



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

TEORIA Y DISEÑO DE FILTROS ESPACIALES

T E S I S

Que para obtener el título de:

INGENIERO GEOFISICO

presenta:

EDMUNDO ALARCON CAÑEDO



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

"TEORIA Y DISEÑO DE FILTROS ESPACIALES"

| | | |
|-------|--|----|
| I.- | INTRODUCCION | 1 |
| II.- | GENERALIDADES | 5 |
| | 1 - Características elásticas de los sólidos | 6 |
| | 2 - Diferentes tipos de ondas | 14 |
| | 3 - Señal y Ruido | 16 |
| | 4 - Pruebas de campo para el análisis de ruido | 19 |
| | 5 - Análisis de la señal y el ruido | 23 |
| III.- | TEORIA DE LOS FILTROS ESPACIALES | 26 |
| | 1.- Tendido de detectores de igual sensibilidad | 26 |
| | 2.- Tendido de detectores de sensibilidad variable | 48 |
| | 3.- Mezclado de tendido de detectores múltiples | 55 |
| | 4.- Tendido de detectores múltiples distribuidos en una superficie | 62 |
| | 5.- Puntas de tiro múltiples | 68 |
| IV.- | DEDUCCION DE LAS ECUACIONES EMPLEADAS PARA DETERMINAR LOS PARAMETROS EN LOS FILTROS ESPACIALES | 71 |
| | 1.- Parámetros de los tendidos de detectores de igual sensibilidad | 71 |
| | 2.- Parámetros de los tendidos de detectores de sensibilidad variable | 76 |
| V.- | EJEMPLO DEL DISEÑO DE UN FILTRO ESPACIAL UTILIZADO EN UNA BRIGADA SISMOLOGICA | 82 |
| | Conclusiones y Resultados | 97 |
| | Bibliografía | 98 |

I N T R O D U C C I O N

El principal objetivo de la exploración del subsuelo mediante técnicas geofísicas, es la obtención de la mayor cantidad posible de información confiable y fidedigna del subsuelo.

La técnica geofísica más sofisticada y utilizada con fines geológicos-petroleros, es la prospección sísmológica.

La información obtenida del subsuelo, se divide en información útil (señal), e información no útil (ruido), así la calidad de la información está dada por la relación señal-ruido.

Entonces podríamos asumir que la calidad del proceso de la información geofísica depende de dos cuestiones primordialmente: El distinguir la señal del ruido, y separarlos reduciendo el nivel de ruido durante los diferentes procesos elaborados con programas de computadora.

Así pues el mejor resultado que puede esperarse de estos procesos geofísicos, es aquella que muestra la señal pura, o sea - toda aquella entendible y necesaria obtenida de la prospección sísmológica.

De aquí podemos destacar que las señales sísmicas son sometidas a una serie de transformaciones, desde que son originadas - hasta ser procesadas e interpretadas, pasando por las diferentes etapas:

a) Origen de la energía sísmica, que depende de las características elásticas del medio de propagación, y el tipo de generación de esta energía.

b) La propagación de la energía sísmica a través de los -- diferentes medios que conducen las deformaciones elásticas; Esta energía proviene del punto de tiro, atraviesa las diferentes capas litológicas, se reflejan, se refractan y se difractan en las diferentes interfaces de las capas geológicas, y una parte de esa energía regresa a la superficie.

c) En la superficie se capta la energía sísmica por medio de elementos transductores, que transforman la energía mecánica a -- energía eléctrica, producida por los pequeños movimientos del suelo, debida a la deformación elástica del medio al transmitir la energía sísmica, Estos elementos actúan en conjunto como un filtro pasivo.

El filtro pasivo, que en sí es un filtro espacial discrimina las ondas que arriban a los detectores, mediante el arreglo geométrico de los mismos, para eliminar la señal no útil (ruido).

d) Amplificación con ganancia variable de la energía eléctrica, prefiltrado en el dominio de las frecuencias, grabación magnética y fotográfica para la obtención de los sismogramas de campo y -- los carretes de campo

e) Y por último el procesado de las cintas de campo, cuyo -- objetivo es hacer resaltar las señales atenuando los ruidos para re -- presentarlos en secciones de distancia contra profundidad y realizar su interpretación geológica.

Los ruidos, por lo general siguen trayectorias casi horizontales, cuya componente vertical es muy pequeña y las reflexiones viajan casi verticalmente, con una componente horizontal igual a la distancia que hay entre el punto de tiro y el geófono, entonces el método que se estudia distingue las ondas que se desplazan verticalmente de las que lo hacen horizontalmente.

El método consiste en distribuir los geófonos de un solo canal sísmico de tal manera que la distancia horizontal del tendido, sea igual a la longitud de onda de los ruidos observados, que se desean atenuar, así una onda horizontal producto de los ruidos, registrará en todo momento en la mitad del tendido de geófonos, un semicíclo positivo, y en la otra mitad, un semicíclo negativo.

Debido a que los geófonos están conectados en serie o para llo, la suma de las respuestas de las ondas de ruido de los geófonos es casi cero, eliminando el efecto de estas ondas en este canal sísmico.

Es importante hacer notar que los filtros espaciales juegan un papel de vital importancia para la obtención de la información sísmica, pues la señal resultante del procesado no podrá ser nunca mejor que la calidad implícita de la señal, que se grabó en la cinta de campo.

El objetivo primordial del geofísico de campo está orientado de tal manera, que debe registrar y grabar en cinta la mayor cantidad de información con el menor ruido posible, por lo cual su conocimiento como geofísico debe abarcar técnicas de campo; instrumentación, conocimiento de las diferentes formas y causas de la propagación de los diferentes tipos de onda, identificando cada una de las señales no desea

das para eliminarlo de los sismogramas y carretes de campo, deben saber como se propagan las ondas de ruido en el área en estudio, además efectuar el análisis de los patrones de atenuación que eliminen dicho ruido.

Este estudio es justificable si tomamos en cuenta que - los trabajos que se efectúan, y los que se efectuarán en el futuro tienen que ser más finos, con una mayor relación señal-ruido y con un mayor poder de resolución, pues como es evidente cada vez resulta mucho más difícil localizar los yacimientos de hidrocarburos, de hidro que se tiene que explorar en áreas cada vez más difíciles, y de topografía más accidentada, las estructuras son cada vez más pequeñas y más profundas y los sitios contienen problemas geológicos - muchos más complejos, y cuyas trampas son ya más bien de origen estratigráfico que estructural.

El objetivo del presente trabajo, es el diseño de la distribución de detectores que permita optimizar la información proveniente de las reflexiones de ondas del subsuelo.

11 GENERALIDADES

La prospección sísmica para exploración petrolera, está basada en la medición del tiempo de transmisión--reflexión de los pulsos de las ondas sísmicas, y evaluando esta información, podemos conocer las características geológicas del área de interés.

Para conocer el fenómeno de la propagación de las ondas sísmicas es importante recordar los principios físicos básicos de las características elásticas del medio.

La propagación de las ondas elásticas en la corteza terrestre, origina diferentes tipos de ondas sísmicas, algunas son ruido y otras información, determinaremos el modo y ocurrencia de la transmisión de las ondas productoras del ruido, y efectuaremos un análisis conceptual de la señal y el ruido.

Describiremos brevemente las pruebas de ruido que se realizan en el campo y realizaremos un análisis de los filtros pasivos o pasivos, y los filtros de frecuencia o activos, para poder estudiar la correcta aplicación de estos.

1.- CARACTERISTICAS ELASTICAS DE LOS SOLIDOS.

Las características y velocidades de las ondas sísmicas, dependen de las propiedades elásticas del medio transmisor; así, - al excitar la superficie del subsuelo utilizando cualquier medio - ya sea natural o artificial, se ejerce una fuerza hacia los alrededores produciendo un esfuerzo y en consecuencia una deformación - que se propagará en forma esférica.

Deformación es el movimiento relativo entre las partículas de un sólido que produce cambios de su forma geométrica. Existen tres diferentes tipos de deformaciones: Deformación lineal, deformación de cizalla y deformación volumétrica.

a) Deformación Lineal, es aquella cuando un cuerpo se deforma sin cambiar los ángulos que forman sus lados - manteniendo su volumen constante.

Supongamos un cuerpo como de la figura donde

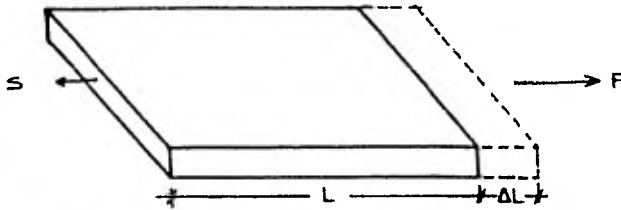
X_i es la dimensión original en el eje X,

X_f es la dimensión final en el eje X,

ΔX es la deformación en la Dirección X.

El esfuerzo unitario normal se define como la fuerza normal que actúa en una unidad de área, supongamos que en la barra actúa una fuerza F sobre el área de sección S entonces el esfuerzo unitario normal será:

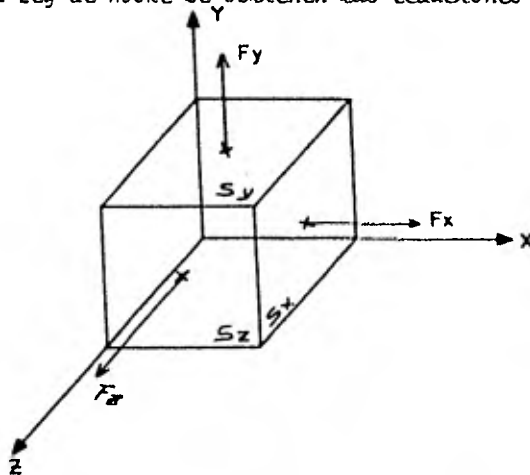
$$f_L = \frac{F}{S}$$



La Ley de Hook, especifica que el esfuerzo ejercido en un cuerpo elástico es proporcional a la deformación:

$$f_L = Y \epsilon_L$$

En donde el factor de proporcionalidad "Y" es el módulo de Young. Si suponemos que en cubo actúan las fuerzas F_x , F_y y F_z , normales a las caras S_x , S_y y S_z , que constituyen los esfuerzos principales, aplicando la Ley de Hooke se obtienen las ecuaciones de la elasticidad.



$$\begin{array}{c} \text{Cara} \\ \downarrow \\ \epsilon_{xx} = \frac{F_x}{S_x}; \epsilon_{yy} = \frac{F_y}{S_y}; \epsilon_{zz} = \frac{F_z}{S_z} \\ \uparrow \\ \text{Fuerza} \end{array}$$

El esfuerzo E_{xx} , ejercido por la fuerza normal X a la cara X también se puede expresar como el cambio de la dimensión x del cuerpo en la dirección X .

$$\epsilon_{xx} = \frac{\partial x}{\partial x}; \epsilon_{yy} = \frac{\partial y}{\partial y}; \epsilon_{zz} = \frac{\partial z}{\partial z}$$

En donde x, y, z , son los alargamientos del cuerpo en dirección X, Y, Z , respectivamente. Si suponemos que $F_{yy} = F_{zz} = 0$ la ley de Hooke podrá expresarse como:

$$f_{xx} = Y \epsilon_{xx}$$

Y aplicando la relación de Poisson, que es la relación negativa de la deformación unitaria en una dirección con respecto a la deformación unitaria en dirección ortogonal.

$$\nu = - \frac{\epsilon_{xx}}{\epsilon_{yy}} = - \frac{\epsilon_{xx}}{\epsilon_{zz}}$$

Entonces las ecuaciones de la elasticidad serán:

$$\epsilon_{xx} = \frac{1}{Y} f_{xx} - \frac{\nu}{Y} f_{yy} - \frac{\nu}{Y} f_{zz}$$

$$\epsilon_{yy} = - \frac{\nu}{Y} f_{xx} + \frac{1}{Y} f_{yy} - \frac{\nu}{Y} f_{zz}$$

$$\epsilon_{zz} = - \frac{\nu}{Y} f_{xx} - \frac{\nu}{Y} f_{yy} + \frac{1}{Y} f_{zz}$$

Para la deducción de la velocidad de las ondas elásticas.

Consideramos las ecuaciones de movimiento de cuerpos elásticos homogéneos e isotrópicos cuando los esfuerzos son pequeños:

$$\rho \frac{\partial \sigma}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \Theta}{\partial x} + \mu \nabla^2 \mu$$

$$\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \Theta}{\partial y} + \mu \nabla^2 v$$

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \Theta}{\partial z} + \mu \nabla^2 w$$

donde:

t = tiempo

ρ = densidad del medio

λ, μ = constantes de Lamé, siendo:

$$\lambda = \frac{\sigma}{(1+\sigma)(1-2\sigma)} E ; \mu = \frac{E}{2(1+\sigma)}$$

u, v, w = desplazamiento en dirección x, y, z .

Θ = dilatación cúbica unitaria

$$\Theta = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$$

$$\nabla^2 \mu = \frac{\partial^2 \mu}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mu}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \mu}{\partial z^2}$$

Consideremos las ecuaciones para las ondas planas con variación en la dirección x

$$\int \frac{\partial^2 \mu}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial^2 \mu}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 \mu}{\partial x^2} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 \mu}{\partial x^2}$$

$$\int \frac{\partial^2 \nu}{\partial t^2} = \mu \frac{\partial^2 \nu}{\partial x^2}$$

$$\int \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \mu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad \text{ordenado:}$$

$$\frac{\partial^2 \mu}{\partial t^2} = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 \mu}{\partial x^2} \right)$$

$$\frac{\partial^2 \nu}{\partial t^2} = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 \nu}{\partial x^2} \right)$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)$$

función de onda plana longitudinal:

$$\mu = f(x - v_L t)$$

función de onda plana transversal:

$$\nu = \varphi(x - v_T t)$$

entonces las velocidades serán:

v_L = velocidad de onda plana longitudinal

$$v_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \left[\frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \right]}$$

V_T = velocidad de onda transversal

$$V_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\nu)}}$$

2.- DIFERENTES TIPOS DE ONDAS.

Las ondas elásticas que se propagan en el interior de los sólidos se llaman ondas internas, y las que se propagan en las inmediaciones de la superficie se llaman ondas superficiales.

Las ondas internas pueden ser longitudinales o transversales, las longitudinales se transmiten en los sólidos, líquidos y gases, mientras que las transversales solo se transmiten en los sólidos.

Las ondas longitudinales hacen que las partículas del medio se desplacen en forma ordenada en la misma dirección de la propagación de la onda.

Las ondas transversales hacen que el movimiento de las partículas sean perpendiculares a la dirección de la propagación de la onda.

Existen dos tipos de ondas superficiales: Ondas Rayleigh y Ondas Love.

Las ondas Rayleigh se transmiten en la superficie con un movimiento de partículas en forma elíptica y retrógrada en un plano vertical de una manera análoga al movimiento de las ondas en el agua, su velocidad de propagación depende de la longitud de onda, la amplitud del movimiento decrece exponencialmente con la profundidad, esta onda es la componente principal de las ondas superficiales.

Las ondas Love se transmiten en las capas superficiales y el movimiento de las partículas es transversal a la dirección del movimiento de las ondas; estas se transmiten por debajo de la capa de baja velocidad y con la velocidad de la capa inferior, Love, matemático inglés, demostró que esas ondas crean una reflexión múltiple en la capa de baja velocidad. Su velocidad se incrementa con la longitud de onda y presenta el fenómeno de dispersión, Estas ondas no son gran problema de ruido al método sísmico de reflexión, pues los detectores son sensibles a los movimientos verticales y esta onda solo produce movimientos transversales. Fig II.4 b

3.- SENAL Y RUIDO

El objetivo de la prospección sísmológica es el establecer un modelo geológico que estando acorde con los resultados encontrados por el método, sea lo más representativo de la realidad.

Se define como señal a toda información entendible y reconocida, que esté relacionada a los objetivos. Ruido es aquel que enmascara y oscurece la señal ocultando la información deseada. Así -- pues, es importante entender la naturaleza de los ruidos, para lograr su eliminación.

El ruido se clasifica como coherente u organizado, e incoherente o desorganizado. El ruido coherente u organizado, es aquel - que muestra cierta organización en el sísmograma, correlacionable, - en frecuencia, amplitud y velocidad aparente. Su velocidad aparente es casi siempre menor que la velocidad aparente de las ondas reflejadas. Su energía es originada en el punto de tiro y siguen trayectorias muy diversas para llegar a los sísmodetectores.

En las pruebas de análisis de ruido que se realizan en el campo se graban sísmogramas en las cuales se determinan la frecuencia, longitud de onda y velocidad aparente. Este tipo de ruido es - muy intenso cuando los pozos de los puntos de tiro no quedan por debajo de la capa de intemperismo o de baja velocidad. El ruido cohe-

rente de alta velocidad aparente se debe a difracciones, refracciones múltiples, reflexiones laterales reverberaciones y combinaciones de -
Estos.

El presente trabajo versa sobre la eliminación del ruido -- coherente, aprovechando la diferencia de tiempo horizontal que tardan las ondas que viajan casi horizontalmente para llegar a los sismodetectores (ondas superficiales), sin interferir en las ondas que llegan a la superficie casi verticalmente.

El ruido incoherente es aquel que no muestra ninguna organización, por lo que no es correlacionable, no muestra frecuencia, fase ni amplitud uniforme, siguen trayectorias indeterminadas. Su origen es debido a diferentes causas, parte de éste se origina en el punto de tiro, otra parte puede deberse al ruido ambiental, o sea, el producto de pequeños sismos que ocurren en la corteza terrestre, otras causas pueden ser fuentes externas comp personas, animales u autotransportes circulando cerca de los sismodetectores, y en general lo causa todo aquello que provoque vibración de la superficie en las inmediaciones de los sismodetectores, y por último lo causa también el ruido intrínseco de las diferentes etapas del sismógrafo.

La eliminación del ruido incoherente es básicamente estadístico, pues en el sismograma aparece distribuido completamente al azar mientras que los reflejos aparecen en el sismograma ordenados con ve-

locidades aparentes mucho muy grandes, entonces la eliminación del ruido incoherente se logra sumando la respuesta de un número grande de detectores a un sólo canal sísmológico, observándose que este se cancela proporcionalmente a la raíz cuadrada del número de elementos que componen el canal sísmológico, no importando la distribución de éstos sobre el terreno.

La relación señal - ruido es el cociente de la intensidad de la señal y la intensidad del ruido. Una información de buena calidad es aquella que tiene una alta relación señal - ruido.

La relación señal - ruido se incrementa bajando la intensidad del ruido mediante las diferentes técnicas de eliminación de ruido, o aumentando la intensidad de la señal mediante el apilado - de familias de punto de reflejo común y técnicas de reforzamiento - de la señal durante el procesamiento digital de las cintas de campo para obtener la sección final.

4.- PRUEBAS DE CAMPO PARA EL ANALISIS DE RUIDO.

El objetivo de esta prueba es obtener registros en los que se puedan identificar los ruidos característicos de una zona determinada, Fig. 11. 4B. En este análisis de ruido se miden la frecuencia mínima y máxima, velocidad aparente, para calcular las longitudes de onda mínima y máxima.

Variando la geometría de los sismodetectores se puede diseñar un patrón de detección adecuado que nos permita atenuar al máximo el ruido, obteniendo así un mejoramiento de la relación señal ruido.

Para efectuar esta prueba se perforan varios pozos cuyas profundidades varían entre 6 y 8 metros con cargas de dinamita variables. Se dispone un tendido de 24 estaciones espaciadas a cada 5 metros, y se agrupan en cada estación un determinado número de detectores. La prueba puede efectuarse de dos maneras: una forma se realiza variando la posición de los puntos de tiro manteniendo en el mismo sitio el tendido de detectores, y el punto de tiro se desplaza en cada observación un espacio igual al espacio ocupado por el tendido. -- Otra manera es perforar todos los puntos de tiro en una sola estaca, para ir alejando el tendido un espacio igual a su longitud, para cada punto de tiro.

La disposición de la geometría del tendido para verificar esta prueba es la siguiente:

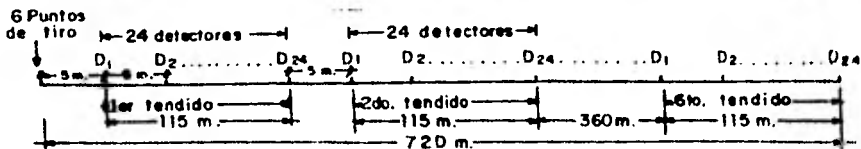


FIG. II 4a. Geometría del tendido para la ejecución de la prueba de campo del análisis de ruido.

La prueba más comunmente usada en las brigadas sismológicas es aquella donde se perforan ó pozos en el lugar donde se encuentra una estación a las profundidades de 10 metros para dos pozos, uno a doce metros, dos pozos a 15 metros, y el último pozo a 20 metros de profundidad, a los pozos que tienen 10 metros de profundidad se le colocan cargas de 2.5 y 5 Kg. de dinamita, al de 12 metros de profundidad se le ponen 5 Kg. los pozos que tienen 15 metros de profundidad se cargan con 10 y 15 Kgs. de dinamita, y el último de 20 metros de profundidad con 10 Kgs. de dinamita.

Los grupos de detectores usados constan de 24 elementos agrupados al azar en cada estación que están espaciadas 5 metros, siendo la distancia de cada uno de los tendidos 120 metros. En la primera observación la distancia entre el punto de tiro y el primer detector es de 5 metros, aumentando esta distancia 120 metros para cada observación

Las operaciones que se realizan en el sismógrafo son similares a las que se realizan en la producción normal, siendo diferentes únicamente las condiciones de filtrado, en las que se deja fuera la pendiente de corte del filtrado de baja frecuencia, con el fin de permitir el registro de señal con frecuencias desde cero hasta 124 Hertz.

Se realizan además pruebas tales como: distancia óptima entre el punto de tiro y el grupo de detectores más cercano al punto de río (offset). Esta prueba se hace variando la distancia mencionada, y conservando fijos los demás parámetros de observación previamente determinados. Los registros obtenidos son comparados para decidir cual de ellos presenta una mejor relación señal ruido, y en base a estos resultados se determina el mejor "Offset"

En las pruebas de carga y profundidad óptima conservando fijos los parámetros de observación previamente determinados, se varían la carga o la profundidad de los pozos, para obtener por comparación la claridad de los sismogramas resultantes, y así determinar las cargas y profundidades óptimas.

En las secciones de los análisis de ruidos, pueden identificarse la Onda P Directa, las ondas P. refractadas, ondas guiadas, ondas reverberantes, onda "Love", ondas de "Ground Roll" o "Rayleigh" y ondas de aire. (FIG. II 4b).

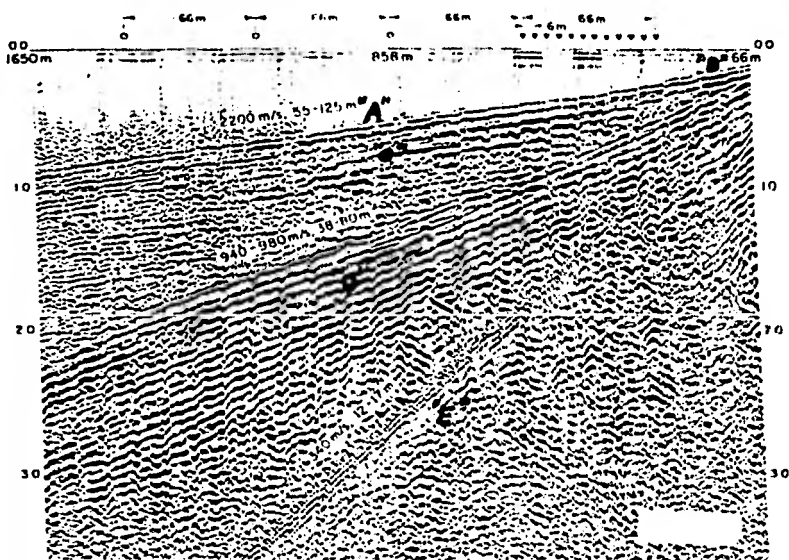


FIG. II 4b.- Sismograma obtenido de la prueba de campo del análisis de ruido.

De este diagrama se leen las longitudes de onda, frecuencia y velocidad aparente de las ondas identificadas.

- A Ondas Primarias refractadas
- B Ondas Primarias directas
- C Ondas Guiado, reverberación, Ondas "S" Love
- D Ondas de "Ground Roll" o Rayleigh
- E Onda de aire

5.- ANALISIS DE LA SEÑAL Y EL RUIDO.

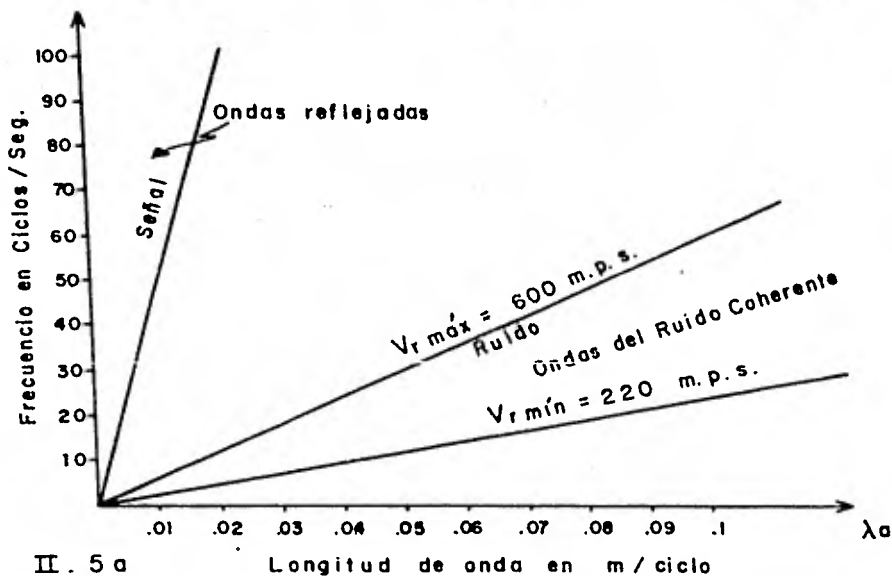
Las ondas tanto de ruido como de la señal tienen un carácter esencialmente transitorio, y por medio de la transformada de Fourier pueden representarse en el dominio de la frecuencia. fig. II.5a y a'

Las frecuencias de corte de los filtros de frecuencia, que se diseñan a partir de los filtros eléctricos se determinan en los amplificadores sísmicos.

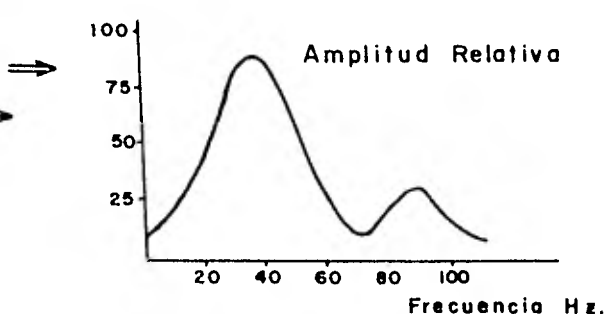
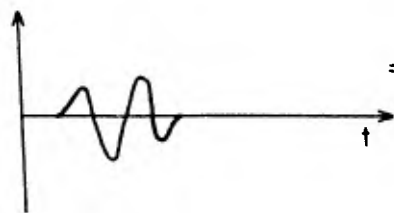
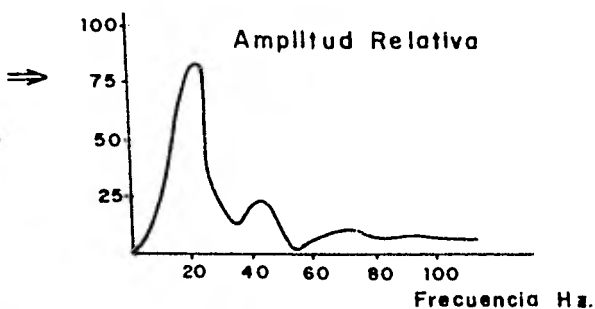
Al representar en el plano $F K$ (frecuencia, longitud de onda) Fig 11. 5a., el contenido de frecuencias y longitudes de onda de la señal y el ruido, se pueden establecer las regiones de atenuación del filtro eléctrico (que actúa en el eje de las frecuencias), y espacial (que actúa en el eje de las longitudes de onda), para determinar las regiones de atenuación; Básicamente se presentan dos casos para la separación de las regiones: Fig. II. 5b

a) Si la señal contiene principalmente frecuencias altas, digamos por ejemplo entre 40 y 80 Hertz, mientras que el espectro del ruido muestra que la frecuencia de su componente principal esta entre 10 y 20 Hertz, (FIG. II 5a. y II 5b.) esta situación permite que se elimine la gran parte del ruido utilizando exclusivamente filtros de frecuencia se separan las regiones 2 y 3 de 4 y 1.

b) Puede suceder como en la mayoría de los casos, que la frecuencia de la componente principal de las ondas de la señal esten entre 20 y 40 ó 20 y 60 Hertz, coincidiendo que las frecuencias de la componente principal del ruido este también entre 20 y 40 ó 20 y 60 Hertz, obteniendo espectros semejantes, en este caso el ruido es eliminado casi exclusivamente por los filtros espaciales, se separan las regiones 3 y 4 - de 1 y 2 (FIGURA II 5a. y II 5b.)



II. 5a

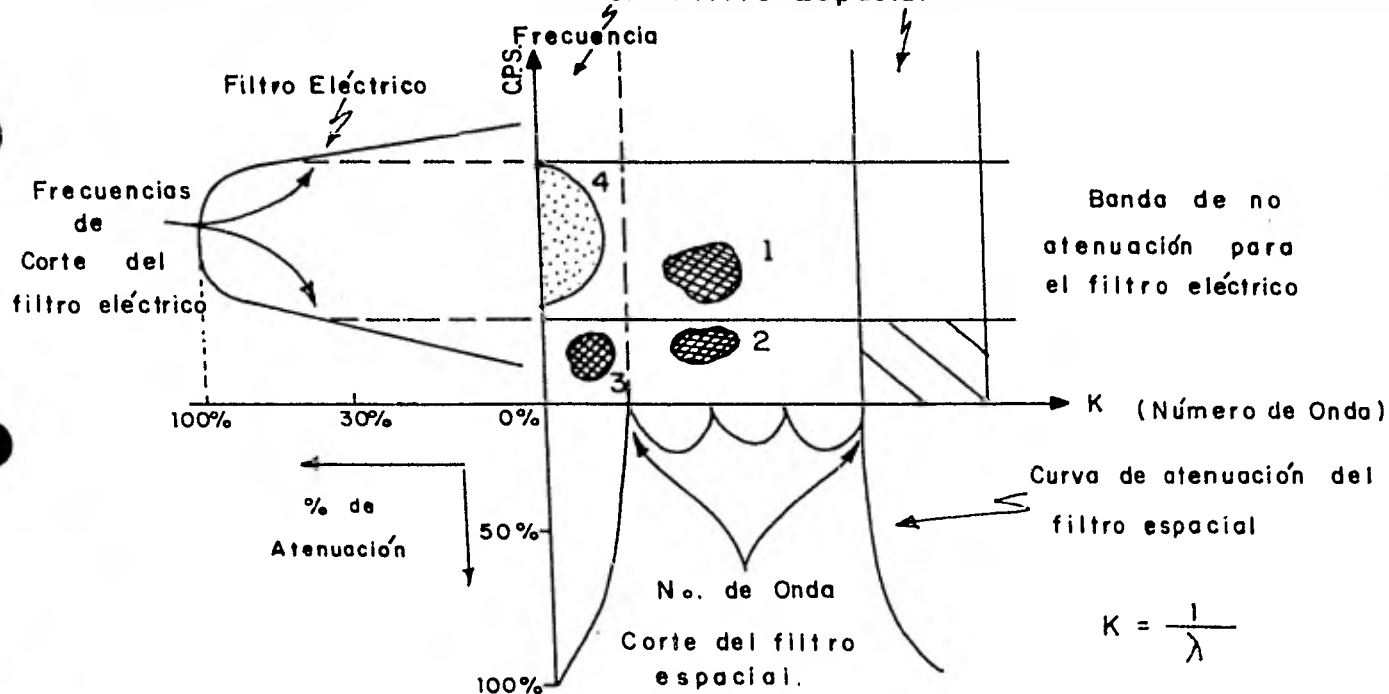


Onda de Reflejo
II. 5a'

II 5a. Ruidos y señales tal como se presentan en un sismografo

II 5a'. Espectros de frecuencias de la señal, y el ruido, se puede observar las diferencias entre el contenido de frecuencias, entre la señal y el ruido.

Bandas de No atenuación para el Filtro Espacial

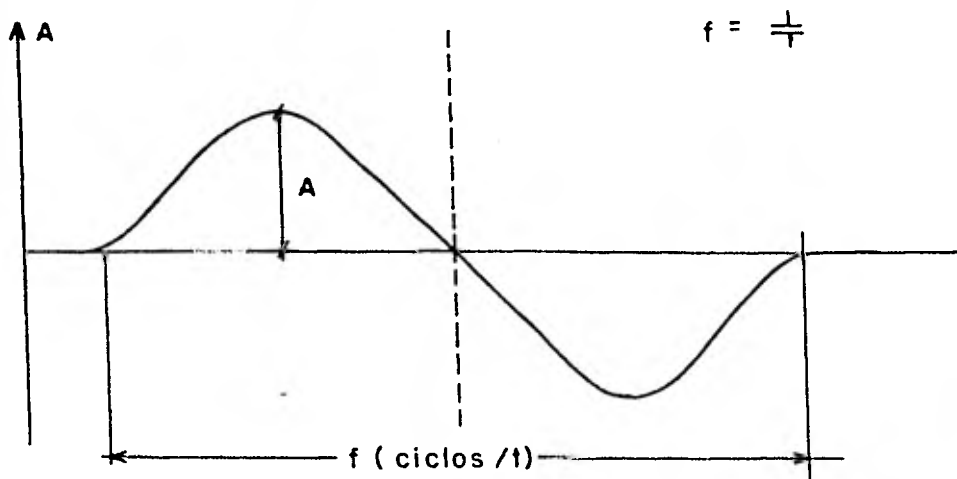


- 1.- Ruido eliminado exclusivamente por el filtro espacial
- 2.- Ruido eliminado por el filtro espacial y el filtro eléctrico
- 3.- Ruido eliminado exclusivamente por el filtro eléctrico
- 4.- Señal. no atenuada por el filtro eléctrico ni por el filtro espacial

III.- TEORIA DE LOS FILTROS ESPACIALES.

1.- TENDIDOS DE DETECTORES DE IGUAL SENSIBILIDAD DISTRIBUIDOS EN LINEA.

Para fines de cálculo suponemos que una onda que proviene desde el punto de tiro, y que se ha transmitido por cualquier trayectoria del subsuelo, es registrada en un detector que corresponde a un canal cualquiera en un tiempo determinado cuya forma se representa en la siguiente figura:



Esta onda registrada en el detector, tiene una frecuencia f , periodo $T=1/f$ y amplitud A . Por medio de las series de Fourier - podemos representar esta onda de la siguiente manera:

$$f(t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n \omega_0 t + b_n \sin n \omega_0 t) \dots \dots \dots \text{III.1.1}$$

donde:

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^{N_2} f(t) dt, \quad a_n = \frac{4}{T} \int_0^{N_2} f(t) \cos \frac{2\pi n}{T} t dt$$

$$Y \quad b_n = \frac{4}{T} \int_0^{N_2} f(t) \sin \frac{2\pi n}{T} t dt \quad Y \quad \omega_0 = \frac{2\pi}{T}$$

Como la onda considerada es impar, o sea que $f(t) = -f(-t)$,

su expresión en términos de series de Fourier, se reduce a:

$$f(t) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin (n \omega_0 t) \dots \dots \dots \text{III.1.2}$$

$$\text{Si } \omega_0 t = \frac{2\pi t}{\lambda} + \theta_n \quad Y \quad T = 1/f$$

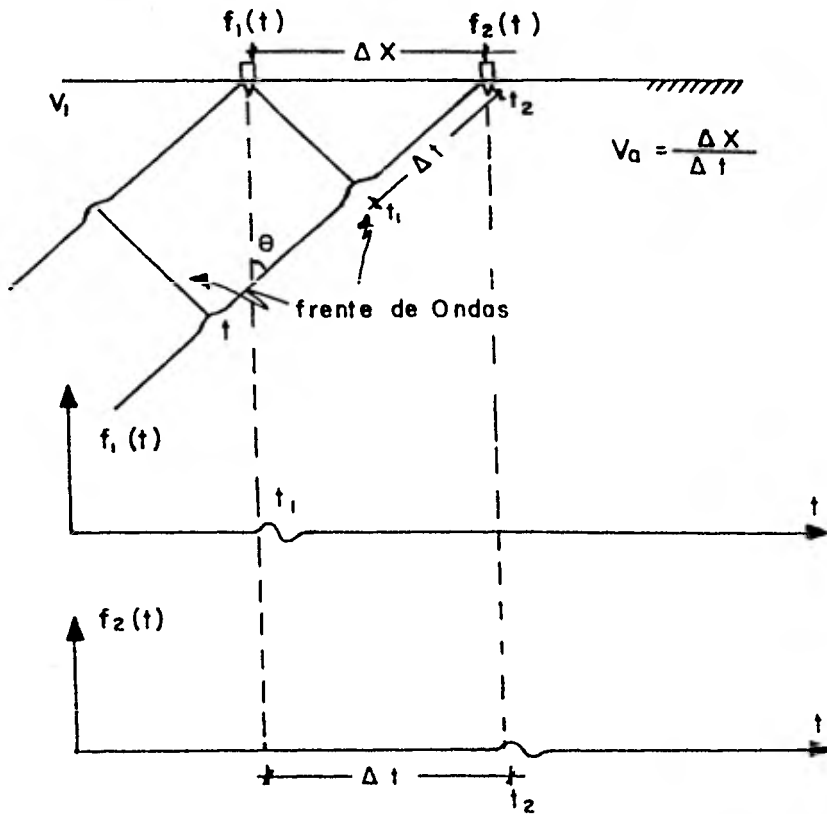
En donde ω_0 es la velocidad angular, del período, y el desfase entre las componentes, sustituyendo en III. 1.2 se tiene.

$$f(t) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin (2\pi f n t + \theta_n) \dots \dots \dots \text{III.1.3}$$

Considerando que el primer detector D1 está separado una distancia X del punto de tiro, y el frente de Onda viaja esta distancia en un tiempo t , (FIG. III. 1 b)

El mismo frente de onda con las mismas características, en contenido de frecuencia, y amplitud desfasado en un tiempo \uparrow llega al segundo detector Fig. III 1a, en un tiempo

III. 1a. El mismo frente de ondas es registrado por los detectores D1 y D2 con una diferencia de tiempo Δt .



III . Ib Registro de los detectores D1 y D2 mostrando el desfase en el tiempo para el mismo frente de ondas.

Las funciones de onda $f_1(t)$ $f_2(t)$ registradas en los transductores 1 y 2, son iguales, originados por el mismo frente de ondas, pero desfasadas en un tiempo igual a .

$$f_1(t) = \sum_{n=0}^M a_n \operatorname{sen} (2\pi f_n t + \theta_n) \dots\dots\dots \text{III. 1.4}$$

$$f_2(t) = \sum_{n=0}^M b_n \operatorname{sen} (2\pi f_n (t + \Delta t) + \theta_n) \dots\dots\dots \text{III. 1.5}$$

La velocidad V con la que transmite el frente de ondas es constante si el medio es homogéneo, y depende de las constantes elásticas del medio. La velocidad con la que se desplaza el frente de ondas sobre la superficie del terreno se llama velocidad aparente V_a , que es igual al desplazamiento Δx entre el tiempo Δt -- que tarda en viajar esa distancia:

$$V_a = \Delta X / \Delta t \quad \therefore \quad \Delta t = \Delta X / V_a$$

Sustituyendo en III 1.5 se tiene:

$$f_2(t) = \sum_{n=0}^{O_0} b_n \operatorname{sen} (2\pi f_n (t + \frac{\Delta X}{V_a}) + \theta_n) \dots\dots \text{III. 1.6}$$

Si $f(t)$ es la señal que se recibe en el detector k , - siendo "M" el número de detectores que integran el canal sísmico, entonces, al conectar en serie los sismodetectores, equivale a sumar - las "M" funciones registradas en los transductores, que será la respuesta del canal sísmico.

$$\begin{aligned} \sum_{n=0}^M f(t) &= f_1(t) + f_2(t) + f_3(t) + \dots\dots + f_M(t) = \\ &= \sum_{n=0}^M a_n \operatorname{Sen} (2\pi f_n t + \theta_n) + \\ &= \sum_{n=0}^M b_n \operatorname{Sen} (2\pi f_n t + \frac{\Delta X}{V_a} + \theta_n) + \\ &= \sum_{n=0}^M c_n \operatorname{Sen} (2\pi f_n t + \frac{2\Delta V}{V_a} + \theta_n) + \dots\dots + \\ &= \sum_{n=0}^M z_n \operatorname{Sen} (2\pi f_n t + \frac{(M-1) \Delta X}{V_a} + \theta_n) \dots\dots \text{III. 1.7} \end{aligned}$$

Sumando las componentes de cada frecuencia a fn desfasadas respecto a la frecuencia fundamental o, la sumatoria que resulta para n=1, se expresa a continuación:

$$\begin{aligned} \sum_{n=1} f(t) / &= a_1 \text{ sen } (2 \pi f_1 t + \theta_1) + \\ &b_1 \text{ sen } (2 \pi f_1 t + 2 \pi f_1 \frac{\Delta X}{V_a} + \theta_1) + \\ &c_1 \text{ sen } (2 \pi f_1 t + 2 \pi f_1 \frac{2 \Delta X}{V_a} + \theta_1) + \dots + \\ &z_1 \text{ sen } (2 \pi f_1 t + 2 \pi f_1 \frac{(M-1) \Delta X}{V_a} + \theta_1) = \end{aligned}$$

$$\sum_{n=1} f(t) /_{n=1} = \sum_{n=0}^{N-1} A_n \text{ sen } (2 \pi f_1 t + 2 \pi f_1 \frac{n \Delta X}{V_a} + \theta) \\ \dots\dots\dots \text{III. 1. 8}$$

Donde:

$$A_0 = a_1, \quad A_1 = b_1, \quad A_2 = c_1, \quad \dots, \quad A_{(M-1)} = z_1$$

Si hacemos que:

$$x = (2\pi f, t + \theta)$$

$$y = 2\pi f$$

$$k = \frac{\Delta x}{v_a}$$

y sustituyendo en III . 1 8 se obtiene:

$$\sum_{n=1}^{f(t)} \Big/_{n=1} = \sum_{n=0}^{M-1} A \text{ sen } (x+nky) \dots \dots \dots \text{III. 1.8}$$

La solución de esta sumatoria según ref "8 " es :

$$= B \text{ sen } (x + k \frac{M-1}{2} y) \text{ sen } \frac{kNy}{2} \text{ Cosec } \frac{ky}{2} \dots \dots \dots \text{III.1.9}$$

volviendo a las variables originales de la ex. III 1 8 tenemos:

$$\sum_{n=1}^{f(t)} \Big/_{n=1} = B \text{ sen} (2\pi f, t + \theta + \frac{(M-1)\Delta x}{2v_a} - 2\pi f) \text{ sen } \frac{2\pi f M \Delta x}{2v_a}$$

$$\text{Cosec } \frac{2\pi f \Delta x}{2v_a} \dots \dots \dots \text{III. 1.10}$$

como (M-1) es el número de espacios que hay entre los detectores, y Δ x es el espaciamento entre ellos, entonces la longitud total del tendido es igual al número de espacios que hay entre los detectores, multiplicado por la cantidad de detectores menos uno:

$$L = (M-1) \Delta x$$

III.II

Que se le conoce como el cubrimiento del tendido de sismodetectores. Sustituyendo L de III.2.11 en III.1.10 se tiene:

$$\sum_{n=0}^{M-1} \text{sen} \left(2\pi f_1 t + n 2\pi f \frac{\Delta x}{V_0} + \theta \right) =$$

$$\text{Sen} \left(2\pi f_1 t + \frac{2\pi f L}{2 V_0} + \theta \right) \text{Sen} \frac{M \pi f L}{(M-1) V_0}$$

$$\text{Cosec} \frac{\pi f L}{(M-1) V_0} \dots \dots \dots \text{III. 1. 12}$$

Con referencia a la Fig. 3.1.d se puede establecer:

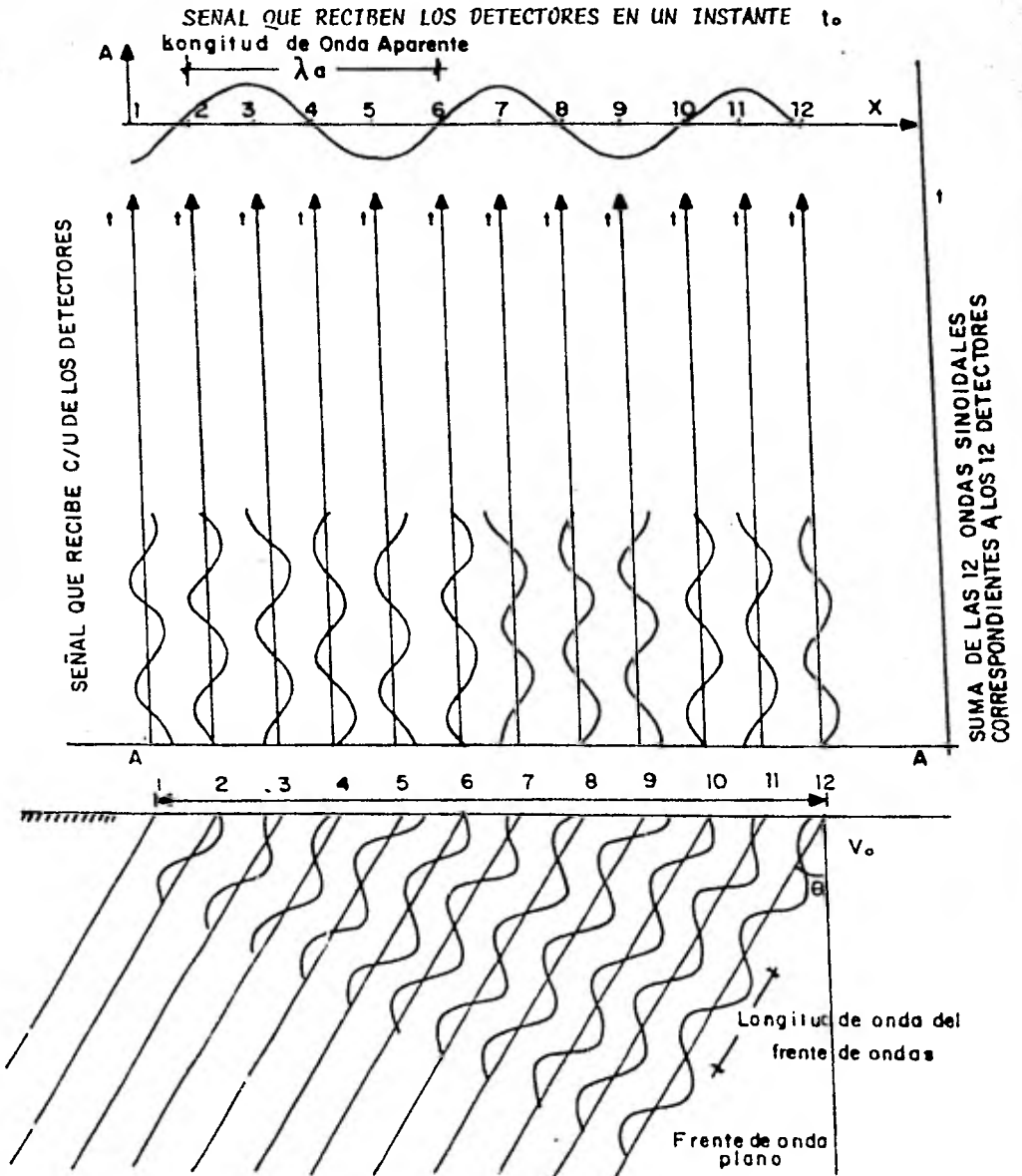
$$\lambda_{ap} = V_0 / f_r \dots \dots \dots \text{III.1.13}$$

$$\lambda_{re} = V_r / f_r \dots \dots \dots \text{III.1.14}$$

donde:

λ_a = longitud de onda aparente

λ_{re} = longitud de onda real



III 1C Desfasamiento entre detectores para un frente de onda plano.

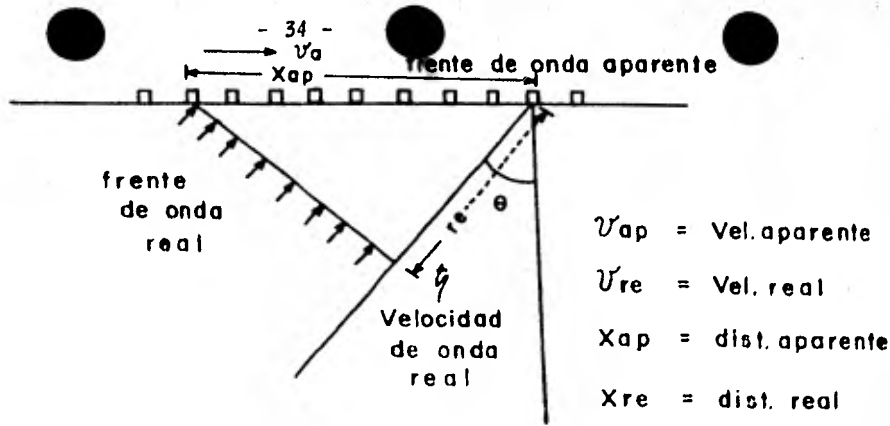


FIG. 3.1d, relación entre la longitud de onda real y aparente.

También se puede observar que:

$$X_{re} = X_{ap} \text{ sen } \theta \dots \dots \dots \text{III.1.15}$$

Donde θ es el ángulo de incidencia y X_{re} es la distancia real recorrida por el frente de ondas en un ciclo, y X_{ap} es la distancia en superficie que recorre el frente de ondas para que transcurra un ciclo. FIG. III 1 C

Como el tiempo de recorrido es exactamente el mismo, entonces la velocidad aparente siempre será mayor o igual que la velocidad real.

$$V_{ap} = \frac{\Delta X_{ap}}{\Delta t} \dots \dots \dots \text{III.1.16}$$

$$V_{re} = \frac{\Delta X_{re}}{\Delta t} \dots \dots \dots \text{III. 1.17}$$

Despejando ΔX_{ap} y ΔX_{re} de III. 1.16 y III. 1.17, para sustituirlos en III. 1.17 tenemos:

$$\text{sen } \Theta = \frac{\Delta X_{re}}{\Delta X_{ap}} = \frac{V_{re} \Delta t}{v_{ap} \Delta t} = \frac{\Delta t}{\Delta t} \dots \dots \text{III. 1.18}$$

y despejando X_{ap} y X_{re} de III.13 y III.14 y sustituyéndolos en III. 1.18

$$\text{sen } \Theta = \frac{v_{re}}{v_{ap}} = \frac{\lambda_{refr}}{\lambda_{apfr}} = \frac{\lambda_{re}}{\lambda_{ap}} \dots \dots \dots \text{III. 1.19}$$

Así podemos observar que las relaciones de distancias real y aparente, velocidad real y aparente, y longitudes de onda real y aparente dependen únicamente del ángulo de incidencia.

En el caso de incidencia normal, Θ vale cero grados, entonces la velocidad aparente, la longitud de onda aparente, y distancia aparente tienden a infinito, y en el caso de que el ángulo de incidencia Θ valga 90° , que se presenta cuando las ondas superficiales viajan paralelamente a la superficie, los valores de velocidad aparente, longitud de onda aparente y distancia aparente, serán iguales a los valores de velocidad real, longitud de onda real y distancia real.

Si de la ecuación III. 1. 13 se despeja la frecuencia para sustituirla en la ecuación III. 1. 12 se tiene:

$$\sum_{n=0}^{\infty} A_n \sin \left(2\pi f_1 t + 2\pi n f \frac{\Delta x}{v_a} + \theta \right) =$$

$$B \sin \left[\left(\frac{2\pi v_a t}{\lambda_a} \right) + \frac{\pi L}{\lambda_a} + \theta \right] \operatorname{sen} \frac{M\pi L}{(M-1)\lambda_a} \operatorname{Cosec} \frac{\pi L}{(M-1)\lambda_a} \dots \text{III.1.20}$$

Despejando Δx de la ecuación III 1 11 y sustituyendo en III 1 20 se tiene:

$$\sum_{n=0}^{N-1} A_n \sin \left(2\pi f_1 t + 2n\pi f \frac{\Delta x}{\lambda_a} + \theta \right) =$$

$$B \operatorname{sen} \frac{2\pi}{\lambda_a} \left(v_a t + \frac{L}{2} + \theta \right) \operatorname{sen} M\pi \frac{\Delta x}{\lambda_a} \operatorname{Cosec} \pi \frac{\Delta x}{\lambda_a} \dots \text{III.1.21}$$

Considerando que la cosecante es la función inversa del seno:

$$\sum f(t) =$$

$$\sum_{n=0}^{N-1} A_n \sin \left(2\pi f_1 t + 2n\pi f \frac{\Delta x}{\lambda_a} + \theta \right) =$$

$$B \operatorname{sen} \frac{2\pi}{\lambda_a} \left(v_a t + \frac{L}{2} + \theta \right) \frac{\operatorname{Sen} M\pi \frac{\Delta x}{\lambda_a}}{\operatorname{Sen} \pi \frac{\Delta x}{\lambda_a}} \dots \text{III.1.22}$$

Haciendo $C = \frac{\text{Sen } \pi M \Delta X / \lambda a}{\text{Sen } \pi \Delta X / \lambda a} \dots \dots \text{III . 1.23}$

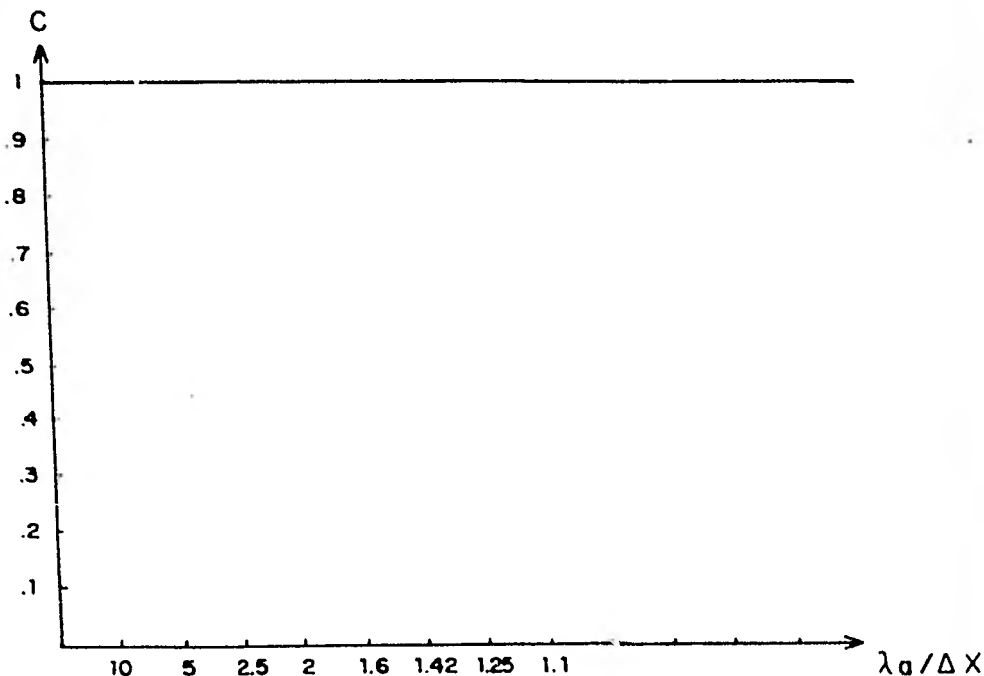
Despejando la frecuencia de III 1 13 y sustituyendolo en III 1 22 se tiene:

$$\sum f(t) = BC \text{sen } 2\pi f_r \left(t + \frac{L}{2V_0} + \theta \right) \dots \dots \text{III . 1 . 24}$$

Se hace notar que la ecuación III 1 24 3, es una función senoidal equivalente a la respuesta que se observaría de un solo-detector como la descrita en la ecuación III 1 4, pero colocado en el centro del tendido; La amplitud queda afectada por el valor de la constante "C".

Se puede observar que la amplitud "C" depende de la relación $\Delta X / \lambda a$ y el número de detectores M. Para poder observar el comportamiento de la amplitud "C" se tabulan y grafican los valores de $\Delta X / \lambda a$ contra "C" para valor de M. (FIG. III. 1 d, III.1 e, III 1 f, III. 1g, III 1h.

Para el caso de un solo detector, o sea cuando $M = 1$, se tiene que para todo valor de $\Delta X / \lambda a$, "C" siempre vale uno, así que no existe ninguna atenuación para cualquier valor de $\Delta X / \lambda a$ y la gráfica se mantendrá constante: (FIG. III 1d).



III 1 d CURVA DE RESPUESTA PARA UN SOLO DETECTOR.

Para el caso de dos detectores,

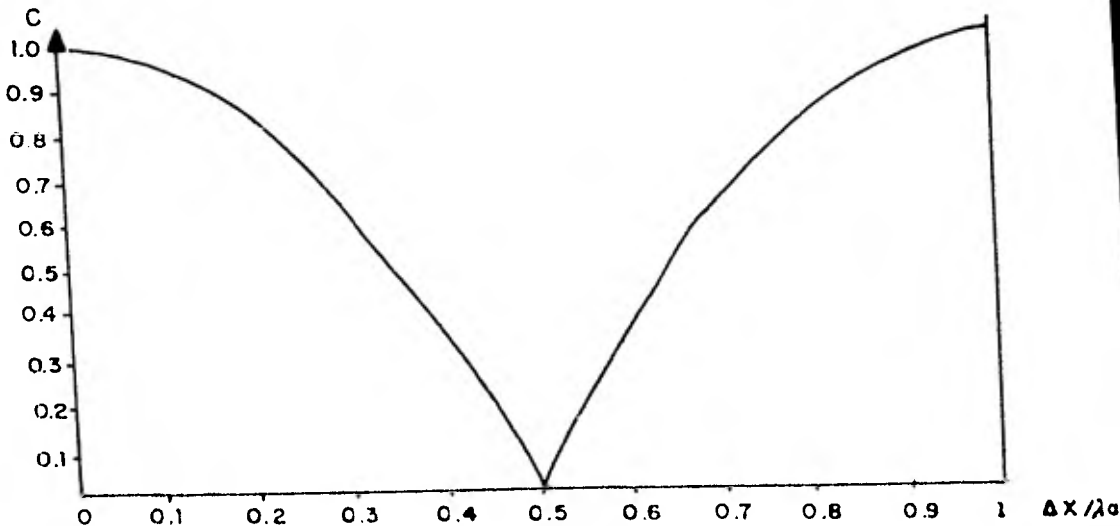
$M = 2$ detectores, y

$$C = \frac{\text{Sen } 2\pi \Delta X / \lambda a}{\text{Sen } \pi \Delta X / \lambda a}$$

cuyos valores graficados

y tabulados se muestran en la FIG. III. 1c

| $\frac{\Delta X}{\lambda a}$ | $\text{Sen } \frac{2\pi \Delta X}{\lambda a}$ | $\text{Sen } \frac{\pi \Delta X}{\lambda a}$ | C | C / 2 |
|------------------------------|---|--|------------|------------|
| 0.0 | 0.00000 | 0.00000 | 2.0000000 | 1.0000000 |
| 0.1 | 0.58778 | 0.30901 | 1.9021389 | 0.9510695 |
| 0.2 | 0.95105 | 0.58778 | 1.6180365 | 0.8090182 |
| 0.3 | 0.95015 | 0.80901 | 1.1755719 | 0.5877859 |
| 0.4 | 0.58775 | 0.95105 | 0.6180009 | 0.3090005 |
| 0.5 | 0.00000 | 1.00000 | 0.0000000 | 0.0000000 |
| 0.6 | -0.58778 | 0.95105 | -0.6180009 | -0.3090005 |
| 0.7 | -0.95105 | 0.80901 | -1.1755719 | -0.5877859 |
| 0.8 | -0.95105 | 0.58778 | -1.6180365 | -0.8090182 |
| 0.9 | -0.58778 | 0.30901 | -1.9021389 | -0.9510695 |
| 1 | 0.00000 | 0.00000 | -2.0000000 | -1.0000000 |



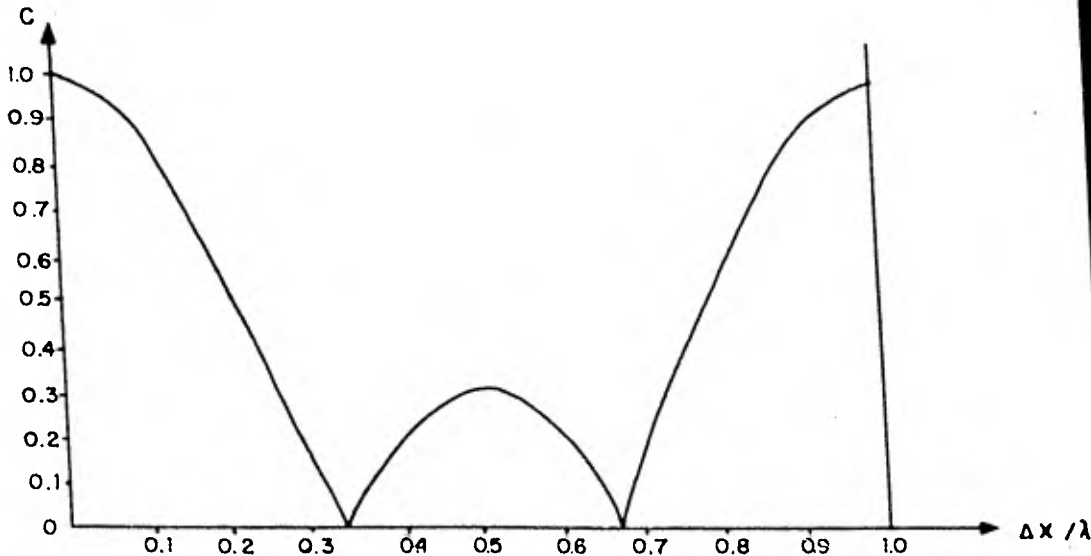
III. 1c Curva de respuesta para dos detectores

Caso para 3 detectores

M= 3 detectores

$$C = \frac{\text{Sen } 3\pi \Delta X / \lambda a}{3 \text{ Sen } \pi \Delta X / \lambda a}$$

| $\Delta X \lambda a$ | $\text{Sen } \frac{3\pi \Delta X}{\lambda a}$ | $\text{Sen } \frac{\pi \Delta X}{\lambda a}$ | 3C | C' / 3 |
|----------------------|---|--|---------|------------|
| 0 | 0 | 0 | 30 | 1 |
| 0.08333 | 0.7071 | 0.25881 | 2.7321 | 0.9107066 |
| 0.16666 | 1.0000 | 0.50000 | 2.0000 | 0.6666666 |
| 0.25000 | 0.7071 | 0.70710 | 1.0000 | 0.3333333 |
| 0.33333 | 0.0000 | 0.86602 | 0.0000 | 0.0000000 |
| 0.41666 | -0.7071 | 0.96592 | -0.7320 | -0.2440159 |
| 0.50000 | -1.0000 | 1.00000 | -1.0000 | -0.3333333 |
| 0.58333 | -0.7071 | 0.96592 | -0.7320 | -0.2440159 |
| 0.66666 | -0.0000 | 0.86602 | -0.0000 | -0.0000000 |
| 0.75000 | -0.7071 | 0.70710 | 1.0000 | 0.3333333 |
| 0.83333 | 1.0000 | 0.50000 | 2.0000 | 0.6666666 |
| 0.91666 | 0.7071 | 0.25881 | 2.7321 | 0.9107066 |
| 1.00000 | 0.0000 | 0.00000 | 3.0000 | 1.0000000 |
| 1.08333 | -0.7071 | 0.25881 | 2.7321 | 0.9107066 |



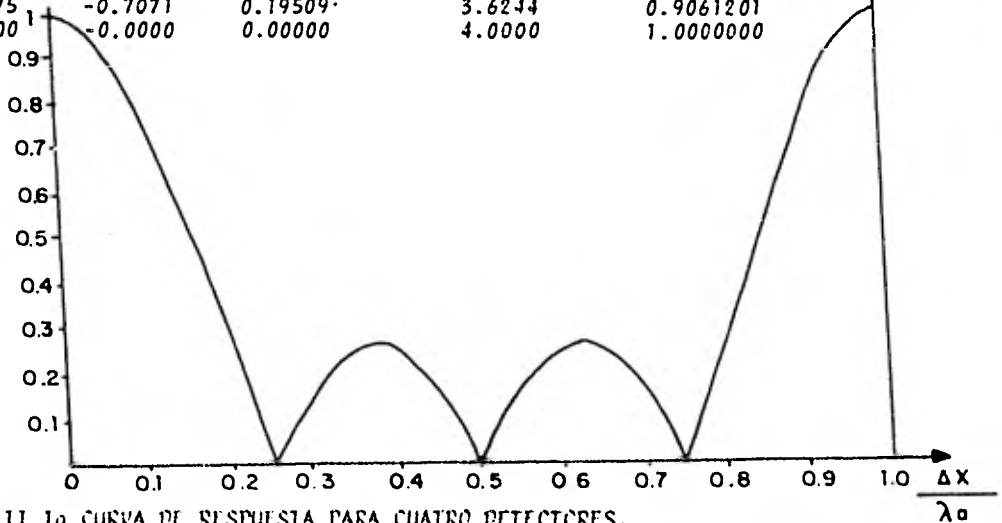
III 16 CURVA DE RESPUESTA PARA TRES DETECTORES

Caso para 4 detectores

$M = 4$ detectores

$$C = \frac{\text{Sen } 4\pi \Delta X / \lambda a}{\text{Sen } \pi \Delta X / \lambda a}$$

| $\Delta X / \lambda a$ | $\text{Sen} \frac{4\pi \Delta X}{\lambda a}$ | $\text{Sen} \frac{\pi \Delta X}{\lambda a}$ | C | C/4 |
|------------------------|--|---|--------|-----------|
| 0.0000 | 0.0000 | 0.00000 | 4.0000 | 1.0000000 |
| 0.0625 | 0.7071 | 0.19509 | 3.6244 | 0.9061201 |
| 0.1250 | 1.0000 | 0.38268 | 2.6131 | 0.6532872 |
| 0.1875 | 0.7071 | 0.55557 | 1.2727 | 0.3181866 |
| 0.2500 | 0.0000 | 0.70710 | 0.0000 | 0.0000000 |
| 0.3125 | -0.7071 | 0.83146 | 0.8504 | 0.2126078 |
| 0.3750 | -1.0000 | 0.92387 | 1.0524 | 0.2706007 |
| 0.4375 | -0.0000 | 1.00000 | 0.0000 | 0.0000000 |
| 0.5000 | -0.0000 | 1.00000 | 0.0000 | 0.0000000 |
| 0.5625 | 0.7071 | 0.98078 | 0.7209 | 0.1802390 |
| 0.6250 | 1.0000 | 0.92387 | 1.0824 | 0.2706007 |
| 0.6875 | 0.7071 | 0.83146 | 0.8504 | 0.2126078 |
| 0.7500 | -0.0000 | 0.70710 | 0.0000 | 0.0000000 |
| 0.8125 | -0.7071 | 0.55557 | 1.2727 | 0.3181866 |
| 0.8750 | -1.0000 | 0.38268 | 2.6131 | 0.6532872 |
| 0.9375 | -0.7071 | 0.19509 | 3.6244 | 0.9061201 |
| 1.0000 | -0.0000 | 0.00000 | 4.0000 | 1.0000000 |



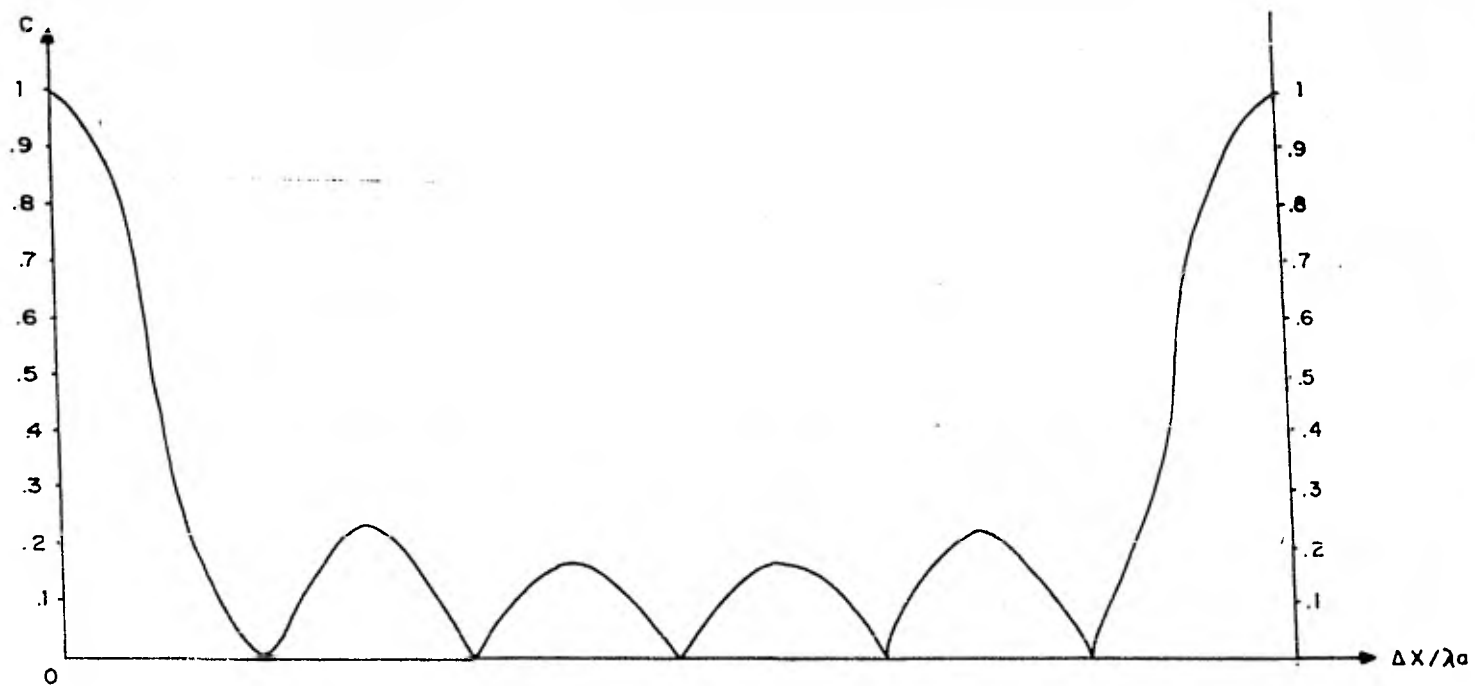
III 1g CURVA DE RESPUESTA PARA CUATRO DETECTORES.

Caso para 6 detectores

M= 6 detectores

$$C = \frac{\text{Sen } 6 \pi \Delta X / \lambda a}{\text{Sen } \pi \Delta X / \lambda a}$$

| $\Delta X / \lambda a$ | $\text{Sen } \frac{6 \pi \Delta X}{\lambda a}$ | $\text{Sen } \frac{\pi \Delta X}{\lambda a}$ | C | C/6 |
|------------------------|--|--|-------|-----------|
| 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 6.000 | 1.0000000 |
| 0.0416 | 0.7071 | 0.13052 | 5.417 | 0.9029267 |
| 0.0833 | 1.0000 | 0.25881 | 3.863 | 0.6439730 |
| 0.1250 | 0.7071 | 0.38268 | 1.847 | 0.3079596 |
| 0.1666 | 0.0000 | 0.50000 | 0.000 | 0.0000000 |
| 0.2083 | -0.7071 | 0.60867 | 0.891 | 0.1485716 |
| 0.2500 | -1.0000 | 0.69591 | 1.436 | 0.2394945 |
| 0.2916 | -0.7071 | 0.79322 | 0.891 | 0.1485716 |
| 0.3333 | -0.0000 | 0.86602 | 0.000 | 0.0000000 |
| 0.3750 | 0.7071 | 0.92387 | 0.765 | 0.1275611 |
| 0.4166 | 1.0000 | 0.96592 | 1.035 | 0.1725470 |
| 0.4583 | 0.7071 | 0.99144 | 0.713 | 0.1188673 |
| 0.5000 | 0.0000 | 1.00000 | 0.000 | 0.0000000 |
| 0.5416 | -0.7071 | 0.99144 | 0.713 | 0.1188673 |
| 0.5833 | -1.0000 | 0.96592 | 1.035 | 0.1725470 |
| 0.6250 | -0.7071 | 0.92387 | 0.765 | 0.1275611 |
| 0.6666 | -0.0000 | 0.86602 | 0.000 | 0.0000000 |
| 0.7083 | 0.7071 | 0.79322 | 0.891 | 0.1485716 |
| 0.7500 | 1.0000 | 0.69591 | 1.436 | 0.2394945 |
| 0.7916 | 0.7071 | 0.60867 | 0.860 | 0.1434662 |
| 0.8333 | -0.0000 | 0.50000 | 0.000 | 0.0000000 |
| 0.8750 | -0.7071 | 0.38268 | 1.847 | 0.3079596 |
| 0.9166 | -1.0000 | 0.25881 | 3.863 | 0.6439730 |
| 0.9583 | 0.7071 | 0.13052 | 5.417 | 0.9029267 |
| 1.0000 | 0.0000 | 0.00000 | 6.000 | 1.0000000 |



III 1h AMPLITUD RELATIVA PARA 6 DETECTORES DE SENSIBILIDAD UNIFORME

De las tabulaciones y gráficas de la amplitud "C" normalizada, notamos que el número de lóbulos de las gráficas depende y es igual al número "M" de detectores.

El dividendo de la amplitud "C" de la ecuación III 1 25 esta formada por la función circular siguiente:

$$\text{Sen} (M \pi \Delta X / \lambda a) \quad \text{III 1 26}$$

Si consideramos el caso especial cuando "M" es igual a uno, entonces el argumento varía entre 0 y 180 grados, para los diferentes valores de $\Delta X / \lambda a$ comprendidos entre 0 y 1, de esta manera la función completa medio ciclo. Cuando "M" es igual a dos, entonces el argumento varía entre 0 y 360 grados para los mismos valores de $\Delta X / \lambda a$ del caso anterior, presentándose así un ciclo completo, -- compuesto de medio ciclo positivo y medio ciclo negativo, que al tomar el valor absoluto para la gráfica de la amplitud "C" forma dos lóbulos simétricos.

Generalizando, la función $f(\dagger)$ tiene $M/2$ ciclos para los valores de $\Delta X / \lambda a$ comprendidos entre 0 y 1, y por lo tanto la gráfica presentara "M" lóbulos constituidos por el valor absoluto de los "M" semiciclos, de esta manera, los valores de amplitud cero ocurren cuando el argumento es múltiple de 180 grados.

$$M \frac{\pi \Delta X}{\lambda a} = N \pi. \dots \text{III. 1. 27}$$

Condición necesaria para que "C" valga cero, despejando $\Delta X / \lambda a$ se tiene:

$$\frac{\Delta X}{\lambda a} = \frac{\pi N}{\pi M} = \frac{N}{M} \dots \text{III. 1. 28}$$

Si N es cualquier número natural, y M el número de detectores, se puede observar que cuando $\Delta X / \lambda a$ es múltiple de la fracción N/M , entonces el valor de la constante "C" es cero, para el caso de las gráficas de la Fig. (III 1d - III 1h) en las cuales

$\Delta X / \lambda a$ varía entre 0 y 1, N toma su valor máximo cuando es igual a M .

Para los casos espaciales que ocurren cuando el espaciamiento entre los detectores y la longitud de onda aparente $\Delta X / \lambda a$ es cero o cualquier otro número natural los argumentos tanto del dividendo como del divisor son múltiplos de 180 grados, y el seno de esos ángulos valen cero, presentándose así, un cociente de cero entre cero, pero tomando el límite se tienen que ese valor tiende a uno, como puede observarse en las gráficas.

$$\text{Sen} (\pi \Delta X / \lambda a) \dots \text{III. 1. 29}$$

El efecto que produce el divisor es el establecer un semiciclo senoidal positivo cuyos valores varían entre 0 y 1 y no dependen del número de detectores, y define la envolvente del filtro.

Este factor contribuye a que los lóbulos centrales tengan poca amplitud, pues son afectados por un divisor relativamente grande de esta manera se puede observar que el aumento de la atenuación del filtro, se incrementa con un número grande de detectores, obteniendo un mayor contraste y definición de éstos, tabla III 1.

En la tabla III 1 se muestran las magnitudes relativas de la amplitud de los diferentes lóbulos, en relación con el número de detectores:

TABLA III . 1

Porcentaje de respuesta en cada lóbulo para cualquier número de detectores de sensibilidad uniforme.

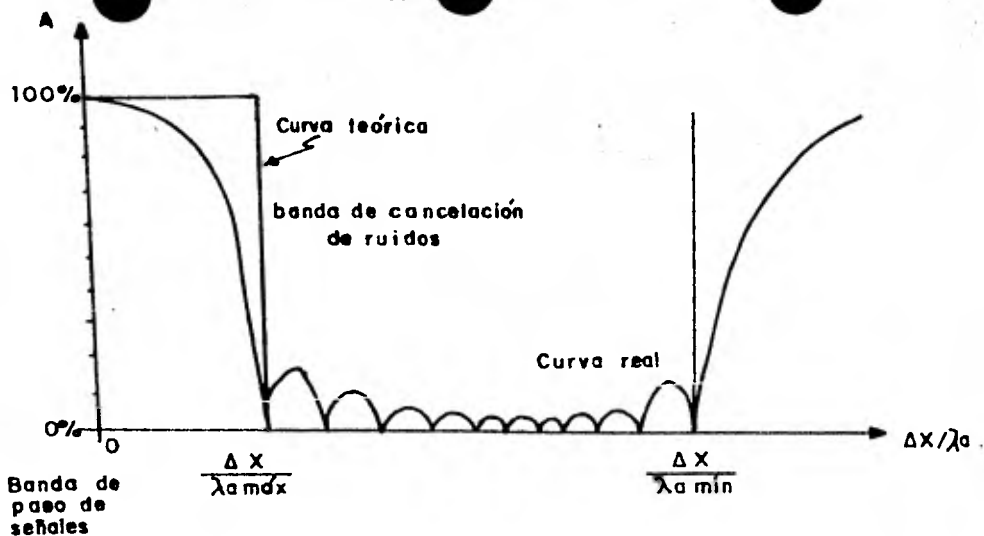
| No. DE DETECTOR | 1er. LOBULO % | 2o. LOBULO % | 3er. LOBULO % | 4to. LOBULO % | 5to. LOBULO % | 6to. LOBULO % | 7to. LOBULO % | 8to. LOBULO % | 9no. LOBULO % | 10mo. LOBULO % |
|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| 3 | 0.33 | | | | | | | | | |
| 4 | 0.27 | | | | | | | | | |
| 5 | 0.25 | 0.20 | | | | | | | | |
| 6 | 0.24 | 0.17 | | | | | | | | |
| 7 | 0.23 | 0.15 | 0.14 | | | | | | | |
| 8 | 0.23 | 0.15 | 0.13 | | | | | | | |
| 9 | 0.22 | 0.15 | 0.12 | 0.11 | | | | | | |
| 10 | 0.22 | 0.14 | 0.11 | 0.10 | | | | | | |
| 12 | 0.22 | 0.14 | 0.11 | 0.09 | 0.08 | | | | | |
| 14 | 0.22 | 0.13 | 0.10 | 0.08 | 0.08 | 0.07 | | | | |
| 16 | 0.22 | 0.13 | 0.10 | 0.08 | 0.07 | 0.07 | 0.06 | | | |
| 18 | 0.22 | 0.13 | 0.10 | 0.08 | 0.07 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | | |
| 20 | 0.21 | 0.13 | 0.10 | 0.08 | 0.07 | 0.06 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | |
| 00 | 0.21 | 0.13 | 0.09 | 0.07 | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.03 | 0.03 | 0.03 |

2.- TENDIDOS DE DETECTORES DE SENSIBILIDAD VARIABLE

Como es posible apreciar en el punto anterior, las curvas de respuesta relativa para tendidos de detectores con la misma sensibilidad presentan "M" lóbulos donde M es el número de detectores.

La banda de atenuación esta comprendida desde el segundo lóbulo hasta el penúltimo, cubriendo dicha banda M-2 lóbulos, se puede observar que los lóbulos centrales presentan mayor atenuación que los adyacentes al primero y el último lóbulo. Según la tabla III.1, el porcentaje de atenuación para el primer lóbulo de un tendido de cuatro detectores es de 33 % , 24 % de atenuación para 6 detectores, 23 % de atenuación para 8 detectores, 22 % de atenuación para 18 y - 21 % de atenuación cuando el tendido tiene de 29 a un número infinito de detectores, con lo que el método muestra su mayor limitación - en el poder de atenuación. Para poder aumentar el poder de atenuación se recurre al uso de detectores de sensibilidad variable.

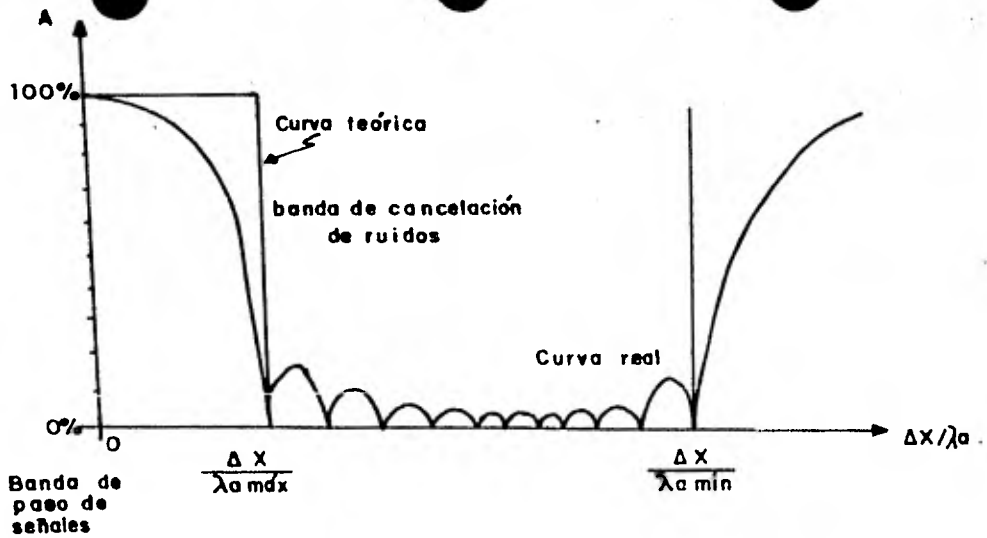
De acuerdo a la figura II 5b, la banda ideal para la cancelación de los ruidos es la que se muestra en la siguiente figura:



En la curva teórica de un filtro espacial, para la longitud de onda cero, hasta la longitud de onda máxima de los ruidos, la curva teórica se mantiene en el 100 %.

Se mantienen en el 0 % para la banda de cancelación de ruidos, o sea entre $\Delta X / \lambda_0 \text{ máx}$ y $\Delta X / \lambda_0 \text{ mín}$ FIG. III 2a.

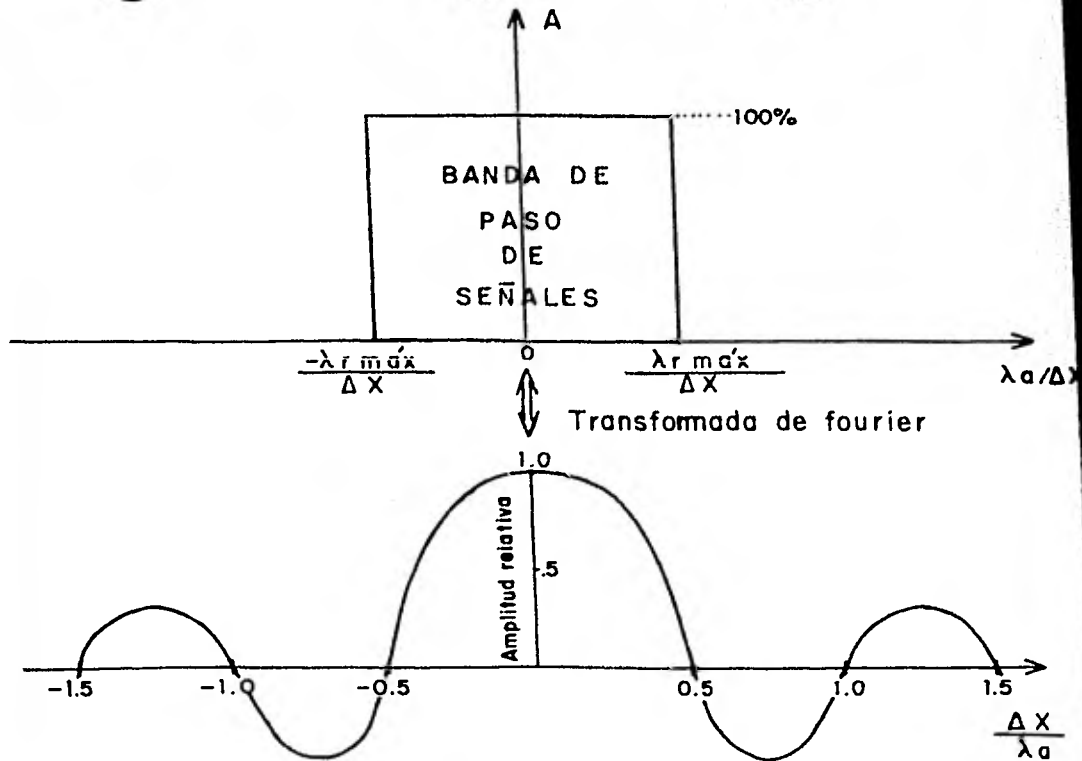
Estableciendo que $-\lambda_0 \text{ máx}$ es la longitud de onda máxima negativa para velocidades aparentes negativas, entonces tanto la curva teórica como la curva real serán simétricas con respecto al origen, y en consecuencia el período T será $2 \lambda_0 \text{ máx}$, su transformada de Fourier está representada en la siguiente figura:



En la curva teórica de un filtro espacial, para la longitud de onda cero, hasta la longitud de onda máxima de los ruidos, la curva teórica se mantiene en el 100 %.

Se mantienen en el 0 % para la banda de cancelación de ruidos, o sea entre $\Delta X/\lambda_0 \text{ máx}$ y $\Delta X/\lambda_0 \text{ mín}$ FIG. III 2a.

Estableciendo que $-\lambda_0 \text{ máx}$ es la longitud de onda máxima negativa para velocidades aparentes negativas, entonces tanto - la curva teórica como la curva real serán simétricas con respecto al origen, y en consecuencia el período T será $2\lambda_0 \text{ máx}$, su transformada de Fourier esta representada en la siguiente figura:



III ab Transformada de Fourier de la banda de paso de señales de la curva teórica del filtro espacial.

En donde el periodo $T = \frac{2\lambda r máx}{\Delta x}$

y la frecuencia será $\frac{1}{T} = \frac{\Delta x}{2\lambda r máx}$

Teóricamente si establecemos un patrón de detectores de sensibilidad variable, estos detectores tendrían que tener una sensibilidad relativa que varíe según la curva de respuesta, Fig. 111 2b, y el espaciamiento entre los detectores tendría que ser cero, y la longitud del patrón infinito, existiendo alternancia de polaridad cada vez que la distancia Δx del centro del tendido pase por un múltiple de la mitad de la longitud aparente máxima de los ruidos.

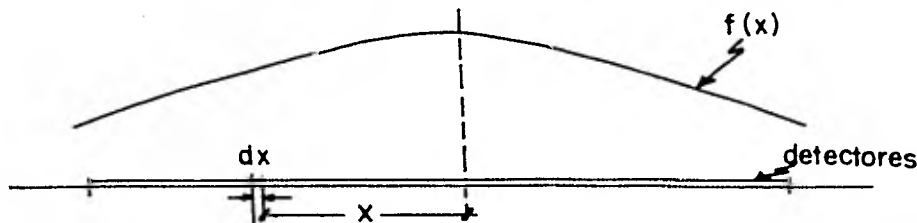
La solución práctica para establecer el tendido de delectores de sensibilidad variable, es considerar únicamente el lóbulo principal de la curva de sensibilidad relativa, así todos los detectores tendrán polaridad positiva, y la longitud total del tendido - sera entonces λr max. Como los detectores extremos tienen una sensibilidad relativa de cero, entonces es válido no tomarlos en cuenta y así el número de detectores será igual a la longitud de onda - máxima del ruido dividido entre el espaciamiento entre los detectores:

$$M = \frac{\lambda r \text{ máx}}{\Delta x}$$

Existe entonces un compromiso entre el número de detectores y el espaciamiento, pues la longitud del tendido se mantiene - constante, así podemos limitar a que el espaciamiento entre los detectores nunca exceda de la longitud de onda mínima de los ruidos λr mín

La respuesta relativa de cada uno de los detectores deberá tomarse de la curva de respuesta relativa técnica, en donde el valor relativo de los detectores será simétrico con respecto al centro de tendido.

Se puede determinar la curva de respuesta relativa técnica aplicando la transformada de Fourier a la respuesta que tendrá, un número infinito de detectores espaciales en forma tal que la contribución de un elemento dx a la señal total registrada sea $f(x)$ representa la señal generada por los detectores del tendido por unidad de longitud.



$F(t)$ es la respuesta de la suma de las respuestas de los de tectores conectados en serie.

$$f(t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \sin \left[2\pi f_n \left(t + \frac{\Delta x}{V_a} \right) + \theta_n \right] \dots \dots \dots \text{III.1.6}$$

En estas condiciones la señal instantanea que proporciona al elemento dx al total de la señal del tendido es:

$$d A_T = \sum_{f_n=0}^{f_n=\infty} A_n \sin \left[2\pi f_n \left(t + \frac{\Delta x}{V_a} \right) + \theta_n \right] f(x) dx \dots \dots \dots \text{III.2.1}$$

y la salida total del tendido a una frecuencia f , es:

$$dA_T = \int_{-\infty}^{\infty} A \cdot \text{sen} [2\pi f(t + Kax) + \theta] f(x) dx$$

$$dA_T = \int_{-\infty}^{\infty} [\text{sen}(2\pi ft + \theta) \text{Cos } 2\pi Kax + \text{Cos}(2\pi ft + \theta) \text{Sen}(2\pi Kax)] f(x) dx$$

Como $f(x)$ es simétrico con respecto al centro del tendido la parte integral en función del seno se cancela:

$$dA_T = A \int_{-\infty}^{\infty} \text{sen}(2\pi ft + \theta) \text{cos}(2\pi Kax) f(x) dx$$

$$= A \text{sen}(2\pi ft + \theta) \int_{-\infty}^{\infty} \text{cos}(2\pi Kax) f(x) dx \dots \text{III. 2.2.}$$

Si $A(Ka)$ es: $A(Ka) = \int_{-\infty}^{\infty} \text{cos } 2\pi Kax f(x) dx$ III. 2.3

Entonces la transformada de Fourier de $A(Ka)$ es:

$$\int_{-\infty}^{\infty} A(Ka) e^{2\pi i Kax} dKa = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \text{cos}(2\pi Kax) f(x) e^{2\pi i Kaz} dKax$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx \int_{-\infty}^{\infty} \text{cos}(2\pi Kax) e^{2\pi i Kaz} dKa$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{e^{2\pi i Kax} + e^{-2\pi i Kax}}{2} \right] e^{2\pi i Kaz} dKa$$

$$= \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx \int_{-\infty}^{\infty} e^{2\pi i Ka(x+z)} + e^{2\pi i Ka(z-x)} dKa$$

Por definición de la función 'impulso' se tiene:

$$= \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx [\delta(z+x) + \delta(z-x)] \dots \dots \dots \text{III.2.2}$$

Como $f(x)$ es simétrico, o sea $f(-x) = f(x)$; entonces

$$f(x) = \frac{1}{2} [f(x) + f(-x)]$$

de aquí que:

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} A(K_a) e^{2\pi i K_a x} dK_a$$

III. 2. 3

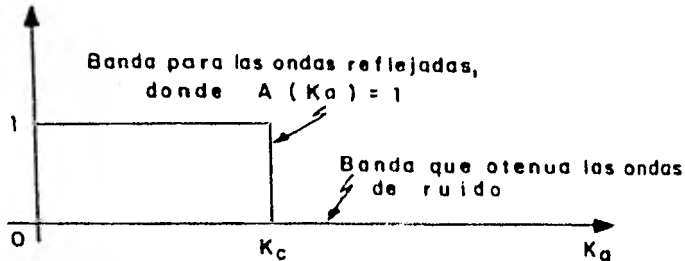
$$= 2 \int_0^{K_c} A(K_a) \text{Cos } 2\pi K_a x dK_a$$

$$F(x) = \frac{\text{Sen } 2\pi K_a x}{\pi x} \Big|_0^{K_c}$$

III. 2. 4

que es la curva de respuesta para los detectores de sensibilidad variable, y está representada por la figura III. 2. b

K_c según la figura III. 2.C, es el inverso de la longitud de onda de corte para el filtro ideal, cuya amplitud $A(K_a)$ es uno:



III.3 MEZCLADO DE TENDIDOS DE DETECTORES MÚLTIPLES.

Se ha observado en el campo que los ruidos tienen una mejor atenuación al mezclar tendidos de detectores múltiples para ser registrados en un solo canal sismológico, esta es la razón fundamental por la cual el uso del mezclado de tendidos de detectores múltiples se extiende a casi todos los trabajos sismológicos de reflexión.

En el inciso III.1 se estableció la manera en que al sumar las respuestas de un tendido de detectores de sensibilidad uniforme con espaciamiento constante entre los detectores, resulta la respuesta de un solo detector colocado en el centro del tendido; cuya amplitud depende de la geometría del tendido y la longitud de onda de las diferentes perturbaciones sismológicas.

Considerando varios tendidos constituidos por la misma cantidad de detectores de sensibilidad uniforme, cuyos centros estén separados una cantidad constante y conectadas las salidas de los tendidos en serie; se puede establecer que la salida de todo el sistema equivale a la salida de un solo patrón, en el cual su centro coincide con el centro geométrico de los centros de los tendidos. Esta salida total también equivale a la respuesta de un solo detector situado en el centro de los centros de los tendidos, y cuya amplitud es igual al producto de todas las amplitudes:

$$C_m = C_1 \lambda a \quad C_2 \lambda a \quad \dots \quad \text{III.3.1}$$

$C_1 \lambda a$, es la respuesta de amplitud relativa de cualquier tendido de detectores de una sola cuerda de sensibilidad uniforme y espaciamiento constante, siendo independiente del número de cuerdas que conste el tendido completo.

$C_2 \lambda a$, es la respuesta de amplitud relativa del conjunto de cuerdas, considerando a éstas como si fuesen unidades de detectores, de manera que el espaciamiento es la distancia entre los centros de las cuerdas, y el número de elementos es igual al número de cuerdas.

C_m es la respuesta de todo el sistema.

Para visualizar mejor lo antes expuesto, considérense según FIG III.3.C, tres tendidos formados por cuatro detectores separados dos metros, entre sí, estando los centros de los tendidos a cada 5 metros. Entonces la respuesta teórica del tendido según III.3.C, será:

$$C_1 \lambda a = \frac{\text{Sen}(8\pi/\lambda a)}{4 \text{Sen}(2\pi/\lambda a)} \quad \text{III.3.2}$$

$$C_2 \lambda a = \frac{\text{Sen}(15\pi/\lambda a)}{3 \text{Sen}(5\pi/\lambda a)} \quad \text{III.3.3}$$

por lo cual:

$$C_m = \frac{\text{Sen} (8 \pi / \lambda a) \text{Sen} (15 \pi / \lambda a)}{12 \text{Sen} (2 \pi / \lambda a) \text{Sen} (5 \pi / \lambda a)} \quad \text{III.3.4}$$

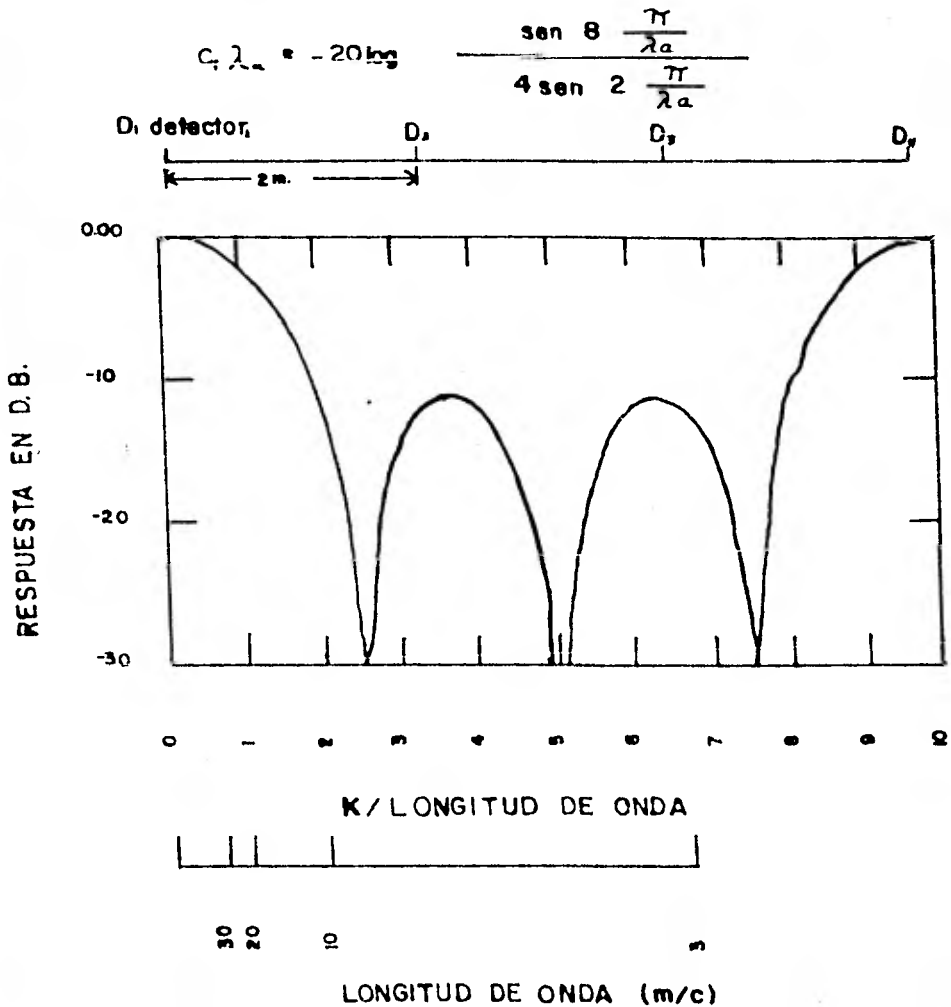
Las gráficas de las respuestas de $C_1 \lambda a$ y $C_2 \lambda a$ se encuentran en las figuras III.3a y III.3b.

C_1 es la respuesta relativa de un tendido de 4 elementos separados a cada 2 metros, por lo cual se originan 4 lóbulos, y la banda de atenuación de ruidos que esta comprendida entre los 10 y 2.5 - metros de longitud de onda, la respuesta de la curva $C_2 \lambda a$ FIG. III.3b contiene tres lóbulos, debido a que el tendido está constituido por tres grupos de detectores, cuyos centros se localizan a cada 5 metros.

La banda de atenuación está comprendida entre 6.66 y 18 metros de longitud de onda.

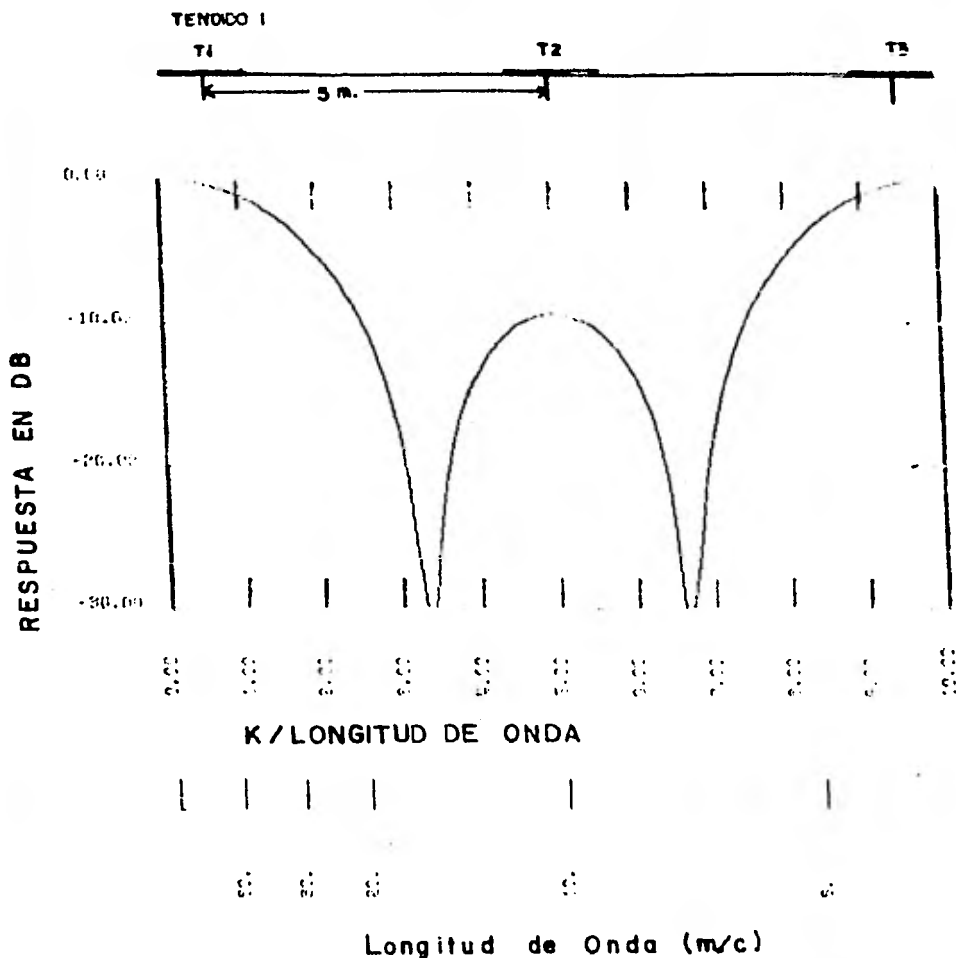
La Figura III 3c es la curva de respuesta combinada de C_1 y C_2 que equivale a la respuesta de tres tendidos de 4 elementos, dispuestos según la figura III.3.C., la respuesta combinada es igual al producto de las curvas de las figuras III.3.a y III.3.b.

**3.3.a. CURVA DE RESPUESTA DE AMPLITUD RELATIVA
DE UN TENDIDO DE CUATRO ELEMENTOS CON SEPARACION
DE DOS METROS ENTRE DETECTORES**



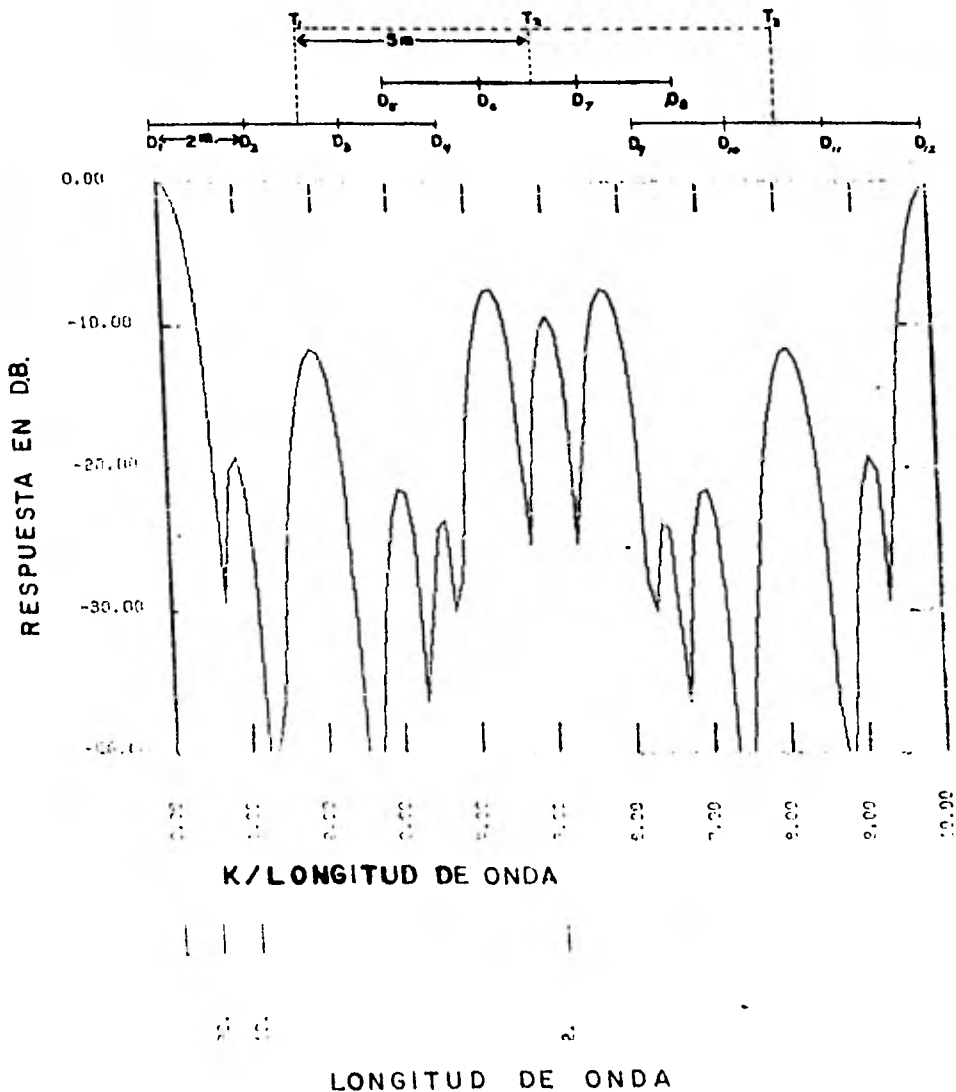
III.3.b. CURVA DE RESPUESTA DE AMPLITUD RELATIVA DE TRES TENDIDOS SEPARADOS CADA CINCO METROS.

$$C_2 \lambda_a = -20 \log \frac{\text{sen } 15 \pi / \lambda_a}{3 \text{Sen } 5 \pi / \lambda_a}$$



$$C_m = -20 \lg \frac{(\text{Sen } 8\pi/\lambda a) (\text{Sen } 15\pi/\lambda a)}{12 (\text{Sen } 2\pi/\lambda a) (\text{Sen } 5\pi/\lambda a)}$$

$$C_m = -20 C_1 \lambda a C_2 \lambda a$$



III.3.C. CURVA DE Respuesta de amplitud relativa del mezclado de 4 elementos por tendido.

La banda completa de atenuación de la curva de la Fig. 111 3.C está comprendido entre 20 y 1.05 metros de longitud de onda aparente; la banda de atenuación se alarga hacia ambos lados obteniendo además mayor porcentaje de atenuación en los lóbulos centrales. Es necesario dar especial atención a los rangos de atenuación con el fin de que no atenuar aquellas longitudes de onda pertenecientes a las señales útiles FIGURA 111 3c.

Debido a las características de atenuación de este tipo de filtros y a la facilidad de diseño y construcción, es el que más uso tiene en las brigadas sísmológicas de la actualidad. Además puede combinarse con pozos de tiro múltiples para áreas donde los ruidos son muy complejos.

III. 4 TENDIDOS DE DETECTORES MULTIPLES DISTRIBUIDOS EN UNA SUPERFICIE.

Los ruidos y las señales que son generados en un punto de tiro, se desplazan lateralmente formando frentes de onda concéntricos alrededor del punto de excitación. Las longitudes de onda aparentes del ruido y la señal, se registran en direcciones radiales al punto de tiro, sobre la superficie del terreno.

Las longitudes de onda aparente, registrados según la dirección de los tendidos FIGURA III.4a, dependen del ángulo entre la dirección radial del frente de ondas y la dirección del tendido.

Se registran longitudes de onda aparente muy grandes cuando la dirección del frente de ondas es ortogonal a la dirección del tendido 2.

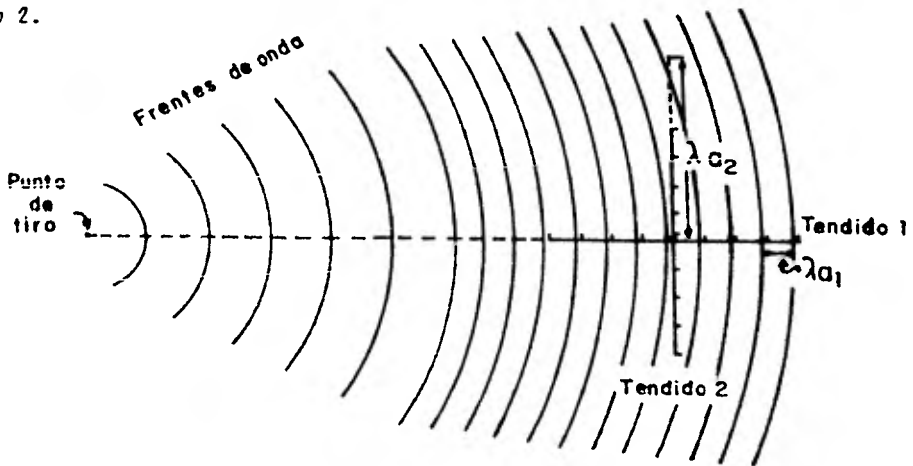


FIGURA III.4.a El tendido 1 registra las menores longitudes de onda aparente de la señal y el ruido, mientras que el tendido 2 registra las longitudes de onda mas grandes.

Cuando el ruido y la señal se transmiten de manera tal que los frentes de onda forman círculos concéntricos debido a que las propiedades elásticas del medio son homogéneas lateralmente, es innecesario diseñar arreglos especiales distribuidos en una superficie.

Cuando exista en el subsuelo somero alguna discontinuidad elástica en sentido horizontal, provocado por diversos factores geológicos, tales como alguna falla, dique, intrusiones, etc, que modifiquen la trayectoria del ruido y las señales en sentido horizontal. Entonces los ruidos y señales se reflejan en sentido lateral convirtiéndose esta señal en ruido; En este caso conviene distribuir los detectores en una superficie para darle al tendido propiedades atenuadoras en las direcciones donde proviene el ruido. La respuesta del tendido dependerá de su dirección, el peso de los elementos y la cantidad de elementos en cada punto. Un ejemplo ilustrativo se muestra en la figura III 4b, donde el tendido está formado por 64 detectores de igual sensibilidad distribuidos en una superficie cuadrada de ocho detectores por lado.

La respuesta de los tendidos que queden orientados vertical u horizontalmente tendrán su respuesta igual a la de un tendido de ocho detectores de igual sensibilidad espaciado una distancia Δx , esta curva de respuesta esta representada por la gráfica III.4c.

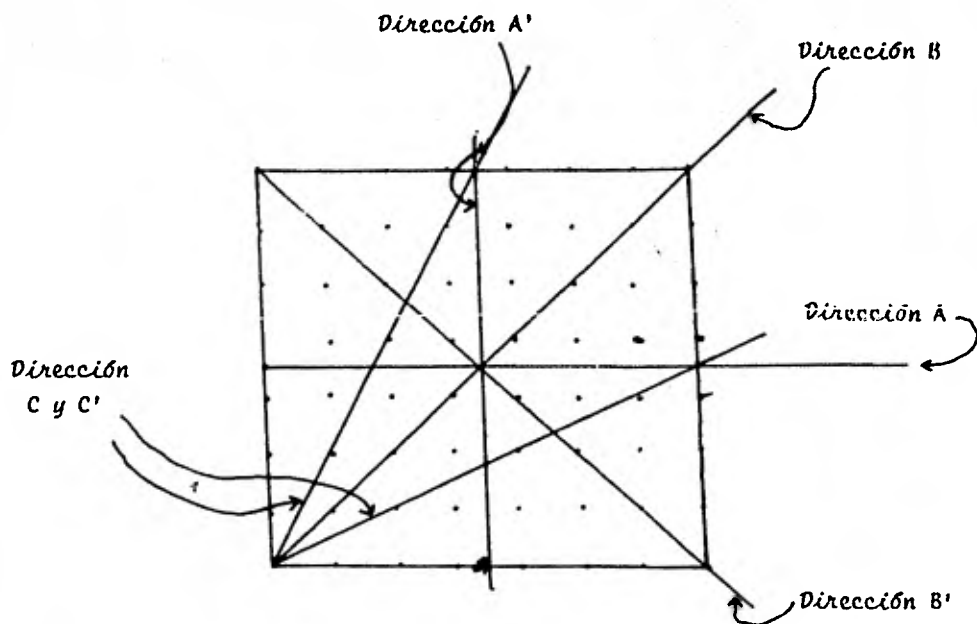


FIG. III. 4b PATRON DE DETECTORES DISTRIBUIDOS EN UNA SUPERFICIE.

La respuesta de atenuación para las líneas B y B' (FIG. III. 4d), es equivalente a la de un tendido lineal de 15 detectores de sensibilidad variable y espaciamiento $\Delta X' = 0.707 \Delta X$.

La respuesta de atenuación para la dirección intermedia C y C' (FIG. III.4.e) es equivalente a la de un tendido lineal de - 29 detectores de sensibilidad variable y con espaciamiento - $\Delta X' = .383 \Delta X$.

En general, la respuesta en una dirección determinada - de un tendido de detectores distribuidos en una superficie es equivalente a la de un tendido de detectores, cuya distribución de elementos es la proyección ortogonal de todos los elementos distribuidos en la superficie.

Fig III.4.C La respuesta en la dirección A y A' es equivalente de un
tendido de detectores de igual sensibilidad

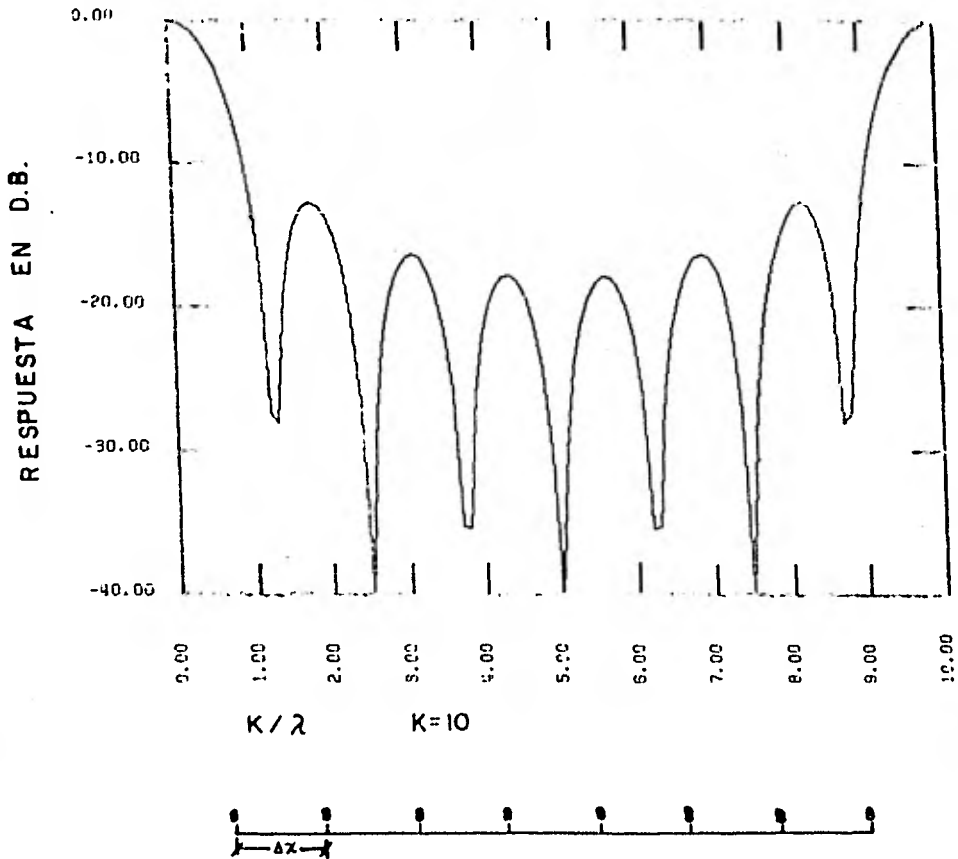
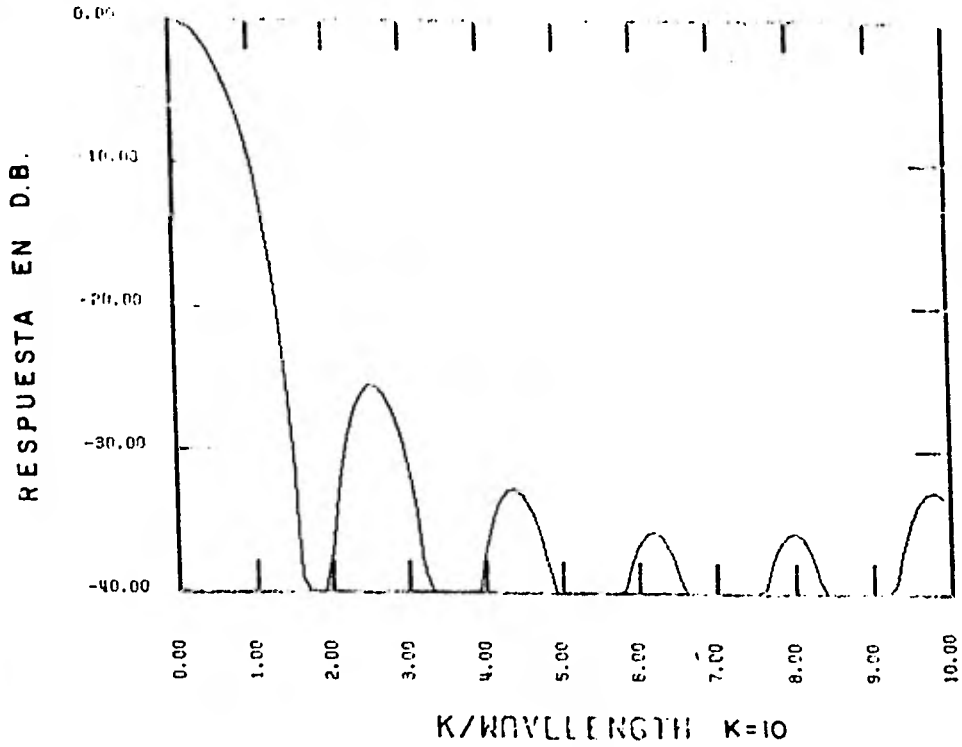
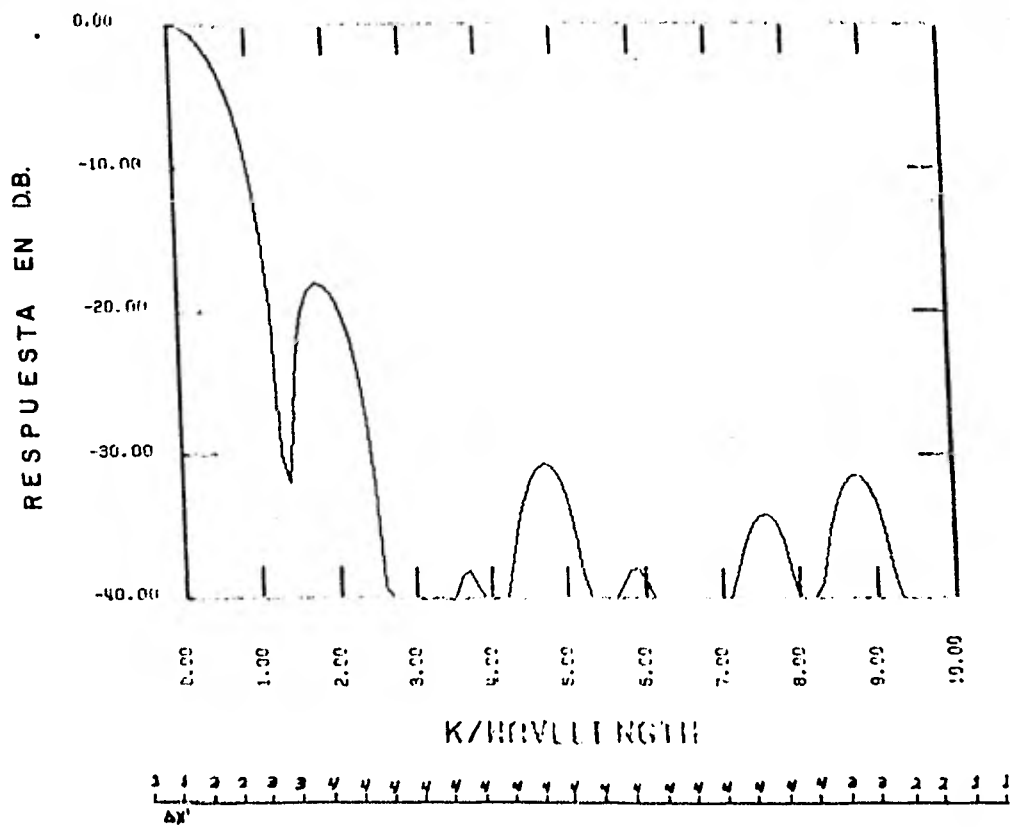


Fig. 1.10 D Respuesta en la dirección B y B'



1 2 3 4 5 6 7 8 7 6 5 4 3 2 1
 detectores

Fig. 11.4E Respuesta en la dirección C y C'



III.5 PUNTOS DE TIRO MÚLTIPLES

Los puntos de tiro múltiples se utilizan también para eliminar los ruidos coherentes e incoherentes. La teoría de eliminación del ruido por medio de sismodetectores múltiples es aplicable a los puntos de tiro múltiples, para fines de cálculo es posible obtener la respuesta de un patrón de tiros múltiples intercambiando los siguientes parámetros:

Δx = distancia entre puntos de tiro

N = cantidad de puntos de tiro

P = Peso relativo de los puntos de tiro, es la cantidad relativa de carga de dinamita de cada pozo si es uniformemente pesado, entonces la carga de dinamita es la misma para todos los pozos.

M = cantidad de líneas o arreglos de puntos de tiro

L = longitud del arreglo.

En general C_p es la respuesta del patrón de atenuación diseñado con pozos de tiro múltiples y esta dada por siguiente expresión:

$$C_p = C_1 \lambda_0 C_2 \lambda_0$$

III.5.1

$C_1 \lambda_0$ es la respuesta relativa de cualquier distribución de pozos de tiro con carga uniforme y espaciamiento constante, y $C_2 \lambda_0$ es la respuesta relativa del conjunto de dos o más diseños de distribuciones de puntos de tiro, siendo estas distribuciones iguales y con sus centros separados una distancia constante ΔX .

En forma semejante a lo que sucede cuando se mezclan señales de grupos de detectores múltiples, la respuesta relativa del sistema pozos-detectores C_{pd} es:

$$C_{pd} = C_p \times C_d \dots \dots \dots III.5.2$$

siendo $C_d = C_1 \lambda_0 C_2 \lambda_0$ La respuesta de varios tendidos múltiples de sismodetectores.

Es notable observar el incremento del nivel de atenuación al actuar en conjunto el patrón de detectores con el patrón de pozos múltiples, así como el incremento de la anchura de la banda de atenuación. El nivel del ruido incoherente disminuye ahora a $1/\sqrt{MN}$ por ciento donde N es el número de detectores y M el número de pozos.

La utilización de pozos de tiro múltiples esta condicionado al compromiso existente entre la calidad de la información y el precio de las operaciones, pues resulta mucho más caro perforar pozos que sembrar detectores.

Generalmente se utilizan pozos múltiples para estudios -
finos de detalles cuyos objetivos son muy precisos, o bien cuando -
son realizados en suelos muy absorbentes de energía sísmica, y don-
de por su estructura geológica produce un alto nivel de ruido compa-
rado con el nivel de la señal.

IV DEDUCCION DE LAS ECUACIONES EMPLEADAS PARA DETERMINAR LOS PARAMETROS EN LOS FILTROS ESPACIALES.

1.- PARAMETROS DE LOS TENDIDOS DE DETECTORES DE IGUAL SENSIBILIDAD.

En las curvas de respuesta relativa, se distinguen las bandas laterales de paso, formadas por los dos lóbulos extremos, y la banda central de atenuación. FIG. IV.1.a.

Las longitudes de onda de la señal se deben hacer corresponder con la banda de paso, mientras que las longitudes de onda pertenecientes a los ruidos se deben hacer corresponder con la banda central de atenuación FIG. IV. 1.a.

La eficiencia de la banda central de atenuación depende del número de detectores, del número de arreglos y peso de los elementos.

Para fines de diseño establecemos la condición de que todas las longitudes de onda de los ruidos observados, que no coincidan con las longitudes de onda de las señales, queden confinados dentro de la banda central de atenuación, que pueden definirse a partir de la ecuación III. 1.23:

$$C = \frac{\text{Sen } M\pi \Delta X / \lambda_a}{\text{Sen } \pi \Delta X / \lambda_a} \dots \text{III.1.23}$$

La respuesta "C" vale cero cuando la fracción $M\pi \Delta X / \lambda_0$ es múltiple de π , es decir cuando $\Delta X / \lambda_0$ es igual a n / M donde n es un número natural. El primer cero que se presenta entre el primer y el segundo lóbulo, es cuando $\Delta X / \lambda_0$ vale $1 / M$ y el último cero que se presenta entre el penúltimo y el último lóbulo, es cuando $\Delta X / \lambda_0$ vale $M-1 / M$; es decir las longitudes de onda aparentes máximas deseadas del ruido $\lambda_{0r \text{ máx}}$, se hacen coincidir con el extremo izquierdo de la banda central de atenuación que corresponde al valor:

$$\frac{1}{M} = \frac{\Delta X}{\lambda_{0r \text{ máx}}} \quad \text{IV 1.1}$$

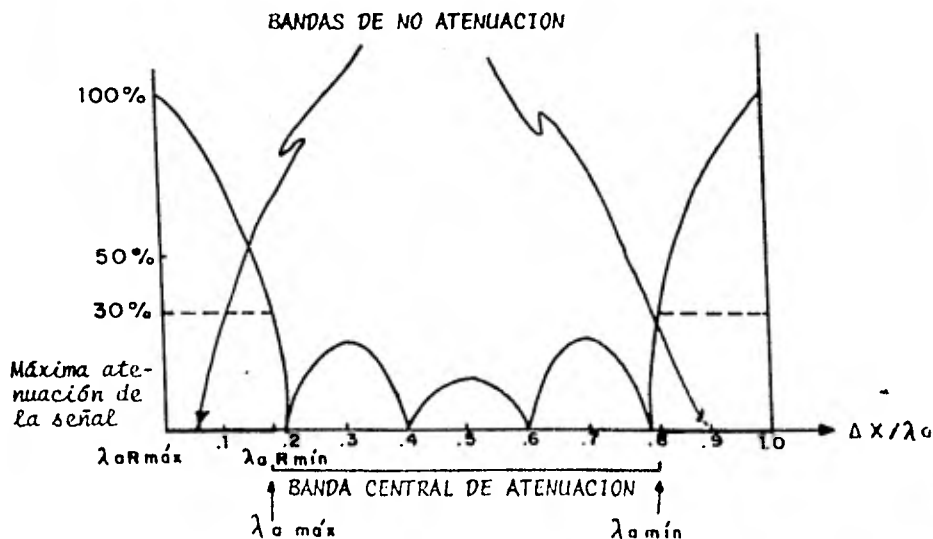


FIG. IV 1a. Bandas de Atenuación y Bandas de Paso de señales del filtro espacial.

Las longitudes de onda aparente mínimos del ruido, $\lambda_{ar \text{ mín}}$ corresponderán entonces al extremo derecho de la banda central de atenuación. En tales extremos donde $C = 0$, puede establecerse la siguiente relación:

$$\bar{i} - \frac{i}{M} = \frac{\Delta X}{\lambda_{ar \text{ mín}}} \quad \text{IV.1.2}$$

Despejando de las ecuaciones IV. 1.1 y IV. 1.2 tenemos:

$$\Delta X = \frac{\lambda_{ar \text{ máx}}}{M} \quad \text{IV.1.3 y}$$

$$\Delta X = \lambda_{ar \text{ mín}} - \frac{\lambda_{ar \text{ mín}}}{M} \quad \text{IV.1.4}$$

igualando IV. 1.3 y IV.1.4

$$\frac{\lambda_{ar \text{ máx}}}{M} = \lambda_{ar \text{ mín}} - \frac{\lambda_{ar \text{ mín}}}{M} \quad \text{IV.1.5}$$

resolviendo para M;

$$M = \frac{\lambda_{ar \text{ máx}} + \lambda_{ar \text{ mín}}}{\lambda_{ar \text{ mín}}} \quad \text{IV.1.6}$$

que corresponde al valor teórico de detectores.

Para encontrar el espaciamiento entre detectores sustituimos IV 1.1 en IV 1.2:

$$I = \frac{\Delta x}{\lambda_{a \text{ m} \acute{a}x}} = \frac{\Delta x}{\lambda_{a \text{ m} \acute{e}n}} \quad \text{IV.1.7}$$

y resolvemos para Δx :

$$\frac{\Delta x \lambda_{a \text{ m} \acute{e}n} + \Delta x \lambda_{a \text{ m} \acute{a}x}}{\lambda_{a \text{ m} \acute{e}n} \lambda_{a \text{ m} \acute{a}x}} = I$$

$$\Delta x = \frac{\lambda_{a \text{ m} \acute{a}x} \lambda_{a \text{ m} \acute{e}n}}{\lambda_{a \text{ m} \acute{a}x} + \lambda_{a \text{ m} \acute{e}n}} \quad \dots \text{IV.1.8}$$

y el largo del tendido será entonces:

$$L = (M - 1) \Delta x \quad \text{IV. 1,9}$$

La velocidad aparente mínima de las ondas reflejadas puede calcularse de la función de la velocidad media de propagación, que es función de la profundidad z , el echado ϕ , de la distancia Δx que abarca del punto de tiro al último detector, y de la velocidad media V_m al contacto reflejante:

$$V_{a \text{ Rmin}} = \frac{V_m}{\frac{\Delta x}{2z} + \text{sen } \phi} \quad \text{IV.1.10}$$

Para fines prácticos, en el terreno se puede determinar el espaciamiento entre detectores Δx , de tal manera que se pueda redondear el valor de Δx , obtenido del cálculo a un número próximo entero preferentemente menor que el calculado. El número M de detectores se escoge de tal manera que quede un número entero de detectores más grande que el calculado con objeto de asegurar la atenuación de los ruidos.

2.- PARAMETROS DE LOS TENDIDOS DE DETECTORES DE SENSIBILIDAD VARIABLE.

Debido a que las ondas senoidales que se suman al conectar a un solo canal los detectores, son de igual frecuencia, según III.22, es posible obtener la resultante normalizada, considerando vectorialmente a las amplitudes de cada una de ellas, las cuales son proporcionales a sus sensibilidades.

El desfazamiento angular entre los vectores expresado en radianes, es igual a $2\pi K \Delta X$. (FIG. III 2a.) y para el caso particular de un tendido de 9 elementos, su respuesta será

$$C_9 = \frac{a_1}{M_0} \cos 8\pi K \Delta X + \frac{a_2}{M_0} \cos 6\pi K \Delta X +$$
$$\frac{a_3}{M_0} \cos 4\pi K \Delta X + \frac{a_4}{M_0} \cos 2\pi K \Delta X + \frac{a_5}{M_0} +$$
$$\frac{a_6}{M_0} \cos 2\pi K \Delta X + \frac{a_7}{M_0} \cos 4\pi K \Delta X + \frac{a_8}{M_0} +$$
$$\cos 6\pi K \Delta X + \frac{a_9}{M_0} \cos 8\pi K \Delta X$$

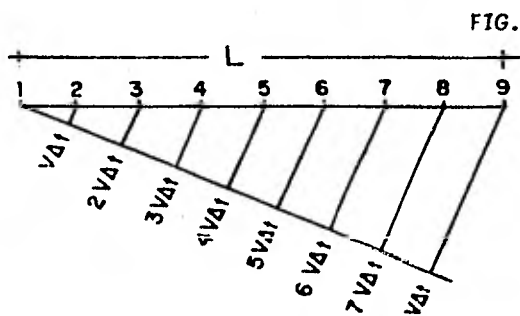


FIG. IV 2a. Tendido Múltiple y Frente de Onda - Plano.

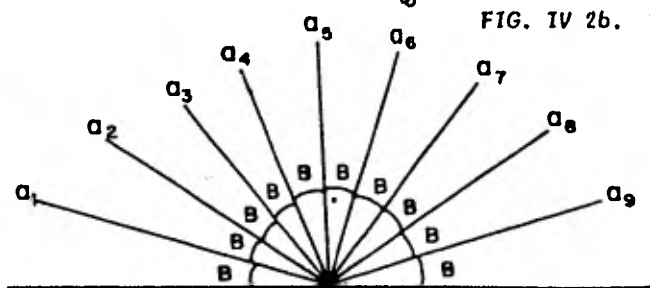


FIG. IV 2b. Diagrama Vectorial de respuesta a ondas senoidales de de periodo T.

siendo:

Δt = Desfasamiento en el tiempo

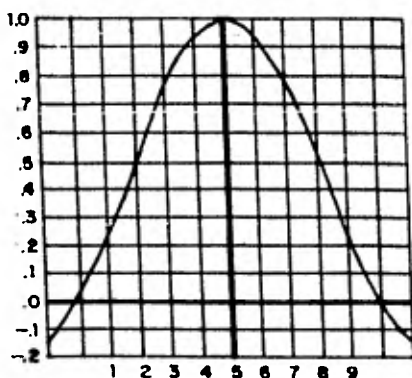
$B = 2 \pi \Delta t / T = 2 \pi K \Delta X$ = Desfasamiento Angular

$\Sigma a = a_1 + a_2 + \dots + a_9 =$ Suma de Sensibilidades

Generalizando la anterior, la ecuación de respuesta de los tendidos de detectores en línea igualmente espaciados de sensibilidad variable y número par, tiene la forma de una serie de Fourier en términos de cosenos y de argumento impar en B.

La Figura IV. 2b, que equivale al lóbulo central de la curva de sensibilidades relativas para detectores de sensibilidad variable, "C"

se muestra discretizada para nueve elementos, con el objeto de poder estimar las sensibilidades relativas de los 9 detectores.



| | | |
|-------|---|------|
| a_1 | = | .22 |
| a_2 | = | .48 |
| a_3 | = | .74 |
| a_4 | = | .92 |
| a_5 | = | 1.00 |
| a_6 | = | .92 |
| a_7 | = | .74 |
| a_8 | = | .48 |
| a_9 | = | .22 |

FIG. IV. 2b. GRAFICA DE LAS SENSIBILIDADES RELATIVAS DE 9 DETECTORES.

Sustituyendo las sensibilidades relativas en la Fig. IV. 2.1:

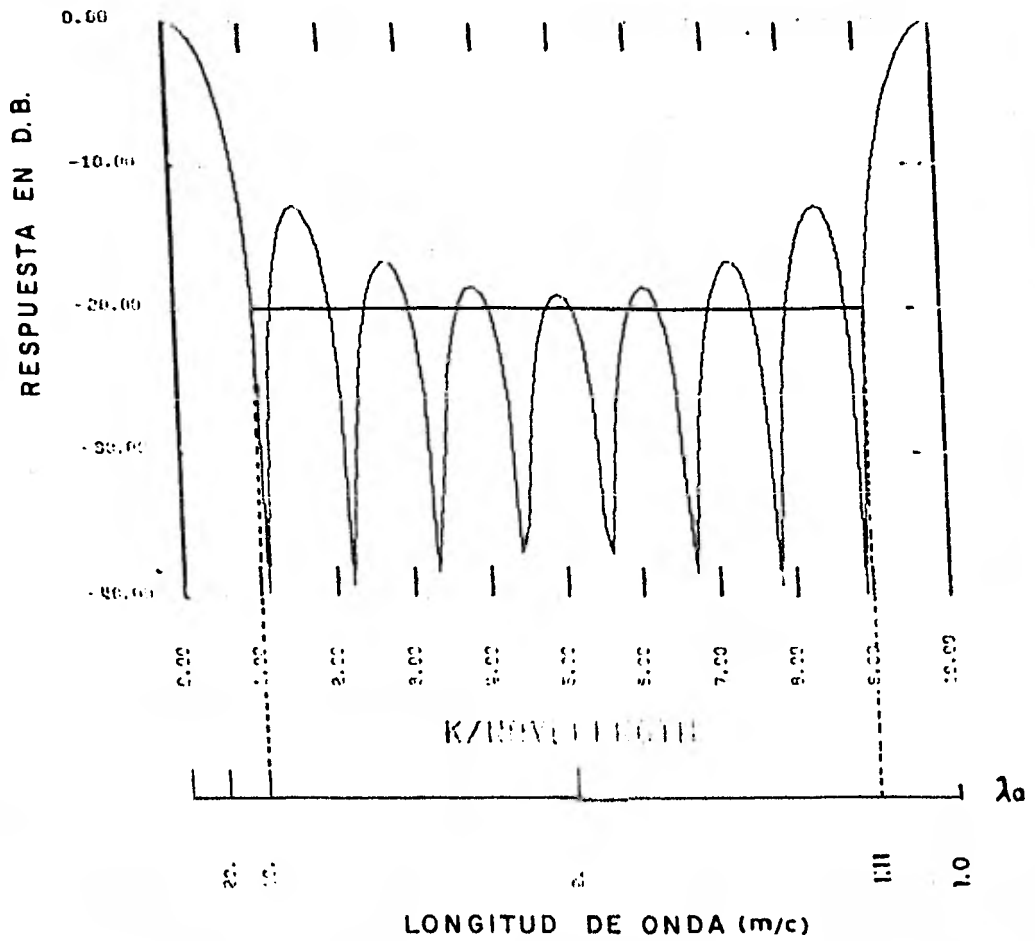
$$C = \frac{.22}{6.77} \cos 8\pi K\Delta X + \frac{.48}{6.72} \cos 6\pi K\Delta X + \frac{.74}{6.72} \cos 4\pi K\Delta X +$$

$$+ \frac{.92}{6.72} \cos 2\pi K\Delta X + \frac{1}{6.72} \cos(0) + \frac{.92}{6.72} \cos 2\pi K\Delta X +$$

$$\frac{.74}{6.72} \cos 4\pi K\Delta X + \frac{.48}{6.72} \cos 6\pi K\Delta X + \frac{.22}{6.72} \cos 8\pi K\Delta X$$

En la gráfica IV. 2c, se encuentra la curva de respuesta relativa de 9 detectores de sensibilidad uniforme y en la gráfica

IV 2c Gráfica de la respuesta de 9 detectores de sensibilidad uniforme



IV. 2d, se encuentra la curva de respuesta relativa de 9 detectores de sensibilidad variable, la distancia entre los detectores son iguales en ambos casos.

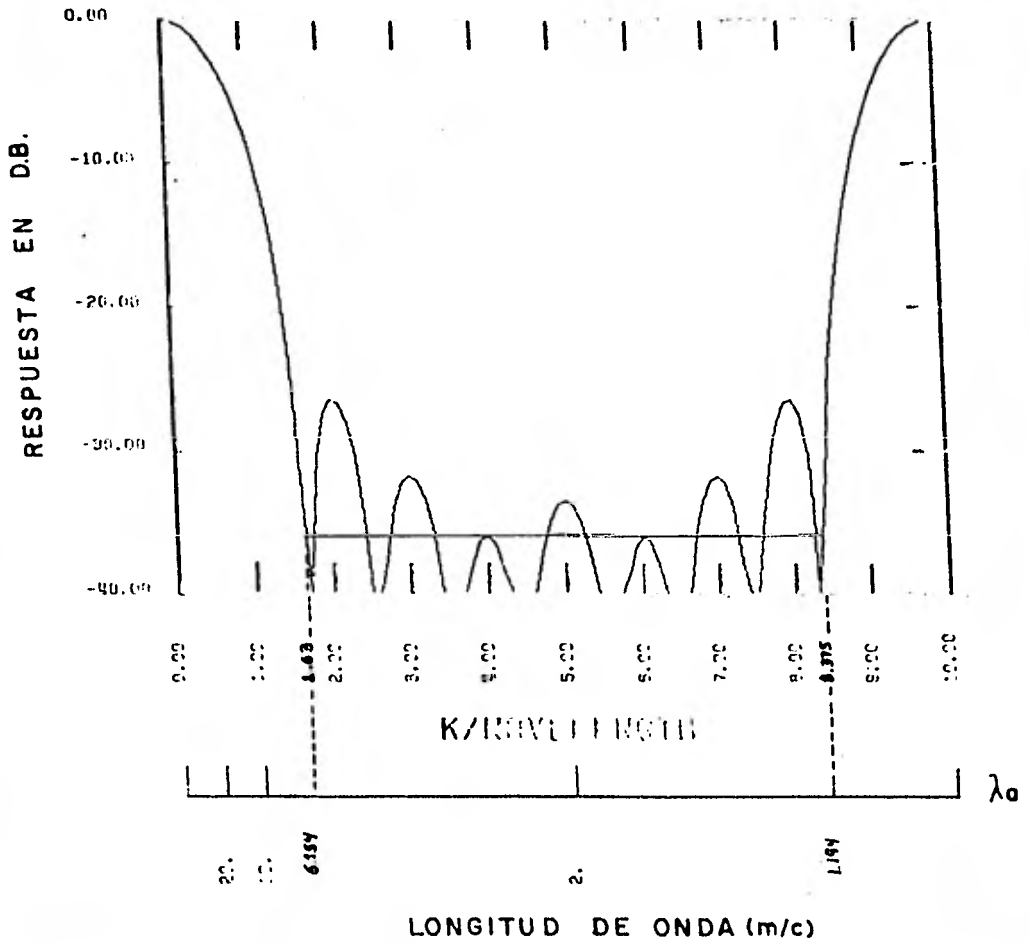
La curva de respuesta para detectores de sensibilidad uniforme, presenta la banda central de atenuación de ruidos a nivel promedio de -20 decibeles y la curva de respuesta para detectores de sensibilidad variable, presenta la banda central de atenuación de ruidos a un nivel promedio de -37 decibeles.

Es notable la mejora del nivel de atenuación en la respuesta de detectores de sensibilidad variable, aumentando el nivel de atenuación de -20 a -37 decibeles.

Se observa una reducción de la banda de atenuación en la respuesta del filtro de detectores de sensibilidad variable, pues la banda de atenuación para el filtro de detectores de sensibilidad uniforme es 1.1 a 10 metros de longitud de onda aparente, mientras que la banda de atenuación para el filtro de detectores de sensibilidad variable es de 1.194 a 6.154 metros de longitud de onda aparente. Es notable la reducción de la banda de atenuación en la parte izquierda de los filtros, donde se reduce de 10 a 6.154 metros de longitud de onda aparente, lo que obliga a verificar los parámetros del filtro de detectores de sensibilidad variable, para ajustar correctamente a los límites de la longitud de onda de los ruidos observados.

IV.2.d. Gráfica de la respuesta de 9 detectores de sensibilidad variable

Las sensibilidades estan dadas por la gráfica IV.2b



V.- EJEMPLO DEL DISEÑO DE UN FILTRO ESPACIAL UTILIZADO EN UNA BRIGADA SISMOLOGICA.

En la gráfica Va, se pueden identificar los diferentes eventos alineados, originados por ruidos coherentes (indicados con letra). En cada evento se determinan las profundidades (en tiempos) y la distancia horizontal para poder estimar la velocidad aparente del evento; también se determina el periodo para obtener la frecuencia, y se calculan las longitudes de onda aparente de cada evento de los ruidos identificados.

En la tabla Va, se presentan los datos referentes a cada uno de los eventos identificados: La distancia horizontal ΔX , la distancia vertical Δt ; la velocidad aparente V_a que se obtiene con el cociente de $\Delta X / \Delta t$; el periodo T que se obtiene midiendo la longitud de onda correspondiente al evento, en una sola traza sísmica, con su inverso obtenemos la frecuencia f_r , por último se calcula la longitud de onda aparente del ruido con el cociente de la velocidad aparente y la frecuencia V_{ap} / f_r .

T A B L A Va

| Evento | ΔX m | Δt s | v_{ap} m/s | T s | f_r c/s | λ_{ap} m/s |
|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------|--------------|-----------------------|
| A ₁ | 85 | 0.20 | 425 | 0.08 | 12.50 | 34.00 |
| A | 83 | 0.20 | 415 | 0.08 | 12.50 | 33.20 |
| B | 60 | 0.20 | 300 | 0.07 | 14.28 | 21.00 |
| C ₁ | 160 | 0.20 | 800 | 0.07 | 14.28 | 56.02 |
| C | 160 | 0.20 | 800 | 0.08 | 12.50 | 64.00 |
| D | 85 | 0.04 | 2125 | 0.06 | 16.66 | 127.50 |
| E | 73 | 0.04 | 1825 | 0.04 | 25.00 | 73.00 |
| F | 125 | 0.04 | 3125 | 0.04 | 25.00 | 125.00 |
| G | 65 | 0.08 | 812.5 | 0.08 | 12.50 | 65.00 |
| H | 165 | 0.20 | 825.0 | 0.08 | 12.50 | 66.00 |
| I | 183 | 0.24 | 782.5 | 0.07 | 14.28 | 53.00 |
| J | 60 | 0.20 | 300.0 | 0.04 | 25.00 | 12.00 |
| K | 65 | 0.20 | 325.0 | 0.04 | 25.00 | 13.00 |
| L | 65 | 0.20 | 325.0 | 0.08 | 12.5 | 26.00 |
| M | 70 | 0.16 | 437.5 | 0.08 | 12.5 | 35.00 |

De la tabla Va, se determina la longitud de onda máxima y la longitud de onda mínima de los ruidos que se desea atenuar:

$$\lambda_{or\ máx.} = 127.5 \text{ m/c}$$

$$\lambda_{or\ mín.} = 12 \text{ m/c}$$

Mediante las ecuaciones IV.1.6, IV.1.10 y IV.1.11 se calcula el número de detectores "M", el espaciamiento " ΔX ", y la longitud del tendido:

$$M = \frac{\lambda_{ar\ máx.} + \lambda_{ar\ mín.}}{\lambda_{ar\ mín.}} \quad IV.1.6$$

$$\Delta X = \frac{\lambda_{ar\ máx} \quad \lambda_{ar\ mín.}}{\lambda_{ar\ mín} + \lambda_{ar\ máx.}} \quad IV.1.10$$

$$L = (M - 1) \Delta X \quad IV.1.11$$

$$M_{mín} = \frac{127.5 + 12}{12} = 11.625 \text{ detectores}$$

$$\Delta X_{máx} = \frac{127.5 \times 12}{127.5 + 12} = 10.97 \text{ metros}$$

$$L_{mín} = 10.97 (11.625 - 1) = 127.18 \text{ metros}$$

Lo cual nos indica que se puede considerar un número entero de detectores igual a 12, con un espaciamiento de 10 metros, y el largo del tendido según IV. 1.11 es:

$$L = 10 (12 - 1) = 110 \text{ M.}$$

La respuesta del arreglo espacial para este patrón se muestra en la gráfica Vc, en donde se aprecia que los límites de la banda central de atenuación corresponden a 137 y 10.84 metros por ciclo -

(m/c.) de longitud de onda aparente. El nivel promedio de atenuación corresponde a -20 decibels y acepta 28.86% del ruido incoherente - total.

V. Gráfica de la respuesta del modelo de una cuerda



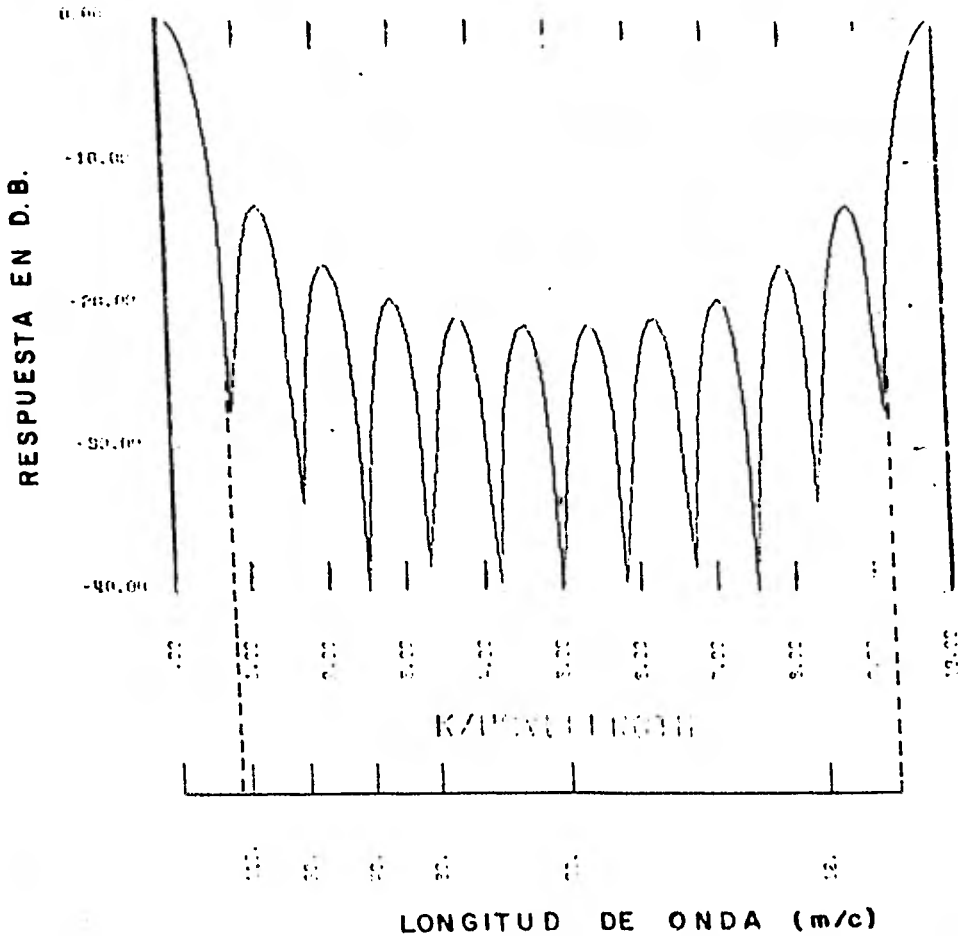
M = 12 Detectores

 $\lambda_{or \text{ máx}} = 137 \text{ m/c}$ $\Delta X = 10 \text{ metros}$ $\lambda_{or \text{ mín}} = 10.48 \text{ m/c}$

C = 1 cuerda

R. I. = 28.87%

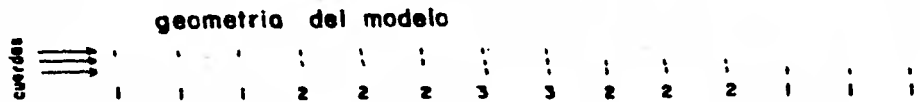
L = 110 metros



Con el objeto de aumentar la atenuación del ruido coherente e incoherente, se diseñaron patrones variando el número de líneas de detectores y espaciamiento entre Estos (Figs. Vd, e, f, g, h, i).

Comparando las gráficas representativas de los diferentes patrones (Figs. Vd, e, f, g, h, i) con la información obtenida de campo, se determina el patrón óptimo.

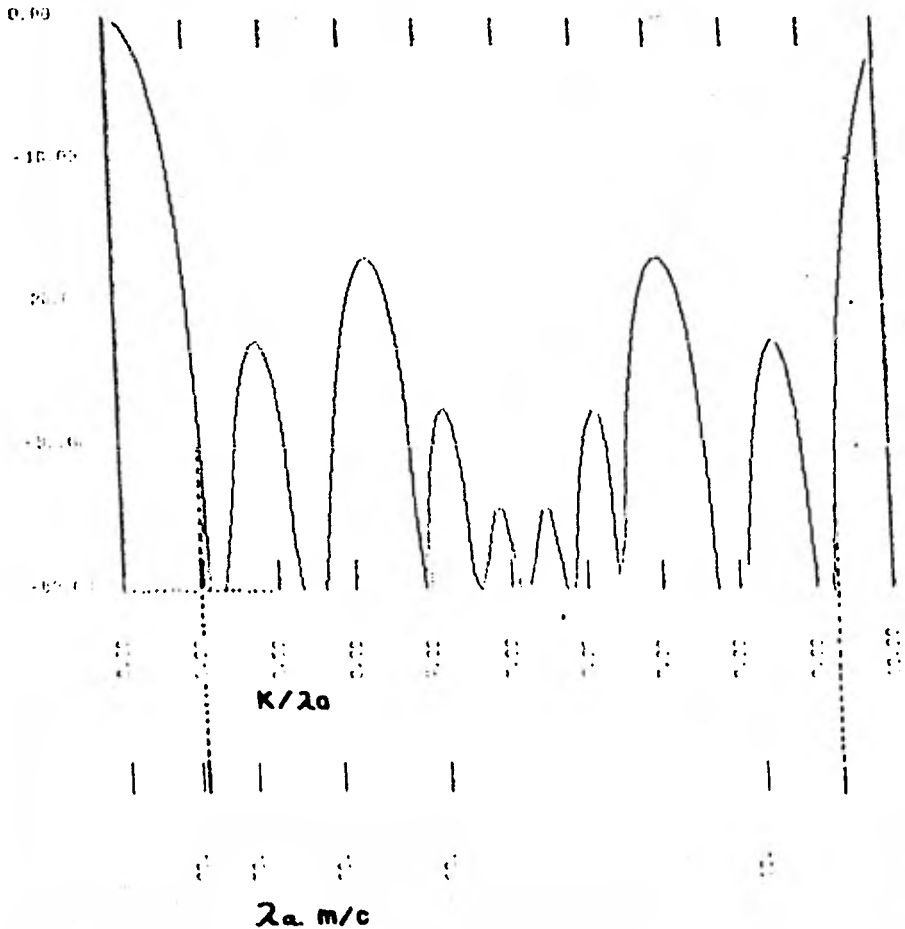
Fig. V. d.

N^o de Cuerdas = 3 $\lambda_{ar \max} = 89 \text{ m/c}$ N^o de Detectorer por Cuerda = 8 $\lambda_{ar \min} = 8.91 \text{ m/c}$ N^o total de Detectores = 24

R.I. = 20.41%

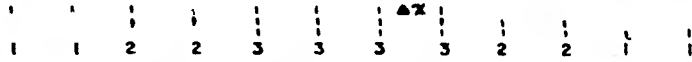
 $\Delta X = 8 \text{ m.}$ $L = 104 \text{ m.}$

RESPUESTA EN D.B.



V.e

geometria del modelo



Nº de Cuerdas = 3

$\lambda_{ar \max} = 78.26 \text{ m/c}$

Nº de Detectores por Cuerda = 8

$\lambda_{ar \min} = 10.22 \text{ m/c}$

Nº total de Detectores = 24

R.I. = 20.41%

$\Delta X = 9 \text{ m.}$

$L = 99 \text{ m.}$

RESPUESTA EN D.B.

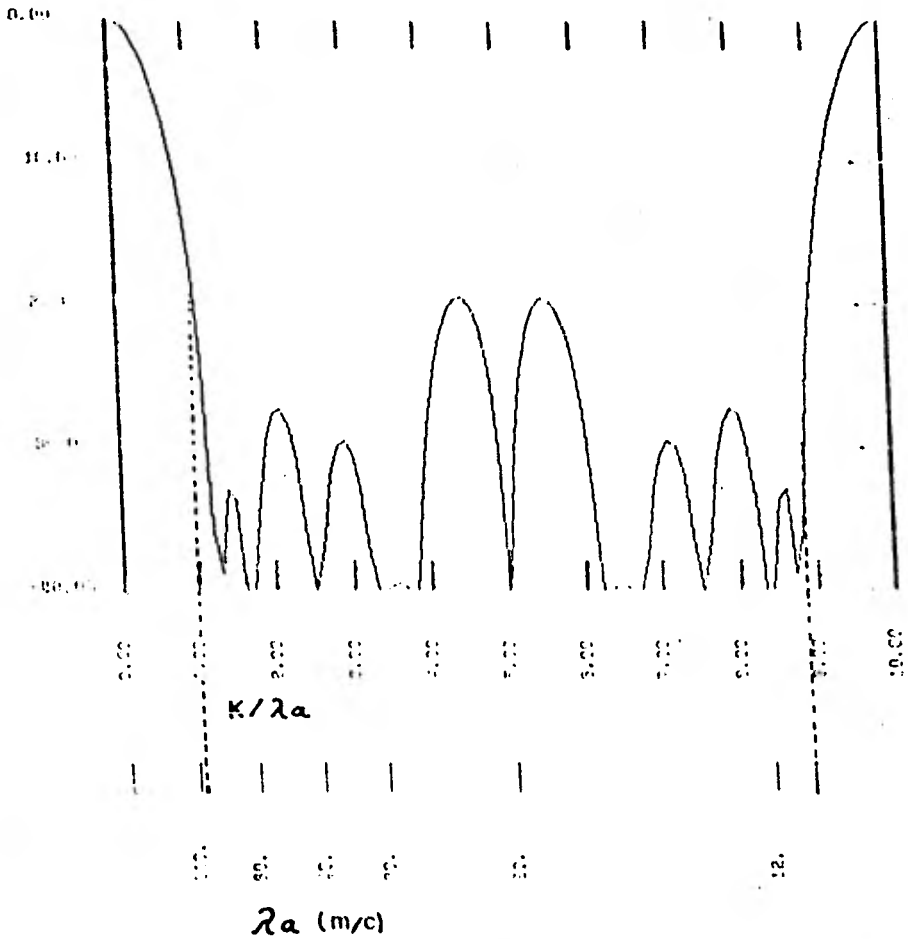


Fig. V.f.

geometria del modelo

| | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | |
| 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 |

Nº de Cuerdas = 3

 $\lambda_{ar\ max} = 80\ m/c$

Nº de Detectores por Cuerda = 9

 $\lambda_{ar\ min} = 8.79\ m/c$

Nº total de Detectores = 27

R. I. = 19.25%

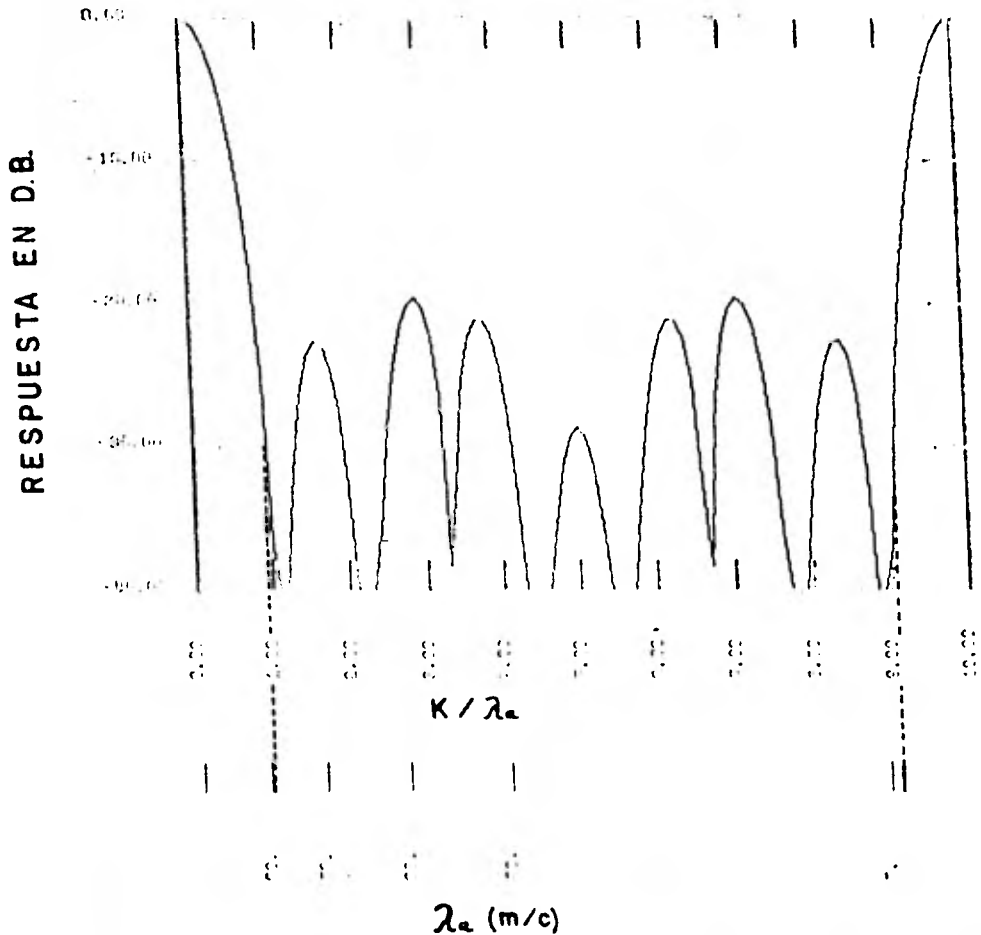
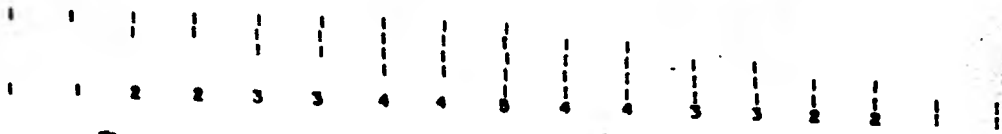
 $\Delta X = 8\ m.$ $L = 112\ m.$ 

Fig. V. 1.

geometria del modelo



No. de Cuerdas = 5

No. de Detectores por cuerda = 9

No. total de detectores = 48

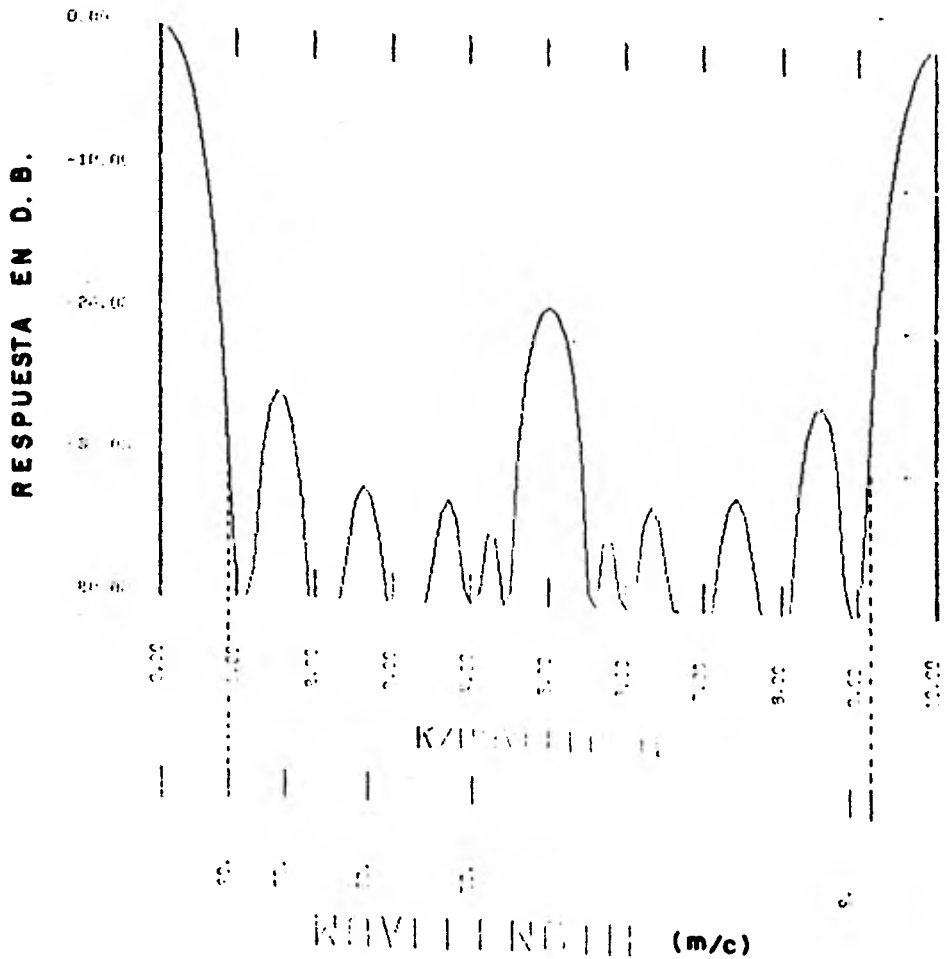
$\Delta X = 8m$.

$\lambda_{ar\ max} = 90\ m/c$

$\lambda_{ar\ min} = 8.79\ m/c$

R.I. = 14.90 %

L = 128 m



El patrón óptimo es aquel cuya banda de atenuación cubre las longitudes de onda de todos los ruidos observados y que permita un alto nivel de atenuación en dicho rango.

En la gráfica Vb, se puede observar que las máximas longitudes de onda de los ruidos corresponden a los eventos d y f, cuyas longitudes de onda aparente son de 125 a 127 m/c, estos ruidos son causados por las ondas refractadas en el contacto de la capa de interperismo y la capa subyacente de velocidad V1, y aparecen en el sismograma como los primeros arribos a tiempos muy cortos, por lo que no se mezclan con la señal de reflexión, por lo cual pueden ser eliminados en el procesado de las secciones sísmológicas mediante un filtro llamado "Mute".

Los eventos de ruidos (E, H, G, C, J, K) que se mezclan con la señal, deben ser eliminados con filtros espaciales.

Los eventos E, H, G y C tienen longitudes de onda altas - cuyos valores varían entre 64 y 73 m/c. y los ruidos que tienen una longitud de onda más pequeña corresponden a los eventos J y K que tienen valores de 12 y 13 m/c. de longitud de onda.

| <u>PRUEBA</u> | <u>Nc</u> | <u>Ndxc</u> | <u>ΔXc</u> | <u>Ntd</u> | <u>ΔX</u> | <u>L</u> | <u>$\lambda_{ar} Mdx$</u> | <u>$\lambda_{ar} Mln$</u> | <u>N.R.I.</u> | <u>FORMA</u> |
|---------------|-----------|-------------|-------------------------------|------------|------------------------------|----------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------|-------------------|
| Vc | 7 | 12 | | 12 | 10 | 110 | 127.50 | 12.00 | 28.87 % | 111111111111 |
| Vd | 3 | 8 | 24 | 24 | 8 | 104 | 89.00 | 8.91 | 20.47 % | 11122233222111 |
| Ve | 3 | 8 | 18 | 24 | 9 | 99 | 78.26 | 10.22 | 20.41 % | 112233332211 |
| Vf | 3 | 9 | 24 | 27 | 8 | 112 | 80.00 | 8.79 | 19.25 % | 111222333222111 |
| Vg | 4 | 9 | 9 | 36 | 9 | 126 | 90.00 | 9.00 | 16.00 % | 112233444332211 |
| Vh | 3 | 10 | 27 | 30 | 9 | 135 | 100.00 | 8.89 | 18.25 % | 1112223333222111 |
| Vi | 5 | 9 | 16 | 45 | 8 | 128 | 90.00 | 8.79 | 14.90 % | 11223344544332211 |

Vi Gráfica donde se muestran los parámetros de los patrones a probar, se indica con: Nc número de cuerdas, Ndc número de detectores por cuerda, ΔXc distancia entre los centros de las cuerdas, Ntd número de detectores del tendido, ΔX distancia entre detectores, L longitud del tendido, $\lambda_{ar} mx.$ longitud de onda de corte alto, $\lambda_{ar} mln.$ longitud de onda de corte bajo, - N.R.I. nivel de ruido incoherente, forma o configuración en planta del tendido optado.

Por lo que el rango de atenuación del filtro deseado debe corresponder a las longitudes de onda de 12 a 73 m/c.

Considerando las características (Tabla Vj) de los diferentes filtros considerados (Figs. Vc, Vs, Vd, Ve, Vf, Vh) y la necesidad de un filtro de atenuación en el rango de 12 a 73 m/c, el filtro óptimo podría ser Vd, Vf ó Vi.

Aunque de estos tres filtros el que tiene mayor nivel de atenuación de ruido coherente e incoherente es el Vi, es conveniente escoger dos o tres filtros como los óptimos, para probarlos en el campo (insitu) y elegir el que registre un sismograma de campo de mejor calidad.

CONCLUSIONES Y RESULTADOS

A medida que se van localizando y explotando los yacimientos de hidrocarburos, cada vez es más difícil la localización y extracción de los hidrocarburos, así que día con día se tienen que mejorar estos métodos. Esta tesis trata la teoría del método para la obtención de las señales sísmicas en el campo, eliminando el ruido coherente, para mejorar en los sismogramas de campo la relación señal-ruido,

Mediante el uso de detectores múltiples se puede eliminar al efectuarse el registro, el ruido coherente e incoherente. El método funciona para los parámetros específicos del ruido en el área, donde se efectuó la prueba de ruidos.

En un área se pueden encontrar situaciones geológicas cambiantes y por lo tanto, el filtro del patrón de sismodetectores no ajustará a las diferentes condiciones geológicas del área por lo que se tienen que escoger varias zonas de prueba dentro de una área, se debe procurar establecer zonas geológicamente homogéneas dentro del área, para realizar pruebas en cada una de ellas.

Si no se hace lo anterior, podemos efectuar pruebas en el área a medida que los resultados de la información no vaya siendo de la calidad esperada.

Es recomendable generalizar el uso de patrones de más de dos cuerdas, a todos los trabajos sísmológicos de reflexión, pues se mejoran considerablemente los sismogramas de campo. Es conveniente dedicar el tiempo necesario para obtener la buena calidad en los sismogramas, pues debemos tener en cuenta que si la información de campo es de calidad pobre, ningún otro proceso o procedimiento podrá mejorar la calidad y sólo lo podemos llegar a obtener secciones interpretables cuando se ha hecho un procesado fino o trabajos sísmológicos con buena calidad de información, para poder localizar estructuras favorables a la acumulación de hidrocarburos.

DOBRIK, M.B., P.L. LAURENCE AND RAYMOND SENGBUSH.- *Surface and Near-Surface Waves in the Delaware Basin, Geophysics, Vol. 19, PP. 695-715, 1954.*

PEACOCK, R.B. AND D.M. NASH, Jr.- *Thomping Techniques Using Full Spread of Geophones, Geophysics, Vol. 27, PP 952-965, 1962.*

McKAY, H.E. - *Review of Pattern Shooting, Geophysics, Vol. 19 PP, 420-437, 1954.*

LOMBARDI, L.V.- *Notes on the Use of Multiple Geophones, Geophysics, Vol. - 20, PP. 539-565, 1955.*

REYNOLDS, F.F.- *Design Factors for Multiple Arrays of Geophones and Shot Holes. Oil Gas J., Apr. 29, 1954, PP 145-146, 1954.*

DOBRIK M.- *Introduction to Geophysical Prospecting, Third Edition McGraw Hill.*

PARR, J.O. Jr. and WAYNE, W.H.- *A New Method of Pattern Shooting Geophysics, 1955, Vol. XX, No. 3.*

SMITH MARK K.- *Noise Analysis and Multiple Seismometer Theory, Geophysics, 1956, Vol. XX1, No. 2.*

GARCIA ROJAS ANTONIO.- *Notas sobre el Empleo de Sismodetectores Múltiples 1a. Parte, Boletín Asociación Mexicana de Geofísicos de Exploración, Vol. III, No. 2, 1962.*

GARCIA ROJAS ANTONIO, BASURTO G. JESUS.- *Notas sobre el Empleo de Sismodetectores Múltiples 2a. Parte, Boletín AMGE, Vol. IV, No. 2, 1963.*

GARCIA ROJAS ANTONIO, OCHOA E. RAUL, DEL VALLE TOLEDO E., BASURTO G. JESUS, *Algunas Perturbaciones que Oscurecen los Registros Sismológicos de Reflexión, Boletín AMGE, Vol. IV, No. 2, 1963.*

HERNANDEZ MOEDANO MARIANO.- *Determinación de la Cubierta Óptima de Sismodetectores Múltiples, Boletín AMGE, Vol. V, No. 2, 1964.*

COFFIN OTERO JOSE.- *Aplicación de Sismos Múltiples en Áreas Difíciles de la Zona Noroeste, Boletín AMGE Vol. V, No. 2, 1962.*

LIMON ANTONIO C.- *Aspectos sobre el Uso de Detectores Múltiples, Boletín AMGE, Vol. II, No. 1, 1961.*

CALCANEO VIZCARRA GABRIEL.- *Filtrado Espectral y Técnicas para la Eliminación de Ondas Superficiales en la Prospección Sísmica de Reflexión, Tesis Profesional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Instituto Politécnico Nacional, 1975.*

DANIEL GUTIERREZ.- *Características Teóricas de Algunos Tipos de Ruido y Método para su Reconocimiento y Eliminación. Boletín AMGE, Vol. V, No. 1, 1964.*

BASURTO G. JESUS.- *Uso de Detectores Múltiples en la Exploración Sísmológica, Boletín AMGE, Vol. V, No. 3, 1964.*

JOSE COFFINO O. Y JUAN M. SARABIA.- Método Gráfico para el Cálculo de Tendidos en la Aplicación de Sismos Múltiples y/o Pozos Múltiples en Áreas Difíciles.

F. VAN GOOR.- Fundamentos de Exploración Sísmica por el Método de Reflexión, Boletín AMGE, Vol. III, No.4, 1962.

DANIEL GUTIERREZ G. Y ANTONIO GARCIA ROJAS.- La Transformada de Fourier y su Aplicación en el Estudio de Equipos Sísmológicos.

ENZO LEVI.- Elementos de Mecánica del Medio Continuo, LIMUSA 1975.

ELMORE EHARD.- Physics of Waves, International Student Edition, McGraw Hill.

HWEI P. HSU.- Análisis de Fourier, Fondo Educativo Interamericano, S.A.

FIG. 6 PRUEBA DE CAMPO DE UN ANALISIS DE RUIDO

FUENTE ENERGIA VIBROSONO

DISTANCIA ENTRE DETECTORES 12 METROS

