onda elástica en forma de calor, siendo éstas pérdidas exponenciales con la distancia.

Por lo tanto, las variables anteriores deben ser consideradas principalmente en la explicación del modelo convolucional, podemos decir que existen tres aplicaciones básicas en el modelo.

1) La adquisición de datos.- el control producido por la ondícula sísmica en el proceso de adquisición de datos determina la calidad final de la traza interpretable. La relación señal/ruido como una función de la frecuencia es la primera consideración en el campo.

2) En el procesamiento de datos.- si la ondícula sísmica de campo $w(f, t)$ es conocida, sería emplear una ondícula fase cero interpretativa que estimará más la impedancia que los reflejos de cada capa para facilitar su apariencia a los datos correctos.

3) En la interpretación podemos comprimir una ondícula sísmica, pero no podremos hacerlo tanto como queramos. Las propiedades del subsuelo pueden ser estimadas, y la reflectividad correspondiente calculada. La convolución con la ondícula interpretativa proporcionaría al intérprete una traza o sección sísmica sintética, la cual puede ser comparada directamente con los datos observados (Backus, 1979).

En el método sísmico de reflexión se han aplicado diversas técnicas matemáticas a los sismogramas, en función de las teorías de propagación de onda y del análisis estadístico sobre series de tiempo, para así determinar las señales útiles que pudieran estar interferidas por ruido .

De esta forma un registro sísmico se puede considerar como el resultado de convolucionar la ondícula sísmica con la función de reflectividad.

Tradicionalmente la estimación espectral, como es actualmente complementada usando la Transformada Rápida de Fourier (T.R.F), es caracterizada por producir estimaciones espectrales confiables estadísticamente.

Actualmente existen para procesar los datos apoyos como promedio en el dominio del tiempo, y “ventaneo”, promedio en el dominio de las frecuencias de datos muestreados a partir de procesos aleatorios con la finalidad de balancear las necesidades de reducir lóbulos laterales, para realizar promedio real y asegurar una resolución espectral adecuada, para lo cual daremos las bases del análisis espectral convencional, de tal forma considerando una forma analógica determinística, $x(t)$ que es una función continua del tiempo, así absolutamente integrable por lo tanto la señal de la energía esta dada por:

$$\mathcal{E} = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt < \infty \quad \text{Ec. 1.1}$$

La cual representa el atributo de amplitud en la traza sísmica y entonces la transformada continua de Fourier $x(f)$ de $x(t)$ a partir de la ecuación 1.1 existe y esta dada por:

$$x(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-2\pi ift} dt \quad \text{Ec.1.2}$$

El módulo cuadrado de la transformada de Fourier es comúnmente denominada como espectro $S(f)$ de $x(t)$

$$S(f) = |x(f)|^2 \quad \text{Ec.1.3}$$

I.2 Teorema de Parseval

Este teorema permite realizar entre dos señales $f_1(t)$, $f_2(t)$ la relación entre la potencia de una señal $f(t)$ y su espectro continuo $f(w)$.

En lo referente a la traza sísmica esta representa, una secuencia de la propagación elástica de la energía y como este teorema da una relación entre una señal temporal y su transformada de Fourier, se permite establecer que la energía de una señal en el dominio del tiempo debe ser igual a la energía calculada en el dominio de la frecuencia de la misma.

Así el teorema de energía de Parseval es expresado como:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |x(f)|^2 df \quad \text{Ec.1.4}$$

Es una proposición de conservación de la energía; la energía de la señal en el dominio del tiempo es igual a la energía de la transformada en el dominio de la frecuencia. Así que $S(f)$ es una densidad espectral de energía como una función de la frecuencia.

Si la señal $x(t)$ es muestreada a intervalos equiespaciados para producir una secuencia discreta $x_n = x(n t)$ para entonces la secuencia muestreada puede ser representada como el producto de la función original en tiempo $x(t)$ con un conjunto infinito de funciones delta de Dirac equiespaciado.

La transformación de Fourier de este producto, puede ser escrito al usar teoría de distribución como:

$$x'(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} x(t) S(t - n\Delta t) \Delta t \right] e^{(-i2\pi ft)} dt = \Delta t \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_n e^{(i2\pi fn\Delta t)} \quad \text{Ec. 1.5}$$

La expresión 1.5 corresponde aproximadamente a una integración regular de la ecuación 1.2 al factor Δt asegura conservación del área integrada entre ecuación 1.2 y ecuación 1.5 conforma $\Delta t \Rightarrow 0$.

La expresión 1.5 será idéntica con valor a la transformada $x(t)$ de la ecuación 1.2 sobre el intervalo $-1/2\Delta t \leq f \leq 1/2\Delta t$ siempre y cuando $x(t)$ sea de banda limitada y todos los componentes de frecuencia estén dentro del intervalo.

Por lo que la densidad espectral de energía sería:

$$S'(f) = |x'(f)|^2 \quad \text{Ec. 1.6}$$

Por datos muestreados a partir de un proceso limitado es idéntico a la ec. 1.3, si:

A) La secuencia de datos esta disponible a partir solamente de una ventana finita desde

$n=0$ a $n=N-1$.

B) La transformada es discretizada para N valores tomando muestras desde $f=m\Delta f$ para $m=0,1,2,\dots,N-1$ donde Δf es igual a $1/N\Delta t$, entonces la ecuación 1.1 puede generar la transformada de Fourier discreta (T.F.D.) a partir de la ecuación 1.5.

$$\begin{aligned} X_m &= \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} X_n e^{(-i 2 \pi m \Delta f n \Delta t)} \\ &= \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} X_n e^{(-i 2 \pi m n / N)} \end{aligned}$$

Para $m = 0,1,2,\dots,N-1$ Ec. 1.7

Tanto la ecuación 1.7 como su inversa asociada esta dada por :

$$X_n = \Delta f \sum_{m=0}^{N-1} x_m e^{(i 2 \pi m n / N)}$$

Son cíclicas con periodo N

Así que usando la ecuación 1.7 hemos forzado a la periodicidad tanto de los datos discretos en tiempo así como a su transformada aunque los datos originales continuos pudieron no haber sido periódicos.

Por lo tanto la densidad espectral de energía de una señal se definirá como la energía por unidad de frecuencia y muestra las contribuciones relativas de distintas componentes de frecuencia y se expresa por:

$$S_m = |x_m|^2$$

Para $m=0,1,2,\dots,N-1$ $0 \leq m \leq N-1$ Ec. 1.8

Tanto S_m discreta como $S'(f)$ han sido denominados estimación espectral de Períodograma.

Notese sin embargo que S_m y $S'(f)$ al ser evaluados en $f=m/N\Delta t$

Para $m=0,1,2,\dots,N-1$ no producen resultados idénticos.

S_m es en efecto una versión muestreada de un espectro determinado a partir de la convolución de $x(f)$ con la transformada de la ventana rectangular que contiene las muestras de datos.

Así el espectro discreto S_m basado a un conjunto finito de datos es una versión del espectro continuo $S'(f)$ basada a un conjunto finito de datos. Un punto de vista diferente debe ser tomado cuando el proceso $x(t)$ es un proceso en estado estocástico estacionario en lugar de una forma de onda de energía finita de tipo determinístico.

La energía de dicho proceso es usualmente infinita de tal forma, que representa la distribución de la potencia con la frecuencia es decir una relación tiempo con promedio de la energía. Las integrales del tipo de ecuación 1.2 normalmente no existen para procesos estacionarios, pero para el caso de un proceso aleatorio estacionario se aplica la función de autocorrelación.

$$R_{xx}(\tau) = E(x(t + \tau)x^*(t)) \quad \text{Ec. 1.9}$$

Esta expresión proporciona las bases para el análisis espectral más que de el proceso aleatorio de $x(t)$ en sí.

I.3 Teorema de Wiener –Khintchine

El teorema de Wiener-Khintchine relaciona $R_{xx}(\tau)$ y la transformada de Fourier con $P(f)$ densidad espectral de potencia o sea

$$P(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau) e^{(-i2\pi f\tau)} d\tau \quad \text{Ec. 1.10}$$

Pero uno usualmente no conoce la función de autocorrelación del proceso, por lo que una suposición adicional frecuentemente hecha es que el proceso también es ergódico en su primer y segundo momento.

Esta suposición permite la sustitución de promedios de tiempo por promedios de ensambles por lo cual para el proceso ergódico la función de autocorrelación estadística puede ser igualada con :

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t+\tau)x^*(t) dt \quad \text{Ec. 1.11}$$

Es posible mostrar con ayuda de ecuación 1.10 y ecuación 1.11 puede ser expresada igualmente como :

$$P(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} E \left\{ \frac{1}{2T} \left| \int_{-T}^T x(t) e^{-2\pi f t} dt \right|^2 \right\} \quad \text{Ec.1.12}$$

El operador E es requerido ya que las propiedades ergódicas de $R_{xx}(\tau)$ no se aceptan a través de la transformada de Fourier por lo cual el límite en la ecuación 1.12 sin el valor esperado no converge en el estricto sentido estadístico.

Anteriormente, los objetivos geológicos eran normalmente de tipo estructural, por lo que la sismología de alta resolución no siempre, era realmente requerida.

Sin embargo en las últimas dos décadas, las técnicas sismológicas de exploración han progresado notablemente debido a la necesidad de identificar nuevas zonas favorables para la acumulación de hidrocarburo. Así, la sismología de **alta resolución** se emplea cada vez más frecuente en la exploración de trampas estratigráficas .

Los fundamentos anteriores permitirán realizar todos los apoyos matemáticos de obtención a partir de las trazas sísmicas de su espectro de potencia.

Así al descomponer las series de tiempo detectadas y multiplicarlas por una onda sinusoidal con cierta frecuencia, en un intervalo de tiempo, se obtendrá la densidad espectral de amplitud que elimina las componentes de frecuencias no útiles.

Por lo tanto para conocer el contenido de energía de una señal sísmica en función de la duración del registro se efectúa el cuadrado del módulo de la densidad espectral que da como resultado el espectro de potencia ya que en general, la potencia es definida como proporcional al cuadrado de la amplitud.

Sí la cantidad que se representa es el espectro de potencia o densidad espectral el cual refiere la potencia o energía por unidad de intervalo en una escala de frecuencias, entonces el módulo al cuadrado del espectro de amplitud, nos informa acerca del comportamiento al espectro de fase de la función en el tiempo.

Esto significa que es imposible recobrar la señal original si únicamente, se conoce el espectro de potencia. por lo tanto, las señales con espectro de amplitud idéntico pueden llegar a tener un espectro de potencia similar, pero no igual (Robinson 1980)

Cuando los espectros derivados de registros de tipo sísmico obtenidos con diferentes escalas de tiempo se comparan, se utiliza la propiedad de escalamiento en el dominio del tiempo para su mejor interpretación, principalmente en la obtención de periodogramas, que son estimadores espectrales basados en el método directo utilizando la transformada de Fourier. De tal forma que se tienen las siguientes formas:

A) Calcular la transformada de Fourier de una señal $f(t)$ y elevar al cuadrado su módulo.

B) Obtener su función de autocorrelación de $f(t)$ y posteriormente su transformada de Fourier.

En la segunda se utiliza el teorema de Wiener -Khinchine con aplicación de la función de autocorrelación con resultados iguales a la primera opción, además establece una relación directa entre la transformada de Fourier y la densidad espectral de potencia.

I.4 SEÑALES EN GEOFÍSICA

Como sabemos el término señal es muy general y sirve para denotar la variación en el tiempo o espacio de cualquier cantidad física; esta variación puede ser registrada de manera continua o discreta, como ocurre con los eventos sísmicos de reflexión y la grabación magnética en la cual se realiza su filtrado etc.

De esta forma toda señal puede ser sujeta al análisis espectral basada en Fourier y su parámetro independiente puede ser el tiempo y/o un espacio coordinado, como ocurre en los campos gravimétricos y magnéticos al realizar rejillas de continuación analítica

Para su análisis matemático, se considera a la señal como una sucesión de valores conocida como series de tiempo ; considerándose un ejemplo la traza sísmica.

Debido a todo lo anterior; en los campos de ingeniería se han establecido tres tipos básicos de señales, las cuales se aprecian en la figura (2), difieren entre si; por su duración, apariencia, y su tratamiento matemático, siendo estas:

A) Señales no periódicas.

B) Señales periódicas.

C) Señales aleatorias.

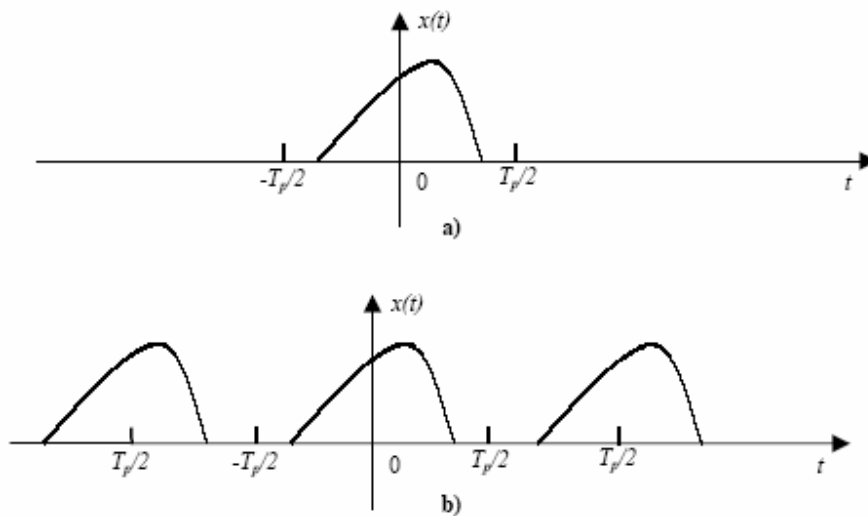


FIG: 2 Una señal no periódica en a) y replicada con periodo T convertida en Señal periódica b).

Las características intrínsecas de estas señales se atribuyen a su mecanismo de generación y su tipo de fuentes de energía, ya sean estas impulsivas o codificadas y se representan por un pulso de fase mínima el cual contiene un rango limitado de frecuencia, de acuerdo a la fuente de energía utilizada en la perturbación. De esta forma se ha desarrollado para la exploración sísmica que la energía liberada por fuentes explosivas o mecánicas se asocia a pulsos de fase mínima, que permitan adecuar los procesos de convolución como los de Ricker. Así la generación de este pulso se convoluciona con la función reflectiva y se obtienen la traza sísmica, los pulsos denominados asociados a una fuente vibratoria, donde sus parámetros están definidos por el período inicial, final y la amplitud. El resultado obtenido de esta aplicación es una ondícula de fase cero, pero con los efectos vibratorios acumulativos se puede producir una ondícula de fase mínima.

Al intervalo de los registros sísmicos existe un tipo de señal, la cual "enmascara" información atenuando o exagerando eventos no necesarios y que se considera como una perturbación indeseada que está mezclada con las señales útiles transmitidas, a esta

interferencia se le denomina ruido aleatorio y este se representa con una amplitud variable y su valor promedio de amplitud es cero.

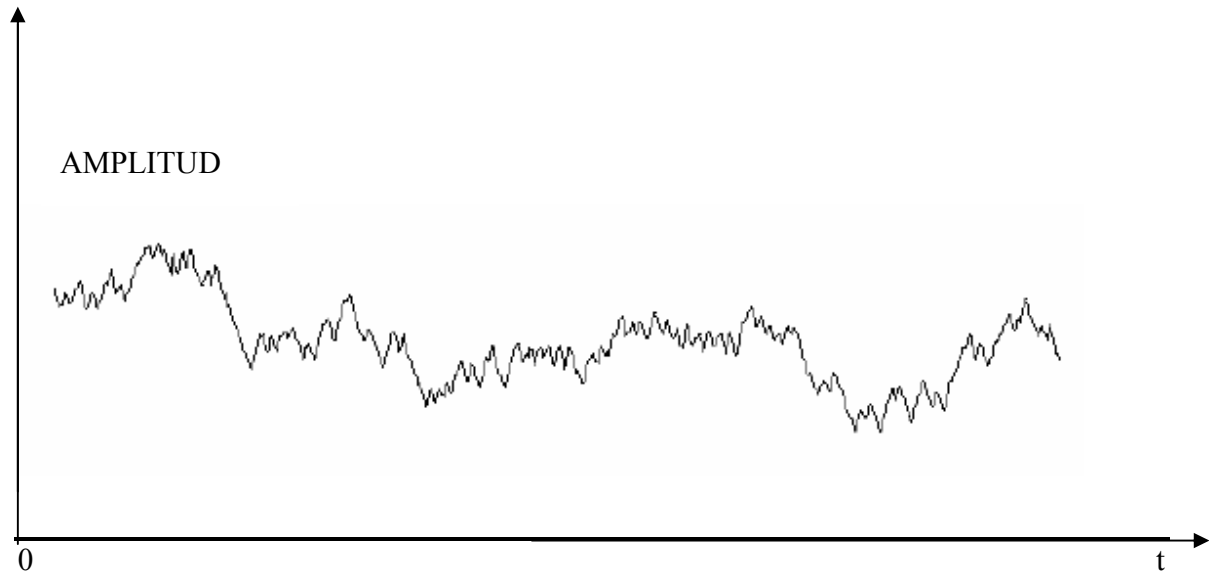


FIGURA 3 Ejemplo de señal aleatoria.

Como el ruido es una señal aleatoria, no tiene una expresión determinística en el tiempo y sólo se puede estimar el valor de su magnitud espectral. Por lo tanto a estas señales por la falta de periodicidad no es posible efectuarles una predicción precisa de su comportamiento y su análisis es a través de un tratamiento estadístico. Como se ve en la figura (3) Así en la sismología de exploración se han clasificado dos tipos de ruido, dentro de las trazas sísmicas siendo:

A) Ruido coherente el cual muestra tendencia a correlacionarse entre los diferentes registros, además de tener gran similitud con la señal útil como se muestra en la fig.4

B) Ruido incoherente. Se representa de manera aleatoria entre los diferentes registros, y no tiene similitud con la señal útil.

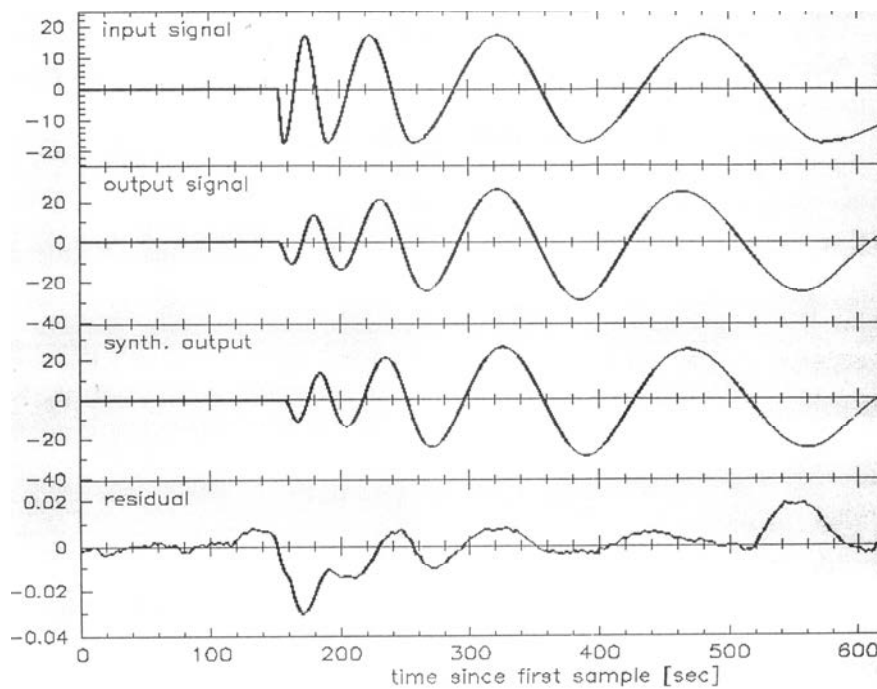


Figura 4 Ruido coherente

Como la señal sísmica puede ser analizada en el dominio de la frecuencia; esto permite tener una estimación de la relación señal/ruido, es decir de la calidad de la información registrada, que de no detectarse en el tratamiento de sismología pueda conducirse a errores e interpretación.

Bajo esta perspectiva podemos definir a las señales en cantidades estadísticas independientes o no del tiempo es una variable aleatoria sólo es descrita por una distribución de probabilidades y es conocida como una variable estocástica, en contraste con una determinística que no presenta un comportamiento aleatorio.

El análisis estadístico aplicado a las señales no examina a la señal individual en sí, más bien considera un conjunto de señales o de ruido generado por fuentes similares; el registro forma así un ensamble o conjunto de funciones aleatorias obtenidas a partir de una sola fuente o de eventos repetidos limitados en el tiempo, tal como ocurre en los métodos de sismología de exploración, donde las ondas sísmicas son consideradas como señales no estacionarias.

I.4.2 TRUNCAMIENTO DE SEÑALES ANALÍTICAS.

Para realizar un estudio a los registros reales de campo se observa previamente que el truncamiento realizado a las señales de tipo analítico puede tener efectos significativos en el espectro obtenido y este efecto es mayor en las series observadas de datos, donde no se logra un espectro totalmente verdadero. Esto origina que no sea posible una evaluación absoluta de los efectos de truncamiento y solamente se puedan hacer estimaciones relativas por su duración. Entonces por otro lado, el espectro verdadero para ciertas funciones analíticas y el espectro obtenido con el truncamiento de tales señales analíticas con espectro conocido son muy útiles para el trabajo discreto, especialmente, para verificar los métodos e inclusive programas de cómputo y el óptimo uso de filtros y ventanas, al comparar bajo datos fijos los espectros obtenidos.

Ilustrando el efecto de estrechamiento o de ampliación espectral por efectos de truncamiento de señales analíticas en el dominio del tiempo se presentan varios ejemplos (Both,1985) donde se muestran las deformaciones del espectro generado. Dentro de la figura (5) se observa que en la primer gráfica (a) se tiene una función de tipo rectangular con un punto de truncamiento lo que tiende al infinito que origina un lóbulo central estrecho con poca energía, aunque si se tomara el punto de truncamiento $t_0 = 1$ se presentaría más amplio y con un lóbulo lateral mostrándose así la gran influencia del intervalo de corte de una serie de datos.

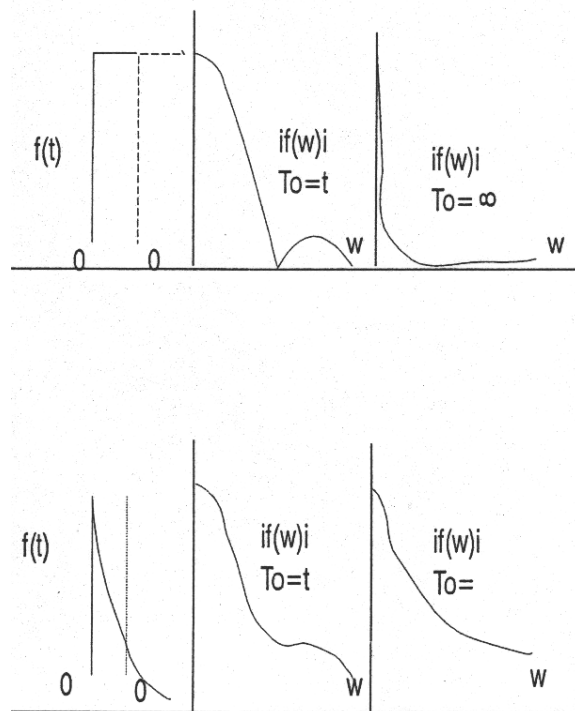


Figura 5 Truncamiento de señales

En la segunda gráfica (b)se tiene una función que define adecuadamente una fuente impulsiva de tipo sísmico donde resulta difícil ubicar el punto de truncamiento debido a que amplitudes de señales más bajas pueden ser enmascaradas por el ruido, ya que cuando el punto de corte tiende a infinito se estrecha el lóbulo central.

Se observará en las tres siguientes funciones de la fig. (6) que las amplitudes máximas están concentradas en un intervalo de tiempo limitado, para observar la influencia del intervalo de corte en el tiempo y sus efectos sobre el espectro de potencia, se podría decir: que en el intervalo mayor se dispersa energía del lóbulo central a varios lóbulos laterales decrecientes, al existir lóbulo central estrecho ;pero conforme el intervalo de tiempo disminuye el lóbulo central es más amplio, en esta función la amplitud de la señal es constante. De esta forma es notoria la influencia del corte aún en funciones analíticas.

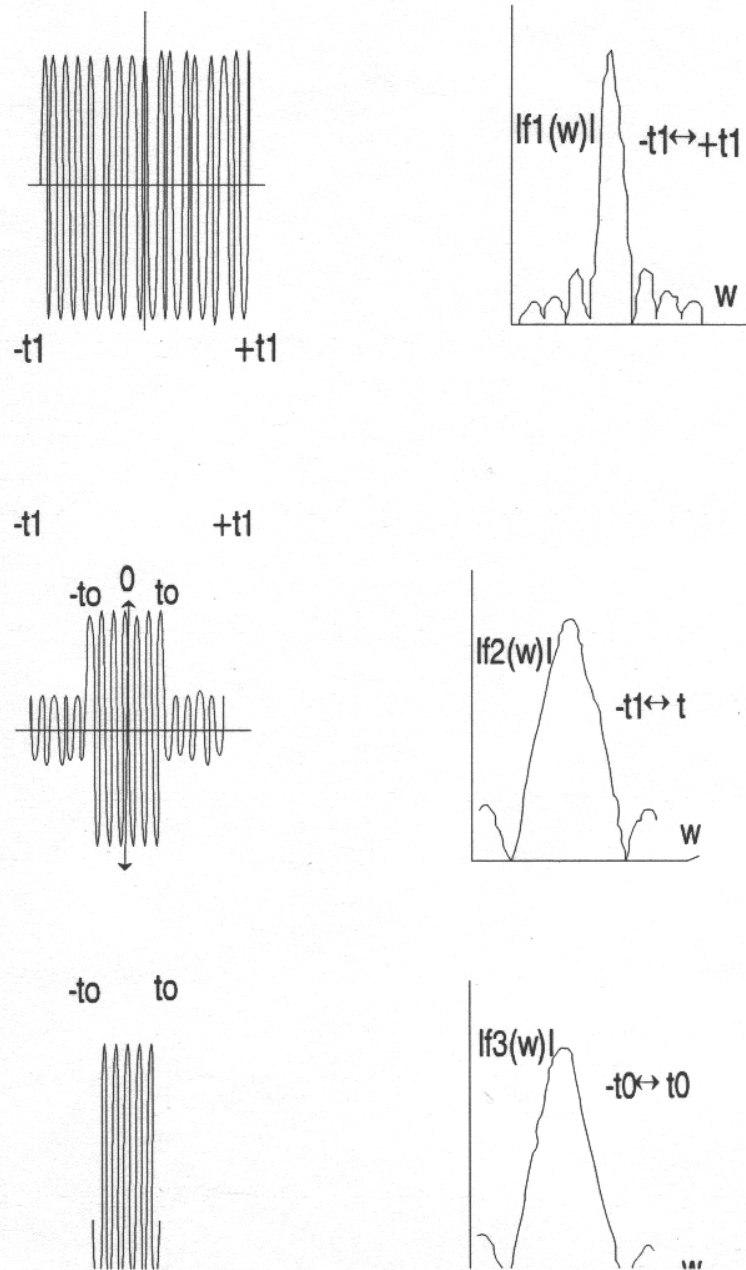
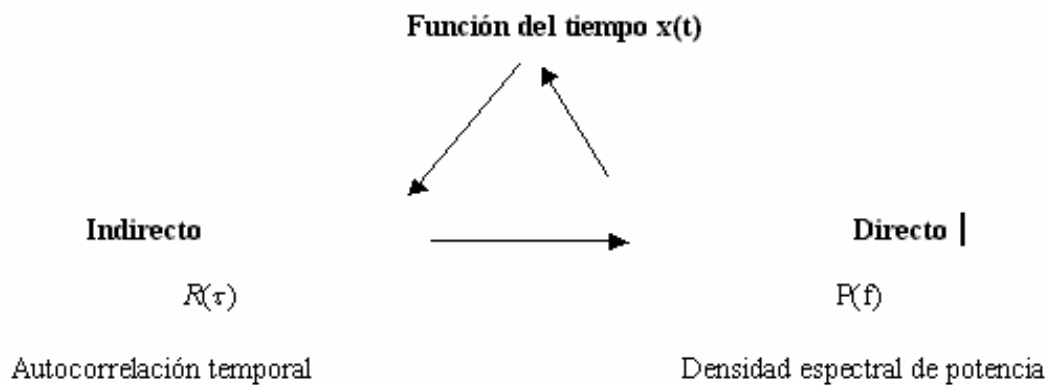


Figura 6 Influencia del truncamiento ene. espectro

CAPITULO II

TECNICAS DE OBTENCION DEL ESPECTRO DE POTENCIA

En el esquema siguiente se verán los procesos de obtención de la densidad espectral de potencia en su forma directa o indirecta a partir de la seña $x(t)$ que en esta tesis será un sismograma sintético , todo el proceso lo relacionaremos a las ecuaciones 2.10 , 2.11 y 2.12 .



Se pueden presentar dificultades en la ecuación 1.12 si es aplicado a conjuntos finitos de datos , sin considerar las operaciones de esperanza o valor esperado (E) y del límite al que se llegue en la resolución de la ecuación. Si no es llevado a cabo por medio estadístico se tendrán estimaciones inconsistentes no estables estadísticamente, es decir la varianza de la densidad espectral de potencia no tenderá a cero conforme el período T aumente su límite

en el dominio de las frecuencias (a partir de la serie de entrada).

El siguiente paso consistió en eliminar componentes negativas del espectro de amplitud, tal y como lo menciona la técnica. En seguida se duplicó el espectro de amplitud hasta la frecuencia de doblaje debido al factor que esta alterando la amplitud de la seña en el desarrollo matemático, tomando en cuenta que permanece invariante a estas operaciones el espectro de fase.

Posteriormente se volvió a utilizar la sub-rutina de la transformada de Fourier, esta vez de manera inversa, con el fin de llevar a la señal nuevamente al dominio del tiempo (fig. 7). Todas estas modificaciones hechas anteriormente, nos llevan a la obtención de una señal en el tiempo de carácter complejo, que es la señal analítica deseada, es decir, la traza sísmica real y la parte imaginaria o cuadratura.

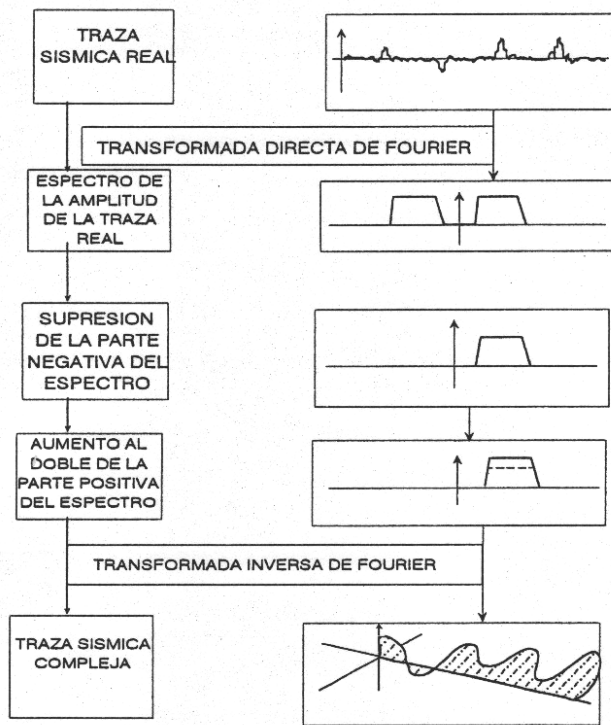
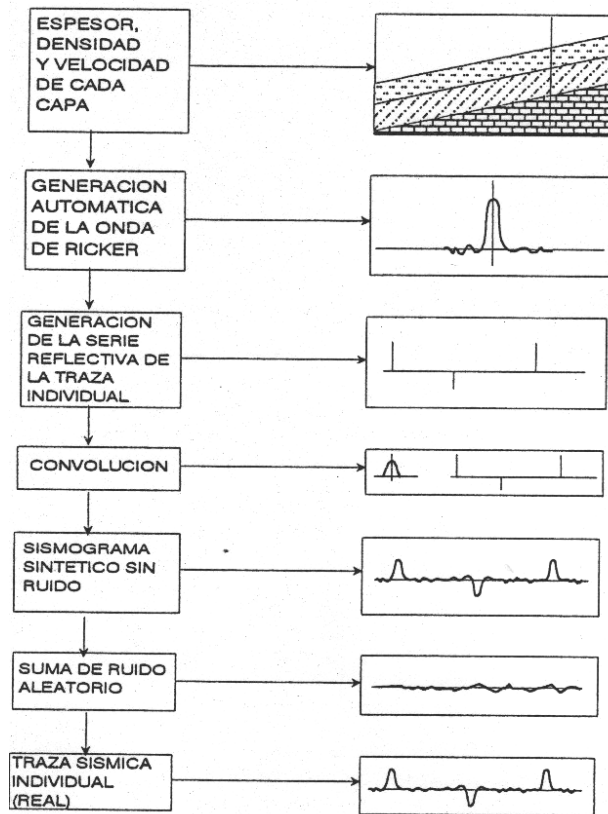


Fig. 8 atributos de la traza sísmica

Fig. 7 Obtención de traza sísmica

Correspondiendo al módulo de esta señal el atributo llamado envolvente; la cuadratura será la parte imaginaria de esta señal; la fase se podrá obtener de la función arco tangente del cociente de la cuadratura y la parte real; cuya derivada, a su vez, viene a ser el tercer atributo importante conocido como frecuencia instantánea fig. (8)

II.1 METODO INDIRECTO.

El estimador de densidad espectral de potencia basada en un esquema indirecto se fundamenta en la función de autocorrelación. Este método está fundamentado en propuestas de Blackman y Tukey. Si se tiene una secuencia finita de datos, solamente un número discreto de coeficientes de autocorrelación pueden ser estimados por eso los autores mencionados propusieron el estimador espectral

$$\hat{P}(f) = \Delta t \sum_{m=-M}^M \hat{R}_{xx}(m) e^{(-2\pi j f m \Delta t)} \quad \text{Ec. 1.13}$$

Basados en coeficientes de autocorrelación $\hat{R}_{xx}(m)$ donde $-\frac{1}{2\Delta t} \leq f \leq \frac{1}{2\Delta t}$ y el símbolo $\hat{\cdot}$ representa que es un estimador.

Este realiza la versión en tiempo discreto de la expresión de WIENER-KHINCHINE ecuación (1.10) La función de autocorrelación basado en la ecuación 1.11 se transforma en el estimador insesgado:

$$\hat{R}_{xx}(m) = \frac{1}{N-m} \sum_{n=0}^{N-m-1} x_{n+m} x_n^* \quad \text{Ec. 1.14}$$

para $m=0,1,2,\dots, M$ y donde $M \leq N-1$

Los valores de autocorrelación, para tiempos negativos son determinados de la siguiente manera :

$$\hat{R}_{xx}(-m) = \hat{R}_{xx}^*(m) \quad \text{Ec.1.15}$$

De acuerdo con la propiedad de simetría conjugada de la función de autocorrelación en lugar de la ecuación 2.14 se proporcionan argumentos para usar el estimador de autocorrelación :

$$\hat{R}_{xx} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-m-1} x_{n+m} x_n^* \quad \text{Ec. 1.16}$$

El principio básico del método consiste en calcular la función de autocorrelación de la serie de tiempo $f(t)$, posteriormente se aplica la * T. R. F* y de esta manera se obtiene su espectro de potencia. Cabe señalar que los datos de entrada de la serie de tiempo están constituidos por la regla de 2^n elementos de la función de autocorrelación, cuando la TRF. es de base 2.

A continuación, se muestran matemáticamente la forma continua y discreta para obtener el espectro de potencia de las series discretas de datos:

A) Forma Continua

B) Forma Discreta

Por medio del fundamento matemático se concluye que las etapas para obtener el espectro anterior de potencia se desarrollan de la siguiente forma:

I) Se obtiene el valor promedio o valor esperado de las series de tiempo $f(t)$, para normalizar a la serie de datos como ensambles, registros sísmicos etc.

II) se aplican filtros de fase cero para suavizar la información y de esta manera eliminar la presencia de lóbulos laterales en partes del espectro obtenido.

* T. R. F. Transformada rápida de Fourier.*

III) calcular la función de auto correlación de la serie de datos $f(t)$, o del conjunto de ensambles por medio de la expresión :y Generar el espectro de potencia o densidad espectral a partir de ecuación 1.13 .

IV) La estimación espectral preliminar es suavizada por coeficientes pesados de Hanning. Este suavizamiento elimina ruido y efectos de esquina rizos en el espectro, y en el dominio de las frecuencias elimina lóbulos laterales .Se ha observado que en el sentido matemático la función de autocorrelación y el espectro de potencia tienen una relación de igualdad .

Ya que si la función de autocorrelación de los datos analizados muestra el comportamiento de una señal periódica, dicha función no representa la forma de onda de la señal , si no su período únicamente .

Así mismo, se pueden aplicar a los coeficientes de la función de autocorrelación, factores discretos y/o de algunas ventanas que suavicen la señal antes de obtener su espectro de potencia .

II.2 MÉTODO DIRECTO.

Se considera como una variación del Periodograma de Schuster, entonces se tiene una versión de datos discretos de la expresión 1.12 para lo cual los datos muestreados están disponibles para las muestras x_0, x_1, \dots, x_{n-1} es :

$$\hat{P}(f) = \frac{1}{N\Delta t} \left| \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{(2\pi i f n \Delta t)} \right|^2 \quad \text{Ec.1.17}$$

Para esta ecuación se tiene definido el intervalo de frecuencias $-\frac{1}{2\Delta t} \leq f \leq \frac{1}{2\Delta t}$.

el uso de la transformada rápida de Fourier permite la evaluación en la expresión 1.17 .

Procediendo matemáticamente se llega a la siguiente expresión :

$$\hat{P}_m = \hat{P}(f) = \frac{1}{N\Delta t} \left| x_m \right|^2 \quad \text{Ec.1.18}$$

Donde X_m es la transformada de Fourier discreta de la expresión 2.7 y \hat{P}_m es idéntico a S_m la densidad espectral de energía de la ecuación 2.8 excepto por la división por intervalo de tiempo $N\Delta t$. De esta forma \hat{P}_m es la densidad espectral de potencia.

La potencia total en el proceso, la cual es supuestamente periódica debido a la propiedad de la TDF es :

$$\text{Potencia} = \sum_{m=0}^{N-1} \hat{P}_m \Delta f \quad \text{Ec. 1.19}$$

La anterior expresión representa una aproximación a \hat{P} donde al Periodograma se le incrementa un factor Δf por lo tanto queda la expresión:

$$\hat{P} = \hat{P}_m \Delta f = \frac{1}{(N\Delta t)^2} \left| x_m \right|^2 \frac{1}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{(2\pi i m n / N)} \right|^2 \quad \text{Ec.1.20}$$

Esta cantidad que frecuentemente es calculada como Períodograma no esta escalada apropiadamente como una densidad espectral de potencia de tal forma que el resultado seria la potencia de la señal periódica y por el algoritmo de la TRF es lo más utilizado siendo conocido como método del periodograma basado en el cálculo directo de la transformada de Fourier de las series del tiempo. Para esto al obtener la transformada de Fourier, ésta se considera formada invariablemente por su parte real e imaginaria siendo definidas en lo descrito anteriormente, tiene diferencias respecto al método indirecto, ya que aunque existen etapas en la obtención del espectro de potencia las cuales son efectuadas de igual manera sobre las series de tiempo hay características que inciden favorablemente para mejorar el proceso como :

- A) Sustracción del valor promedio de la función $f(t)$
- B) Aplicación de filtros. C) No se aplica la autocorrelación de la función $f(t)$.
- D) Obtención del espectro de potencia, por medio de las expresiones del método directo .

Suavizamiento espectral con ayuda de ventanas, que actúan en el dominio de las frecuencias con coeficientes pesados (Hanning-Hamming) .

Las etapas para obtener el espectro de potencia por los dos métodos, tiene suavizamiento espectral en el tiempo ó en las frecuencias. En el método directo puede realizarse la variante de una corrección instrumental como ocurre en los acelerogramas y demás registros sísmicos, antes o después de utilizar una ventana temporal ó espectral.

Cabe mencionar que para obtener el espectro de potencia en los dos métodos es recomendable realizar el módulo a la señal en proceso.

CAPITULO III

APLICACION A LA TRAZA SISMICA

III.1 VENTANAS

En estudios geofísicos y en especial en sismología resulta importante conocer el contenido de frecuencias de las señales sísmicas representadas en trazas sísmicas no obstante con secuencias de datos muy largos usados actualmente, estudiosos como Bartlett han reconocido problemas estadísticos al utilizar la ecuación 1.18 y sugiere separar los datos en segmentos cortos calculando \hat{P}_m para cada segmento y promediar el Períodograma por cada uno de ellos .

Welch sugiere un procedimiento digital especial con la TRF que involucra promediar los periodogramas. También se puede utilizar una aproximación a los promedios de los ensambles haciendo usos de ventanas en el dominio del tiempo , de la frecuencia o en ambos.

Para minimizar el impacto del “ventaneo “ y crear lóbulos laterales se realiza también un promedio de segmentos pesados que se traslapan a través de la serie de tiempo.

En general los estimadores espectrales \hat{P}_m y \hat{p} no son idénticos si consideramos que el estimador producto de la autocorrelación visto en la ecuación(1.16) es usado y son calculados tantos coeficientes de correlación como datos muestreados $M=N-1$, entonces $\hat{P}_m = \hat{p}$. Al suponer que los datos no medidos son ceros aunque esto es inusual entonces la multiplicación de la serie de datos de tiempo real con una función de ventana significa que la Transformada promedio es la convolución de la transformada deseada con la transformada de la función ventana. Si la potencia verdadera de una señal estuviera concentrada en una banda angosta esta operación de convolución dispersaría dicha potencia en regiones de frecuencia adyacentes (Lóbulos laterales). Este fenómeno denominado dispersión es una consecuencia del ventaneo inherente en el cálculo del Períodograma.

Para series de datos con longitud limitada en el tiempo a los que se desea realizar su análisis espectral es necesario utilizar ventanas ya sea en el dominio del tiempo en las frecuencias.

De manera general, al utilizar una ventana específica proporciona un resultado equivalente al emplear una función rectangular. La aplicación de una ventana efectúa una distorsión del espectro verdadero de la señal, por el suavizamiento que realiza sobre el espectro fig. (9)

Sin embargo, para lograr una distorsión mínima, se requieren de características en la ventana espectral las cuales harán que los efectos de su aplicación en el dominio del tiempo sobre una señal sean de suavizamiento espectral, como lograr una alta concentración de energía en el lóbulo principal.

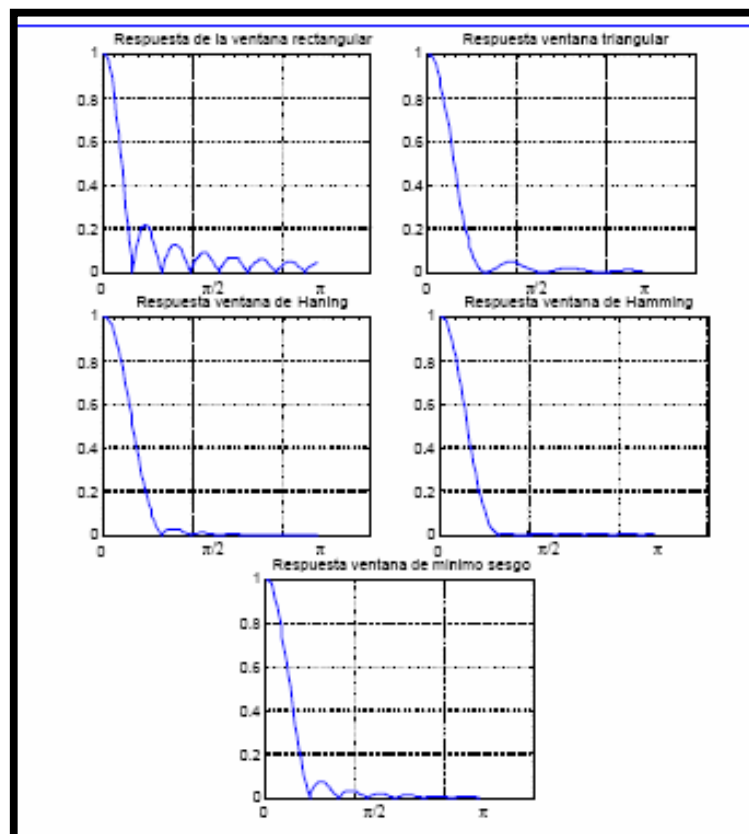


Fig. (9) Lóbulos laterales en ventanas.



Fig. (10) Respuesta temporal y en frecuencias de las ventanas

Las oscilaciones en las frecuencias altas se manifiestan con la presencia de lóbulos laterales. Como se observa en la figura 10.

La ventana rectangular se caracteriza por no provocar distorsión a la señal en el dominio del tiempo, pero tiene un efecto muy severo en el dominio de las frecuencias, ya que las esquinas agudas y los lados verticales introducen frecuencias altas. Esto se ha minimizado con el empleo de otras ventanas que decrecen gradualmente en ambos extremos del intervalo bajo análisis por ejemplo :

Hanning y Hamming; aunque persiste poca distorsión de la señal, se evitan las oscilaciones en las frecuencias altas.

Es importante mencionar que el empleo de una ventana en el dominio del tiempo o la frecuencia no garantiza que la señal y su espectro no sean distorsionados, pero esto se puede minimizar con un filtrado adicional.

Este efecto se puede observar al aplicar una ventana en el tiempo a cierta señal o a una función de autocorrelación antes de obtener su $* T . R . F . *$ y generar su espectro de potencia sin haber utilizado un filtro.

Como las ventanas en el tiempo son de duración limitada, continuas y simétricas, esto permite que sean tratadas en forma discreta. Este enfoque ha permitido al análisis espectral una alta eficiencia computacional con ayuda de la T.R.F., obteniéndose una variedad de resultados en las señales de datos geofísicos.

Existe una limitante para la resolución en el dominio de las frecuencias, la facilidad de distinguir espectros de 2 o más señales.

* T. R. F. Transformada rápida de Fourier.*

Una selección adecuada de las ventanas puede limitar la dispersión de energía hacia los lóbulos laterales, pero a expensas de disminuir la resolución, además en la figura 11 se observarán las ventanas en el dominio del tiempo y la frecuencia.

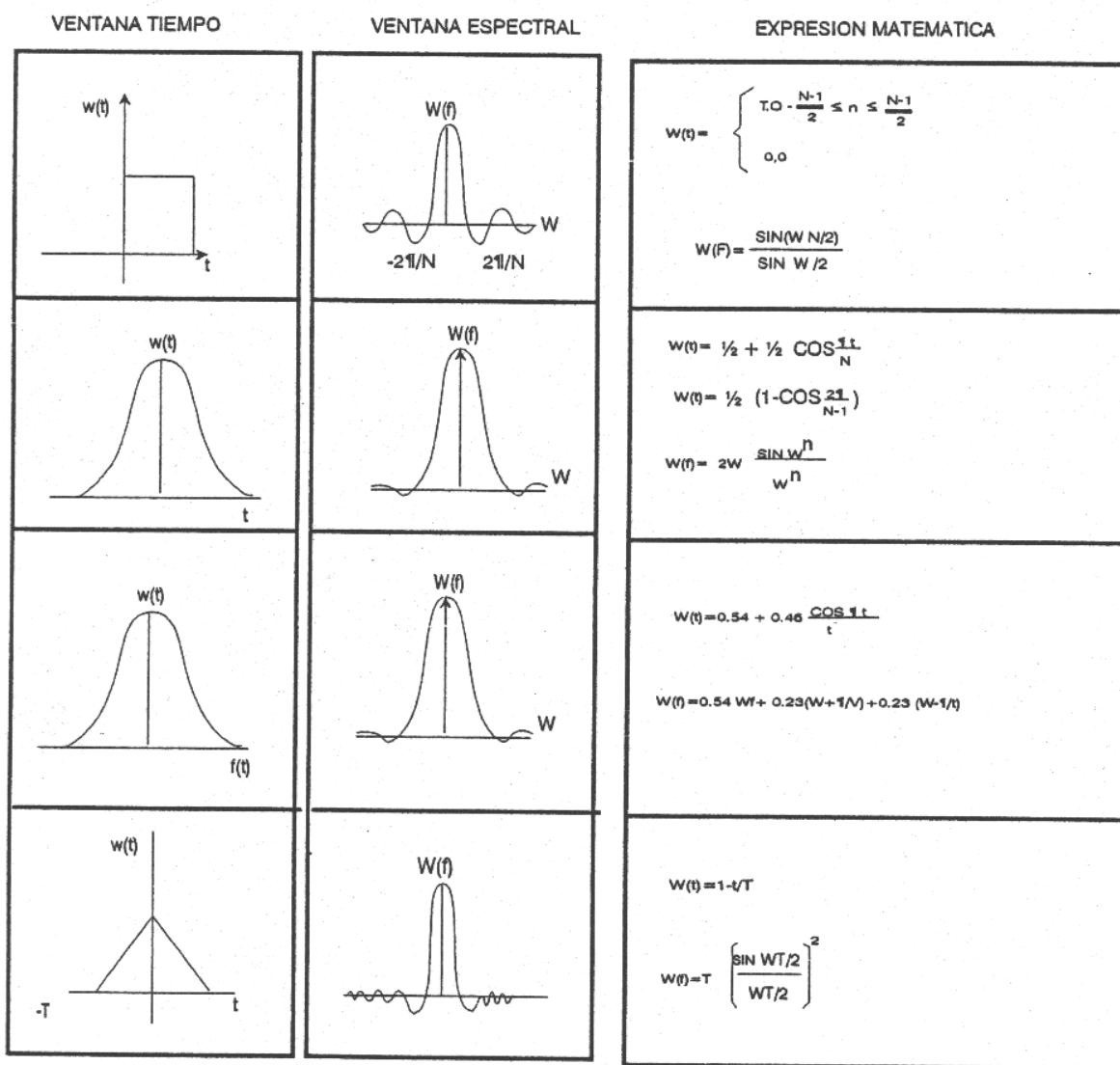


Fig. 11 Dominio frecuencial de ventanas y la expresión matemática

La operación de aplicar una ventana es una multiplicación en el dominio del tiempo y una convolución en las frecuencias. esto significa de antemano un cierto suavizamiento del espectro, de tal forma que las diferentes ventanas provocan ciertos efectos sobre el espectro obtenido.

Así, los procedimientos prácticos para aplicar ventanas pueden resumirse en los siguientes métodos.

PRIMER METODO

- 1a. La serie de datos $f(t)$ pasa a través de una ventana rectangular.
- 1b. Al resultado obtenerle su T. R. F
- 1c. $S(w)$ es suavizado en las frecuencias por coeficientes pesados consecutivos.

SEGUNDO METODO

- 2a. La función es multiplicada por cualquier ventana diferente de la rectangular.
- 2b. El resultado del producto es transformado al dominio de la frecuencia, aquí el suavizamiento no es efectuado sobre $f(w)$, ya que la aplicación de la ventana, se realizó en el tiempo.

Los procedimientos anteriores son iguales, pero con etapas en órdenes diferente por lo tanto se confirma que los métodos anteriores son equivalentes, pero ambos no permiten la obtención del espectro verdadero, ya que este recibió un suavizamiento

III. 2 SUAVIZAMIENTO DEL ESPECTRO

Es importante considerar que una solución ideal en la elección de una ventana no es fácil ya que depende de varios factores entre los que destacan:

A) Ancho de la banda espectral que, concentre en el lóbulo principal el mayor contenido de energía.

B) Lóbulos laterales en el espectro de la ventana que decrezcan rápidamente energía de preferencia cuando $\omega \rightarrow \infty$. En si una ventana debe de concentrar la mayor energía en el lóbulo principal con $\omega \rightarrow 0$ y con lóbulos laterales insignificantes. Además, los lóbulos negativos si hubieran deben ser lo más pequeños posibles.

Pruebas empíricas demuestran que el ancho de banda de una ventana espectral es de los parámetros más significativos y pueden ser del mismo orden de la zona de registro en el cual se desea investigar el espectro.

Se ha determinado que el ancho de banda espectral es proporcional a la longitud de serie de datos en el dominio del tiempo e inversamente proporcional en el dominio en la frecuencia, ver fig. 12.

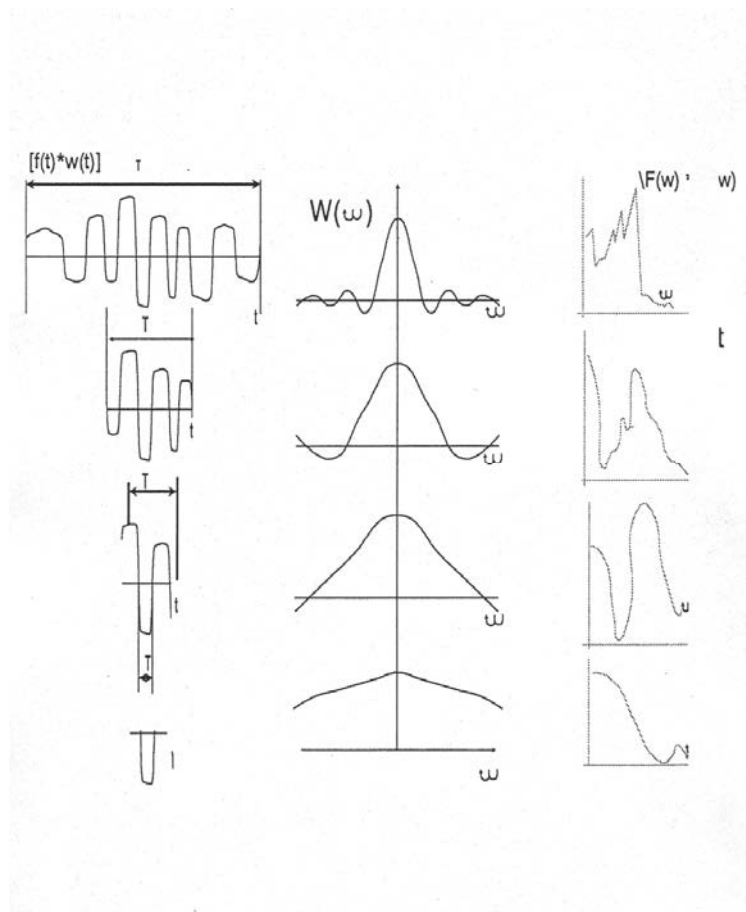


Fig. 12 Respuesta espectral según periodo de la señal.

La estabilidad y resolución espectral en señales geofísicas dependen de la longitud de la ventana y para lograr una resolución espectral existen dos alternativas que se fundamentan en un período T de investigación del registro siendo :

- Mantener un período constante T , e investigar su comportamiento entre los diferentes tipos de ventana.
- Variar el período T manteniendo un tipo de ventana. otro aspecto es la aplicación de las ventanas consiste en el truncamiento se realiza en diversos puntos .

Se puede decir que un truncamiento anticipado de la señal origina una amplitud artificial del espectro, como se ve en la figura(13) , especialmente en el punto 1.

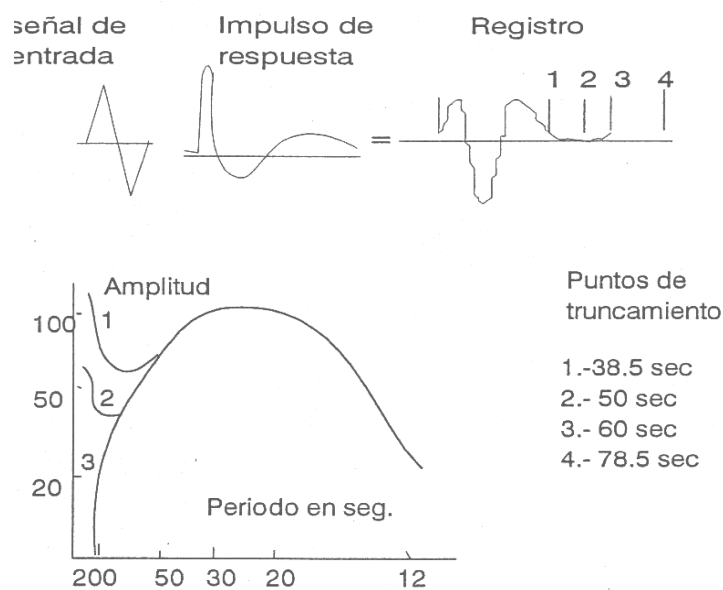


Fig. 13 Efectos de Truncamiento espectral

Por esto se recomienda usar una longitud de la ventana por lo menos igual a dos veces el período dominante de la señal. A la vez el intervalo de muestreo T debe ser elegido mediante pruebas en los registros dados y comparándolo entre diversos espectros de varios intervalos.

III.3 EJEMPLO SINTÉTICO

Para lograr este proceso sísmico simulado se hizo necesario considerar un pulso de fase mínima como con el de Ricker el cual fuera (convolucionado) con una serie de coeficientes de reflexión a partir de un modelo con las variables de espesor, velocidad y densidad de esta forma se generó el pulso con una longitud para multiplicarse con un vector de elementos de los coeficientes de reflexión de esta forma se detecto como cada coeficiente mantiene la amplitud o anula el valor de la convolución en los puntos de sobreposición, esto proporciona una traza sísmica ideal sin alteraciones.

En general la traza con ruido aleatorio se observa el incremento de altas frecuencias y un diferente rango de amplitudes.

Resulta muy importante seleccionar el tamaño de la ondícula para que el vector convolucionado sea muestreado y filtrado adecuadamente para quitar el ruido y obtener un espectro de potencia concentrado sin lóbulos laterales, ya que este recibió un suavizamiento espectral. Como se observa en la figura 14.

Se puede observar que la amplitud instantánea representa la cantidad de energía de la señal reflejada; y cuando existen cantidades significativas de energía como en el caso en que se presente un reflector en esta señal, la amplitud instantánea tiende a manifestar estos cambios variando su amplitud.

En una sección de la amplitud. se permite determinar zonas donde existen anomalías de amplitud. Además nos permite analizar cualitativamente la energía que se refleja y la que se transmite en una interfase, que va a indicar anomalías asociadas a cambios de litología .

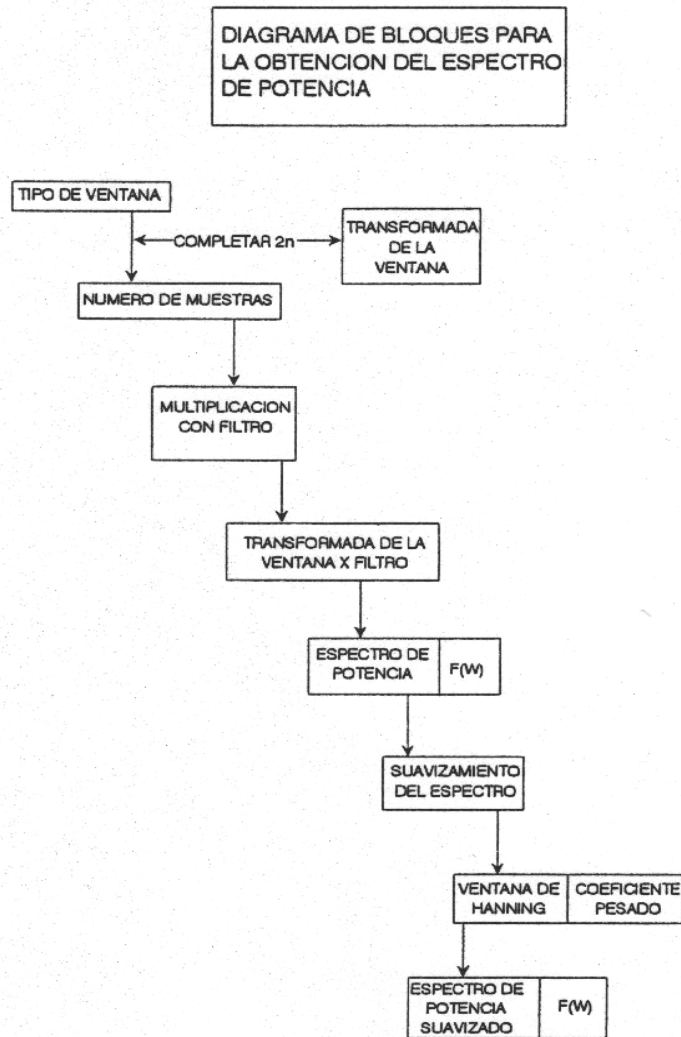


Fig. 14 Secuencia de obtención de el espectro de potencia

En las secciones sísmicas se presentan anomalías asociadas con acumulaciones de gas. En este caso, el gas se encuentra en una formación de arena en donde, la anomalía toma la forma de coeficiente de reflexión de gran amplitud, y polaridad negativa debido a que estos sedimentos clásicos tienen más baja impedancia acústica que las capas de su alrededor.

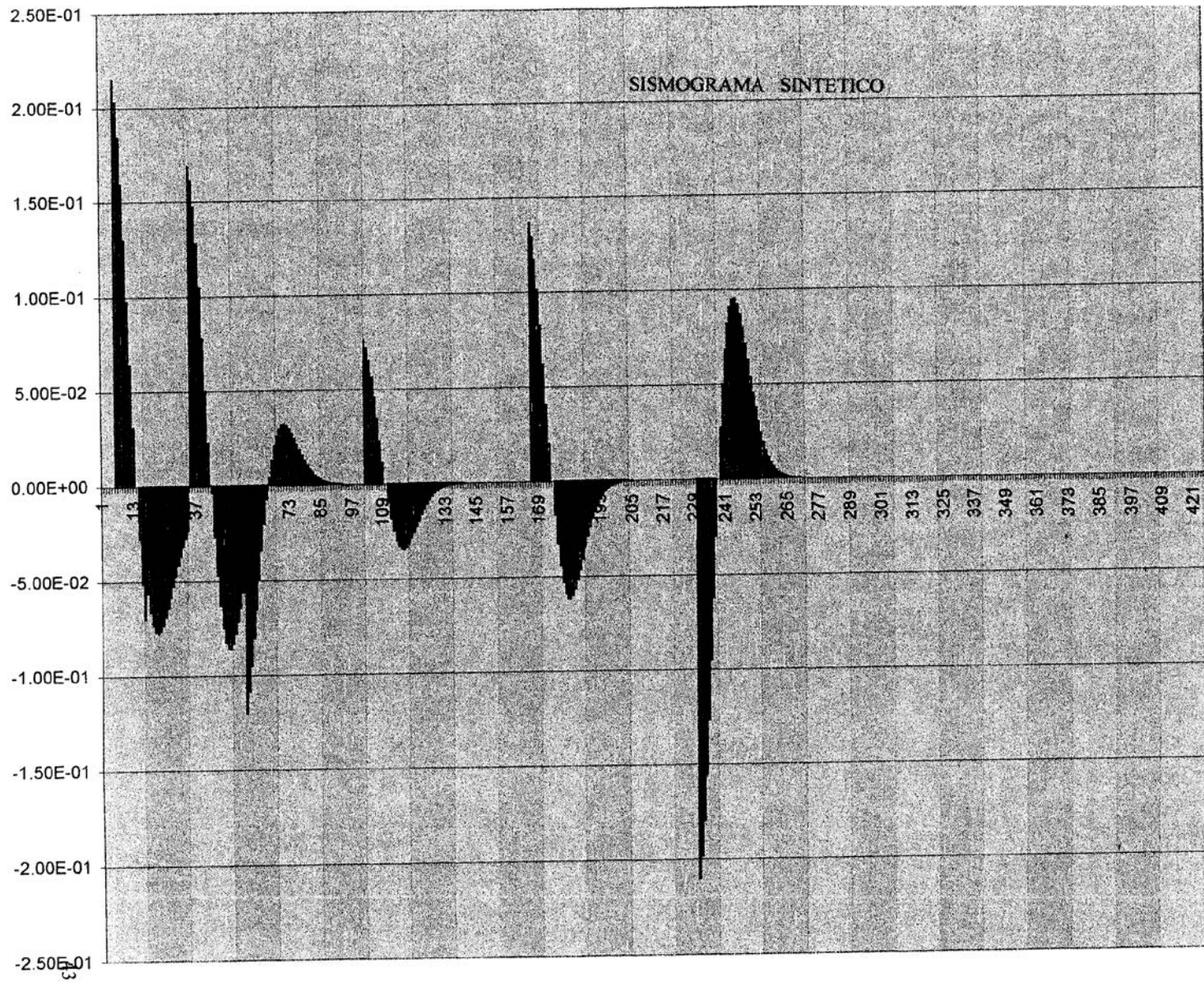
Este tipo de anomalías en estratigrafía sísmica se conocen como puntos brillantes o bright spot. Sus características principales en una sección sísmica son:

- Efectos en la transmisión de energía
- Múltiples locales de gran amplitud.
- Existencia de una zona de sombra (baja amplitud en los eventos)
- Absorción anómala (hay un incremento debido a la presencia del líquido).

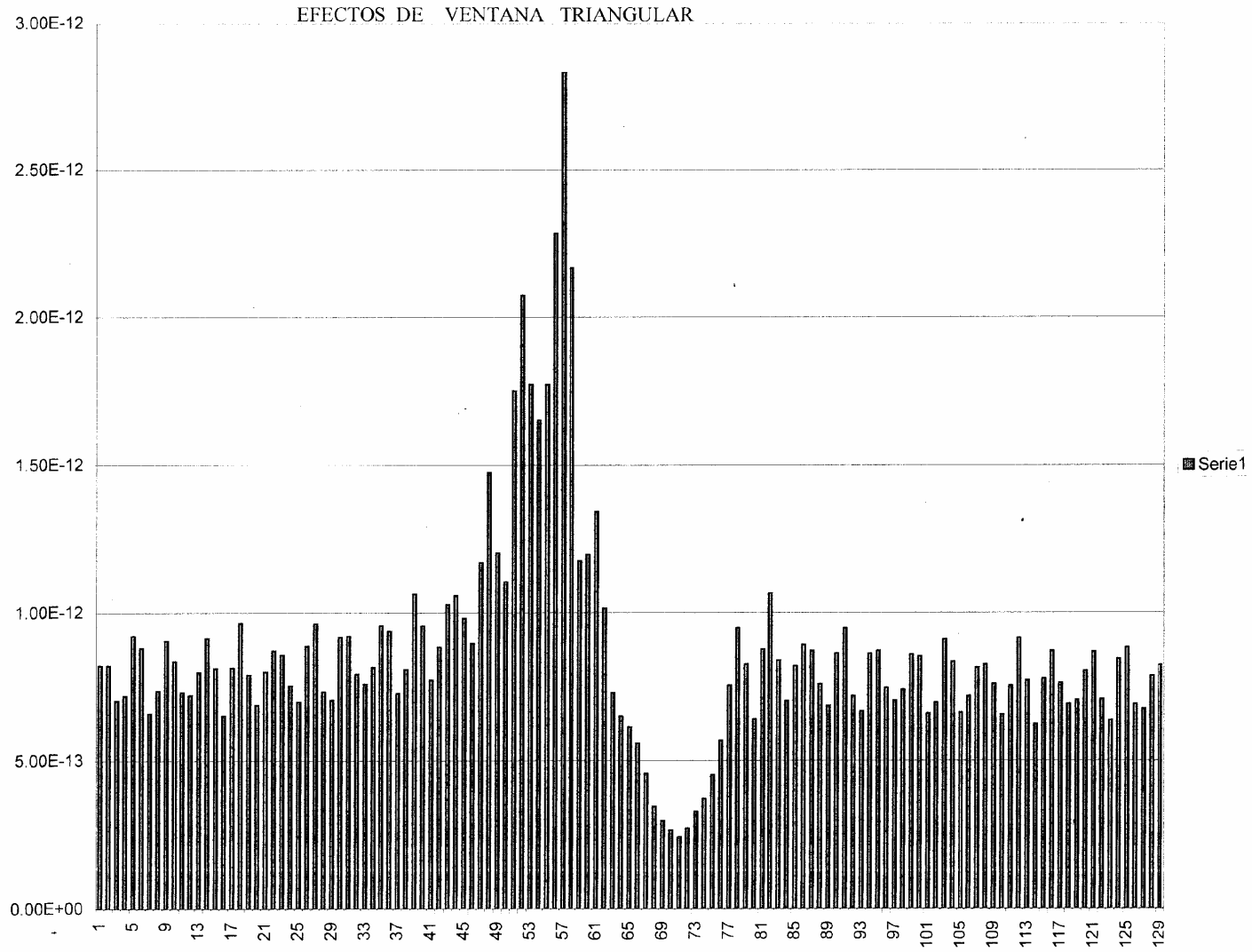
En estratigrafía sísmica, el corte bajo del filtro de campo es usualmente alto. Esto es debido a que el corte bajo alto garantiza contenido de altas frecuencias en el espectro de la traza sísmica, no permitiendo interferencias en los reflejos generados por la energía de frecuencia y velocidad aparentemente baja.

El corte alto del filtro de campo se determina con base en la frecuencia de muestreo temporal empleada en el estudio sísmológico. Este corte alto, es definido igual a la frecuencia temporal de Nyquist, con el objetivo de eliminar la posibilidad del fenómeno de alias.

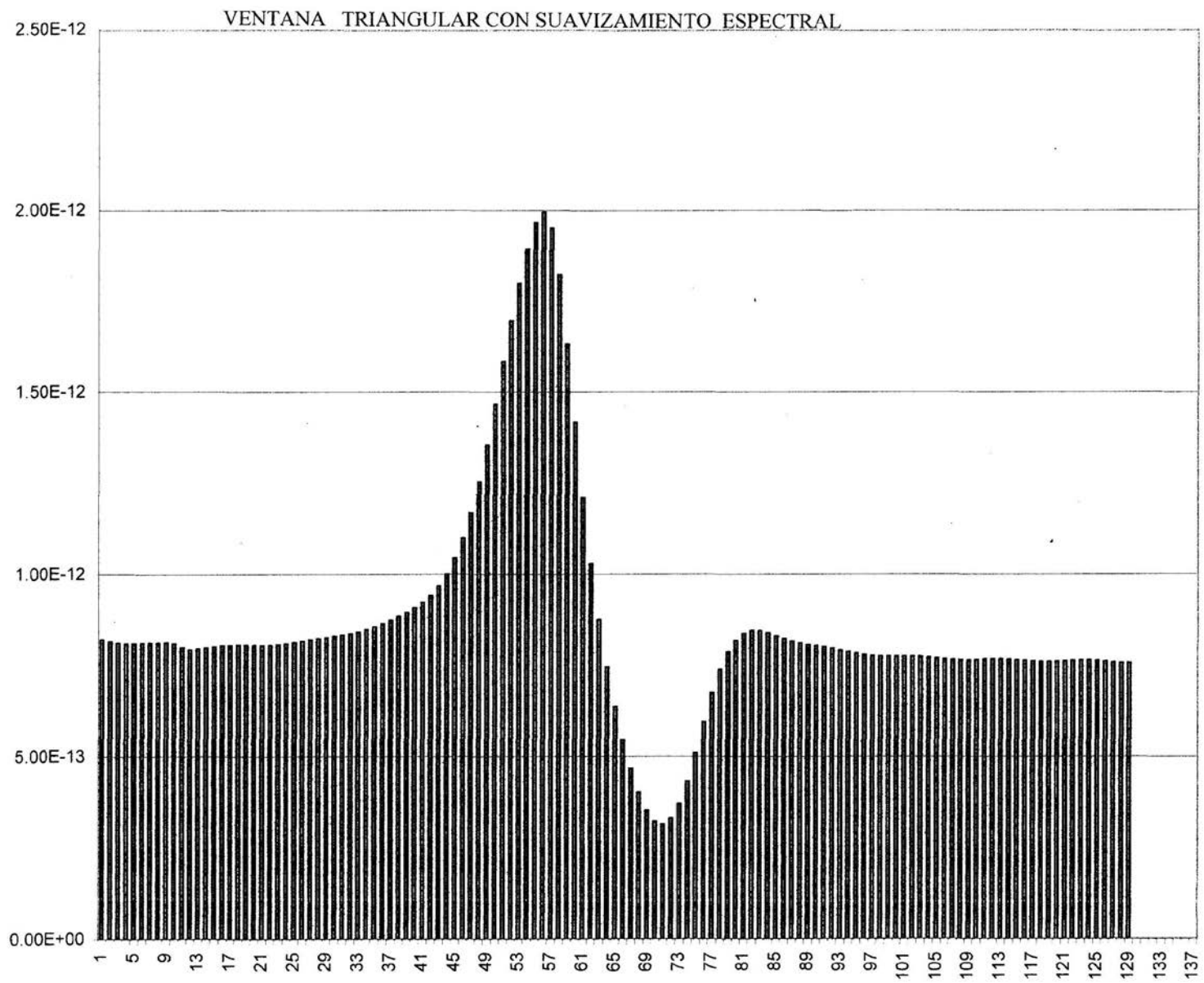
Enseguida se mostrará una secuencia y modelo ,ondícula,serie reflectiva,, sismograma sintético,traza con ruido ,filtro,traza filtrada ,transformada de la función autocorrelación ,espectro filtrado y espectro suavizado que es el objetivo principal del programa en lenguaje Fortran de esta tesis.



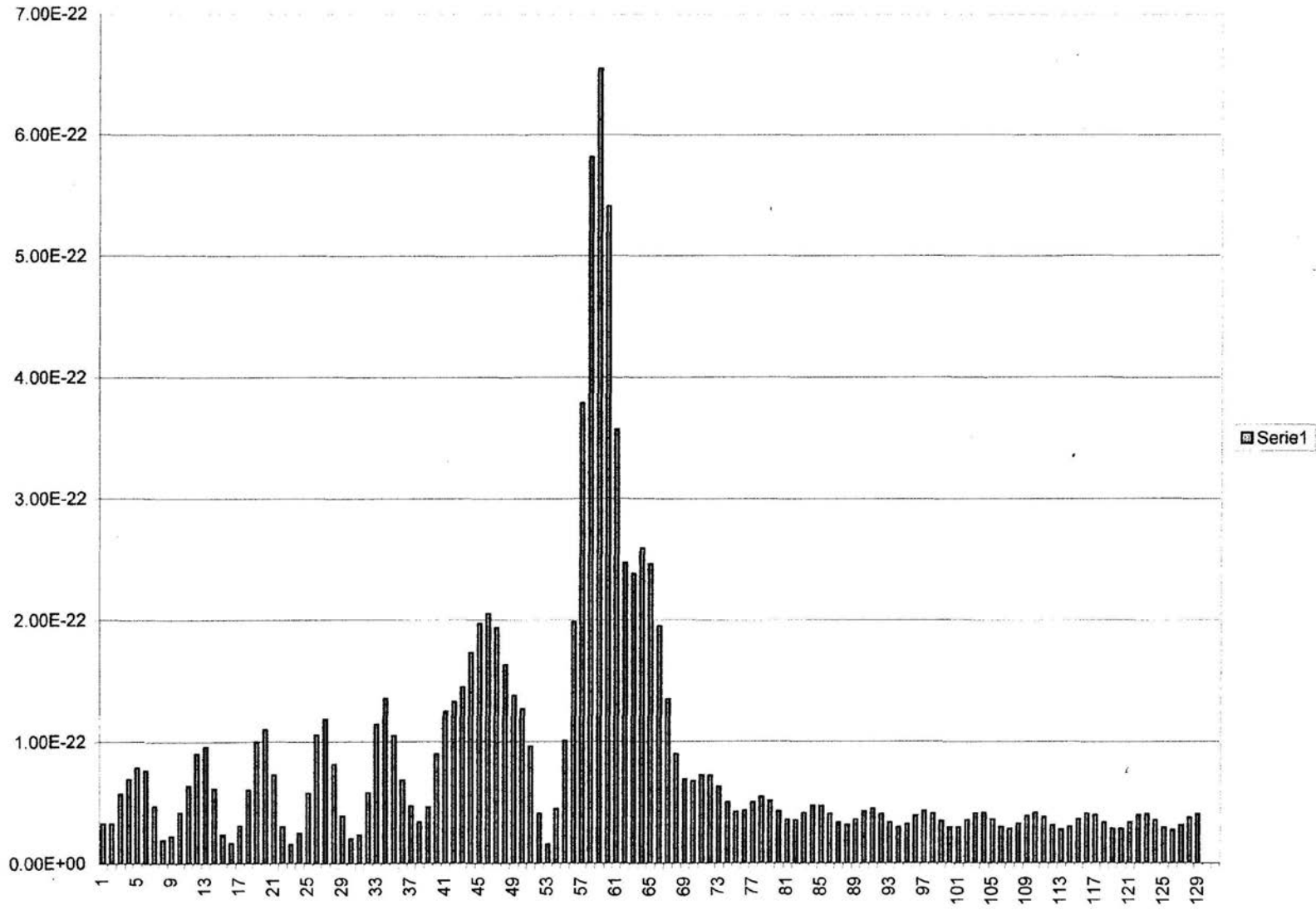
Serie1



47



ESPECTRO SIN FILTRO HANNING



CONCLUSIONES

La estimación de la densidad espectral de potencia DEP o simplemente espectro de procesos estocásticos y determinísticos muestreados discretamente esta basada usualmente en procedimientos que emplean la TRF.

Este enfoque al análisis espectral es eficiente computacionalmente y produce resultados razonables para una gran clase de procesos de señal.

No obstante estas ventajas , hay ciertas limitaciones de alcance en el esquema de TRF.

La limitación más prominente es la de resolución en frecuencia , es decir , la habilidad de distinguir las respuestas espectrales de 2 o más señales .La resolución en frecuencia dada en HZ es aproximadamente el recíproco del intervalo de tiempo en segundos sobre el que los datos muestreados están disponibles.

Una segunda limitación es debida al ventaneo implícito de los datos que ocurre cuando se procesa o se aplica T.R.F.

El ventaneo se manifiesta como una dispersión en el dominio espectral , es decir, la energía del lóbulo principal de una respuesta espectral se dispersa en los lóbulos laterales , oscureciendo y distorsionando otras respuestas espectrales de señales débiles pueden ser enmascaradas por lóbulos laterales altos debidas a respuestas espectrales más fuertes.

Una selección habilidosa de ventanas puede reducir la dispersión hacia los lóbulos laterales , pero siempre a expensas de reducir la resolución .

Estas dos limitaciones de la TRF en cuanto a su alcance son particularmente problemáticas cuando se analizan registros cortos. Los registros cortos ocurren frecuentemente en práctica ya que muchos procesos son breves en duración o tienen espectro que varia lentamente con el tiempo , que pueden ser considerados constantes solamente para registros cortos. En un intento por aliviar las limitaciones inherentes de los esquemas de FFT han

sido propuestas muchos procedimientos alternativos de estimación espectral en la última década. Por citar algunas técnicas: Blackman y Tukey , Máxima Entropía ,. La aplicación del modelo convolucional en la adquisición de datos tiene una enorme importancia para la obtención de los atributos físicos en la exploración estratigráfica. Esto es con base en que las técnicas de campo juegan un papel muy importante en los resultados finales de la exploración, es decir, que de lo adecuado de las técnicas de campo dependerá la calidad de la señal grabada y la alta resolución necesaria para llevar a cabo lo que se conoce como "estratigrafía sísmica".

Anteriormente, los objetivos geológicos eran normalmente de tipo estructural, la acumulación de hidrocarburo, que antes habían pasado desapercibidas por la mente del geofísico. Ahora, la sismología de alta resolución se emplea cada vez más frecuentemente en la exploración de trampas estratigráficas, la mayoría de espesores muy pequeños, comparados con los espesores que tradicionalmente se han determinado con el método sísmico de reflexión. Por esta razón , el interés desde el punto de vista sismológico radica, ya no en el simple tiempo de reflexión, sino en los atributos de la ondícula de reflexión; es decir, que en la actualidad es posible usar la información de amplitud, fase y frecuencia para definir comportamientos estratigráficos del subsuelo.

Así, para propósitos de interpretación estructural, deseamos retener los beneficios de las técnicas ahora usadas como la de convolución, filtraje en frecuencia con variación el tiempo y el espacio por ejemplo.

En cuanto al enfoque estratigráfico, debemos estudiar el material en estas capas y para tal fin, debemos hacer todas las mediciones posibles de la traza sísmica, como son el contenido de frecuencias y la polaridad de estas reflexiones, juntas todas ellas con la velocidad de intervalo que hay entre las capas y cambio en el contenido de frecuencias, polaridad anomalías en las velocidades .

El criterio usado para evaluar los efectos del filtro (ventana * filtro) contra la traza sísmica sin ruido, en los espectros de potencia fué bajo en comparación directa manteniendo la misma longitud de ventana y frecuencia de corte.

El enfoque de Blackman --Tukey utilizando anteriormente y el periodograma para la estimación espectral tienen las siguientes características.

A) Son computacionalmente eficientes ya que solamente se necesitan algunos coeficientes de autocorrelación para el caso de Blackman--Tukey o bien apoyándose con una T.R.F. para el caso de un periodograma.

A) Las estimaciones de la función de densidad espectral son directamente proporcionales a la potencia de las funciones sinusoidales.

De alguna manera existen desviaciones que limitan una utilización directa y segura de estos métodos sobre las señales en estudio siendo estas:

- Supresión de lóbulos centrales por la presencia de lóbulos laterales fuertes.
- La resolución en frecuencia está limitada por la duración del registro disponible y 1 es independiente de las características de los datos o de la relación señal / ruido.
- Distorsión en el espectro obtenido, por efectos de dispersión.
- La obtención necesaria de algún promedio estadístico para reforzamiento del espectro.
- La aparición de valores negativos del espectro estimado al usar el método Blackman --Tukey, cuando es utilizada parte de la secuencia de autocorrelación.

A los métodos que se les denomina paramétricos, es porque tienen mejor resolución al semejar una forma sinuosa, o sea que se ajustan y tienden a la **forma** de los datos.

Otra ocurre en el "ventaneo" implícito de los datos al procesarse por TRF esto origina una dispersión en el dominio espectral, es decir la energía del lóbulo central se vierte hacia los lóbulos laterales, enmascarando la señal útil.

De hecho las respuestas espectrales de señales débiles pueden ser enmascaradas por lóbulos laterales altos debidas a respuestas espectrales más fuertes.

Siempre es importante mantener una alta resolución espectral que no oculte información útil.

BIBLIOGRAFIA

- A.A.FITCH
SEISMIC REFLECTION INTERPRETATION
GEOPUBLICATION ASSOCIATES SERIES
1976
- BACKUS N.
PRINCIPLES OF SONIC REGISTER
PRENTICE HALL
1979
- CLEARBOUT
FUNDAMENTAL OF GEOPHYSICAL DATA
PROCESSING
1976
- ENDERS A. ROBINSON,TARIQ S.
GEOPHYSICAL SIGNAL PROCESSING
PRENTICE HALL 1986
- HWEI P.HSU
ANALISIS DE FOURIER
FONDO INTERAMERICANO 1975
- NIGEL ANSTEY
SEISMIC INTERPRETATION
THE PHYSICAL ASPECTS
1984
- OPPENHEIM ,A .V.,R.W.SCHAFFER
DISCRETE TIME SIGNALS
PRENTICE HALL 1989
- BATH MARCUS
SPECTRAL ANALYSIS IN GEOPHISICS
ELSEVIER SCIENTIFIC PUBLISHING
1974
- BODINE,J,H
WAVEFORM ANALYSIS WITH SEISMIC
ATRIBUTES
OIL &GAS JOURNAL
1986
- E. A. ROBINSON
GEOPHYSICAL SIGNAL ANALYSIS
PRENTICE HALL INTERNACIONAL
1988
- GERALD GARDNER,FRANKLYN K. LEVIN
MIGRATION OF SEISMIC DATA
GEOPHYSICS REPRINT SERIES 1985
- IEEE,VOL.69 ,No 11
**SPECTRUM ANALYSIS A MODERN
PERSPECTIVE**
NOV. 1982
- OPPENHEIM A.V
DIGITAL SIGNAL PROCESSING
PRENTICE HALL
1995
- PROAKISJ. AND D. MANOLAKIS
DIGITAL TIME SIGNALS}PRENTICE HALL
1989

ROBINSON ENDERS

**PHISICAL APPLICATION OF STATIONARY
TIME SERIES,WITH REFERENCE TO
DIGITAL DATA**

PRENTICE HALL

1986

SHERIFF,R.E Y GELDART,L.P.

EXPLORACION SISMOLOGICA

VOL. 1 , EDITORIAL LIMUSA

. 1991

SAMUEL D.STEARN,R HUSH

DIGITAL SIGNAL ANALYSIS

PRENTICE HALL

1990

STRUM D. HUBERT

**FIRST PRINCIPLES OF DISCRETE
SYSTEMS AND DIGITAL SIGNAL
PROCESSING**

1989

SINVHAL,A AND SINVHAL H.

**SEISMIC MODELLING AND PATTERN
RECOGNITION IN OIL EXPLORATION**

KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS

1992

SHERIFF ,R.E. Y GELDART ,L.P.

PROCESAMIENTO E INTERPRETACION E

DATOS .VOL.2 EDITORIAL LIMUSA

1991

TANER,M,T, KOHELERF, SHERIFF R.

COMPLEX SEISMIC TRACE ANALYSIS

GEOPHISICS,V.44

1979

Website : www.analisis.espectral.com

Miguel Angel Lagunas

c234567

c programa QUE CALCULA ESPECTRO DE POTENCIA
DIMENSION W(500),G(300),WG(300),GG(300),S(300)

DIMENSION CR(50),PB(50),PP(50),P(50),QQ(50),QDIV(50),Q(50)
DIMENSION B(300),A(300),V(50),RESP(50),ENT(50),QA(50)
DIMENSION ACONV(50),DVD(50),X(100),T(50),DVS(50)
DIMENSION AMP(300),FASE(300),FRE(300),C(300)
DIMENSION AUTOCORR (300),TGC(300)

COMPLEX CAUTOCORR(300),CX(1),CAMP(300)
C COMPLEX CWG(300),CGG(300),CG(300),CX(1)
COMPLEX C
INTEGER OTCD1
REAL PI

C*****

PRINT*,'DAME EL N DE CAPAS'
READ (5,*)N

PRINT*,'UNIDADES DE TIEMPO RETRASO L'
PRINT*,'DONDEQUIERES COMNOCER ELSISMO SINTE'
READ(5,*)L
PRINT*,'CUANTAS MUESTRAS DE LA OND'
READ (5,*)LDO
PRINT*,'DI LA FREC DE LA OND/SISSNTE'
READ(5,*) FREC
PRINT*,'DAME LOS COEF DE REFELEX'
DO 101 I=1,N-1
READ(5,*)CR(I)

101 CONTINUE
DO 102 I=1,N
PP(I)=0.0
P(I)=0.0
QQ(I)=0.0
Q(I)=0.0

102 CONTINUE
PB(1)=1.0
P(1)=1.0
QA(1)=1.0
Q(1)=1.0
K=2

117 LD=K
DO 103 I=1,LD
PP(I)=PB(I)
P(I)=PB(I)
QQ(I)=QA(I)
Q(I)=QA(I)

103 CONTINUE
L=LD/2
DO 104 I=1,L
J=LD-I
TEMP=P(I)
AUX=Q(I)
P(I)=P(J+1)

```

Q(I)=Q(J+1)
P(J+1)=TEMP
Q(J+1)=AUX
104 CONTINUE
DO 105 I=1,LD
AI=P(I)*CR(K)
BI=Q(I)*CR(K)
PB(I)=PP(I)-BI
QA(I)=QQ(I)-AI
105 CONTINUE
K=K+1
IF(K.GT.N+1)GO TO 1440
GO TO 117
1440 N=N+1
M=M+1
DO 106 I=1,N
DVD(I)=CR(1)*PB(I)
DVS(I)=PB(I)-CR(1)*QA(I)
106 CONTINUE
GO TO 28
201 GO TO 300
301 LC=L+LDO-1
WRITE(6,2000)
2000 FORMAT(//,40X,'OND DE RICKER')
CALL PLOTN (ACONV,LDO)
GO TO 400

987 WRITE (6,1008)
1008 FORMAT(//,30x,'TRAZA SISMICA')
PAUSE
PAUSE

CALL PLOTN (C,LC)

c OPEN(UNIT=6,FILE='ESPEC.LIS',STATUS='NEW')

pause

PAUSE
I=LC
WRITE (6,*)'DAME EL TIEMPO DONDE INICIA LA GANANCIA'
READ(5,*)TIEM
WRITE(6,*)'DAME LA GANANCIA QUE QUIERES'
READ(5,*)F

DO 996 I=TIEM,LC
A(I)=F/20*0.043412161*(C(I+1)-C(I))
B(I)=20*LOG(EXP(A(I)*I))

996 CONTINUE
WRITE(6,1009)

```

```

1009 FORMAT(30X,'TRAZA CON GANANCIA EXP.')
      DO 997 I=1,LC
          T(I)=B(I)
997 CONTINUE
      CALL PLOTN(T,lc)

```

C

```

      PI=4.0*(ATAN(1.0))
      TWOPI=2.0*(PI)
      INCOD=5
      OTCD1=6
10 WRITE(6,11)
11 FORMAT(//,40X,'ENTRA NF,ITYPE,JTYPE',//)
      READ(INCOD,1)NF,ITYPE,JTYPE
1  FORMAT(3I4)
      WRITE(6,2)NF,ITYPE,JTYPE

      2 FORMAT(/,40X,'NF=',I4,5X,'ITYPE=',I4,5X,'JTYPE=',I4)
      IF (NF.LE.260)GOTO 30
20 WRITE(OTCD1,9997)NF
9997 FORMAT('NF=',I4,'ESTA FUERA DE LIMITE')
      STOP
30 IF(ITYPE.NE.7.AND.NF.LT.3)GO TO 20
      IF(ITYPE.EQ.7.AND.(NF.EQ.1.OR.NF.EQ.2))GO TO 20
      N=(NF+1)/2
      IF(JTYPE.NE.1.AND.JTYPE.NE.2)GO TO 50
      WRITE(6,12)
12 FORMAT(/,40X,'ENTRA FREC. DE CORTE',//)
40 READ(INCOD,3)FC
3  FORMAT(F4.2)
      WRITE(6,4)FC
4  FORMAT(/,40X'FREC .DE CORTE=',F4.2)
      IF (FC.GT.0.0.AND.FC.LT.0.5)GO TO 60
      WRITE(OTCD1,9995)FC

9995 FORMAT('EL VALOR DE FC=',F14.7,'ESTA FUERA DE LIMITE')
      STOP

```

C BANDPASS Y HIGHPASS

```

50 WRITE(6,13)
13 FORMAT(//,40X,'ENTRA FL,FH',//)
      READ(INCOD,5)FL,FH
5  FORMAT(2F14.7)
9993 FORMAT(2F14.7)
      IF(FL.GT.0.0.AND.FL.LT.0.5.AND.FH.GT.0.0.AND.FH.LT.0.5
* .AND.FH.GT.FL)GO TO 60
      IF(FL.LT.0.0.OR.FL.GT.0.5) WRITE (OTCD1,9995)FL
      IF(FH.LT.0.0.OR.FH.GT.0.5) WRITE(OTCD1,9995)FH
      IF(FH.LT.FL) WRITE(OTCD1,9992)FH,FL
9992 FORMAT('FH=',F14.7,'ES MENOR QUE FL=',F14.7)
      STOP
C234567

```

```

60 IF(ITYPE.NE.7)GO TO 70
  WRITE(6,14)
14 FORMAT(//,40X,'ENTRA(ITYPE=7) DPLOG,DF',//)
  READ(INCOD,6)DPLOG,DF
  6 FORMAT(2F5.5)
  DP=10.0**(-DPLOG/20.0)
  CALL CHEBC(NF,DP,DF,N,X0,XN)
70 IEO=MOD(NF,2)
  IF(IEO.EQ.1.OR.JTYPE.EQ.1.OR.JTYPE.EQ.3) GO TO 80
  WRITE(OTCD1,9990)
9990 FORMAT('NF DEBERA SER ENTERO EN HP O BS',
  * //,'SE COMENZARA CON NF+1')
  NF=NF+1
  N=(1+NF)/2
  IEO=1
80 CONTINUE

  C1=FC
  IF(JTYPE.EQ.3.OR.JTYPE.EQ.4) C1=FH-FL
  IF(IEO.EQ.1) G(1)=2.*C1
  I1=IEO+1
  DO 90 I=I1,N
  XN=I-1
  IF(IEO.EQ.0.0) XN =XN+0.5
  D=PI*XN
  C3=(D*C1)
  IF(JTYPE.EQ.1.OR.JTYPE.EQ.2) C3=2.0*C3
  G(I)=SIN(C3)/D
  IF(JTYPE.EQ.3.OR.JTYPE.EQ.4.) G(I)=G(I)*2.*COS(D*(FL+FH))
90 CONTINUE

  IF(ITYPE.EQ.1) WRITE(OTCD1,9989)NF
9989 FORMAT(40X,'VENTANA RECTANGULAR NF=',I4)
  DO 100 I=1,N
100 W(I)=1.0
  GO TO (200,110,120,140,150,160,170),ITYPE

110 CALL TRIANG(NF,W,N,IEO)
  WRITE (OTCD1,9988)NF
9988 FORMAT(40X,'VENTANA TRIANGULAR NF ='I4)
  GO TO 180

C    VENTANA DE HAMMING

120 ALPHA=0.54
  WRITE(OTCD1,9987)NF
9987 FORMAT(40X,'VENTANA DE HAMMING NF='I4)
130 BETA=1.0 -ALPHA
  CALL HAMMIN(NF,W,N,IEO,ALPHA,BETA)
  WRITE(OTCD1,9986)ALPHA
9986 FORMAT('ALPHA=',F14.7)
  GO TO 180

140 READ (INCOD,7)ALPHA
  7 FORMAT(F14.7)
  WRITE(OTCD1,9984)NF

```

```

9984 FORMAT(40X,'VENT.GRALIZADA DE HAMMING NF='I4)
GO TO 130

150 ALPHA=0.5
WRITE(OTCD1,9983)NF
9983 FORMAT(40X,'VENT. DE HANNING NF=',I4)
NF=NF+2
N=N+1
GO TO 130

C KAISER
160 READ(INCOD,8)ATT

8 FORMAT(F14.7)
IF(ATT.GT.50) BETA=0.1102*(ATT-8.7)
IF(ATT.GE.20.96.AND.ATT.LE.50)BETA=0.58417*(ATT-20.96)**
*.4+0.07886*(ATT-20.96)
IF(ATT.LT.20.96) BETA=0.0
CALL KAISER (NF,W,N,IEO,BETA)
WRITE(OTCD1,9981)NF
9981 FORMAT(40X,'VEN DE KAISER NF=',I4)
WRITE(OTCD1,9980)ATT,BETA
9980 FORMAT(40X,'ATT=',F14.7,'BETA=',F14.7)
GO TO 180

170 CALL CHEBY (NF,W,N,IEO,DP,DF,XO,XN)
WRITE(OTCD1,9979)NF
9979 FORMAT(40X,'VEN DE CHEBY NF=',I4)
WRITE (OTCD1,9978)DP,DF
9978 FORMAT(40X,'DP=',F14.7,' DF=',F14.7)
C RESPUESTA IDEAL DEL FILTRO
180 IF(ITYPE.EQ.5)NF=NF-2
IF(ITYPE.EQ.5)N=N-1
DO 190 I=1,N
190 G(I)=G(I)*W(I)
C RESULTADOS

WRITE(6,175)
175 FORMAT(//,5X,'IWP(0,1)',//)
200 READ(INCOD,9976)IWP
9976 FORMAT(I1)
IF(IWP.EQ.0)GO TO 220
WRITE(OTCD1,9975)
9975 FORMAT('VALOR DE VENTANA')
DO 210 I=1,N
J=N+1-I
K=NF+1-I
210 CONTINUE
220 IF(JTYPE.EQ.1) WRITE(OTCD1,9973)
9973 FORMAT(40X,'FILTRO PASABAJAS')
IF (JTYPE.EQ.2) WRITE(OTCD1,9972)
9972 FORMAT(40X,'FILTRO PASA ALTAS')
IF (JTYPE.EQ.3) WRITE (OTCD1,9971)
9971 FORMAT (40X,'FILTRO PASABANDAS')
IF (JTYPE.EQ.4) WRITE (OTCD1,9970)
9970 FORMAT(40X,'FILTRO BAND STOP')

```

```

IF( JTYPE.EQ.1) WRITE (OTCD1,9969 )FC
9969 FORMAT (40X,'FREC.CORTE PASABAJAS',F14.7)
IF(JTYPE.EQ.2) WRITE(OTCD1,9968)FC
9968 FORMAT(40X,'FREC. DE CORTE PASA ALTAS FC=',F14.7)
IF (JTYPE.EQ.3.OR.JTYPE.EQ.4) WRITE(OTCD1,9967) FL,FH
9967 FORMAT(40X,'FRECUENCIAS IDEALES FL & FH = ',2F14.7)
IF (JTYPE .EQ.1.OR .JTYPE.EQ.3)GO TO 240
DO 230 I=2,N
230 G(I)= -G(I)
G(1)=1.0-G(1)

```

C RESPUESTA AL IMPULSO

```

c234567
240 DO 250 I=1,N
J=N+1-I
K=NF+1-I
250 CONTINUE
DO 888 I=1,N
J=N+1-I
K=NF+1-I
WG(I)=W(J)
GG(I)=G(J)
WG(K)=W(J)
888 GG(K)=G(J)

```

```

FN=NF
WRITE(OTCD1,3018)
3018 FORMAT(//,40X,'VENTANA*FILTRO -TIEMPO-')
C*****
print*, 'filtro contra ventana'
CALL PLOTN(GG,NF)

```

C***** AQUI MULTIPLICAR POR FILTRO VENTANA

```

DO 918 I=1,NF
918 TGC(I)=GG(I)*B(I)

PAUSE
WRITE (6,919)
919 FORMAT(/,20X,'TRAZA FILTRADA contra ventana')

PAUSE

PAUSE

```

```

CALL PLOTN(TGC,LC)
PAUSE
CALL CORREL (TGC,LC,AUTOCORR)

```

```

WRITE (6,9999)
9999 FORMAT (//,40X,'LA FUNC DE AUTOCORR')
PAUSE
CALL PLOTN (AUTOCORR,LC)
PAUSE

NV=LC
CALL CEROS (AUTOCORR(IJ),NV,NT)
DO 1060 IJ=1,NT
    CAUTOCORR(IJ)=CMPLX(AUTOCORR(IJ),0.0)
1060 CONTINUE
DELTAT=1
CALL FORK(CAUTOCORR,NT,-1.0)
DO 1061 I=1,NT
    A(I)=REAL(CAUTOCORR(I))
1061 B(I)=AIMAG(CAUTOCORR(I))

NARM=NT/2+1
FNYQ =1./(2*DELTAT)
DELF=FNYQ/(NARM-1)
DO 365 I=2,NARM
365 FRE(I)=FLOAT(I-1)*DELF
FRE(1)=FRE(2)
CALL CALESP(A,B,AMP,FASE,NARM,IPRO)
WRITE(6,3011)
3011 FORMAT(///,40X,'TRANSFORMADA DE AUTOCORR')
PAUSE

CALL PLOTN(A,NARM)
PAUSE

CALL CALESP (A,B,AMP,FASE,NARM,10)
WRITE (6,3013)
3013 FORMAT(///,40X,'EL ESPECTRO DE POTENCIA')
PAUSE

CALL PLOTN(AMP,NARM)
PAUSE

CALL SUAVE(AMP,NARM,10)
WRITE(6,3014)
3014 FORMAT (///,40X,'ESPECTRO DE POTENCIA SUAVIZADO')
PAUSE

CALL PLOTN (AMP,NARM)
PAUSE

GO TO 354
28 GO TO 500
501 GO TO 506
507 DO 195 I=1,LV
    QDIV(I)=QDIV(I)/DVS(1)
    IF(I.EQ.L)GOTO 111
    KL=I

```



```

      ISUB=MIN0(N-1,L-I)
195 CONTINUE
      DO 196 J=1,ISUB
          KL=KL+1
          QDIV(KL)=QDIV(KL)-QDIV(I)*DVS(J+1)
196 CONTINUE

111 GOTO 201
300 DO 2100 I=1,LDO
      VAR=I-1
          AA=1.-2*(3.14159*FREC*VAR)*(3.14159*FREC*VAR)
          AB=EXP(-1.*((3.14159*FREC*VAR)*(3.14159*FREC*VAR)))
          ACONV(I)=AA*AB
2100 CONTINUE
      GOTO 301
400 LC=L+LDO-1
      DO 5020 I=1,LC
          C(I)=0.0
5020 CONTINUE
      DO 310 I=1,L
          DO 310 J=1,LDO
              KK=I+J-1
              C(KK)=C(KK)+QDIV(I)*ACONV(J)
310 CONTINUE
      GO TO 987
500 DO 410 I=1,LD
      T(I)=0.0
410 CONTINUE
      GO TO 501
506 DO 510 I=1,LD
      QDIV(I)=DVD(I)
510 CONTINUE
      GO TO 507
354 STOP

```

END

```

SUBROUTINE PLOTN (T,LT)
DIMENSION T(500),LINE(51)
DATA NMAX/40/
DATA IBLNC1,IBLNC2 ,IAST,IBLNC,ICENTR /'*,*',!'','!'/
WRITE(6,300)
IST=0
TMAX=0.
DO 120 I=1,LT
    IF(IST.EQ.0. AND.T(I).NE.0.)IST=1
    TMAX=AMAX1(T(I),TMAX)
120 CONTINUE

IF(TMAX.LE.0.)WRITE(6,400)
IF(TMAX.LE.0.)WRITE(6,500) TMAX
IF (TMAX.LE.0.)RETURN
DO 121 I=IST,LT
    DO 123 J=1,51
        LINE(J)=IBLNC
123 CONTINUE

```

```

J=IFIX(25.* T(I)/TMAX+ SIGN(.5,T(I))) +26
J=MAX0(MIN0(J,51),1)
KM=MIN0(J,26)
KP=MAX0(J,26)
    DO 124 K=KM,KP
        LINE(K)=IAST
124 CONTINUE
    LINE(26)=ICENTR
    TM=T(I)
    IF(I.GT.1)TM=T(I)-T(I-1)
    TP=T(I)
    IF(I.LT.LT) TP=T(I)+T(I+1)
    IF(TM.LT.0.AND.TP.LT.0.0)LINE(J)=IBLNC2
    IF(TM.GT.0.AND.TP.GT.0.0)LINE(J)=IBLNC1
    WRITE(6,600) (LINE(J),J=1,51),I,T(I)
121 CONTINUE
300 FORMAT(' +',10('----+'))
400 FORMAT(/20X,'CIDADO--- LA TRAZA ES NULA.')
```

```

500 FORMAT(' +',10('----+'))//,10X,'MAX DEFLEXION=',G15.7)
600 FORMAT(' ',51A1,I4,2X,G15.7)
    RETURN
    END

SUBROUTINE NOISE (LX,SIGNAL,CORSIG,B)
C   SIGNAL IS THE ORIGINAL TIME SERIES
C   CORSIG IS THE CORRUPTED SIGNAL
C   B IS THE AMOUNT OF CORRUPTION
    DIMENSION B(1), SIGNAL(1), CORSIG(1)
C   NOISE IS ADDED IN TIME DOMAIN
c 2000 FORMAT(//' ENTER SUBROUTINE NOISE')
2001 FORMAT(1X,'VARNO = ',F14.5' XMEAN = ',F14.5)
2002 FORMAT('VARSI = ',F14.5/'MEAN OFF SIGNAL = ',F14.5/'
c * SNR=',F14.5)
c 2003 FORMAT(//' NOISE')
c   WRITE(6,2000)
    M = 10
    LA = 2**M
    IX = 121212121
    DO 30 I = 1,LA
        IY = IX*65539
        IF(IY) 10,20,20
10 IY=( IY + 2147483647) + 1
20 AR = IY
    B(I) = AR*.4656613E-9
    IX = IY
30 CONTINUE
C   NOISE CHARACTERISTICS
    SUMN1 = 0.0
    SUMN2 = 0.0
    DO 40 J = 1,LA
        B(J) = B(J) - 0.5
        SUMN1 = SUMN1 + B(J)
        SUMN2 = SUMN2 + B(J)*B(J)
40 CONTINUE
    ALX = LA
    AMEAN = SUMN1/la

```

```

VARNO = SUM2 + (SUMN1*SUM1)/ALX
WRITE (6,2001) VARNO, AMEAN
SUMS1 = 0.0
SUMS2 = 0.0
C      SIGNAL CHARACTERISTICS
DO 50 J = 1,LX
SUMS1 = SUMS1 + SIGNAL(J)
SUMS2 = SUMS2 + SIGNAL(J)*SIGNAL(J)
50 CONTINUE
ALX = LX
VARSI = SUMS2 + (SUMS1*SUMS1)/ALX
SNR = VARSI/VARNO
WRITE(6,2002) VARSI, SMEAN, SNR
FUN = SNR/10
DO 60 J = 1,LX
B(J) = SQRT((FUN)*B(J))
C      ADD RANDOM NOISE TO SIGNAL
C      S/N = 10
CORSIG(J) = SIGNAL(J) + B(J)
60 CONTINUE
c WRITE(6,2002)
RETURN
END

C REAL FUNCTION COSHIN(X)
C COSHIN=ALOG(X+SQRT(X*X-1.0))
C RETURN
C END

C REAL FUNCTION CCOSH(X)
C CCOSH=(EXP(X)+EXP(-X))/2.0
C RETURN
C END

C FUNCTION ARCCOS(X)
C IF(X) 30,20,10
C 10 A=SQRT(1.0-X*X)/X
C ARCCOS=ATAN(A)
C RETURN
C 20 ARCCOS=2.0*ATAN(1.0)
C RETURN
C 30 A=SQRT(1.0-X*X)/X
C ARCCOS=ATAN(A)+4.0*ATAN(1.0)
C RETURN
C END

SUBROUTINE FORK (CX,LX,SIGNI)
COMPLEX CX(1),CARG,CW,CTEMP,C1
C1=CMPLX(0.,1.)
J=1
SC=SQRT(1./FLOAT(LX))
DO 30 I=1,LX
IF(I.GT.J)GO TO 10
CTEMP=CX(J)*SC
CX(J)=CX(I)*SC
CX(I)=CTEMP

```

```

10 M=LX/2
20 IF(J.LE.M)GOTO 30
   J=J-M
   M=M/2
   IF(M.GE.1)GOTO 20
30 J=J+M
   L=1
40 ISTEP=2*L
   DO 50 M=1,L
     CARG=C1*(3.14159265*SIGNI*(M-1))/L
     CW=CEXP(CARG)
     DO 50 I=M,LX,ISTEP
       I1=I+L
       CTEMP=CW*CX(I1)
       CX(I1)=CX(I)-CTEMP
       CX(I)=CX(I)+CTEMP
50 CONTINUE
   L=ISTEP
   IF (L.LT.LX)GOTO 40
   RETURN
   END

```

```

SUBROUTINE CALESP(A,B,AMP,FASE,NARM,IPRO)
DIMENSION A(1),B(1),AMP(1),FASE(1)
PI=3.141592654
COR=PIH
PIH=PI/2.
IF(IPRO.EQ.10)GOTO 24
DO 10 I=2,NARM
10 AMP(I)=SQRT(A(I)*A(I)+B(I)*B(I))
   GOTO 25
24 DO 20 I=2,NARM
20 AMP(I)= (A(I)*A(I)+B(I)*B(I))
25 DO 30 I=2 ,NARM
   IF(A(I).EQ.0.) GO TO 15
   FASE (I)=ATAN(B(I)/A(I))
   IF(A(I).GT.0.)GOTO 30
   FASE(I)=FASE(I)+PI
   GOTO 30
15 FASE(I)=-PIH*SIGN(1.,B(I))
30 CONTINUE
101 FORMAT(6F15.2)
   AMP(1)=AMP(2)
   FASE(1)=FASE(2)
   RETURN
   END

```

```

SUBROUTINE CEROS(D,NV,NT)
DIMENSION D(300)
NT=1
1 NT=NT+NT
IF(NT.LT.NV) GOTO 1
NDC=(NT-NV)/2
NDC1=NDC+1
NF=NDC1+NV
NF1=NF+1

```

```

DO 10 I=1,NV
10 D(NV-I+NDC+1)=D(NV-I+1)
DO 20 J=1,NDC
20 D(J)=0.0
DO 30 I=NF1,NT
30 D(I)=0.0
RETURN
END

```

C SUBROUTINE SUAVE (S,NARM,NPA)
NO. DE VECES POR HANNING NPA

```

DIMENSION S(300)
DO 20 I=1,NPA
MM=NARM-1
SI=S(1)
S(I)=S(1)*.50+S(2)*.50
DO 10 J=2,MM
SP=S(J)
S(J)=0.25*(SI+S(J+1))+.50*S(J)
10 SI=SP
S(NARM)=S(NARM-1)*.5+S(NARM)*.5
20 CONTINUE
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE CORREL (SEN,N,AUTOCORR)
DIMENSION SEN(1),AUTOCORR(1)
IDEN=1
J=1
NTAO=1
K=0
221 AUTOCORR(NTAO)=0.0
DO 333 I=J,N
K=K+1
333 AUTOCORR(NTAO)=AUTOCORR(NTAO)+(SEN(I)*SEN(K))
J=J+1
K=0
NTAO=NTAO+1
I1=NTAO-2
IJ=I1+1
WRITE(*,*)I1,AUTOCORR(IJ)
IF(NTAO.GT.N) GO TO 44
GO TO 221
44 IF (IDEN.EQ.1) RETURN

END

```

```

SUBROUTINE TRIANG (NF,W,N,IEO)
DIMENSION W(1)
FN=N
DO 10 I=1,N
XI=I-1
IF(IEO.EQ.0.0) XI=XI+0.5
10 W(I)=1.0-XI/FN
RETURN

```

```

END

SUBROUTINE HAMMING(NF,W,N,IEO,ALPHA,BETA)
DIMENSION W(1)
PI2=8.0*ATAN(1.0)
FN=NF-1
DO 10 I=1,N
FI=I-1
IF(IEO.EQ.0.0)FI=FI+0.5
10 W(I)=ALPHA+BETA*COS(PI2*FI)/FN
RETURN
END

SUBROUTINE KAISER(NF,W,N,IEO,BETA)
DIMENSION W(1)
REAL INO
BES=INO(BETA)
XIND=FLOAT(NF-1)*FLOAT(NF-1)
DO 10 I=1,N
XI=I-1
IF(IEO.EQ.0) XI=XI+0.5
XI=4.0*XI*XI
W(I)=INO(BETA*SQRT(1.0-XI/XIND))
10 W(I)=W(I)/BES
RETURN
END

REAL FUNCTION INO(X)
Y=X/2.0
T=1.0E-08
E=1.0
DE=1.0
DO 10 I=1,25
XI=I
DE=DE*Y/XI
SDE=DE*DE
E=E+SDE
IF(E*T-SDE) 10,10,20
10 CONTINUE
20 INO=E
RETURN
END

SUBROUTINE CHEBC(NF,DP,DF,N,X0,XN)
PI=4.0*ATAN(1.0)
IF(NF.NE.0.0)GOTO 10
C1=COSHIN((1.0+DP)/DP)
C0=COS(PI*DF)
X=1.0+C1/COSHIN(1.0/C0)
NF=X+1.0
N=(NF+1)/2
XN=NF-1
GOTO 30
10 IF(DF.NE.0.0) GOTO 20
20 XN=NF-1
C0=COS(PI*DF)

```

```

C1=XN*COSHIN(1.0/C0)
DP=1.0/(CCOSH(C1)-1.0)
30 X0=(3.0-COS(2.0*PI*DF))/(1.0+COS(2.0*PI*DF))
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE CHEBY(NF,W,N,IEO,DP,DF,X0,XN)
DIMENSION W(1),PR(260),PI(260)
PIE=4.0*ATAN(1.0)
XN=NF-1
FNF=NF
ALPHA=(X0+1.0)/2.0
BETA=(X0-1.0)/2.0
TWOPI=2.0*PIE
C2=XN/2.0
DO 40 I=1,NF
XI=I-1
F=XI/FNF
X=ALPHA*COS(TWOPI*F)+BETA
IF(ABS(X)-1.0)10,10,20
10 P=DP*COS(C2*ARCCOS(X))
GOTO 30
20 P=DP*CCOSH(C2*COSHIN(X))
30 PI(I)=0.0
PR(I)=P
IF(IEO.EQ.1)GOTO 40
PR(I)=P*(COS(PIE*F))
PI(I)=-P*(SIN(PIE*F))
IF(I.GT.(NF/2+1)) PR(I)=-PR(I)
IF(I.GT.(NF/2+1)) PI(I)=-PI(I)
40 CONTINUE
TWN=TWOPI/FNF
DO 60 I=1,N
XI=I-1
SUM=0.0
DO 50 J=1,NF
XJ=J-1
SUM=SUM+PR(J)*COS(TWN*XJ*XI)+PI(J)*SIN(TWN*XJ*XI)
50 CONTINUE
W(I)=SUM
60 CONTINUE
C1=W(1)
DO 70 I=1,N
70 W(I)=W(I)/C1
RETURN
END

```

```

C SUBROUTINE GRAFI(X,N,ITIPO)
C DIMENSION X(1),XX(13)
C CHARACTER*1 II,IAST,IBLNO,ISAL(61)
C DATA II,IAST,IBLNO/'!',**,' '/
C IF(ITIPO-1.0)11,10,11
C 10 XMIN=-1.0
C XMAX=1.0
C GOTO 16
C 11 XMIN=X(I)

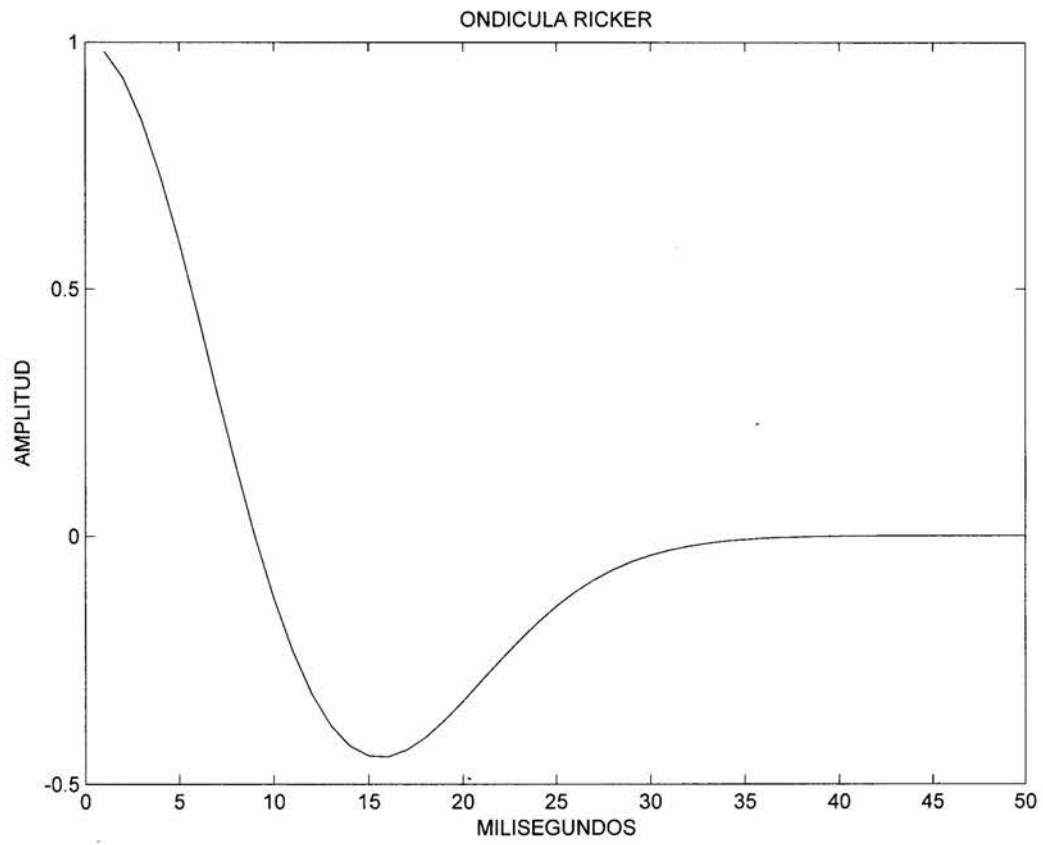
```

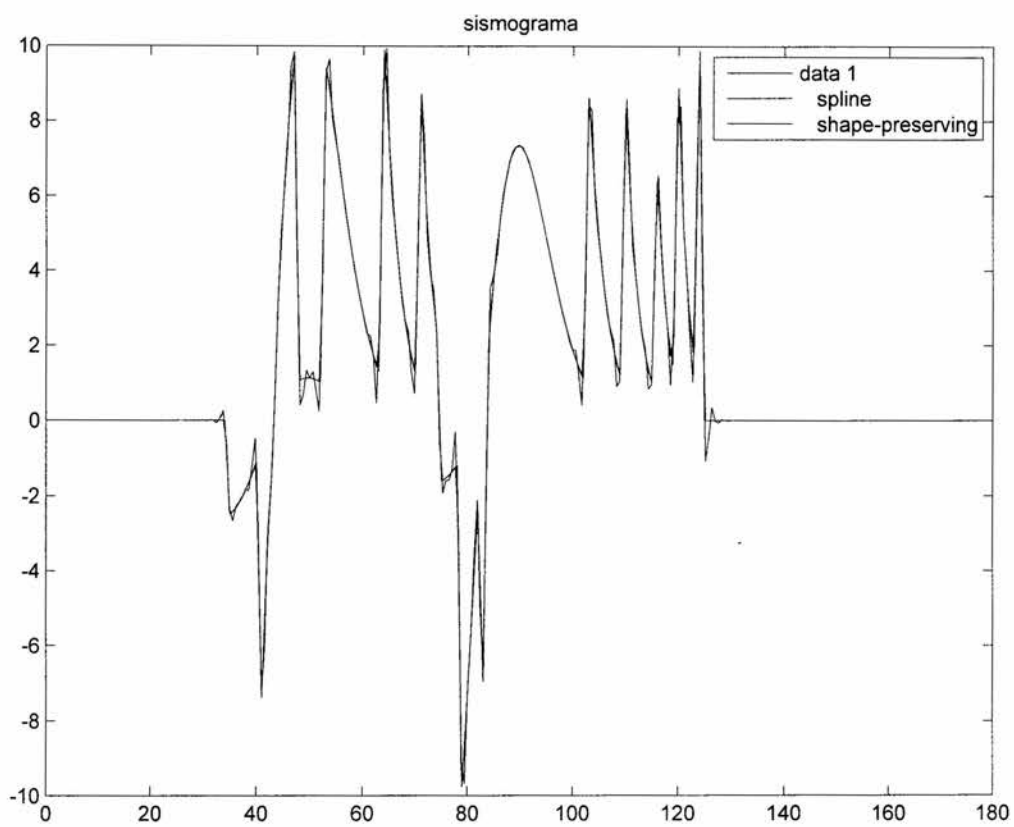
```

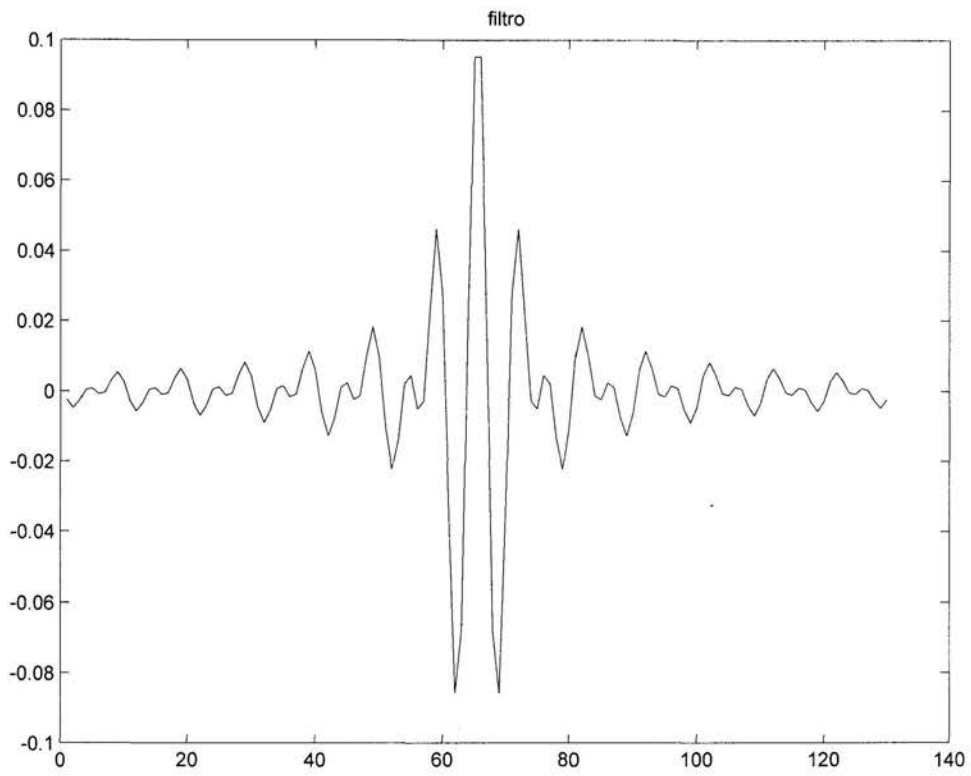
C   XMAX=XMIN
C   DO 15 I=1,N
C   IF(X(I)-XMIN)51,51,52
C 51 XMIN=X(I)
C 52 IF(X(I)-XMAX)15,15,53
C 53 XMAX=X(I)
C 15 CONTINUE
C   IF (ITIPO-3)16,54,17
C 54 XMIN=2.3059*ALOG(XMAX)
C 16 DX=XMAX-XMIN
c2345 TYPE 101,DX
C   XXX=XXX+DX/12.0
C 17 CONTINUE
C   WRITE (6,18)(XX(I),I=2,12,2)
C 18 FORMAT(36X,6F14.6)
C   WRITE (6,19)(XX(I),I=1,13,2 )
C 19 FORMAT(31X,7F14.6)
C   WRITE (6,20)
C 20 FORMAT (36X,'+',I2,'**')
C   DO 22 I=1,N
C   DO 21 J=1,61
C   ISAL(J)=IBLNO
C 21 CONTINUE
C   DO 23 J=1,61,10
C   ISAL(J)=II
C 23 CONTINUE
C   XXX=X(I)
C   IF(ITIPO-3)111,110,111
C 110 XXX=2.3059*ALOG(XX(I))
C 111 IX=IFIX((XXX-XMIN)*60.0/DX)+1.0
C   ISAL(IX)=IAST
C   WRITE(6,50)X(I),ISAL
C 50 FORMAT(2X,F14.6,61A1)
C 22 CONTINUE
C   WRITE (6,20)
C   WRITE(6,19)(XX(I),I=1,13,2)
C   WRITE (6,18)(XX(I),I=2,12,2)
C   RETURN
C   END

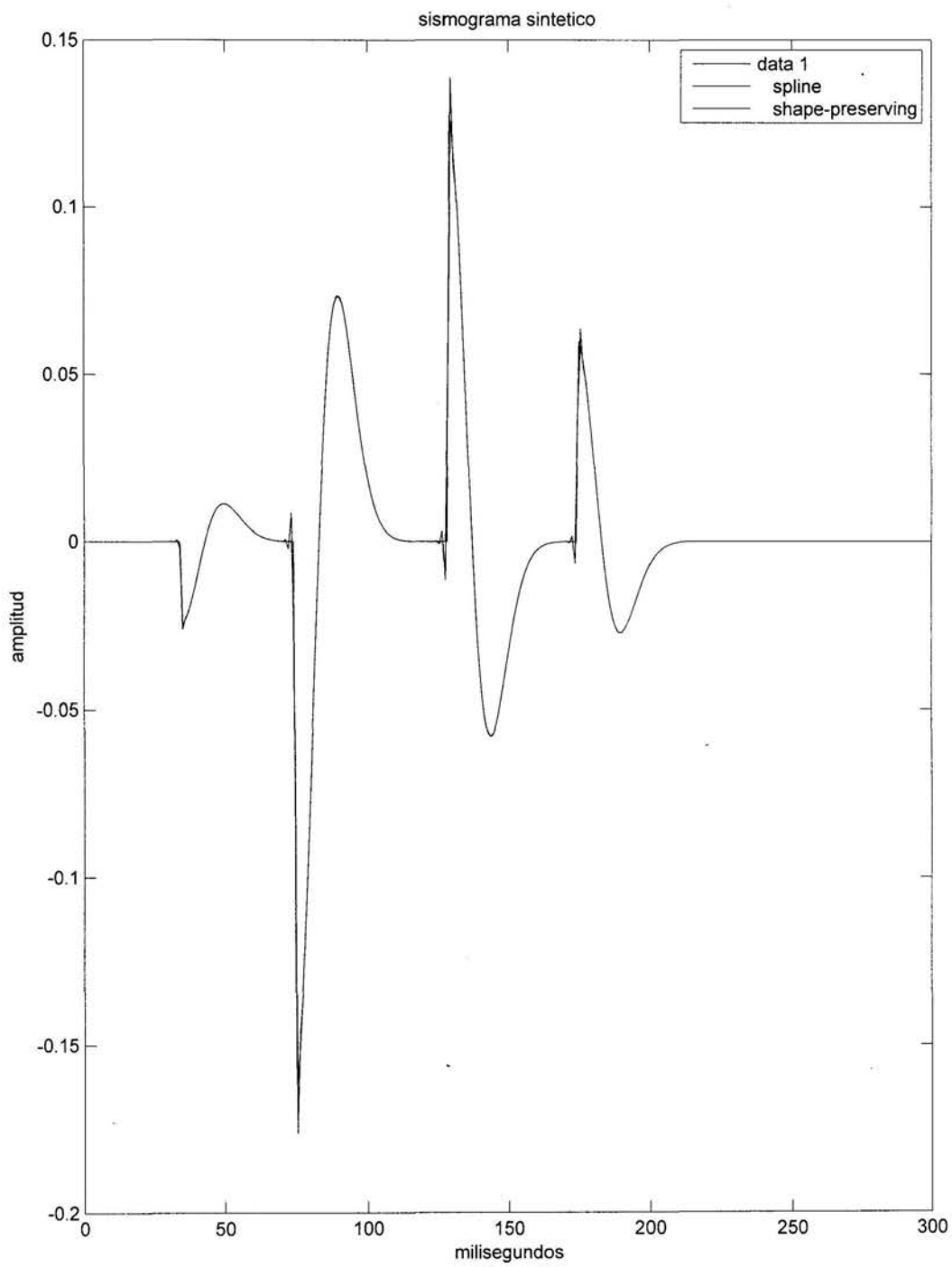
```


APENDICE II EJEMPLG









FILTRO

