

153  
2y



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**ANALISIS Y DETECCION DE SEÑALES SISMICAS  
CON MODELOS TIEMPO-FRECUENCIA**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
AREA ELECTRONICA**

**P R E S E N T A :  
CARLOS JOEL RIVERO MORENO**



**DIRECTOR DE TESIS: DR. BONIS ESCALANTE RAMIREZ**

**MEXICO, D. F.**

**1996**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



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.

**ESTA TESIS ESTA DEDICADA A:**

**Mis Padres:**

**Arq. Joel Gabriel Rivero Toscana  
Dra. Margarita Moreno Murillo**

**Mis Hermanas:**

**Mónica, Avri, Gabriela, y Karina**

**Mis Abuelas:**

**Lilia Toscana Soto  
Bertha Murillo Infante**

**Mi Novia:**

**Ing. Enaida Huerta Abraham**

**LAXMIY**

**IntelliSys**

**Dr. Boris Escalante Ramirez**

**Dr. Alberto Siniego**

**Ing. Miguel A. Torres-Orozco Bermeo**

**A la Universidad Nacional Autónoma de México**

**Y a todos Aquellos que contribuyeron en la realización de esta Tesis.**

# ANÁLISIS Y DETECCIÓN DE SEÑALES SÍSMICAS CON MODELOS TIEMPO-FRECUENCIA

## INDICE

	Página
<b>RESUMEN</b> .....	2
<b>INTRODUCCION</b> .....	3
<b>CAPITULO 1. SEÑALES SÍSMICAS</b> .....	6
1.1 Origen de las Señales Sísmicas .....	6
1.2 Naturaleza de las Señales Sísmicas .....	6
1.3 Patrón de las Señales Sísmicas .....	11
1.4 Magnitud y Energía de un Sismo .....	13
1.5 Registro de las Señales Sísmicas .....	17
<b>CAPITULO 2. DISTRIBUCIONES TIEMPO-FRECUENCIA</b> .....	21
2.1 Limitaciones del Análisis de Fourier .....	21
2.1.1 Dominios del Tiempo y de la Frecuencia .....	21
2.1.2 Frecuencia Instantánea y Retraso de Grupo .....	22
2.2 Representaciones Tiempo-Frecuencia .....	23
2.3 Descomposiciones Lineales de Señales .....	23
2.4 La Representación Short-Time Fourier Transform .....	24
2.4.1 Definición y Expresiones .....	24
2.4.2 Interpretación de Filtrado .....	24
2.4.3 Resolución Tiempo-Frecuencia .....	26
2.5 La Distribución de Wigner-Ville .....	28
2.5.1 Correlación .....	28
2.5.2 Representaciones Tiempo-Frecuencia de Energía .....	27
2.5.3 El Principio de Superposición Cuadrática .....	27
2.5.4 Distribución Wigner-Ville y Función Ambigüity .....	28
2.5.5 Propiedades de la distribución Wigner-Ville .....	29
2.5.6 Términos de Interferencia .....	29
2.5.7 La Clase Cohen .....	30
2.5.8 La Distribución SPWV .....	32
2.6 Análisis de Señales en el Plano Tiempo-Frecuencia .....	33
<b>CAPITULO 3. ALGORITMO DEL SISTEMA DE ALARMA SÍSMICA ACTUAL</b> .....	38
<b>CAPITULO 4. ALGORITMO PROPUESTO</b> .....	42
4.1 Introducción .....	42
4.2 Análisis de Señales Sísmicas con la Distribución Wigner-Ville .....	43
4.3 Uso de la Frecuencia Instantánea .....	48
4.4 Derivada de la Frecuencia Instantánea .....	62
4.5 Análisis con la Energía de la Señal .....	63
4.6 Derivada de la Energía Acumulada Filtrada .....	64
4.7 Cálculo del Umbral de la FCED .....	68
4.8 Sistema Completo en Tiempo Real .....	69
4.9 Simulación del Algoritmo .....	74
<b>CAPITULO 5. RESULTADOS Y EVALUACION</b> .....	78
<b>CONCLUSIONES</b> .....	87
<b>ANEXOS</b> .....	89
Anexo 1 .....	89
Anexo 2 .....	114
Anexo 3 .....	116
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	117

## RESUMEN

Debido a que se requiere incrementar la confiabilidad en la detección de sismos, tal como es el caso del Sistema de Alerta Sísmica (SAS) que opera actualmente, para evitar fallos que generen falsas alarmas y tengan repercusiones en la población, se hace un análisis de las señales sísmicas para obtener un mayor número de parámetros que las caractericen.

El presente trabajo inicia con la revisión del patrón de una señal sísmica; después se hace una revisión de las representaciones Tiempo-Frecuencia; posteriormente, se muestra la operación del algoritmo del Sistema de Alerta Sísmica actual. Seguido de esto, se propone un algoritmo para la detección de señales sísmicas comenzando con un análisis de éstas por medio de la distribución smoothed pseudo Wigner-Ville (SPWVD) para después obtener información de la frecuencia instantánea (IF por sus siglas en inglés) de la señal. Basándose en el comportamiento Tiempo-Frecuencia se caracteriza a la señal sísmica para su detección, de tal manera que se puede hacer una discriminación entre señales sísmicas y no-sísmicas. Al mismo tiempo, se analiza la envolvente de la energía instantánea de la señal, y a partir de su comportamiento se estima un umbral para determinar las transiciones de la señal a través del tiempo, y así rastrear su patrón como señal sísmica. Con ambos comportamientos, frecuencia y energía, y al considerar la magnitud de la señal sísmica, se caracteriza a la señal para finalmente activar una alarma sísmica.

Estas dos partes del algoritmo propuesto, frecuencia y energía, se procesan de manera independiente y al mismo tiempo. El análisis en frecuencia es para la detección de la señal y el análisis en energía para el reconocimiento del patrón de la señal. El algoritmo tiene la característica de poder ser implantado en *tiempo-real* para que opere la alerta sísmica en las estaciones de Guerrero, México, con una mejor confiabilidad. El análisis de la señal y el algoritmo se basa en sismos generados en esta zona por ser la de mayor actividad sísmica en nuestro País. El presente algoritmo se simula en MatLab® con sismos registrados en Guerrero durante el año de 1994. A través de estos programas se pudo analizar la señal sísmica y observar los resultados arrojados por el algoritmo.

## **INTRODUCCION**

El presente tratado tiene dos objetivos generales:

- El análisis de las señales sísmicas aplicando distribuciones Tiempo-Frecuencia, y de esta manera, encontrar un patrón del contenido espectral de las señales, con el fin de obtener un parámetro adicional que caracterice la señal sísmica adquirida por los sismómetros.
- Una vez caracterizada la señal sísmica con su comportamiento tiempo-frecuencia, implementar un algoritmo para la detección de señales sísmicas basado en esta información.

Como objetivos secundarios tenemos:

- El análisis de la energía de la señal, para estimar las diferentes transiciones a lo largo de la señal sísmica.
- La detección de la señal sísmica arriba de cierto nivel de energía para la activación de una alerta sísmica dirigida a la población en general. Este nivel de energía se deriva en la determinación de magnitud de sismos mayores o igual a 6.
- El algoritmo propuesto debe ser capaz de implantarse en tiempo real.
- La confiabilidad del algoritmo debe ser bastante buena de tal manera que sea mayor a la confiabilidad del algoritmo que opera la alarma sísmica de la Ciudad de México actualmente.

La justificación de la presente se basa en que el actual algoritmo para la detección de sismos, conocido como Sistema de Alarma Sísmica (SAS), tiene que ser mejorado en su confiabilidad, debido a que fallos en la misma repercuten en la población. La confiabilidad en la detección aumenta teniendo un mayor número de parámetros que caractericen la señal sísmica.

El SAS es un proyecto de telemetría sísmica que permite detectar eventos sísmicos en la costa de Guerrero durante su ocurrencia y enviar información acerca de su magnitud por medio de radio-comunicación hasta la Ciudad de México. En el Centro de Control del SAS automáticamente se genera y difunde una señal de radio alerta, antes de que el sismo llegue a la Ciudad de México, para que la población pueda tomar medidas preventivas y de mitigación.

Este sistema permite informar de la ocurrencia de sismos fuertes en la costa de Guerrero, aproximadamente 50 segundos antes de que sus efectos arriben a la Ciudad de México. Este proyecto fue desarrollado por el Centro de Instrumentación y Registro Sísmico, A.C. (CIRES) de la Fundación Javier Barros Sierra (FJBS) y patrocinado por el Departamento del Distrito Federal (DDF) y entró en operación el 18 de Agosto de 1991. A partir de esa fecha el SAS ha sido objeto de un programa continuo de evaluación y perfeccionamiento.

Durante los sismos del 14 de Mayo de 1993 el SAS generó señales de alerta con 50 segs. de anticipación a la llegada de los efectos sísmicos al D.F. Las autoridades del DDF anunciaron la existencia del SAS al público dada la importancia social de este proyecto, por su característica de poder prevenir a la población de la inminente ocurrencia de un sismo de gran magnitud en la Ciudad de México.

En el diseño, construcción, instalación y operación de un sistema tecnológico complejo y con un impacto social estratégico, por la difusión que ha tenido y por lo que espera la gente de este, el poder aumentar el factor de confiabilidad en el sistema es de vital importancia. La repercusión que puede tener en la población una falla como la ocurrida el domingo 24 de Octubre de 1993 obliga a una revisión exhaustiva del sistema en sus puntos críticos para aumentar su confiabilidad.

El peligro de un terremoto varía dramáticamente con su ubicación en el mundo, y las prácticas de construcción deficientes frecuentemente acentúan el daño del terremoto. Los países que están alrededor del océano Pacífico tienden a tener sismos intensos con mayor frecuencia, resultando en un daño potencial mayor. El terremoto ocurrido en la Ciudad de México el 19 de Septiembre de 1985 es un ejemplo de un evento en una ciudad con estándares moderados de construcción y que está localizada cerca de una zona de frecuentes terremotos: la costa de Guerrero, México. A pesar de que la Ciudad de México está a 250 Km de la zona de falla, siendo ésta la falla de San Andrés, cuando menos 7000 personas perdieron su vida, principalmente debido al derrumbe de construcciones. Las condiciones del subsuelo bajo el cual las construcciones se apoyan, las prácticas de construcción en la ciudad, y la inusual larga duración de la ruptura en la falla, han sido motivo de culpa para la catástrofe.

El tratar de evitar catástrofes como esta es otra de las causas para la implantación de un algoritmo eficiente con alta confiabilidad derivado de un análisis de los parámetros propios de la señal sísmica.

Debido a que el principal objetivo de este trabajo es la caracterización de señales sísmicas para su detección, de modo que finalmente se pueda construir una alerta sísmica que se active sobre una magnitud de 6.0, la presente se divide en: una revisión del patrón en el tiempo de las señales sísmicas; posteriormente, se hace un repaso de las distribuciones Tiempo-Frecuencia para entender sus fundamentos, ya que son la herramienta de análisis; después se presenta el algoritmo actual en el que se basa el SAS; seguido de esto, se presenta el algoritmo propuesto para que finalmente se evalúe y se obtenga así su grado de confiabilidad. Claro está que los resultados finales no podrán apreciarse hasta que el algoritmo esté trabajando en las estaciones de campo de la costa de Guerrero, y hasta entonces se tendrá la evaluación real del mismo.

El capítulo 1 es un repaso del comportamiento y patrón de las señales sísmicas, así como su origen, y el cálculo de su magnitud. Comienza con una revisión de lo que son placas tectónicas, fallas, epicentro y foco de un sismo. Después se introducen los conceptos de ondas P, S, R y L, y su transmisión en forma mecánica a través de la corteza terrestre. Posteriormente se presenta el oscilograma y características del mismo que determinan a una señal sísmica. A continuación de lo anterior se definen la magnitud, amplitud, intensidad y energía de un sismo, así como las escalas de magnitud y el cálculo de las mismas. Finalmente, se comenta como se hace el registro

de las señales sísmicas a través de sísmógrafos y se da una breve explicación de ellos.

El capítulo 2 trata lo principal relacionado con las distribuciones Tiempo-Frecuencia, haciendo mención de sus propiedades y el manejo de su base teórica sobre la que se fundamentan. También se menciona la necesidad de tener una buena resolución tiempo-frecuencia en estas distribuciones y cuáles son aquellas que pueden proporcionarla. Esta es la base teórica sobre la cual se desarrolla el algoritmo.

El capítulo 3 trata lo relacionado al algoritmo que actualmente trabaja en la costa de Guerrero, México, como Sistema de Alerta Sísmica (SAS).

El capítulo 4 trata el desarrollo del algoritmo propuesto, analizando y dando fundamentos a cada una de sus partes. Además, se hace la estimación teórica del umbral en energía para la toma de decisiones, evaluando el algoritmo propuesto al comparar la teoría con la experimentación y así darle soporte teórico al mismo. Finalmente, se analiza el algoritmo completo que está diseñado para poder ser implantado en tiempo-real.

El capítulo 5 muestra los resultados de procesar varias señales sísmicas con el algoritmo propuesto y se evalúan con el desarrollo teórico del capítulo 4.



**CAPITULO 1**  
**SEÑALES SISMICAS**

## CAPITULO 1. SEÑALES SISMICAS

### 1.1 Origen de las Señales Sísmicas

La parte superior de la Tierra, llamada litósfera, está constituida por varios bloques amplios y bastante estables llamados *placas*, siendo adyacentes unas a otras y compuestas de material rígido (roca). Debido a que en su conjunto forman la estructura de la corteza terrestre, a manera de un gran rompecabezas, reciben el nombre de *placas tectónicas*.

Cada placa se extiende a una profundidad de 90 kilómetros aproximadamente; la placa se mueve horizontalmente en relación a las capas vecinas, sobre una capa de rocas más viscosas que se encuentran inmediatamente debajo.

En el borde de una placa, donde existe el contacto entre placas adyacentes, actúan grandes esfuerzos deformantes (o *tectónicos*) sobre las rocas, causando cambios físicos e incluso químicos en ellas. En estos bordes de las placas la estructura geológica de la Tierra es la más afectada por las fuerzas de reacción entre placas, y es aquí donde tienen lugar los cambios geológicos masivos y radicales.

Estos cambios en la estructura de la roca debido al deslizamiento entre placas reciben el nombre de *fallas*, y a lo largo de ellas ocurren muchos terremotos debido a dicho desplazamiento de las capas de rocas, ya sea horizontal o verticalmente.

Los movimientos en las fallas pueden ser deslizamientos lentos, que no producen temblor del suelo, o una ruptura repentina, que provoca vibraciones perceptibles, es decir, un terremoto. Ya sea en la tierra o en los océanos, los desplazamientos de las fallas pueden clasificarse en tres tipos como se muestra en la figura 1.

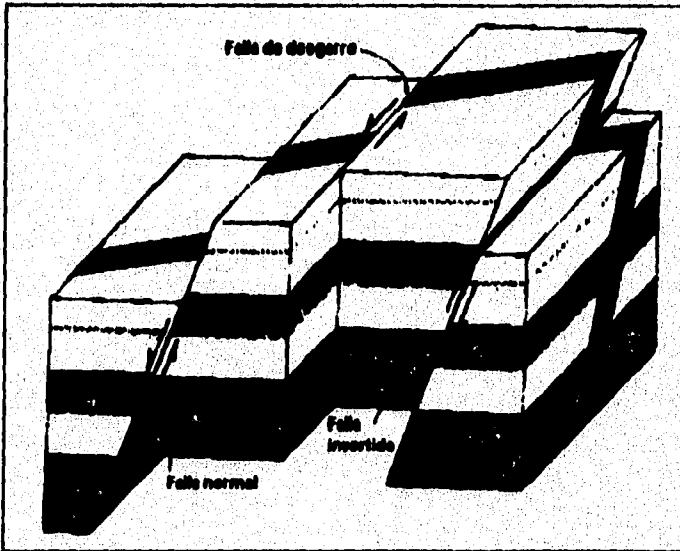


Figura 1.

El plano de la falla corta la superficie horizontal del suelo a lo largo de una línea cuya dirección medida desde el norte recibe el nombre de traza de la falla. El plano de la falla normalmente no es vertical, sino que se inclina con un cierto ángulo hacia el interior de la Tierra. Cuando la roca del lado de la falla que está encima de la fractura se desplaza hacia abajo, quedando más baja que el otro lado, tenemos una *falla normal*. Sin embargo, cuando la pared de la falla, que está por encima de la fractura, se desplaza hacia arriba, tenemos una *falla invertida*. Ambas fallas, normales e invertidas, producen movimientos verticales. Por otro lado, hay fallas que pueden originar solamente movimientos horizontales en la dirección de la falla. Tales fallas se conocen como fallas transcurrentes o *fallas de desgarro*.

Cuando existe una ruptura en el material deformado y fracturado a lo largo de la falla, el suelo empieza a temblar. Esta ruptura empieza en el *hipocentro* o *foco del terremoto* dentro de la corteza y se propaga en todas las direcciones en el plano de la falla, aunque el borde de la ruptura no se propaga uniformemente, debido a que las rocas de la corteza varían en sus propiedades físicas de un lugar a otro. En la figura 2 podemos apreciar la localización del epicentro y del hipocentro de una ruptura entre dos fallas. El *epicentro* es el punto en la superficie de la Tierra situado directamente sobre el foco.

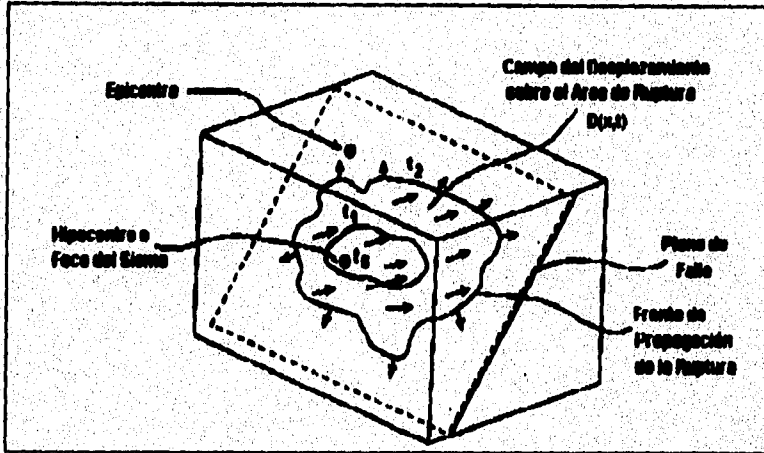


Figura 2.

La longitud de la ruptura de falla depende de la variación de la deformación de la roca por la región. Durante la ruptura, las orillas de la falla rozan una contra otra de forma que parte de la energía se gasta por las fuerzas de fricción y en la trituración de la roca. Las superficies se calientan localmente. Al mismo tiempo, se generan ondas sísmicas por el rebote de las orillas adyacentes de la falla en la superficie de ruptura así como por el rozamiento y la trituración de las rocas. La ruptura continuará hasta que alcance la zona en que la roca no esté suficientemente deformada para permitir que se extienda más. Entonces la ruptura se detiene.

Por medio de este proceso desde que se genera la ruptura en el hipocentro hasta que se detiene, se generan las *ondas sísmicas* que producen el movimiento de la superficie terrestre. El resultado final es un sismo que puede ir desde un ligero temblor hasta un intenso terremoto.

## 1.2 Naturaleza de las Señales Sísmicas

En un sismo, las fuerzas liberadas en la tierra por dislocación de fallas dan lugar a ondas mecánicas, es decir, vibraciones transmitidas por la tierra y disipadas por divergencia y absorción (amortiguamiento por rozamiento). Las ondas sísmicas se generan en las placas deslizando y se transmiten como ondas *másicas* hasta la superficie de la tierra, una vez allí se propagan como ondas *superficiales* [1].

Dentro de este comportamiento, sólo tres tipos básicos de ondas elásticas se generan en un sismo. De los tres tipos sólo dos se propagan en el interior de las rocas [2], las cuales corresponden a las ondas *másicas* o de *cuerpo*. El primer tipo de éstas son las ondas *primarias (P)*, primary waves, o de *compresión*. Las ondas *P* son longitudinales y entrañan variaciones de volumen, esto es, a medida que se propaga,

comprime y dilata alternativamente el material de la roca a lo largo de la dirección de propagación de la onda. (Véase figura 3a).

El segundo tipo son las *ondas secundarias (S)*, secondary waves, o de deformación. Las ondas S son transversales, se propagan sin cambio de volumen y son análogas a las de las cuerdas vibrantes [1]. Cuando una onda S se propaga, deforma la roca lateralmente en ángulo recto a la dirección de propagación, es decir, la deformación es transversal a la dirección de propagación de la onda [2]. (Véase figura 3b).

La velocidad de las ondas P es superior a la de las de tipo S. Las ondas P tienen el mismo movimiento que el de una onda de sonido, siendo capaces de viajar a través, tanto de rocas sólidas, como de materiales líquidos. Además, debido a su similitud con las ondas sonoras, cuando emergen desde el interior de la Tierra a la superficie, una fracción de ellas puede ser transmitida a la atmósfera como ondas sonoras audibles cuando caen dentro del rango de frecuencias adecuado<sup>1</sup>. Las ondas S, debido a que son transversales, no pueden propagarse en las partes líquidas de la Tierra, tales como los océanos.

La velocidad de ambas ondas sísmicas P y S depende de la profundidad, densidad y propiedades elásticas de las rocas y el suelo a través de los que pasan [2]. Algunos valores típicos de estas velocidades son 7 u 8 [Km/s] para las ondas P y 4 o 5 [Km/s] para las ondas S [2]. Es importante hacer notar que en cualquier sismo la onda P se presenta primero.

El tercer tipo general de ondas sísmicas se denominan ondas superficiales, surface waves, ya que su movimiento está restringido a la superficie del suelo. Estas ondas son equivalentes a las olas que viajan a través de un lago. El movimiento debido a éstas ondas se localiza principalmente en la superficie libre, y según aumenta la profundidad, el desplazamiento debido a ellas disminuye. En este tipo de ondas existen análogas a las anteriores P y S denominadas ondas Rayleigh (R) y ondas Love (L). Las ondas R pueden considerarse como ondas longitudinales al igual que las ondas P, y las ondas L son transversales en forma similar a las ondas S [1].

Las ondas L no tienen desplazamiento vertical; mueven el suelo de lado a lado en un plano horizontal paralelo a la superficie de la Tierra, pero en ángulo recto a la dirección de propagación. El movimiento producido por este tipo de ondas es únicamente oscilatorio. (Véase figura 3c). Con las ondas R, las partículas de material se mueven vertical y horizontalmente en el plano vertical orientado en la dirección en que viajan las ondas, produciendo un movimiento trepidatorio. Como señalan las flechas en la figura 3d, un trozo real de roca se mueve según una elipse (vista lateralmente) cuando pasa la onda R. Las ondas superficiales viajan más despacio que las ondas internas y de las dos ondas superficiales, las ondas Love viajan generalmente más rápido que las ondas Rayleigh [2].

<sup>1</sup> Entre 20 Hz y 20 KHz para el rango de frecuencias audibles.

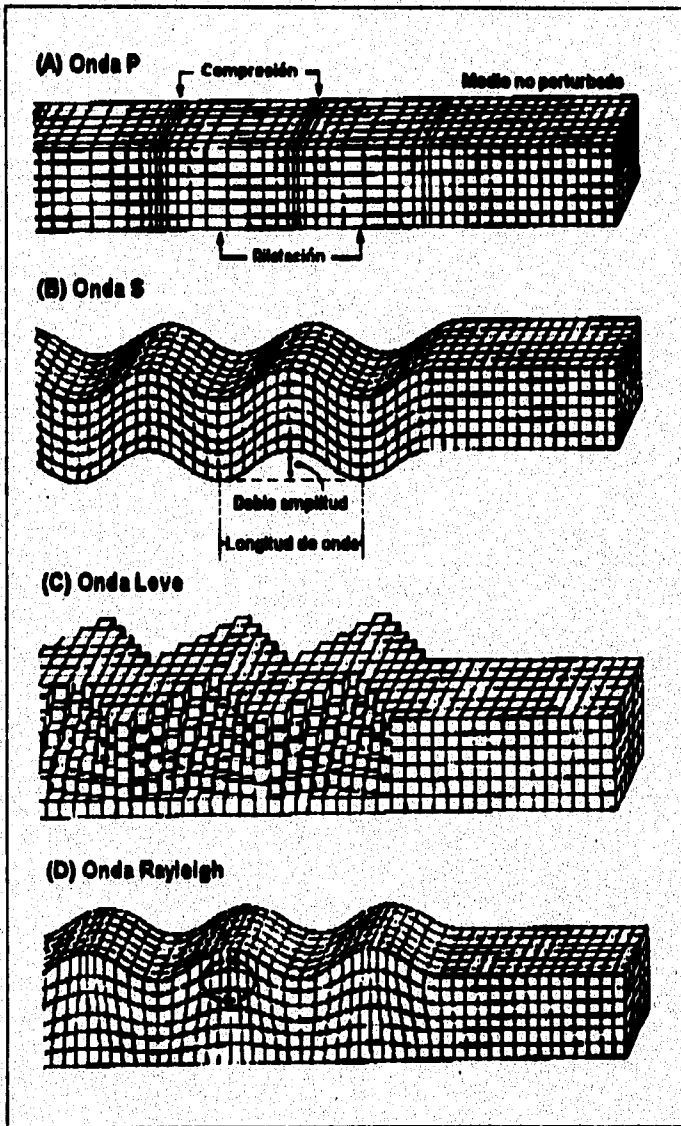


Figura 3.

### 1.3 Patrón de las Señales Sísmicas

Las ondas mecánicas generadas por un sismo tienen cierto comportamiento desde su origen en el interior de la corteza (hipocentro) hasta su llegada a la superficie. Como se describió anteriormente, en el origen de un sismo, se tiene la presencia de ondas *P*, posteriormente de ondas *S*, y finalmente las ondas de superficie que pueden ser *L* o *R*.

Las ondas *P* son de compresión, las ondas *S* de deformación, y las ondas superficiales son de movimiento oscilatorio o trépido para el caso de ondas *L* o *R* respectivamente.

El conjunto de estas ondas forman la señal sísmica. Entonces, una señal sísmica es aquella señal presente en la corteza terrestre que, conforme transcurre el tiempo, tiene tres etapas a partir del reposo: onda *P*, onda *S* y ondas de superficie (*L* o *R*), tal como se muestra en la figura 4, en donde podemos observar el oscilograma de una señal sísmica completa.

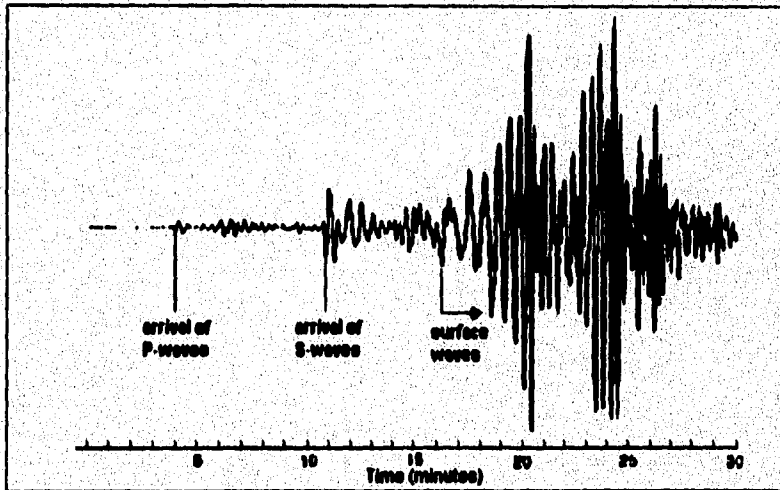


Figura 4.

Mucho del conocimiento acerca de la estructura interna de la Tierra se ha obtenido a través de la comparación entre oscilogramas registrados en diversas regiones y de diversos sismos, analizándolos en términos de propiedades conocidas de las ondas.

El oscilograma de la señal sísmica representa la aceleración de la tierra en función del tiempo, obtenida a través de un acelerómetro que puede estar algunos kilómetros del epicentro. Las unidades son en porcentaje de la gravedad *g* del lugar en que es sensada la señal. Comúnmente se manejan las unidades de  $[cm/s^2]$ .

Las señales sísmicas son sensadas en tres componentes ortonormales designadas norte (N), este (E) y vertical (V). Estas componentes o ejes definen un sistema de

referencia cartesiano, tal y como se representan en la figura 5. El oscilograma corresponde a un temblor originado en la costa de Guerrero, México. También se muestra los dos tipos principales de ondas sísmicas: la onda *P* que aparece en el interior de la Tierra, la onda *S* que representa el inicio del sismo, debido a que le siguen las ondas de superficie, momento en que el temblor se siente en la superficie.

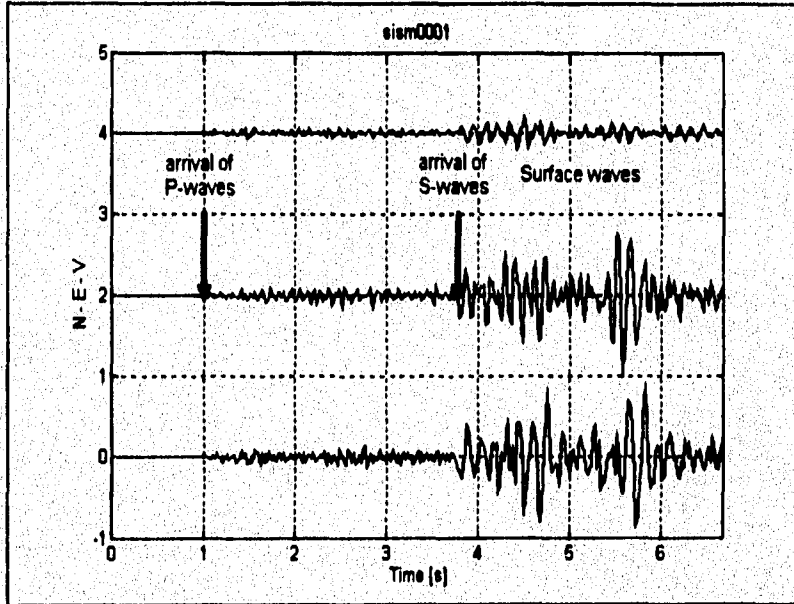


Figura 5.

Como se mencionó, las variables *N*, *E*, y *V* se refieren a las tres componentes direccionales de la señal medidas por el instrumento, siendo éstas ortogonales entre sí. Se designan norte-sur (*N*), este-oeste (*E*) y vertical (*V*), aunque los sensores no necesariamente tienen que estar alineados en estas direcciones. Por ejemplo, el instrumento puede estar alineado paralelamente a la falla. Las componentes *N* y *E* representan las direcciones horizontales del movimiento en la superficie terrestre, mientras que la componente *V* se refiere al movimiento en la dirección vertical.

De acuerdo con esto, las ondas superficiales Love (*L*) producen un movimiento oscilatorio extendiéndose solo en las componentes horizontales *N* y *E*, mientras que, las ondas superficiales Rayleigh (*R*) producen un movimiento trepidatorio que se extiende a lo largo de las componentes horizontal y vertical *N*, *E* y *V*.

Debido a que la señal sísmica es obtenida por un instrumento con tres sensores, uno por cada componente direccional, la señal puede ser representada como un vector con tres componentes:



$$\hat{x}(t) = n(t)\hat{N} + e(t)\hat{E} + v(t)\hat{V}$$

En donde cada componente tiene los tipos de ondas P, S, y, L o R.  
 Cabe mencionar que las señales sísmicas son señales estocásticas

#### 1.4 Magnitud y Energía de un Sismo

La intensidad de un sismo es un índice que indica el tamaño de un sismo. Este índice está directamente relacionado con la cantidad de energía liberada durante el sismo. Adicionalmente, la magnitud de un sismo es una escala que representa la intensidad del sismo. Por esta razón, los conceptos de intensidad, magnitud, y energía de un sismo, se manejan en forma conjunta, para obtener una medida general del sismo.

La *intensidad* de un sismo se mide por el grado de daño a las construcciones del hombre, la cantidad de perturbaciones en la superficie del suelo, el alcance de la reacción animal en la sacudida, y los cambios físicos que se pueden producir en los ecosistemas.

Para el caso en que se requiere comparar las intensidades de los terremotos en todo el mundo, es necesario tener una medida que no dependa, como el caso de la intensidad, de la densidad de población y del tipo de construcción de la zona en que ocurre el sismo. Se requiere una escala estrictamente cuantitativa, que pueda ser aplicada a sismos ocurridos en regiones habitadas o no habitadas, para comparar el tamaño relativo de los sismos. Esta escala recibe el nombre de *magnitud sísmica*.

Una magnitud desarrollada para distinguir el tamaño de un terremoto, fue la escala totalmente instrumental propuesta por Charles Richter en 1935 en California, USA. De ahí su nombre a la escala que ha sido utilizada con mayor frecuencia para determinar la magnitud de un sismo: la escala de Richter.

El término de instrumental se refiere a que la escala fue definida en base a un instrumento específico, es decir, a un sismógrafo que registra las amplitudes de las ondas de un sismo, siendo éste el instrumento estándar o patrón para la definición de la escala Richter.

Como el tamaño de los terremotos varía enormemente, las amplitudes de las ondas difieren en factores de miles de unos terremotos a otros. Por esto, es conveniente reducir el rango de amplitudes medidas sobre los sismogramas mediante algún método matemático, para poderlas agrupar dentro de la escala. Richter definió la magnitud de un terremoto como el logaritmo en base diez de la amplitud máxima de la onda sísmica medida en milésimas de milímetro, registrada en un sismógrafo patrón localizado a una distancia de 100 Km del epicentro del terremoto. Esto significa que siempre que la magnitud aumenta en una unidad, la amplitud de las ondas sísmicas aumenta 10 veces.

El sismógrafo utilizado como patrón para la determinación de la magnitud de sismos locales es del tipo *Wood-Anderson*. Como los focos sísmicos (hipocentros) pueden estar colocados a cualquier distancia de las estaciones, Richter desarrolló un método para tener en cuenta la atenuación con la distancia epicentral cuando se calcula la

magnitud Richter de un terremoto. Este procedimiento para el cálculo de la magnitud Richter se presenta gráficamente en la figura 6.

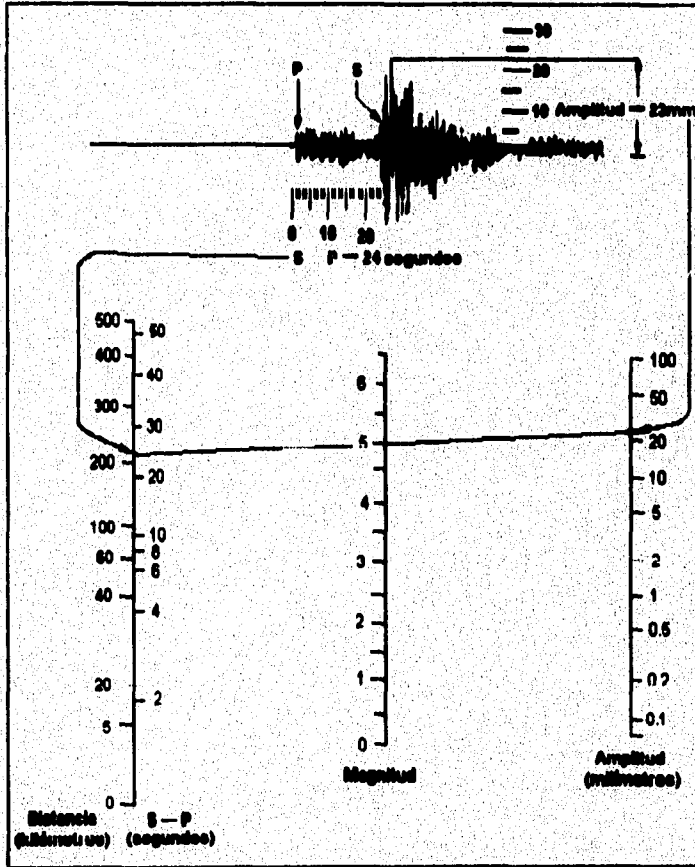


Figura 6.

La magnitud Richter se denomina también *magnitud local* debido a que la definición de su escala se restringe a terremotos de la parte sur de California, USA., donde fue desarrollada. Esto se debe a que la relación distancia-amplitud varía en regiones con diferente estructura de la corteza. La magnitud de Richter o magnitud local se simboliza como  $M_L$ .

Una expresión matemática para la determinación de la magnitud Richter  $M_L$ , basada en las condiciones anteriores, viene dada por [2]:

$$M_L = \log_{10} A + 3 \log_{10} (\delta \Delta t) - 2.92$$

Aquí,  $A$  es la máxima amplitud de la onda sísmica en milímetros [mm], medida directamente del registro gráfico de un sísmógrafo Wood-Anderson.  $\Delta t$  es el intervalo de tiempo entre las ondas  $S$  y  $P$  ( $t_s - t_p$ ) en segundos [s]. Este intervalo de tiempo es proporcional a la distancia del instrumento al epicentro.

En términos generales, los terremotos superficiales alcanzan magnitudes Richter hasta de 5.5 antes de que ocurran daños importantes cerca de la fuente de ondas.

La conveniencia de describir un terremoto por su magnitud, ha requerido que el método se amplie para aplicarlo a otros tipos de sísmógrafos por todo el mundo. Consecuentemente, han aparecido otras escalas de magnitud basadas en diferentes fórmulas. A pesar de esto, las escalas deben ser capaces de calcular una magnitud uniforme, proporcionando prácticamente la misma magnitud para un mismo sismo.

Una nueva cantidad importante utilizada para la medición de sismos, es el *momento sísmico*  $M_0$  [4], la cual es una cantidad física igual al producto del área de la superficie de falla, por la rigidez de la roca, y por el desplazamiento promedio de la falla, medida en [N·m]. Las amplitudes de las ondas sísmicas son directamente proporcionales a los momentos sísmicos. El más pequeño microterremoto detectable tiene un momento sísmico del orden de  $10^5$  [N·m], y los grandes terremotos tienen momentos sísmicos tan grandes como  $10^{23}$  [N·m]. Un microterremoto es aquel en que la magnitud Richter es  $M_L \leq 2.5$ , y rara vez se siente. Los grandes terremotos tienen una magnitud Richter de  $M_L \geq 8.0$ . El terremoto de mayor magnitud Richter registrado hasta la fecha en este siglo fue el ocurrido el 22 de Mayo de 1960 en Chile, con una magnitud Richter de 8.5. Otro caso fue el terremoto ocurrido el 19 de Septiembre de 1985 en México, con magnitud Richter de 8.1 [4].

La mejor manera de cuantificar el tamaño de un terremoto es determinar su momento sísmico,  $M_0$ , ya que es la cantidad física mejor definida con la cual se representa la fuente del sismo debido a que se basa en parámetros estáticos del movimiento total de la falla, teniendo un valor único para cada evento. La escala de la *magnitud del momento*,  $M_W$ , se basa en la escala logarítmica en base diez de los momentos sísmicos para obtener magnitudes numéricas totalmente comparables con escalas de magnitud anteriores, como es el caso de la escala de Richter.

Terremotos fuertes tienen valores de  $M_W \geq 7.0$ , los cuales corresponden a eventos que tienen aproximadamente más de 1 m de desplazamiento en las fallas y que son más de 30 Km de largo. Terremotos enormes tienen valores de  $M_W \geq 8.0$  e involucran grandes fallas con enormes desplazamientos. Para el caso del terremoto más grande registrado instrumentalmente, el ocurrido el 22 de Mayo de 1960 en Chile, la magnitud del momento fue de  $M_W = 9.5$ , en el cual hubo 20 m de desplazamiento en pocos minutos durante la ruptura que se extendió sobre la falla de 1000 Km de largo.

La forma general de todas las escalas de magnitud está dada por [4]:

$$M = \log_{10} (A/T) + f(\Delta, h) + C_s + C_r$$

en donde  $A$  es el desplazamiento de la tierra de la fase en que la escala de la amplitud se basa,  $T$  es el período de la señal,  $f$  es un factor de corrección en función de la distancia epicentral ( $\Delta$ ) y la profundidad del foco ( $h$ ),  $C_s$  es un factor de corrección del efecto de sitio en la estación que registra el sismo, por ejemplo, la variabilidad de la amplificación debido al tipo de roca; y  $C_r$  es un factor de corrección para la región de la fuente. La escala logarítmica es usada porque las amplitudes de las ondas sísmicas varía enormemente. Un incremento de una unidad en la magnitud corresponde a un incremento de 10 en la amplitud (sobre el cero) de desplazamiento de la tierra.

Una medida alternativa del tamaño de un terremoto es la *energía liberada* durante el mismo. Esta energía es el resultado de la energía que proporciona cada partícula de material en la corteza, durante el paso de la onda sísmica. Cada partícula tiene energía potencial, y con el paso de la onda, adquiere energía cinética. La suma de las energías potencial y cinética integradas en el tiempo, se reduce al trabajo, es decir, a la energía liberada. La densidad de energía en un punto a cierta distancia del foco,  $r$ , viene dada por [4]:

$$E = F(r, \rho, c) \left( \frac{A}{T} \right)^2$$

donde  $r$  es la distancia recorrida por la onda,  $\rho$  es la densidad del medio, y  $c$  es la velocidad del tipo de onda ( $P, S$ , y  $L$  o  $R$ ). Nótese que la densidad de energía es proporcional a  $A^2$ . Esta ecuación puede ser reescrita en una forma similar a la ecuación general de las escalas de magnitud:

$$\log_{10} E = \log_{10} F(r, \rho, c) + 2 \log_{10} (A/T)$$

De esta manera, es posible relacionar energía y magnitud si  $F(r, \rho, c)$  se conoce. Gutenberg y Richter encontraron una relación empírica para la magnitud:

$$\log_{10} E = 11.8 + 1.5 M_s$$

En esta última expresión  $M_s$  representa la *magnitud de onda superficial* referida a terremotos de poca profundidad, en los cuales, predominan las ondas superficiales. Esta magnitud es totalmente compatible con la magnitud Richter, obteniéndose resultados similares [4]. Con esta expresión, conociendo la energía de la señal sísmica, se puede calcular su magnitud:

$$M_s = \frac{\log_{10} E}{1.5} - 7.87$$

Otra escala, deducida por Kanamori [4], que de hecho define una nueva escala de magnitud, es aquella que relaciona el momento sísmico  $M_0$  y la magnitud  $M_s$ , llamada *magnitud del momento*,  $M_w$ , dada por:

$$M_w = \frac{\log_{10} M_0}{1.5} - 10.73$$

La diferencia de energía liberada entre un terremoto de  $M_S=6.0$  y uno de  $M_S=7.0$  es un factor de  $10^{1.6}$ , o bien, aproximadamente 32. En otras palabras, la energía sísmica liberada en un terremoto de magnitud 7.0, es arriba de 30 veces mayor que la energía liberada en un terremoto de magnitud 6.0, y es tres ordenes de magnitud mayor que la liberada en un terremoto de  $M_S=5.0$ .

En otras palabras, la relación logarítmica entre energía y magnitud indica que un incremento de una unidad en la magnitud  $M_S$ , incrementa la cantidad de energía sísmica liberada,  $E$ , en un factor de aproximadamente 30, y no un factor de 10 como sucede con la amplitud  $A$ .

### 1.5 Registro de las Señales Sísmicas

Los primeros sismógrafos efectivos fueron construidos poco antes de principios del siglo XX. Aunque los instrumentos son ahora más sofisticados, el principio básico empleado es el mismo. Este principio se ilustra esquemáticamente en la figura 7.

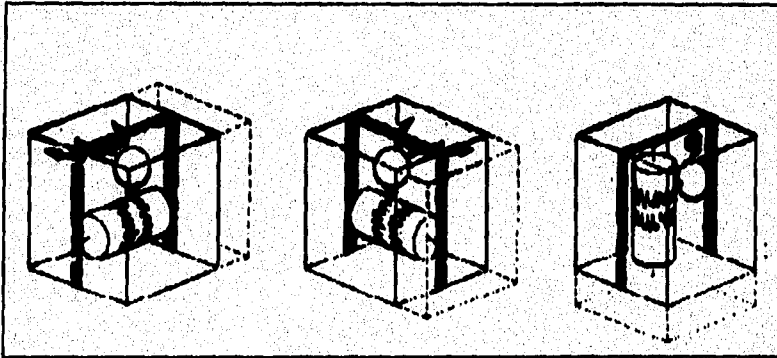


Figura 7.

Una masa está suspendida de un marco apoyado en el suelo, la masa es, por lo tanto, relativamente independiente del movimiento del marco. Cuando el marco se mueve por las ondas de un terremoto, la inercia de la masa hace que ésta quede estacionaria con respecto al movimiento del marco de forma que este movimiento relativo es registrado con una pluma en papel enrollado en un tambor que gira. El registro se llama sismograma. El movimiento real debe calcularse teniendo en cuenta la mecánica del movimiento del péndulo.

Casi todos los sismómetros se basan en sistemas de péndulo-inercial amortiguado de una u otra forma, que en otras palabras, son sistemas mecánicos de segundo orden masa-resorte-amortiguador. Un diseño simple de sismómetros vertical y horizontal se muestran en la figura 8.

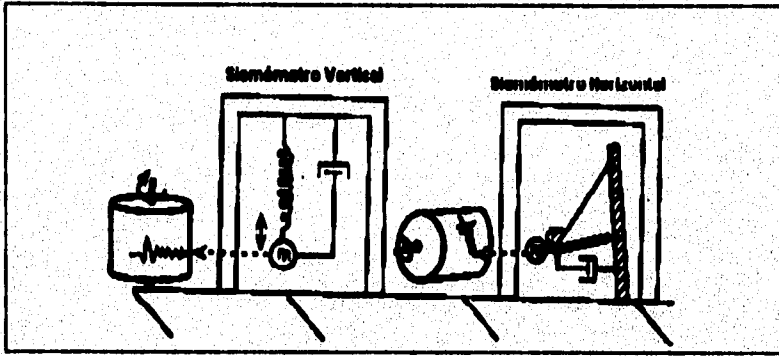


Figura 6.

El marco del sismómetro es rígido y fijo a la tierra, y el péndulo es diseñado de modo que el movimiento de la masa de prueba interna,  $m$ , tiene un retraso relativo al movimiento de la tierra, por su propia inercia. Cada sistema de péndulo tiene una posición de equilibrio en la cual la masa está en reposo y a la cual regresará después de pequeñas perturbaciones transitorias. La orientación del péndulo adicionalmente determina cual componente del movimiento de la tierra inducirá el movimiento relativo del péndulo.

Todos los sistemas de registro sísmico que traducen el movimiento del péndulo en un sismograma final,  $x(t)$ , involucra un coeficiente de amplificación,  $G$ , de los desplazamientos de la tierra  $U(t)$ , que son comunicados a la masa de prueba a través del resorte del sistema, y que amortigua las oscilaciones naturales de la masa. Este sistema de segundo orden, es el instrumento de medición principal del movimiento de la tierra, y como resultado podemos obtener la aceleración  $x''(t)$ , la velocidad  $x'(t)$  o el desplazamiento  $x(t)$  a través del sismograma. Este sistema de segundo orden tiene el modelo [4]:

$$\ddot{x}(t) + 2\zeta\omega_0 \dot{x}(t) + \omega_0^2 x(t) = -G\ddot{U}(t)$$

El más común de los sismógrafos es el que registra la aceleración del suelo y son llamados acelerómetros. Estos instrumentos están diseñados para accionarse durante fuertes aceleraciones del suelo al recibir las primeras ondas de un terremoto.

En los sismógrafos modernos, el movimiento relativo entre el péndulo y el marco produce una señal eléctrica, a través de un transductor, que es amplificada electrónicamente miles de veces antes de que se mueva una pluma para producir el sismograma. Las señales eléctricas de un sismógrafo de péndulo pueden también ser registradas en una cinta magnética para conservar el movimiento del suelo magnéticamente.

El sismógrafo utilizado como patrón para la determinación de la magnitud de un sismo en la escala de Richter es un sismógrafo de torsión con un periodo de amortiguamiento de 0.8 segs., factor de amplificación de 2800, y un factor de

amortiguamiento de 0.8. Este sistema mecánico de segundo orden que funciona como instrumento de medición de la aceleración de un sismo, consiste en un cilindro pequeño de cobre con una masa menor que 1 gramo y con su eje en el sentido vertical, fijado a un filamento vertical de metal. Este filamento está bajo tensión, de modo que la fuerza de restitución es suministrada por tensión. El instrumento es, en general, sensible a movimiento horizontales, los cuales son detectados a través de un haz de luz reflejada desde un pequeño espejo en el cilindro. Este instrumento estándar es conocido como sismómetro *Wood-Anderson*, debido a sus diseñadores [5].

A principios de los 1970s los sistemas de registro sísmico tales como los de registro analógico de rango dinámico pequeño y de tinta, sistemas fotográficos, o grabadoras magnéticas comenzaron a cambiar en favor de los sistemas de registro digital en cintas magnéticas.

En esencia, estos sistemas digitales muestrean la salida en curso de de un sismómetro y amplificador electrónico, y escriben el voltaje en cada instante de tiempo a la cinta en vez de usarlo para manejar un sistema de registro óptico o mecánico.

Uno de los aspectos importantes de la mayoría de los sensores sísmicos, es que ellos utilizan sistemas de realimentación de fuerzas. Esta involucra una realimentación negativa en la cual una fuerza proporcional al desplazamiento inercial de la masa se aplica a la misma masa para cancelar su movimiento relativo. Un transductor eléctrico convierte el movimiento de la masa en una señal eléctrica para estimar cuanta fuerza retroalimentada aplicar. El monto de fuerza requerida para mantener el péndulo en estado de reposo corresponde a la aceleración de la tierra.

La figura 9 muestra un esquema del sismómetro de resorte de lámina *Wielandt-Strackeisen STS-1* y un sistema de registro de muestreo de banda ancha.

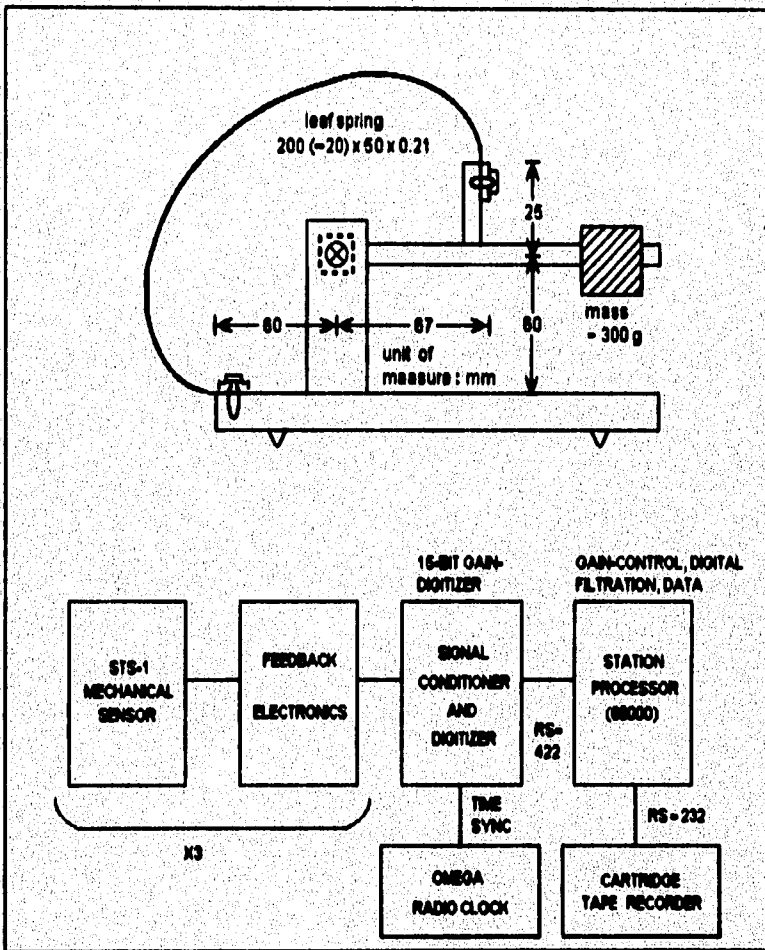


Figura 9.

El sismómetro es un diseño compacto del tipo de péndulo estándar, pero sus capacidades se deben principalmente a la realimentación electrónica que previene a la masa de movimiento significativo. Digitalizar la señal de retroalimentación generada con 16 a 24 bits de resolución, controlar las señales de tiempo (sincronía), filtrar y registrar a cinta magnética, son pasos críticos para obtener una señal útil.



**CAPITULO 2**  
**DISTRIBUCIONES TIEMPO-FRECUENCIA**

## CAPITULO 2. DISTRIBUCIONES TIEMPO-FRECUENCIA

### 2.1 Limitaciones del Análisis de Fourier

#### 2.1.1 Dominios del Tiempo y de la Frecuencia

La transformada de Fourier y su inversa establecen una relación uno a uno entre el dominio del tiempo (señal  $x(t)$ ) y el dominio de la frecuencia (espectro  $X(f)$ ). En otras palabras, la transformada de Fourier conecta los dominios del tiempo y de la frecuencia, conformando una herramienta para el análisis de señales.

El par de transformadas entre los dos dominios viene dado por [6]:

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

$$x(t) = \int X(f) e^{j2\pi ft} df$$

el dominio del tiempo se caracteriza por la señal  $x(t)$ , mientras que el dominio de la frecuencia se caracteriza por su espectro  $X(f)$ .

El dominio del tiempo y el dominio de la frecuencia constituyen dos modos *alternativos* de mirar la señal. A pesar de que la transformada de Fourier permite el paso de un dominio a otro, *no* permite una combinación de los dos dominios.

El hecho de que no permite combinar los dos dominios constituye una limitación en el análisis de señales. Tal es el caso en que se desearía conocer el contenido espectral de una señal conforme transcurre el tiempo, o bien, conforme se va presentando. Esto sólo sería posible a través de la combinación del tiempo y la frecuencia, para observar la variación del espectro en función del tiempo.

En otras palabras, a través de la transformada de Fourier no se puede tener la variación temporal del contenido espectral de una señal. La mayoría de la información en el tiempo no es fácilmente accesible en el dominio de la frecuencia. Mientras que el espectro  $X(f)$  muestra en forma efectiva cualquier frecuencia  $f$  contenida en la señal, ésta no provee en forma general información sencilla de interpretar acerca de la localización en el tiempo de las componentes espectrales. Estrictamente hablando, esta información está contenida en la *fase del espectro*,  $\arg(X(f))$ , pero que frecuentemente aparece en una forma que no es fácil de interpretar.

Lo anterior representa una limitación del análisis de Fourier, por lo que se debe aplicar otra forma de representar el contenido espectral de la señal y su localización temporal.

### 2.1.2 Frecuencia Instantánea y Retraso de Grupo

Existen señales que presentan la característica de tener sus componentes espectrales localizadas en el tiempo. Un ejemplo sencillo es la señal FSK (frequency-shift-keyed) valuada en forma compleja, definida como:

$$x(t) = e^{j2\pi f_k t}, t_k < t < t_{k+1}$$

en donde dentro de cada intervalo  $[t_k, t_{k+1}]$  se tiene sólo una frecuencia  $f_k$  presente.

Esta frecuencia puede ser obtenida como la derivada de la fase instantánea de la señal,  $\arg\{x(t)\}$ . La generalización de este concepto conduce a la definición de la frecuencia instantánea (IF), dada por [6]:

$$f_x(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \arg\{x(t)\}$$

como la derivada de la fase instantánea,  $\arg\{x(t)\}$ , de la señal  $x(t)$  valuada en forma compleja.

Una cantidad similar a la anterior y que en conjunto forman un par por tratarse del caso inverso, es el retraso de grupo (GD) definido como [6]:

$$t_x(f) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{df} \arg\{X(f)\}$$

en donde  $\arg\{X(f)\}$  es la fase del espectro.

El retraso de grupo tiene un significado especial cuando la señal  $x(t)$  es la respuesta al impulso de un sistema lineal invariante con el tiempo. Bajo ciertas condiciones,  $t_x(f)$  puede interpretarse como el "retraso en el tiempo introducido por el sistema en la frecuencia  $f$ ".

Desafortunadamente, la IF y el GD son capaces de describir adecuadamente la localización en el tiempo de las componentes espectrales sólo para una clase muy restringida de señales. La IF representa la frecuencia como una función explícita del tiempo,  $f=f_x(t)$ , y en forma implícita se asume que, en cada instante de tiempo  $t$ , existe sólo una componente de frecuencia. Un ejemplo de señal que no cumple con estas suposiciones es la señal

$$x(t) = e^{j2\pi f_1 t} + e^{j2\pi f_2 t}$$

conteniendo dos componentes de frecuencia ( $f_1$  y  $f_2$ ) en todo momento.

Una restricción similar se aplica al GD; aquí, la suposición implícita es que una frecuencia dada se concentra alrededor de un instante de tiempo.

## 2.2 Representaciones Tiempo-Frecuencia

Las representaciones Tiempo-Frecuencia de una señal caracterizan a esta en el plano *tiempo-frecuencia*. Una representación Tiempo-Frecuencia (TFR) combina el análisis tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia, reduciéndose a una representación gráfica de la localización temporal de las componentes espectrales de la señal.

Las TFRs mapean a una señal de una dimensión que es función del tiempo,  $x(t)$ , en una función bidimensional del tiempo y la frecuencia,  $T_x(t, f)$ . La mayoría de las TFRs son "representaciones espectrales variantes con el tiempo". Los valores de la superficie de la TFR sobre el plano tiempo-frecuencia indican en que tiempos se presentan dichas componentes espectrales.

Las TFRs se han aplicado al análisis, modificación y síntesis de señales variantes con el tiempo o *no-estacionarias*. Los algoritmos de síntesis se emplean para recuperar una señal a partir de su modelo TFR. Las TFRs también se han empleado para la codificación eficiente de señales y como un estadístico para la detección de señales y estimación de parámetros.

Por otro lado, las restricciones asociadas con la IF y el GD descritas en el punto anterior pueden ser eliminadas a través de describir la estructura tiempo-frecuencia de una señal no a través de una curva de una dimensión en el plano tiempo-frecuencia (tal como sucede con la IF y el GD), sino a través de una superficie sobre el plano tiempo-frecuencia. Matemáticamente esto corresponde a la función conjunta  $T_x(t, f)$  del tiempo  $t$  y la frecuencia  $f$ . Llamaremos a  $T_x(t, f)$  una representación Tiempo-Frecuencia (TFR) de la señal  $x(t)$ .

Existen diversas TFRs para caracterizar una señal como la localización temporal de sus componentes espectrales. La propiedad fundamental de cada TFR  $T_x(t, f)$  corresponde a la manera en que ésta depende de la señal  $x(t)$ . Esta dependencia puede ser lineal, cuadrática, o incluso no-lineal; siendo los dos primeros casos los más utilizados.

## 2.3 Descomposiciones Lineales de Señales

Todas las TFRs lineales satisfacen el principio de superposición el cual establece que si la señal es una combinación lineal de otras componentes de señal, entonces la TFR de  $x(t)$  es la misma combinación lineal de las TFRs de cada componente de señal:

$$x(t) = c_1 x_1(t) + c_2 x_2(t) \Rightarrow T_x(t, f) = c_1 T_{x_1}(t, f) + c_2 T_{x_2}(t, f)$$

La linealidad es una propiedad deseable en cualquier aplicación que envuelve señales multicomponentes (ej. voz). Una TFR lineal de básica importancia es la *short-time Fourier-transform*, la cual se verá a continuación.

## 2.4 La Representación Short-Time Fourier Transform

### 2.4.1 Definición y Expresiones

A pesar de que la transformada de Fourier (espectro) no muestra explícitamente la localización temporal de las componentes de frecuencia, esta puede obtenerse a través del "pre-ventaneo" (pre-windowing) de la señal  $x(t)$ . De acuerdo con esto, la representación *short-time Fourier-transform* (STFT), o espectro en tiempo corto, de la señal  $x(t)$  se define como [8]:

$$STFT_x^{(n)}(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} [x(t')\gamma^*(t'-t)]e^{-j2\pi f t'} dt'$$

La STFT en el tiempo  $t$  es la transformada de Fourier<sup>2</sup> de la señal  $x(t')$  multiplicada por una "ventana de análisis" desplazada  $\gamma^*(t'-t)$  centrada alrededor del tiempo  $t$ .

Debido a que la multiplicación por la ventana relativamente corta  $\gamma^*(t'-t)$  suprime a la señal que está afuera de sus límites y la cual se ubica alrededor del tiempo de análisis  $t=t$ , la STFT simplemente es un "espectro local" de la señal  $x(t')$  alrededor del tiempo de análisis  $t$ .

La STFT es evidentemente una TFR lineal, y es en general, valuada en forma compleja. Nótese que el resultado de la STFT,  $STFT_x(t, f)$ , para una señal dada  $x(t')$ , está significativamente influenciado por la elección de la ventana de análisis  $\gamma^*(t')$ . Otras propiedades elementales describen como la STFT es afectada por transformaciones básicas de la señal. En particular, la STFT preserva el desplazamiento en frecuencia en la señal  $x(t')$ , y también preserva el desplazamiento en el tiempo denominado modulación (factor de fase):

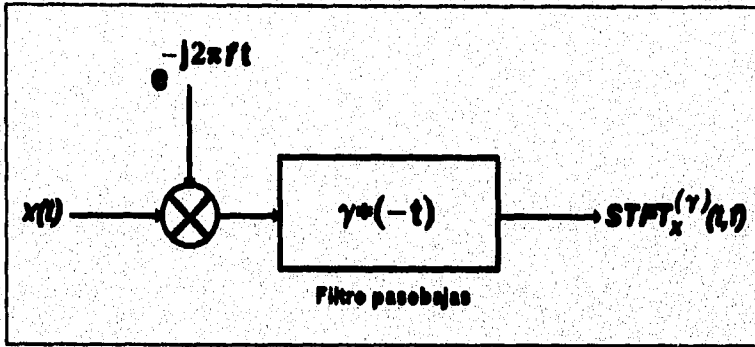
$$\tilde{x} = x(t)e^{j2\pi f_0 t} \Rightarrow STFT_{\tilde{x}}^{(n)}(t, f) = STFT_x^{(n)}(t, f - f_0)$$

$$\tilde{x} = x(t - t_0) \Rightarrow STFT_{\tilde{x}}^{(n)}(t, f) = STFT_x^{(n)}(t - t_0)e^{-j2\pi f t_0}$$

### 2.4.2 Interpretación de Filtrado

La inversa de la transformada de Fourier del espectro ventaneado  $X(f)\Gamma(f-f)$  puede interpretarse como el resultado de pasar la señal  $x(t')$  a través de un filtro con respuesta en frecuencia  $\Gamma(f-f)$ . Este filtro es un filtro pasobanda centrado en la frecuencia de análisis  $f$ , debido a que  $\Gamma(f)$  es la transformada de Fourier de una función de ventana pasobajas. Después se desplaza en frecuencia la salida del filtro a la frecuencia 0. Debido a este desplazamiento en frecuencia, la  $STFT_x(t, f)$  como función de  $t$  es una señal pasobajas para una frecuencia  $f$  fija.

<sup>2</sup> Todas las integrales van desde  $-\infty$  hasta  $\infty$ . El superíndice \* denota complejo conjugado.



En el diagrama de bloques anterior se tiene la implementación pasobajas de la STFT. La STFT en cualquier frecuencia de análisis  $f$  puede obtenerse, primero, desplazando en frecuencia la señal  $x(t)$  en  $-f$ , y después, pasando la señal desplazada en frecuencia a través del filtro pasobajas. La respuesta impulso del filtro pasobajas es  $\gamma^*(-t)$ , es decir, la ventana de análisis invertida en el tiempo  $\gamma^*(t)$ . El ancho de banda del filtro es igual al de la ventana, independientemente de la frecuencia de análisis  $f$ .

Lo anterior es implementar la transformada de Fourier de la señal ventanada como la operación de convolución en el tiempo o de filtrado en la frecuencia.

### 2.4.3 Resolución Tiempo-Frecuencia

Debido a que la STFT en el tiempo  $t$  es el espectro de la señal  $x(t')$  preventanada por la ventana  $\gamma^*(t-t)$ , todas las características de la señal localizada dentro del intervalo de la ventana alrededor del tiempo  $t$  se muestran en el tiempo  $t$  de la STFT. De esto, es claro que para una buena resolución en el tiempo de la STFT se requiere una ventana  $\gamma^*(t')$  corta. Por otro lado, la STFT en la frecuencia  $f$  es esencialmente el resultado de pasar la señal a través del filtro pasobanda  $\Gamma(f-f)$ . Para una buena resolución en frecuencia de la STFT se requiere un filtro de banda estrecha, esto es, una ventana de análisis  $\gamma^*(t')$  larga.

El principio de incertidumbre prohíbe la existencia de ventanas con duración arbitrariamente pequeña y ancho de banda arbitrariamente pequeño. De aquí que, la resolución conjunta tiempo-frecuencia de la STFT es inherentemente limitada. Realmente existe un *compromiso fundamental* para la resolución: improvisando la resolución en el tiempo (usando una ventana corta) resulta en una pérdida de la resolución en frecuencia, y viceversa.

Consideremos dos extremos para la ventana/filtro de análisis  $\gamma(t)$ . El primer caso es el de perfecta resolución en el tiempo, esto es, si la ventana de análisis  $\gamma(t)$  es un impulso infinito (delta de Dirac),

$$\gamma(t) = \delta(t) \Rightarrow STFT_x^{(\gamma)}(t, f) = x(t)e^{-j2\pi ft}$$

En este caso, la STFT se reduce esencialmente a la señal  $x(t)$ , preservando todas las variaciones en el tiempo de la señal pero sin proveer ninguna resolución en frecuencia. El segundo caso es el de perfecta resolución en frecuencia obtenida con la ventana de valor siempre constante  $w(t)=1$ .

$$\Gamma(f) = \delta(f) \Rightarrow STFT_x^{(w)}(t, f) = X(f)$$

Aquí, la STFT se reduce a la transformada de Fourier sin proveer ninguna resolución en el tiempo.

## 2.5 La Distribución de Wigner-Ville

### 2.5.1 Correlación

La correlación es una operación matemática muy parecida a la convolución, y con ella se puede examinar qué tan parecidas son dos señales entre sí. Esta operación está definida por [12]:

$$r_{xy}(\tau) = \int y(t + \tau)x^*(t) dt$$

donde  $\tau$  se define como *retraso en el tiempo* (time lag), el cual representa el corrimiento en el tiempo (fase) entre las dos señales.

Para el caso en que se analiza la señal consigo misma, se obtiene la llamada función de autocorrelación [12]:

$$r_{xx}(\tau) = \int x(t + \tau)x^*(t) dt$$

Para el caso en que  $\tau=0$ , la señal está en fase consigo misma, y se obtiene que la autocorrelación es igual a la energía de la señal a lo largo del tiempo:

$$r_{xx}(0) = E_x(t) = \int x(t)x^*(t) dt = \int |x(t)|^2 dt$$

Con esto se observa que la autocorrelación, y también la correlación, está estrechamente ligada a una medida de la energía de la señal.

Otra característica de la autocorrelación es que su transformada de Fourier es igual a la *densidad espectral de potencia* o de *energía*,  $S_{xx}(f)$ , calculada como:

$$S_{xx}(f) = |X(f)|^2 = \mathcal{F}\{r_{xx}(\tau)\} = \int r_{xx}(\tau)e^{-j2\pi f\tau} d\tau$$

en donde  $S_{xx}(f)$  representa la distribución de la energía de la señal como una función de la frecuencia.

La correlación da una medida del parecido entre dos señales, por lo que si no existe parecido, la correlación resultará en cero; por el contrario, si el parecido aumenta, la correlación resulta en una cantidad mayor a cero, teniéndose su valor máximo cuando el retraso en el tiempo  $\tau$  es igual a cero.

Para el caso de señales con ruido aditivo, la correlación es útil en el reconocimiento de la señal, debido a que la correlación se reduce a la autocorrelación de la señal ya que el ruido casi no está correlacionado. De esta manera, se puede obtener la densidad espectral de potencia de la señal y en consecuencia se logra aislar la señal del ruido.

### 2.5.2 Representaciones Tiempo-Frecuencia de Energía

A pesar de que la linealidad de una TFR es una propiedad deseable, la estructura cuadrática de una TFR es intuitivamente una suposición razonable cuando queremos interpretar la TFR como una distribución tiempo-frecuencia de energía (o "espectro de potencia instantáneo"); debido a que la energía es una representación cuadrática de la señal. Una TFR de "energía"  $T_X(t, f)$  busca combinar los conceptos de potencia instantánea  $p_X(t) = |x(t)|^2$  y la densidad espectral de energía  $P_X(f) = |X(f)|^2$ . Idealmente, esta interpretación energética se expresa por las propiedades marginales [8]:

$$\int T_X(t, f) df = p_X(t) = |x(t)|^2$$

$$\int T_X(t, f) dt = P_X(f) = |X(f)|^2$$

las cuales establecen que la densidad de energía en una dimensión  $p_X(t)$  y  $P_X(f)$  son "densidades marginales" de la TFR  $T_X(t, f)$ . Como consecuencia, la energía de la señal

$$E_X = \int |x(t)|^2 dt = \int |X(f)|^2 df$$

puede calcularse integrando  $T_X(t, f)$  sobre el plano entero tiempo-frecuencia:

$$E_X = \iint T_X(t, f) dt df$$

Otras propiedades matemáticas deseables de las TFRs de energía se encuentran citadas en el anexo 2.

### 2.5.3 El Principio de Superposición Cuadrática

Cualquier TFR  $T_X$  cuadrática satisface el "principio de superposición cuadrática", en donde si se tiene que:

$$x(t) = c_1 x_1(t) + c_2 x_2(t)$$

entonces:

$$T_X(t, f) = |c_1|^2 T_{X_1}(t, f) + |c_2|^2 T_{X_2}(t, f) + c_1 c_2^* T_{X_1, X_2}(t, f) + c_2 c_1^* T_{X_2, X_1}(t, f)$$



en donde  $T_x(t, f)$  es la "auto-TFR" de la señal  $x(t)$  y  $T_{x_1, x_2}(t, f)$  es la TFR cruzada o "cross-TFR" de las dos señales  $x_1(t)$  y  $x_2(t)$ , con  $T_{x, x}(t, f) = T_x(t, f)$ . Nótese que la TFR cruzada es bilineal en las señales  $x_1(t)$  y  $x_2(t)$ .

Generalizando el principio de superposición cuadrático a una señal de  $N$ -componentes

$$x(t) = \sum_{k=1}^N c_k x_k(t)$$

se obtienen las siguientes reglas:

- A cada componente de la señal  $c_k x_k(t)$ , le corresponde una auto-componente o término de la señal  $|c_k|^2 T_{x_k}(t, f)$ .
- A cada par de componentes de la señal  $c_k x_k(t)$  y  $c_l x_l(t)$  ( $k \neq l$ ), le corresponde una cross-componente (componente cruzada) o término de interferencia  $c_l c_k^* T_{x_k, x_l}(t, f) + c_k c_l^* T_{x_l, x_k}(t, f)$ .

De aquí que, para una señal  $x(t)$  de  $N$ -componentes, la TFR  $T_x(t, f)$  contendrá  $N$  términos de señal y  $N(N-1)/2$  términos de interferencia. Nótese que el número de términos de interferencia crece cuadráticamente con el número de componentes de la señal, produciendo que el análisis visual de la TFR de señales multicomponentes sea difícil.

### 2.5.4 Distribución Wigner-Ville y Función Ambiguity

La distribución Wigner-Ville (WVD) se define como [8]:

$$W_{x, y}(t, f) = \int_{\tau} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) y^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi f \tau} d\tau$$

en donde  $\tau$  es el retraso en tiempo (time lag) entre las dos señales  $x(t)$  y  $y(t)$ .

Como se puede apreciar, la WVD es una TFR obtenida a través de la transformada de Fourier de la función correlación local, la cual nos da una distribución de la energía de la señal en el plano tiempo-frecuencia. Para el caso de una sola señal, se obtiene la distribución auto-WVD, la cual siempre es real:

$$W_x(t, f) = \int_{\tau} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi f \tau} d\tau$$

Esta distribución de energía de la señal en el plano tiempo-frecuencia satisface gran número de propiedades matemáticas (anexo 2), y preserva una buena concentración tiempo-frecuencia (resolución), aunque por otro lado presenta un número substancial de términos de interferencia.

La transformada de Fourier en el plano tiempo-frecuencia de la WVD es la conocida función *Ambiguity* (AF) [8],

$$A_x(t, f) = \iint_{f'} W_x(t, f) e^{-j2\pi(v-f)\tau} dt df$$

definida también como [8]:

$$A_x(\tau, \nu) = \int x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi\nu t} dt$$

la cual se puede interpretar como la función de correlación conjunta tiempo-frecuencia. La AF es también una TFR cuadrática, pero de correlación en vez de energía y juega un papel de igual importancia que la WVD. Cabe mencionar que la transformada de Fourier en el plano tiempo-frecuencia es una transformación entre los dominios tiempo-frecuencia  $(t, f)$  y el retraso tiempo-frecuencia  $(\tau, \nu)$ .

### 2.5.5 Propiedades de la distribución Wigner-Ville

La distribución Wigner-Ville (WVD) tiene excelente concentración tiempo-frecuencia, pero aparecen los términos de interferencia, los cuales se comentarán en el siguiente punto, que disminuyen la resolución de la distribución.

De todas las TFRs cuadráticas con interpretación energética, la WVD satisface en forma excepcional un gran número de propiedades matemáticas deseables en este tipo de distribuciones.

Por ejemplo, la auto-WVD siempre es valuada en forma real, y la WVD preserva los desplazamientos en tiempo y frecuencia de la señal. Satisface las propiedades marginales, esto es, las integrales en el tiempo o frecuencia de la WVD corresponden a la potencia instantánea de la señal y a la densidad espectral de energía, respectivamente. De aquí que, la WVD puede interpretarse como una distribución de la energía de la señal en dos dimensiones sobre el plano tiempo-frecuencia. Sin embargo, el principio de incertidumbre prohíbe la interpretación de la WVD como una densidad tiempo-frecuencia de energía en forma *puntual* debido a que la WVD puede tener valores negativos como consecuencia de los términos de interferencia. La frecuencia instantánea y el retraso de grupo se pueden evaluar usando los momentos de primer orden de la WVD.

Todas estas propiedades matemáticas se listan en el *anexo 2* del presente texto de acuerdo a la referencia [8].

### 2.5.6 Términos de interferencia

Los términos de interferencia se producen debido al principio de superposición cuadrático visto anteriormente, en donde a cada par de componentes de la señal  $c_k x_k(t)$  y  $c_l x_l(t)$  ( $k \neq l$ ), le corresponde un término de interferencia definido como

$$c_k c_l^* T_{x_k, x_l}(t, f) + c_l c_k^* T_{x_l, x_k}(t, f).$$

La concentración tiempo-frecuencia y el gran número de propiedades matemáticas son características atractivas de la WVD. Por otro lado, ciertas características de los términos de interferencia (ITs) de la WVD frecuentemente causan problemas en aplicaciones prácticas.

En general, los ITs de la WVD pueden ser identificados por su naturaleza oscilatoria. Más adelante se verá la atenuación de los ITs a través del proceso de "suavizado" (smoothing).

Desde un punto de vista práctico, los ITs son problemáticos debido a que pueden traslaparse con los autotérminos (términos de la señal) y hacer difícil la interpretación visual de una gráfica de la WVD. También, en muchos casos la parte negativa y oscilaciones de los ITs se presenta en la distribución, debido a las señales multicomponentes, por lo que las propiedades marginales y las propiedades de frecuencia instantánea y retraso de grupo no se satisfacen.

Ahora veamos la geometría de los ITs en el plano tiempo-frecuencia: supongamos que se tienen dos componentes de la señal que a su vez generan dos términos de señal en el plano tiempo-frecuencia localizados alrededor de los puntos  $(t_1, f_1)$  y  $(t_2, f_2)$  respectivamente. Entonces, el IT se localiza alrededor del punto central  $(t_{12}, f_{12})$ , en donde  $t_{12} = (t_1 + t_2)/2$ ,  $f_{12} = (f_1 + f_2)/2$ ;  $\tau_{12} = t_1 - t_2$ ,  $\nu_{12} = f_1 - f_2$ . El IT localizado a la mitad de los dos términos de señal oscila con respecto al tiempo con periodo de oscilación  $1/|\nu_{12}|$ , y con respecto a la frecuencia con periodo de oscilación  $1/|\tau_{12}|$ . Debido a estas oscilaciones, los ITs presentan partes negativas. La velocidad de las oscilaciones aumenta con el incremento en la distancia entre los puntos de las dos componentes de la señal en el plano tiempo-frecuencia. La dirección de las oscilaciones es perpendicular a la línea que conecta los dos puntos de la señal en el plano tiempo-frecuencia.

Los ITs "internos" son aquellos ITs que también ocurren para el caso de señales monocomponentes, y sus oscilaciones se presentan en medio de entre dos puntos cualesquiera del término de la señal.

Debido a que los términos de interferencia son oscilatorios, estos pueden ser atenuados a través de la operación de suavizado o *smoothing* (esto es, el filtrado pasobajas de la WVD). Desafortunadamente, la atenuación de términos de interferencia tiene su costo en la pérdida de concentración tiempo-frecuencia, debido a que el suavizado se extiende a los términos de la señal. Otra desventaja del suavizado es la pérdida potencial de propiedades deseables de las TFRs.

### 2.6.7 La Clase Cohen

Además de la distribución Wigner-Ville, existen otras TFRs cuadráticas con una interpretación de energía. La mayoría de estas TFRs satisfacen la propiedad básica de *invarianza en el desplazamiento tiempo-frecuencia* (o "covarianza"): si la señal  $x(t)$  se retrasa en tiempo y/o se desplaza en frecuencia, entonces sus TFR será desplazada en el mismo retraso de tiempo y/o modulación de frecuencia. Esto es [1]:

$$\tilde{x}(t) = x(t - t_0)e^{j2\pi f_0 t} \Rightarrow T_x(t, f) = T_x(t - t_0, f - f_0)$$

La clase de todas las TFRs cuadráticas con interpretación energética, invariantes en el desplazamiento tiempo-frecuencia, se conoce como la *clase cuadrática Cohen* [11]. Miembros prominentes de la clase Cohen son el espectrograma y la distribución smoothed pseudo Wigner-Ville (SPWVD).

Cada miembro de la clase Cohen puede interpretarse como una WVD filtrada en 2-D (dos dimensiones). De hecho, puede mostrarse que una TFR  $T_X(t, f)$  es un miembro de la clase Cohen, denotada  $C_E$ , si y sólo si puede obtenerse con la WVD  $W_X(t, f)$  de la señal  $x(t)$  a través de la *convolución tiempo-frecuencia* [11]:

$$T_X \in C_E \Leftrightarrow T_X(t, f) = \iint_{f'} \psi_T(t-t', f-f') W_X(t', f') dt' df'$$

Cada miembro  $T_X$  de la clase Cohen está asociado con una función kernel  $\psi_T(t, f)$  única e independiente de la señal (o filtro 2-D).

Claramente, la convolución en la expresión anterior se transforma en una simple multiplicación en el dominio de la transformada de Fourier. Por lo tanto, para cada una de las TFRs  $T_X(t, f) \in C_E$  invariantes en el desplazamiento tiempo-frecuencia, se tiene su "par TFR correlativa"  $T_{dual, X}(\tau, \nu)$  definida como la transformada de Fourier en dos dimensiones de la  $T_X(t, f)$  [11]:

$$T_{dual, X}(\tau, \nu) = \iint_{f'} T_X(t, f) e^{-j2\pi(\nu f - \tau t)} dt df$$

Un ejemplo prominente de un par de TFRs se da con la WVD y la AF debido a que se relacionan a través de la transformada de Fourier en dos dimensiones. La clase dual de TFRs correlativas consiste en todas las TFRs que satisfacen la "invarianza correlativa en el desplazamiento" [11]:

$$\tilde{x}(t) = x(t-t_0) e^{j2\pi f_0 t} \Rightarrow T_{dual, \tilde{x}}(\tau, \nu) = T_{dual, x}(\tau, \nu) e^{j2\pi(\nu \tau - \nu_0 \tau)}$$

Nótese que en el dominio dual correlativo, un desplazamiento en tiempo-frecuencia de la señal  $x(t)$  afecta solamente la fase y no conduce a un desplazamiento tiempo-frecuencia análogo al del dominio energético. Aún más importante, cualquier TFR  $T_{dual, X}(\tau, \nu)$  que es un miembro de la *clase correlativa*, denotada  $C_C$ , puede obtenerse a partir de la AF de la señal  $x(t)$  a través de una multiplicación [11]:

$$T_{dual, X} \in C_C \Leftrightarrow T_{dual, X}(\tau, \nu) = \Psi_T(\tau, \nu) A_X(\tau, \nu)$$

El kernel  $\Psi_T(\tau, \nu)$  de  $T_{dual, X}(\tau, \nu)$  en la ecuación anterior y el kernel  $\psi_T(t, f)$  de  $T_X(t, f)$  en la convolución tiempo-frecuencia son un par de transformadas de Fourier, así como lo son también las TFRs  $T_{dual, X}(\tau, \nu)$  y  $T_X(t, f)$ , e igual sucede con la WVD  $W_X(t, f)$  y la

AF  $A_X(\tau, \nu)$ . Esto se debe a la dualidad de la transformada de Fourier entre la clase energética Cohen  $C_E$  y la clase correlativa dual  $C_C$ .

Aún si nuestro interés es sólo en una TFR de la clase energética Cohen  $C_E$ , es conveniente considerar la TFR de la clase correlativa dual  $C_C$  debido a que la relación de multiplicación es usualmente más simple que la relación de convolución. Esta consideración es muy útil para el estudio de las versiones suavizadas (smoothed) de la WVD, tal como es el caso de la SPWVD.

A continuación se muestran algunas TFRs de la clase Cohen  $C_E$  (clase de TFRs cuadráticas, energéticas, con invarianza en el desplazamiento tiempo-frecuencia).

TFR	$\psi_T(t, f)$	$\Psi_T(\tau, \nu)$
Wigner-Ville	$\delta(t)$	1
Espectrograma	$\gamma(-t - \frac{\tau}{2})\gamma^*(-t + \frac{\tau}{2})$	$A\gamma(-\tau, -\nu)$
Smoothed Pseudo Wigner-Ville	$g(t)H(f)$	$\eta(\frac{\tau}{2})\eta^*(-\frac{\tau}{2})G(\nu)$
Choi Williams	$\sqrt{\frac{\sigma}{4\pi}} \frac{1}{ t } e^{-\frac{\sigma}{2}(\frac{t}{\tau})^2}$	$e^{-\frac{(2\pi\nu)^2}{\sigma}}$

### 2.5.6 La Distribución SPWV

A pesar de que la WVD es teóricamente atractiva debido a sus propiedades matemáticas, la aplicación práctica de la WVD está restringida frecuentemente por los términos de interferencia (ITs). Debido a que los ITs son oscilatorios, se pueden atenuar a través de la operación de suavizado (smoothing). La clase Cohen  $C_E$  de TFRs invariantes en el desplazamiento tiempo-frecuencia provee un marco de trabajo conveniente para el suavizado de la WVD.

De acuerdo a la definición de la clase Cohen  $C_E$ , cualquier TFR  $T_X$  invariante en el desplazamiento, puede obtenerse a partir de la WVD por medio de su convolución con un kernel  $\psi_T(t, f)$ . Sin embargo, es claro que esta convolución resultará en un suavizado (o filtrado pasobajas en dos dimensiones) de la WVD sólo si el kernel de la convolución  $\psi_T(t, f)$  es una función lo suficientemente suave. Si este es el caso, entonces podríamos llamar a la TFR resultante una WVD suavizada (SWVD), y al kernel  $\psi_T(t, f)$  se llamaría función suavizadora.

Es claro que existe un *compromiso* fundamental entre una buena atenuación de términos de interferencia y una buena concentración tiempo-frecuencia (resolución). Una función suavizadora (smoothing)  $\psi_T(t, f)$  ancha en el dominio WVD (correspondiente a una función de peso (weighting)  $\Psi_T(\tau, \nu)$  tipo pasobajas angosta en el dominio AF) produce buena atenuación de términos de interferencia pero pobre concentración tiempo-frecuencia. Así mismo, una función suavizadora  $\psi_T(t, f)$  angosta

(correspondiente a una función de peso  $\Psi_T(r, \nu)$  ancha) produce pobre atenuación de términos de interferencia pero buena concentración tiempo-frecuencia.

Como se mencionó en el punto anterior de este capítulo, una de las TFRs que forma parte de la clase energética Cohen  $C_E$  es la distribución smoothed pseudo Wigner-Ville (SPWVD). Esta distribución tiene la particularidad de que el suavizado de la WVD se hace a través de la elección libre e independiente de dos ventanas funciones del tiempo y de la frecuencia respectivamente, denotadas por  $g(t)$  y  $H(f)$ . Las ventanas son independientes entre sí, tanto en su forma como en su longitud (ancho de banda).

La SPWVD se define como [10]:

$$SPWVD_X^{(g,H)}(t, f) = \iint_{t', f'} g(t-t')H(f-f')W_X(t', f')df'dt'$$

la cual permite intervalos de suavizado,  $\Delta t$  y  $\Delta f$ , para ser ajustados libre e independientemente uno de otro. La SPWVD se define por un kernel de suavizado separable  $\psi_{SPWVD}(t, f) = g(t)H(f)$ , en el cual,  $g(t)$  y  $H(f)$  son dos ventanas cuyas longitudes efectivas determinan independientemente el intervalo de suavizado en el tiempo  $\Delta t$  y en la frecuencia  $\Delta f$ , respectivamente.

La estructura separable de  $\psi_{SPWVD}(t, f)$  (esto es,  $\psi_{SPWVD}(t, f)$  es el producto de dos ventanas separadas de una dimensión) produce ventajas prácticas significativas para la SPWVD. Específicamente, el hecho de que el suavizado en el tiempo y en la frecuencia son independientes y de libre elección, facilita su aplicación y su cómputo eficientes.

Un caso especial de la SPWVD corresponde a la elección de la ventana en el dominio del tiempo  $g(t) = \delta(t)$  (esto es, sin suavizado en el tiempo o  $\Delta t = 0$ ), que se conoce como la pseudo WVD (PWVD). La PWVD es, de hecho, una "short-time WVD" que utiliza una ventana deslizante de análisis  $\eta(\tau)$  cuya transformada de Fourier es la ventana para el suavizado en la frecuencia  $H(f)$  definida como [10]:

$$H(f) = \int \eta\left(\frac{\tau}{2}\right)\eta^*\left(-\frac{\tau}{2}\right)e^{-j2\pi f\tau}d\tau$$

## 2.6 Análisis de Señales en el Plano Tiempo-Frecuencia

En los puntos anteriores de este capítulo se presentó los dos tipos principales de TFRs, una que corresponde al caso de TFR lineal (STFT) y otra al de TFR cuadrática o de energía (WVD).

Se presentaron estas TFRs por ser las más generales y representativas de su tipo (lineal o cuadrática). Para el caso de la WVD se mostró que ésta cumple un gran número de propiedades matemáticas, pero que es más conveniente manejar su versión "suavizada" (SPWVD) debido a que reduce los términos de interferencia.

La STFT (o en algunos casos la STFT al cuadrado conocida como *espectrograma*, la cual representa una TFR de energía) ha sido aplicada a problemas de procesamiento de señales en diferentes áreas. Las de mayor aplicación incluyen análisis de señales variantes con el tiempo, identificación de sistemas y estimación espectral, detección de señal y estimación de parámetros, análisis, identificación, codificación, y síntesis de voz; estimación del retraso de grupo y frecuencia instantánea de una señal, y demodulación compleja [8].

La WVD ha sido una herramienta de análisis muy útil en diversos campos como mecánica cuántica, óptica, acústica, bioingeniería, procesamiento de imágenes, y oceanografía. Varios investigadores han utilizado la WVD para el análisis de sistemas variantes con el tiempo, y señales altamente *no-estacionarias*. La WVD ha sido sugerida como un método para el análisis de distorsión de fase en una variedad de problemas de ingeniería de audio, y *no-linealidades* o defectos en sistemas. Se ha usado para analizar voz, *datos sísmicos*, y vibraciones mecánicas. Investigadores han aplicado la teoría de señales aleatorias a la WVD y han usado la WVD para *detección de señales, estimación espectral y de frecuencia instantánea*, y reconocimiento de patrones. Las técnicas de síntesis con la WVD han sido utilizadas para implementar filtrado variante con el tiempo, separación de multicomponentes en la señal, y diseño de ventanas y filtros [8].

La elección de la TFR para el análisis de la señal depende de la aplicación y del tipo de señal a tratar. Para el caso en que se desea conocer la distribución Tiempo-Frecuencia de la energía de la señal se pueden aplicar ambas TFRs vistas en este capítulo (*espectrograma o STFT al cuadrado, y SPWVD*). La elección de alguna de las dos se hace en base a la que proporcione mayor resolución de la distribución en tiempo-frecuencia.

A continuación se hace el análisis de una señal real de una sola componente  $\cos(4\pi t)$  con frecuencia de muestreo de  $f_s=50$  Hz, la cual se presenta en la figura 10. La frecuencia fundamental de esta señal se centra en 0.04 de la frecuencia normalizada, es decir,  $(0.04)T_s$  o bien, 2 Hz. La distribución SPWV proporciona mejor resolución tal y como se vió en puntos anteriores, mientras que el espectrograma o STFT al cuadrado tiende a dispersarse más, perdiendo resolución.

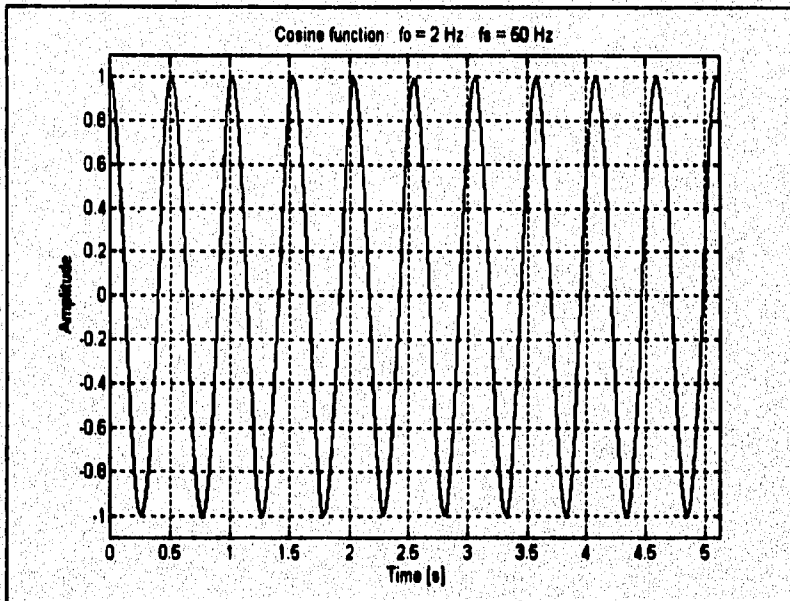


Figura 10.

En la figura 11 se observa la TFR correspondiente al espectrograma de la señal descrita anteriormente, mientras que en la figura 12 se tiene la SPWVD de la misma señal. Se observa claramente que la SPWVD es la mejor elección para tener una mejor resolución en tiempo-frecuencia a pesar de los términos de interferencia, los cuales se reducen debido al proceso de suavizado. Las gráficas de estas distribuciones se realizaron en MatLab<sup>®</sup> y fue utilizada la misma longitud y tipo de ventana (Hanning) en el eje del tiempo para ambas distribuciones.



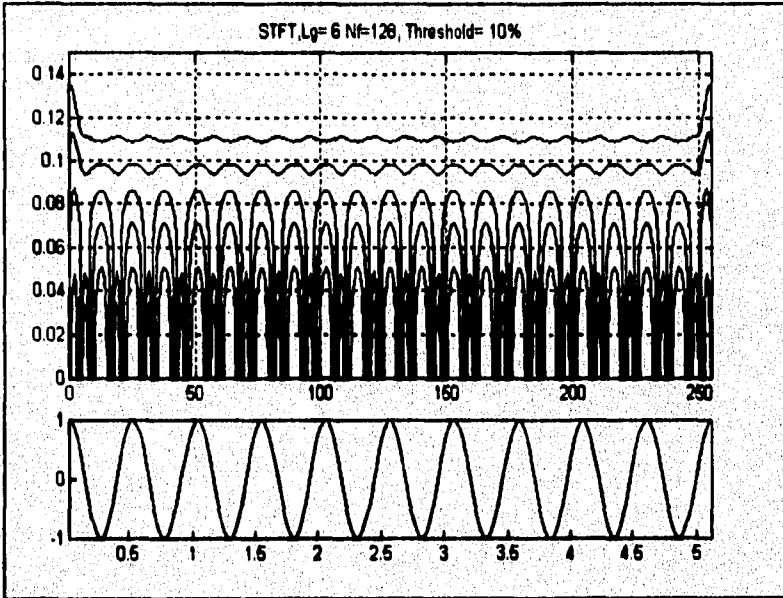


Figura 11.

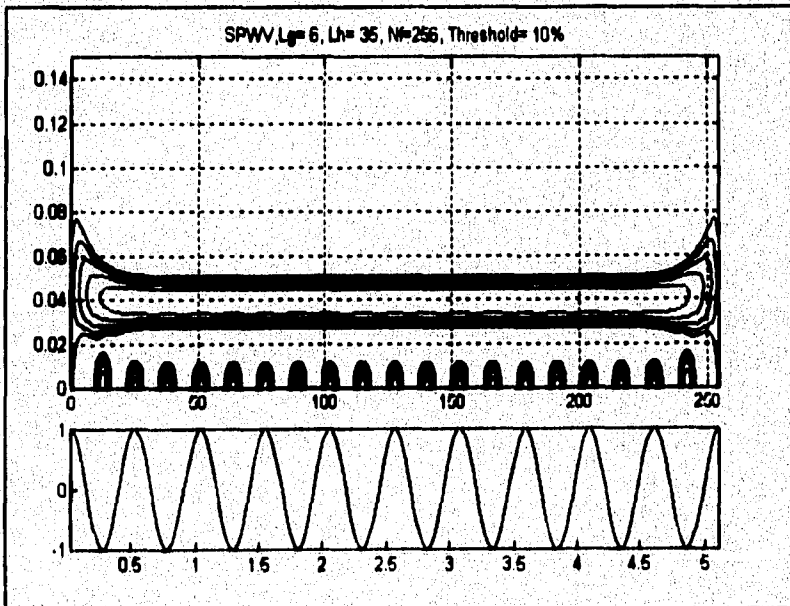


Figura 12.

Para el caso del análisis de señales sísmicas utilizaremos la SPWVD por ser la que mayor número de propiedades matemáticas cumple (véase anexo 2), la que es factible de implantarse en tiempo-real por la característica de ventaneo en el tiempo que a su vez realiza una operación de suavizado de los términos de interferencia, por la disminución de términos de interferencia al suavizarlos tanto en frecuencia como en el tiempo, por su buena resolución tiempo-frecuencia, por su propiedad de autocorrelacionar la señal, eliminándose el ruido aditivo de la misma, y debido a que es la distribución más general por medio de la cual se derivan otras distribuciones (clase Cohen), siendo fácil su programación en la implementación del caso discreto.

Vale la pena mencionar que existe una gran cantidad de TFRs de energía, tal y como es la clase Cohen vista anteriormente, las cuales pueden proporcionar mejores características de resolución y en algunos casos cumplir varias propiedades matemáticas de la WVD, por lo que se puede hacer extensiva la investigación a elegir una mejor distribución Tiempo-Frecuencia para el análisis de señales sísmicas. La presente no tiene tal objetivo, por lo que se propone el uso de la SPWVD que proporciona las ventajas citadas anteriormente.

**CAPITULO 3**  
**ALGORITMO DEL SISTEMA DE**  
**ALARMA SISMICA ACTUAL**

## **CAPITULO 3. ALGORITMO DEL SISTEMA DE ALARMA SISMICA ACTUAL**

Existen diversos algoritmos para detectar un sismo, tales como los métodos estadísticos, o los que trabajen en tiempo real. En este capítulo centraremos nuestra atención en el algoritmo que actualmente es utilizado en México, conocido como Sistema de Alerta Sísmica (SAS).

Este algoritmo trabaja en tiempo real en la costa de Guerrero, México. A continuación se muestra en la figura 13 la ubicación de las estaciones del SAS. Los nombres de las estaciones corresponden al lugar en que se localizan, siendo estas las que se muestran a continuación:

1. PAPANCA
2. EL VEINTE
3. TETITLAN
4. CACALUTLA
5. PEÑAMO
6. EL JARDIN
7. SAN PEDRO
8. EL CORTES
9. LAS VIGAS
10. EL CARRIZO
11. MARQUELIA
12. HUEHUETAN

Se registran sólo sismos de la costa de Guerrero porque esta zona es la de mayor actividad sísmica en nuestro País. Esto se debe a que la falla de San Andrés pasa justamente por la costa de Guerrero, siendo esta falla la que genera sismos de mayor intensidad con relación a otros sismos provenientes de otras zonas del País. Además, debido a su cercanía con la Ciudad de México, y por ser ésta la más poblada y con condiciones del subsuelo que ponen en riesgo la estabilidad de sus construcciones, se requiere entonces conocer de antemano la ocurrencia de un posible sismo generado en esta zona para poder alertar a la población con anticipación y que se tomen las precauciones debidas. El registro de sismos generados en la costa de Guerrero también se basa en que históricamente los sismos ocurridos de mayor intensidad han provenido de esta zona, como es el caso del terremoto de 1985, que dió origen a la necesidad de alertar a la población.

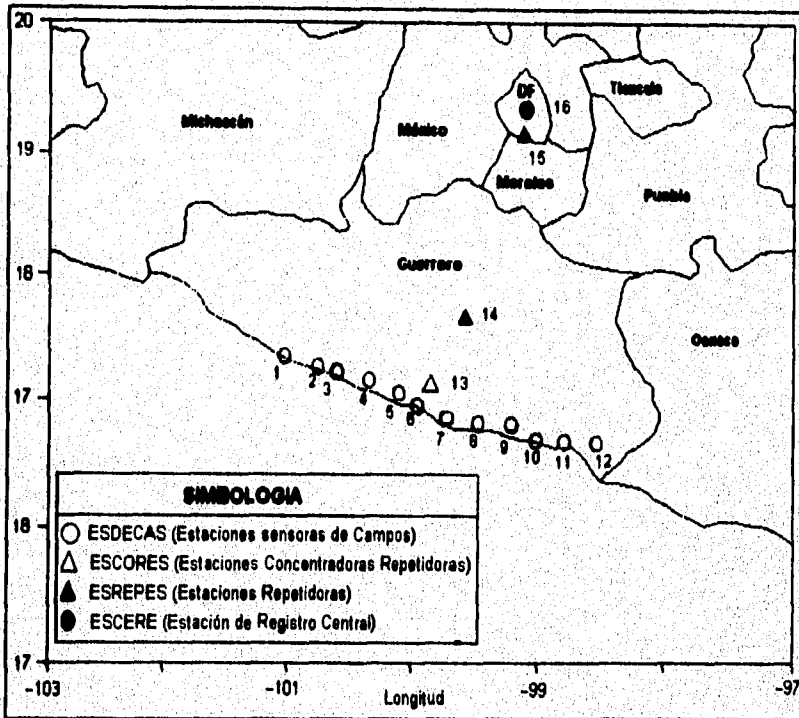


Figura 13.

Como se puede observar en la figura 13, la señal sísmica es obtenida en las estaciones sensoras de campo que monitorean toda la costa de Guerrero. Se tienen doce estaciones de campo localizadas desde Papacoa hasta Punta Maldonado. Cada estación transmite la señal recibida a una estación concentradora y repetidora, que se localiza en el cerro El Veladero, en Acapulco. Una vez que se tienen todas las señales, éstas se multiplexan en tiempo y se mandan por un canal de frecuencia a otras estaciones repetidoras localizadas cerca de la Ciudad de México, en los cerros El Alquitrán y Chichinautzin, según se aprecia en la figura 13. Por último, la señal se envía a la estación central de registro, la cual corresponde al Centro de Instrumentación y Registro Sísmico, AC. (CIRES).

En la estación central de registro, se reciben las señales provenientes de las estaciones de campo, casi de manera simultánea, debido a la transmisión por radiofrecuencia. Una vez que se tiene la señal sísmica en la estación central de registro, es digitalizada y almacenada en forma magnética.

La señal resultante es una señal discreta en tiempo y continua en amplitud. La conversión analógica/digital se realiza con 12 bits de resolución y una frecuencia de muestreo de 50 Hz.

### Capítulo 3. Algoritmo del Sistema de Alarma Sísmica Actual

Una vez que se tiene la señal sísmica digital, ésta se envía a una computadora digital PC a través de un protocolo RS-232., tanto para su almacenamiento magnético como para la aplicación del algoritmo. Esto es, las señales recibidas se procesan a través de un algoritmo para determinar si se trata de un sismo o no.

Si el algoritmo decide que efectivamente se trata de un sismo, y además se verifica que tiene una magnitud mayor o igual que 6.0 en la escala de Richter, se transmite una señal de alarma sísmica, también por radiofrecuencia, a las emisoras de radio para hacerla llegar a la población en general.

Debido a que las ondas sísmicas tardan aproximadamente 60 segundos en llegar a la Ciudad de México, la cual se encuentra a unos 250 Km de la falla en que se produce el epicentro, la posibilidad de recibir la señal de alarma sísmica, precisamente esos 60 segundos antes de que el temblor se sienta en la Ciudad de México, puede prevenir a la población en general para tomar las debidas precauciones antes de que se presente una posible catástrofe. La ventaja de las ondas electromagnéticas en la transmisión por radiofrecuencia, es que éstas viajan a la velocidad de la luz la cual es de 300,000 Km/s, mientras que las ondas sísmicas superficiales viajan aproximadamente a 3.2 Km/s, de acuerdo con mediciones hechas por el CIRES. Es por esto que se puede considerar que al activarse la señal de alerta sísmica simultáneamente se acaba de generar la onda sísmica en la falla debido a una ruptura de la misma. Al activar el SAS se advierte a la población de que se cuenta con 50 segundos para tomar las precauciones adecuadas, de modo que se tiene un margen de seguridad en el tiempo previsto antes de la llegada de las ondas sísmicas a la Ciudad de México. Por otro lado, el proceso del algoritmo debido al uso de un procesador digital de señales (DSP), prácticamente no consume tiempo, procesándose entre muestras de la señal.

El SAS está orientado para prevenir a la población ante la presencia de un sismo que esté por sentirse, y así tomar las medidas de seguridad adecuadas. Esto surgió como necesidad de prevenir otra catástrofe como la ocurrida en el terremoto del 19 de Septiembre de 1985, en la Ciudad de México, con una magnitud Richter de 6.1.

El algoritmo del SAS que actualmente trabaja en el CIRES, se basa en el cálculo de la energía de la señal para caracterizar a una señal como sísmica cuando su nivel de energía excede cierto umbral. Además, una vez considerada la señal como sísmica, se calcula su magnitud Richter y si ésta excede los 6.0, entonces se activa la alerta sísmica.

El cálculo de la energía de la señal viene dado por:

$$E_x(t) = \int x(t)x^*(t)dt = \int |x(t)|^2 dt$$

de tal modo que al considerar las tres componentes del sismo, la expresión anterior es equivalente a:

$$E_x(t) = \int \left[ |n(t)|^2 + |e(t)|^2 + |v(t)|^2 \right] dt$$

Para el caso en que la señal está digitalizada, la integral se transforma en una sumatoria:

$$E_x(m) = \sum_n \left[ |n(m)|^2 + |e(m)|^2 + |v(m)|^2 \right]$$

Si se cumple que  $E_x(m) > \eta$  donde  $\eta$  es el umbral en cuestión, se considera que la señal  $x(t)$  recibida es una señal sísmica. En tal caso, se calcula la magnitud Richter, y si excede los 6.0, se activa la alerta sísmica. La magnitud Richter de 6.0 es precisamente el umbral para la activación de la alerta sísmica. Debido a que la energía y la magnitud del sismo se relacionan según se vió en el capítulo 1, a través de la expresión mostrada abajo, realmente la detección se basa en calcular la magnitud Richter de la señal recibida, y si ésta excede el umbral de 6.0, se activa la alarma.

La magnitud de la señal recibida en la muestra de tiempo  $m$ , se calcula en función de la energía de acuerdo a la siguiente expresión [4], según se vió en el capítulo 1:

$$M_s(m) = \frac{\log_{10} E_x(m)}{1.5} - 7.87$$

Como el cuadrado de la amplitud es directamente proporcional a la energía,  $E = k \cdot A^2$ , entonces se deduce que el umbral realmente está relacionado directamente con la amplitud, por lo que la detección se basa en el nivel de amplitud.

Este supuesto se basa en que la energía liberada por un sismo es realmente grande, así como el hecho de que las ondas superficiales detectadas por el sismómetro también son grandes, en comparación con el resto de las señales, tanto no superficiales como no sísmicas, incluyendo el ruido.

Este algoritmo ha presentado de cuatro eventos una falsa alarma, teniendo cierta confiabilidad. Si bien, la energía de un sismo realmente es grande en comparación con la energía acumulada de cualquier otra señal que no sean las superficiales, el sistema no está exento de fallas, debido a las perturbaciones que frecuentemente son sensedas por el sismómetro.

A continuación se mencionan algunos ejemplos de señales que proporcionan alta energía y no son sismos, estos son: las componentes de D.C. en el sistema de adquisición de datos del sismómetro por falta de calibración; debido a la alta sensibilidad de los sismómetros, un golpe cercano a ellos proporciona vibraciones de alta amplitud; por ejemplo, la patada de una vaca cerca del sensor, tal y como ocurrió una vez, genera alta energía; inclusive las vibraciones mecánicas del subsuelo por el paso de transporte pesado pueden generar señales de alta energía; otro ejemplo, es la dinamitación de alguna zona cercana a los sensores, aunque es un caso poco común, o el derrumbe superficial de alguna parte del terreno también cercano al sensor.

**CAPITULO 4**  
**ALGORITMO PROPUESTO**



## CAPITULO 4. ALGORITMO PROPUESTO<sup>3</sup>

### 4.1 Introducción

El Sistema de Alerta Sísmica (SAS) para la Ciudad de México ha estado funcionando desde hace tres años. Con el fin de aumentar su confiabilidad en la determinación de magnitud de sismos mayores de 6 se requiere de un mayor número de parámetros para poder mejorar la confiabilidad de la evaluación.

Uno de estos parámetros es el contenido espectral de la señal sísmica que está siendo analizada. Por lo que se hace necesaria la adición de un subsistema que lo evalúe en tiempo real. El presente proyecto propone el diseño y programación de un algoritmo que realice esta función.

Se hace necesario obtener un método más confiable que el actual del SAS, como consecuencia en fallas de este último. Esto se debe a que al caracterizar una señal sísmica sólo por su nivel de energía, la probabilidad de falsa alarma llega a ser alta, debido a que señales no-sísmicas o perturbaciones son frecuentemente sensedas por los sismómetros. Por citar un ejemplo, la energía generada por la patada de una vaca cerca del sensor, tal y como ocurrió una vez, podría generar una señal en el sensor que excede al umbral y entonces activar la alarma sísmica. Es por esto necesario encontrar métodos más confiables que discriminen las señales sísmicas de otras señales.

Para obtener información adicional de la señal, se propone obtener un parámetro basado en el contenido de frecuencia de la señal. La caracterización en frecuencia será obtenida a través de una representación Tiempo-Frecuencia.

Se utiliza la distribución Smoothed Pseudo Wigner-Ville (SPWVD) para obtener después la frecuencia instantánea (IF) y su derivada, como una función del tiempo. Se hace uso de la SPWVD debido a las ventajas que presenta en su implementación y por la buena resolución tiempo-frecuencia que proporciona, tal y como se vió al final del capítulo 2 en el tema de "Análisis de Señales en el Plano Tiempo-Frecuencia". Con estos resultados, verificamos si la IF de la señal cae dentro del rango de frecuencias que caracteriza a una señal sísmica generada en la costa de Guerrero. Este rango de frecuencias se obtuvo mediante el análisis de varios sismos provenientes de la costa de Guerrero.

Al mismo tiempo, se obtiene la envolvente de la energía instantánea a través de la derivada de la energía acumulada filtrada (FCED). Con esta envolvente, se detectan las transiciones a lo largo de la señal sísmica. Con la energía acumulada (CE), se activa la señal de alerta sísmica, cuando esta excede algún umbral o nivel de energía.

Finalmente, se deben de dar las siguientes prealarmas: en la transición de *flat* (ausencia de señal) a onda *P*, y de onda *P* a onda *S*. Una vez que se está en onda *S*, si el sismo excede la magnitud de 6.0, se debe activar la alarma sísmica.

<sup>3</sup> Este capítulo fue parcialmente publicado en las memorias del Simposio Internacional "Time-Frequency and Time-Scale Analysis". Véase referencia [13].

## 4.2 Análisis de Señales Sísmicas con la Distribución Wigner-Ville

El primer paso a seguir, es el análisis de las señales sísmicas al procesarlas con una representación Tiempo-Frecuencia (TFR). Para esto, es necesario saber qué representación Tiempo-Frecuencia se aplicará. En base a las conclusiones y resultados obtenidos de dicho análisis, se establecerá el comportamiento del parámetro frecuencia que caracterizará la señal sísmica. En base a esta caracterización se implementará un algoritmo para la detección de señales sísmicas cuando se reciba cualquier señal desde el sensor. Esta detección provee una discriminación de señales sísmicas de otras señales no-sísmicas, que pudieran tener un comportamiento transitorio en su oscilograma similar a las sísmicas.

La representación Tiempo-Frecuencia (TFR) elegida es la distribución smoothed pseudo Wigner-Ville (SPWVD), debido a sus útiles propiedades que satisface y su sencilla implementación con relación a otras distribuciones. Además, al compararla con la distribución short-time Fourier-transform (STFT), es claro que proporciona una representación más precisa de la distribución de la energía de la señal en frecuencia a lo largo del tiempo.

A parte de ser una distribución de energía, característica apropiada para la señal debido a que la alerta sísmica se basa en un umbral de energía, contiene buena resolución tanto en tiempo como en frecuencia, siendo ésta una de las características de la distribución Wigner-Ville. Esta representación tiempo frecuencia de energía que satisface un gran número de propiedades matemáticas [8] está definida por:

$$W_x(t, f) = \int_{\tau} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi f\tau} d\tau$$

Además, debido a que el algoritmo debe trabajar en *tiempo-real*, y como la señal es digitalizada, el *ventaneo* tiene que ser aplicado a la señal  $x(t)$  en el caso discreto [10]. Cuando aplicamos el ventaneo en el dominio del tiempo y calculamos la distribución Wigner-Ville (WVD), realmente estamos obteniendo la distribución pseudo Wigner-Ville (PWVD) [10]. La PWVD es, de hecho, una "short-time WVD" que utiliza una ventana de análisis desplazándose [8]. Esto quiere decir que la señal es suavizada (smoothed) en frecuencia. Esta operación de ventaneo equivale a multiplicar la WVD por una ventana en el tiempo.

Debido a los términos de interferencia que existen en las distribuciones Tiempo-Frecuencia cuadráticas, es mejor usar también la operación de suavizado (smoothed) en el dominio del tiempo. Esto significa filtrar la WVD, que es similar a multiplicarla por una ventana en la frecuencia. Haciendo esto, se obtiene mayor resolución de la distribución tanto en la frecuencia como en el tiempo, obteniéndose la distribución smoothed pseudo Wigner-Ville (SPWVD) [8] la cual se define como:

$$SPWVD_x^{(g,h)}(t, f) = \iint_{t', f'} g(t-t') H(f-f') W_x(t', f') df' dt'$$

Para nuestro caso, las ventanas suavizadoras  $g(t)$  y  $H(f)$  son del tipo Hanning definida como [12]:

$$\begin{cases} \frac{1}{2} \left[ 1 + \cos\left(\frac{2\pi}{NT}\right) \right] & |t| < NT/2 \\ 0 & |t| > NT/2 \end{cases}$$

en donde  $NT$  es el ancho de la ventana y  $f_s = 1/T = 50$  Hz es la frecuencia de muestreo.

El uso de la SPWVD como TFR para el análisis de las señales sísmicas se justifica porque:

- Al tratarse de una TFR cuadrática, se obtiene una distribución de la *energía* en frecuencia y en el tiempo.
- Tiene una buena concentración tiempo-frecuencia, dando resolución a la distribución.
- Elimina términos de interferencia debido al suavizado tanto en frecuencia como en el tiempo. El kernel de la transformación WVD a SPWVD es de dos ventanas, una en frecuencia y otra en tiempo, de tal modo que el suavizado en tiempo es independiente del suavizado en frecuencia y viceversa.
- Es factible su implementación en *tiempo-real*. Esto se debe al proceso de ventaneo en el tiempo.
- A parte de su interpretación energética por ser una TFR cuadrática, tiene una interpretación correlativa, la cual combina la correlaciones temporal y espectral. Debido a esto, tiende a reducir el ruido aleatorio involucrado dentro de la señal, produciendo una distribución de energía más pura.

Para cada componente direccional de la señal del sismo, se calcula la SPWVD. A continuación se muestran las gráficas referentes a un sismo tomado de la estación de Huehuetán. La gráfica 14 corresponde al oscilograma, mientras que las gráficas 15, 16 y 17 corresponden a la SPWVD de los ejes  $N$ ,  $E$ , y  $V$ , respectivamente.

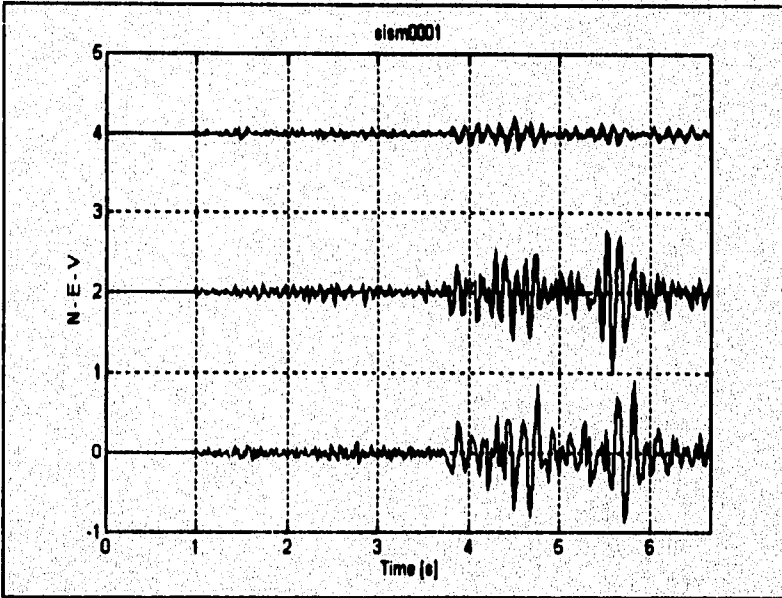


Figura 14.

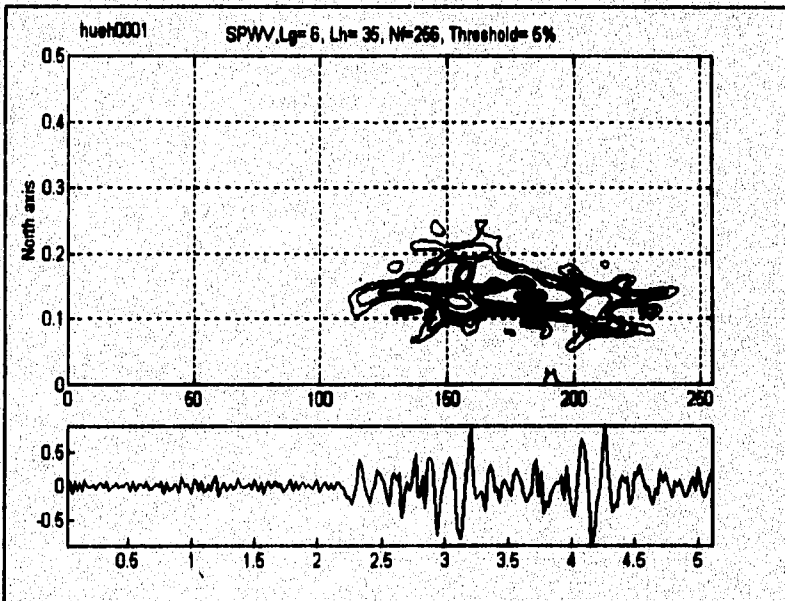


Figura 16.

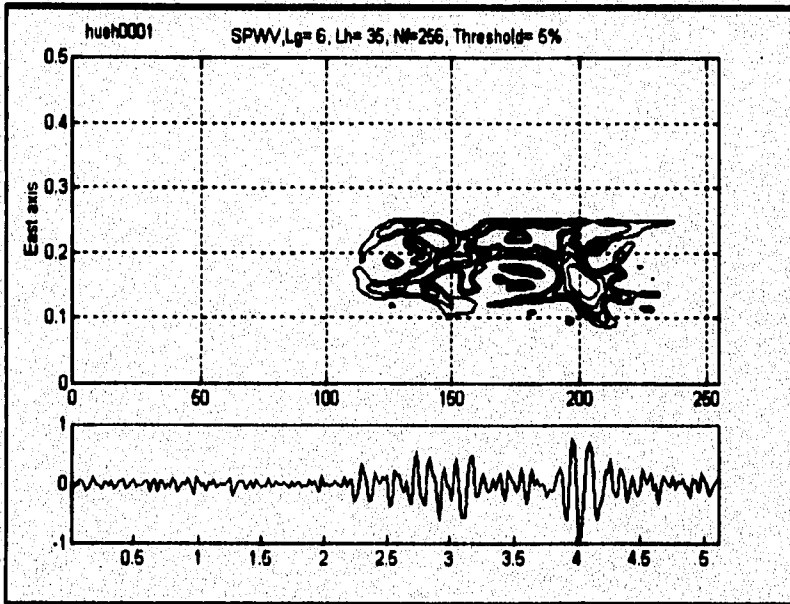


Figura 16.

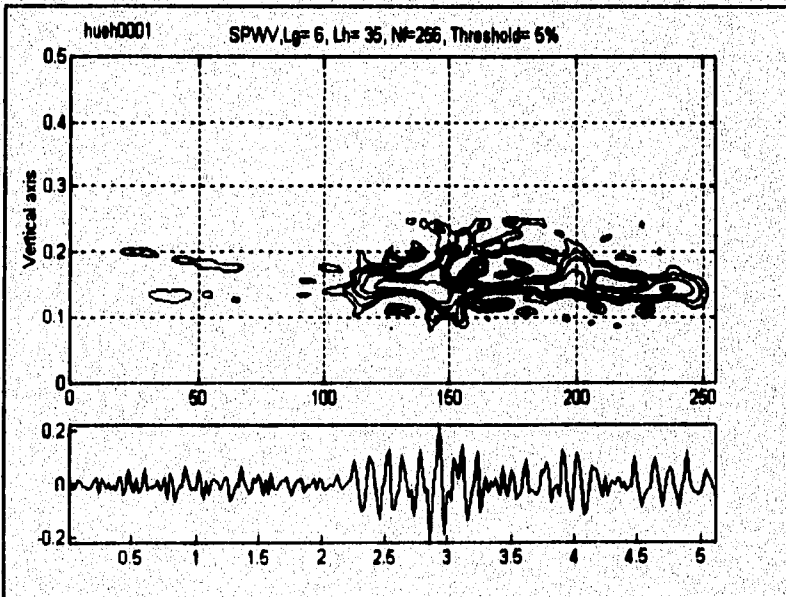


Figura 17.

Como se puede apreciar, la distribución en los tres ejes es similar, con ligeras variaciones. Además, se puede apreciar que la distribución está en un rango de frecuencias entre 0.1 y 0.2 de frecuencia normalizada, esto es, el rango es de  $0.1 \cdot f_s$  y  $0.2 \cdot f_s$ , siendo  $f_s$  la frecuencia de muestreo correspondiente a 50 Hz.

También se puede apreciar que los niveles máximos de la energía para la señal S prácticamente coinciden en la misma frecuencia, además de que coincide con el rango de frecuencias de la onda P. De aquí se puede suponer que la onda P y la onda S caen dentro del mismo rango de frecuencias para un tiempo determinado.

Para reafirmar este supuesto, comparemos las dos gráficas correspondientes a la misma componente direccional Norte-Sur del mismo sismo, pero ahora aplicando el reasignamiento propuesto por P. Fiandrin y F. Auger [9]. Este último aplicado a la SPWVD produce su nueva versión reasignada, la RSPWVD, la cual concentra lo más posible tanto en tiempo como en frecuencia la distribución, además de que atenúa los términos de interferencia, dando mayor resolución sin perder información en la distribución.

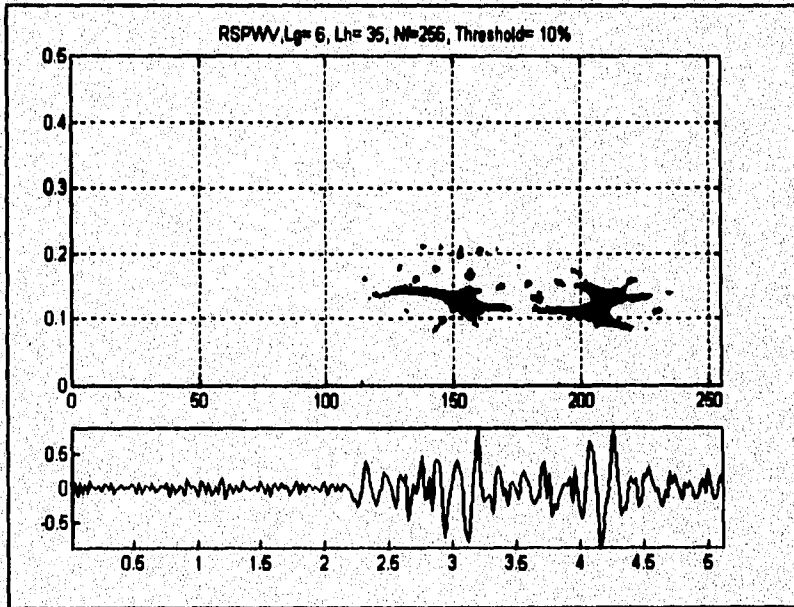


Figura 18.

La única característica en contra del reasignamiento es que este método no es apropiado para nuestros propósitos debido a la condición de tiempo-real. La RSPWVD no se puede calcular en tiempo-real.

Podemos ver que la RSPWVD de la figura 18 nos da una medida más precisa de la distribución de la frecuencia a lo largo del tiempo, obteniéndose un rango de frecuencias más reducido. Con esto, el rango entre 0.1 y 0.2 de frecuencia normalizada, se reafirma. Se puede apreciar la gran similitud entre las dos distribuciones, observando que la SPWVD de la figura 15 da una buena medida de la frecuencia en función del tiempo, al compararla con la RSPWVD.

Como conclusión, estimamos que en una señal sísmica su nivel de energía más elevado se distribuye en el rango de frecuencias normalizadas entre 0.1 y 0.2. Además, la onda P y la onda S caen dentro de este mismo rango de frecuencias.

Este último resultado se ha confirmado con el análisis de otros sismos de la misma zona. Además, dependiendo de la distancia al epicentro, la frecuencia fundamental de la señal sísmica varía. Por estar interesado sólo en sismos de Guerrero, y debido a que la distancia epicentral a los sensores prácticamente no varía mucho, entonces casi no habrá variaciones en la frecuencia fundamental, por lo que restringimos la búsqueda de la señal en el rango de frecuencias entre 0.1 y 0.2 de  $f_0$ .

### 4.3 Uso de la Frecuencia Instantánea

De acuerdo con el análisis anterior, podemos apreciar que la RSPWVD proporciona un rango de frecuencias más reducido que la SPWVD. Esto se debe a su propiedad de concentrar la distribución de la energía tanto en el tiempo como en la frecuencia.

A través del análisis de los resultados obtenidos con la SPWVD y su versión reasignada, probada sobre varios sismos, se aprecia que el rango de frecuencias predominante es el que va de 0.1 a 0.2 de frecuencia normalizada. Aún más, los niveles de energía más elevados de estas distribuciones se encuentran de estos rangos.

La estimación de la banda de frecuencia de la señal a lo largo del tiempo es difícil de hacer a partir de la SPWVD y aún de su versión reasignada, debido a que las diferencias de la distribución no sólo existen entre sismos, como es de esperarse, sino también entre las componentes direccionales N, E y V de un mismo evento. Una de las principales causas es que las señales sísmicas a pesar de seguir cierto comportamiento con respecto al tiempo, son señales aleatorias y no estacionarias.

Por lo anterior, se debe buscar algún método para caracterizar mejor el comportamiento de la señal en frecuencia. Como primera instancia, los picos máximos de energía de las distribuciones se concentran en el rango de frecuencia mencionado anteriormente, pudiendo decirse que para ese instante de tiempo en que se localiza un nivel de energía elevado, esa es la frecuencia de mayor peso.

De acuerdo con esto, para un instante de tiempo, se desea conocer la frecuencia en que se concentra el nivel máximo de energía de la distribución. Aún más, se desea el valor de la frecuencia que represente el centro de energía de la distribución para un instante de tiempo dado.

Al obtener esta frecuencia que representa el centro de energía para un instante de tiempo dado, estamos caracterizando de alguna manera la frecuencia de la señal en

ese instante de tiempo, de tal modo que su comportamiento ya no se basa en un rango de frecuencias sino en una frecuencia específica. A lo largo de todo el tiempo, se estaría obteniendo el comportamiento de la frecuencia por cada instante de tiempo. De esta manera, se puede apreciar mejor dicho comportamiento para establecer algún patrón que sea similar entre las tres componentes direccionales de un mismo evento e incluso, entre distintos eventos.

Obteniendo la frecuencia del centro de energía para cada instante de tiempo a lo largo del tiempo, realmente estamos obteniendo la variación de la frecuencia con respecto al tiempo, es decir, la frecuencia en función del tiempo o *frecuencia instantánea*. Con esto, se propone el uso de la frecuencia instantánea (IF) como el lugar geométrico de la concentración de la energía a lo largo del tiempo.

Adicionalmente, la frecuencia instantánea,  $f_x(t)$ , es una propiedad de la distribución Wigner-Ville [8] cuyo cálculo viene dado por:

$$f_x(t) = \frac{\int_f f W_x(t, f) df}{\int_f W_x(t, f) df}$$

A través de la expresión anterior, se realiza el cálculo de la IF para el instante de tiempo  $t$ . Para nuestro caso, debido a que el algoritmo debe ser aplicado en tiempo-real, éste es un buen método para ir calculando el valor de la frecuencia conforme transcurre el tiempo, por esto, el cálculo de la IF se hará a partir de la SPWVD.

Debido a que cada componente direccional de un evento debe ser procesada simultáneamente con las otras componentes, la caracterización en frecuencia en forma global se hará mejor a través de la IF.

En la figura 19 se muestra la IF junto con la SPWVD de la componente direccional  $N$  del sismo representado en la figura 14. Un resultado esperado aparece cuando la IF coincide con los niveles más elevados de energía de la SPWVD, o cruza cerca de ellos.

Esto también puede observarse claramente si se aplica el reasignamiento a la SPWVD, tal y como se aprecia en la figura 20 que muestra a la IF y la RSPWVD de la misma componente direccional y del mismo evento.



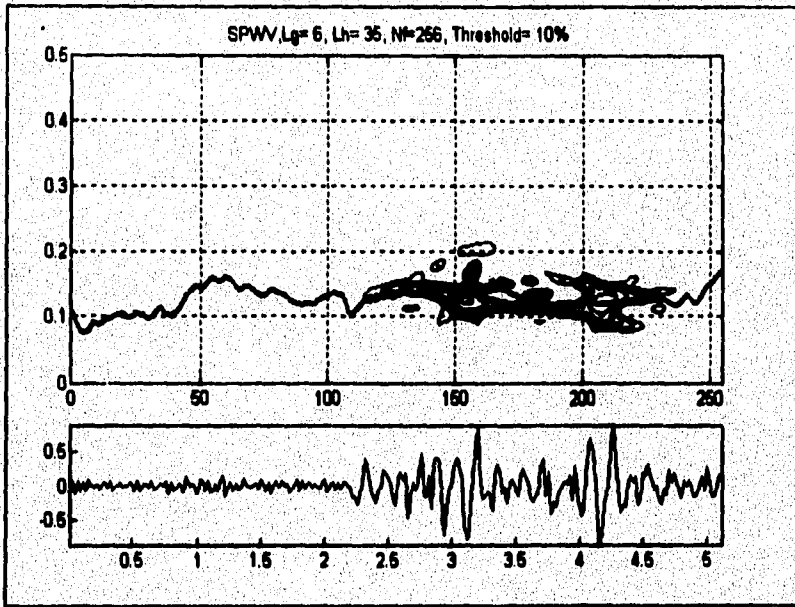


Figura 19.

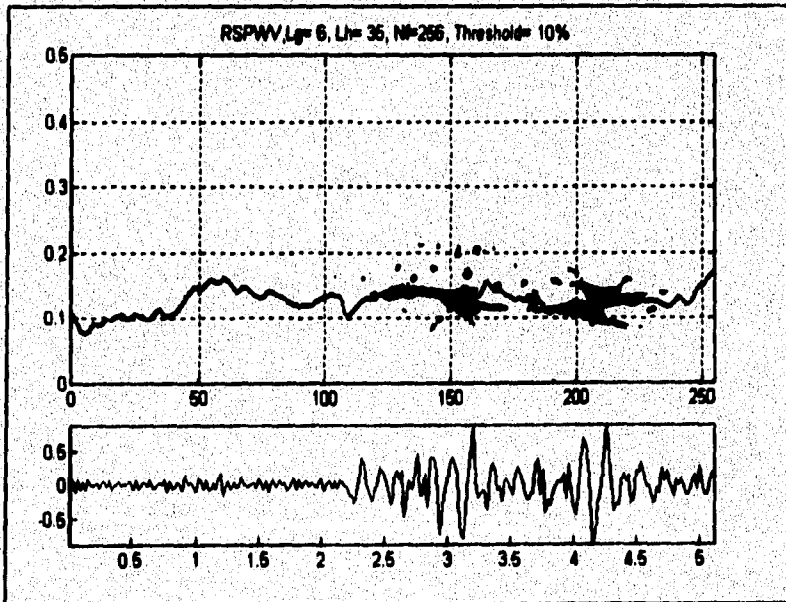


Figura 20.

La coincidencia de la IF con la RSPWVD en sus niveles elevados de energía apoya la idea de utilizar la primera como una eficiente caracterización tiempo-frecuencia de la señal.

El análisis de la IF para determinar un comportamiento y así caracterizar la señal con este parámetro, se debe realizar, primero, calculando la IF para las tres componentes direccionales *N*, *E* y *V* de un sismo y graficarlos al mismo tiempo para ver su similitud, y segundo, repitiendo este proceso para varios eventos. En la figura 21 se muestra la IF de las tres componentes direccionales del sismo de la figura 14.

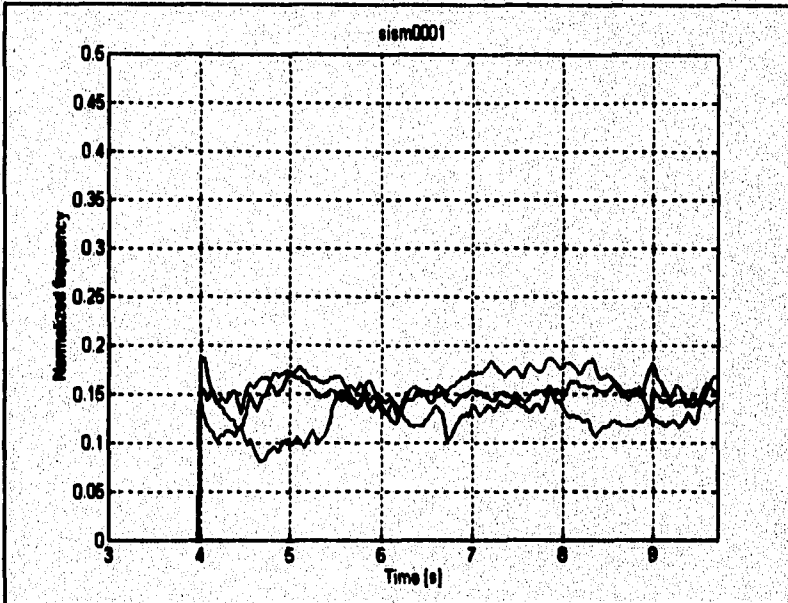


Figura 21.

Comparando la IF de las tres componentes direccionales observamos que éstas son similares para el mismo sismo. Podemos observar de la figura 21 que, en general, la IF es suave con pequeñas oscilaciones, y se encuentra dentro de cierta banda de frecuencia, siendo este el observado en la SPWVD, de 0.1 a 0.2 de frecuencia normalizada.

Las tres componentes se comportan en forma similar, podría decirse que van de la mano, teniéndose una desviación máxima de frecuencia normalizada de 0.12 entre una componente y otra.

De esta manera, podemos decir que si se cumplen las condiciones anteriores en el comportamiento de la frecuencia instantánea, entonces la señal en cuestión se trata de un sismo. Dejando así, caracterizada en frecuencia a la señal sísmica.

#### 4.4 Derivada de la Frecuencia Instantánea

Debido a que la caracterización en frecuencia es un factor importante y determinante para decidir si la señal analizada en cuestión es un sismo o no, es necesario tener una forma de verificar su comportamiento antes de tomar la decisión.

Con el objeto de verificar el comportamiento de la frecuencia instantánea, una vez que se ha determinado que se encuentra en el rango de frecuencias normalizadas de 0.1 a 0.2 correspondiente al de un sismo, se propone rastrear el hecho de que las IFs de las tres componentes son suaves con algunas oscilaciones, es decir, la IF oscila con periodo fundamental largo.

Este comportamiento puede observarse si calculamos la derivada de la frecuencia instantánea (IFD), tal y como se muestra en la figura 22.

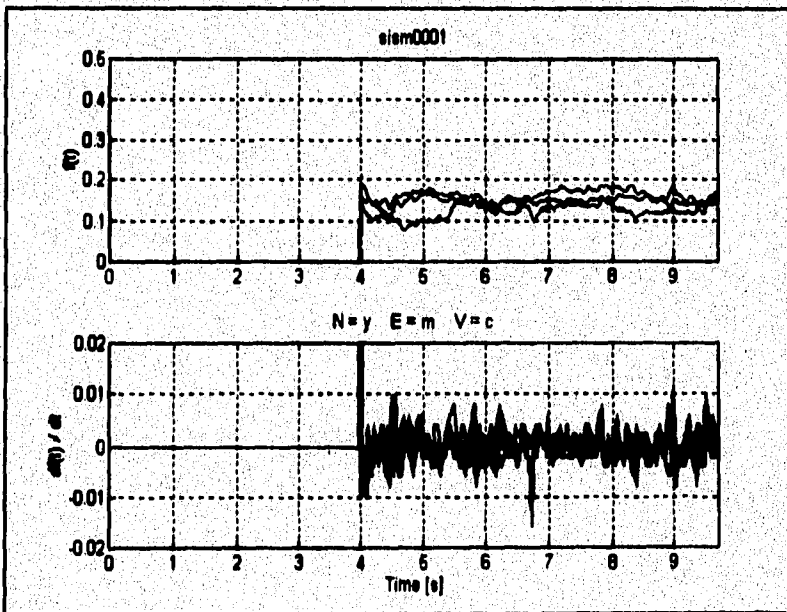


Figura 22.

La derivada de la IF es una medida de la rapidez de variación de ésta, por lo que los cambios en la IF estarán dentro de un rango de la IFD, pudiendo ser negativa o positiva dependiendo si la IF decrece o crece respectivamente.

Para fuertes oscilaciones de la IF, es decir, cuando se tienen cambios bruscos en esta, la derivada tendrá incrementos grandes. De acuerdo a observaciones experimentales con diversos sismos, es posible tener un umbral fijo, tanto arriba del cero como abajo del cero, en que la IFD no debe exceder a bajas oscilaciones de la IF.

Por otro lado, los límites de este rango en que la IFD debe localizarse en el caso de una señal sísmica, se deriva del ancho de banda en que se encuentra la IF. De acuerdo a mediciones experimentales, se observó que el rango en que se encuentra la IFD para condiciones de un sismo está entre -0.01 y 0.01, tal y como lo muestra la figura 22. Incluso, en esta figura se puede apreciar que en una componente direccional se tiene una oscilación brusca en su IF, por lo que la IFD se sale del rango establecido.

Debido a que sólo una componente se sale del rango, en ese instante de tiempo no se considera que la señal sea no-sísmica, ya que en general, a lo menos dos componentes se comportan en forma similar. Sólo en el caso de que dos componentes o más se salgan de los rangos establecidos tanto para la IF como su derivada, se considerará que la señal es no-sísmica.

Con la IF y su derivada caracterizamos la señal sísmica en tiempo-frecuencia, teniendo así conocido el comportamiento de la frecuencia, como parámetro para la detección de una señal sísmica.

#### 4.5 Análisis con la Energía de la Señal

Una vez que la señal ha sido reconocida como señal sísmica con el análisis en frecuencia, la alerta sísmica se debe activar en caso de que la magnitud del sismo sea mayor o igual a 6.0.

Es por esto que de alguna manera se debe calcular la magnitud de la señal en tiempo-real. La manera más directa de hacerlo es a través de la energía de la señal, ya que existe una relación entre la magnitud de un sismo y su energía liberada [4]. En este punto, se aplican los conceptos utilizados por el algoritmo existe en el cálculo de la energía acumulada. La energía acumulada  $E_x(t)$  de cualquier señal  $x(t)$  se calcula como:

$$E_x(t) = \int_0^t x(t) x^*(t) dt = \int_0^t |x(t)|^2 dt$$

Esto es, la energía acumulada al tiempo  $t$ , representa la suma de la energía instantánea  $|x(t)|^2$  de la señal, desde el tiempo cero hasta el tiempo  $t$ . La energía del evento completo considerando sus tres componentes direccionales se viene dada por:

$$E_x(t) = \int_0^t \left[ |n(t)|^2 + |e(t)|^2 + |v(t)|^2 \right] dt$$

Conociendo la energía acumulada (CE) en el instante de tiempo  $t$ , podemos calcular su magnitud en ese instante de tiempo a través de la siguiente expresión vista en el capítulo 1:

$$M_S(t) \propto \log_{10} E_X(t)$$

El umbral de decisión para considerar un sismo de gran intensidad por el cual se debe alertar a la población, es el mismo al del algoritmo existente y que corresponde a la magnitud de 6.0. Entonces, al conocer la magnitud  $M_S(t)$ , esta se compara contra el umbral de 6.0, para tomar la decisión de activar o no la alerta.

Los valores de esta energía (CE) representan cantidades enormes, ya que es la que mueve o sacude a la tierra. Adicionalmente, esta cantidad va creciendo conforme transcurre el tiempo.

Por otro lado, podemos observar de acuerdo al osciograma, que la onda  $P$  tiene una amplitud mucho menor en proporción con la onda  $S$ . De esto se puede deducir que la energía acumulada durante una onda  $P$  es mucho menor que la acumulada en la onda  $S$  y por supuesto mucho menor que la acumulada durante las ondas superficiales. Aún más, el cambio de energía de una onda  $P$  a una onda  $S$  es súbito y de un gran incremento. Una vez que arriban las ondas superficiales, la CE crece pero con una pendiente casi constante.

Estos cambios en la energía sugieren una posibilidad para detectar los cambios de onda en la señal, es decir, las transiciones de *flat* (ausencia de la señal) a onda  $P$ , y de onda  $P$  a onda  $S$ . Una vez que la onda  $S$  se presenta, el arribo de las ondas superficiales seguidas a esta es inminente. Por esto, la transición de onda  $P$  a onda  $S$  es importante para determinar si el sismo se presenta o no, y verificar que la magnitud debida a un acumulación de la energía de la señal, efectivamente se debe a ondas sísmicas superficiales.

#### 4.6 Derivada de la Energía Acumulada Filtrada

Una manera de que el algoritmo que se está diseñando sea más eficiente, es que sea capaz de detectar las transiciones de la señal sísmica a lo largo del eje del tiempo. Aún más, que sea capaz de indicar el arribo de las ondas superficiales, como una confirmación de que la señal en cuestión es sísmica. Esto complementa la caracterización en la frecuencia de la señal.

Como se mencionó en punto 4.5 anteriormente, la energía es un buen parámetro para detectar las transiciones de la señal sísmica, debido a que rastrea su comportamiento en el tiempo. La energía instantánea es la que mejor se adapta a esta situación, aunque la CE es otra medida de las transiciones de la señal.

Para el caso discreto, la gráfica de la energía instantánea (IE), calculada como  $|x(m)|^2$  en la muestra  $m$ -ésima de la señal discreta  $x(m)$ , es idéntica a la del osciograma pero sin la parte que está por debajo del cero. De esta manera, la IE se tiene representada como un conjunto de espigas por arriba del eje del tiempo. Tanto para el caso discreto como para el continuo, la IE es una señal positiva con grandes variaciones idénticas a las del osciograma de la señal de donde proviene.

Si elegimos la IE como parámetro para detectar las transiciones, el problema es que existen fuertes oscilaciones, tal y como sucede con la señal, como para poder establecer el cambio entre una y otra onda. Se podría poner un umbral, pero debido a

que la amplitud que pueda registrar el sismógrafo es variable, como consecuencia la IE variará en su magnitud, no pudiendo establecer un umbral que sirva de igual para todos los eventos.

De manera similar sucede con la CE, ya que el valor de la misma varía entre eventos conforme transcurre el tiempo. Además, para este caso, realmente lo que se tendría que medir son las variaciones de su pendiente, proceso que involucra derivar la CE, pero si derivamos la CE obtenemos de nuevo la IE en la cual no se pueden apreciar los cambios de pendiente.

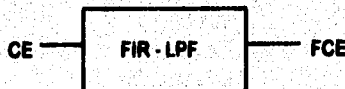
De alguna manera, la IE es una buena forma de rastrear las transiciones de la señal, por lo que nos basaremos en ésta. El problema se resuelve si en vez de analizar la IE directamente, se analiza su envolvente, que de alguna manera es otra representación de la IE. La envolvente de la IE representa el comportamiento de la IE sin las oscilaciones que esta última presenta.

Por otro lado, una manera de medir las variaciones de la pendiente de la CE, la cual resuelve el problema para detectar las transiciones, tal y como se mencionó, es a través de su derivada. La derivada de la CE (CED) representa la rapidez de variación de ésta, es decir, la rapidez de cambio de su pendiente. Si se tienen cambios de pendiente muy pequeños conforme transcurre el tiempo (línea prácticamente horizontal), significa que la señal sísmica no ha cambiado en el tipo de onda en que se encuentra (por ejemplo, onda P). Por el contrario, si se tiene un cambio brusco en la pendiente (recta con cierta inclinación), entonces se puede decir que la señal sísmica ha cambiado en su tipo de onda (por ejemplo, de onda P a onda S).

La CE se obtiene integrando la IE; de tal modo que si se deriva la primera para obtener la CED, entonces estaremos obteniendo de nuevo la IE. La CED al ser la envolvente de la IE, se comporta de manera similar a esta última, excepto que no tiene esas grandes oscilaciones que realmente representan términos de alta frecuencia. Al entender esto, la solución para eliminar esos términos de alta frecuencia, que se reflejan en la CE dándole un aspecto de rugosidad, es filtrar la CE para sólo quedarse con los componentes de baja frecuencia, que son los que interesan, ya que la envolvente de la energía instantánea (IEE) es una señal suave.

Al suavizar la CE a través del filtrado, después de derivarla, obtendremos realmente la IEE y no la IE, siendo el resultado deseado. En este caso, la IEE se obtiene como la derivada de la energía acumulada filtrada (FCED).

El tipo de filtro que se puede utilizar por tratarse de una señal discreta y aprovechando el ventaneo de la señal para su análisis en tiempo real, es un filtro digital de respuesta finita al impulso (FIR) pasabajos (LPF). El orden del filtro se determina por el tamaño de la ventana que procesa la señal, siendo ésta longitud el retraso en el tiempo que se genera entre la salida del filtro (FCE) y su entrada (CE). Este filtro se simboliza con el siguiente de bloque:



Para nuestro caso, el orden del filtro es de 16 y la frecuencia de corte es de 0.005 de frecuencia normalizada, calculándose este valor a partir del análisis sobre la alta frecuencia en la CE. Para el caso en que la frecuencia de muestreo es de 50 Hz, el atraso es de 0.32 s. Con estas características e implementando el filtro con una ventana Hanning se tiene la siguiente respuesta en frecuencia del filtro FIR-LPF [7]:

$$H(z) = \sum_{m=0}^{15} C_m z^{-m} \quad h(n) = \sum_{m=0}^{15} C_m \delta(n-m)$$

$$C_m = \frac{\sin(0.01\pi m)}{2\pi m} \left[ 1 + \cos\left(\frac{\pi m}{8}\right) \right]$$

Representando el filtro como una operador  $F(\bullet)$  se tiene que  $FCE = F\{CE\}$ , en donde la siguiente expresión representa el filtrado:

$$FCE_x(m) = \sum_n F_{LPF}(m-n) E_x(n)$$

El último paso es derivar esta expresión para finalmente obtener la derivada de la energía acumulada filtrada (FCED), es decir, la IEE, de donde:

$$FCED_x(t) = \frac{dF\{E_x(t)\}}{dt}$$

Los resultados de este proceso se muestran en la figura 23, cuyas gráficas representan, primero la CE y la FCE, notándose el atraso de esta última con respecto a la primera, después la FCED y por último el oscilograma de las tres componentes direccionales sobre el mismo eje del tiempo.

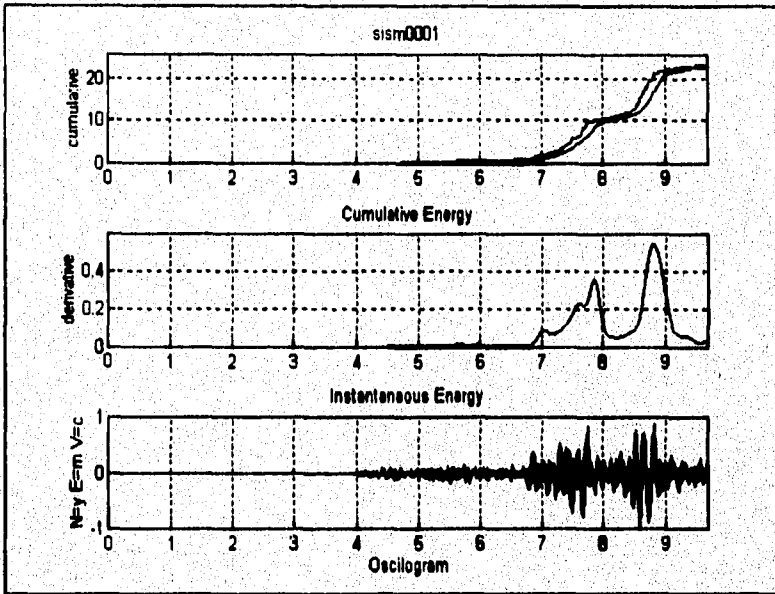


Figura 23.

En esta gráfica de la figura 23, se refleja el comportamiento de la FCED con respecto a la CE y el oscilograma de la señal, obteniéndose los resultados esperados de todo lo mencionado anteriormente. Cuando la pendiente de la CE cambia repentinamente, la FCED excede el umbral indicando ondas S, lo cual se refleja en el oscilograma.

Debido a que la FCED será utilizada para detectar las transiciones de la señal que pertenecen al conjunto (*flat*, *P*, *S*), una vez que en la frecuencia se ha determinado que la señal se trata de un sismo, es necesario poner un umbral sobre el cual la FCED indique si se trata de ondas *P*, al estar por debajo de este, o de ondas *S* al estar por encima del mismo.

Como este umbral debe ser el mismo para cualquier sismo, y dado que, lo que importa es la transición de la onda *P* a la onda *S* debido a la diferencia de niveles entre una y otra para un mismo sismo, se procederá a normalizar las tres componentes direccionales del mismo evento con respecto al valor máximo de amplitud en las tres componentes. Esto se puede hacer porque en tiempo-real la señal registrada en un sismógrafo electrónico tiene un rango dinámico de operación en voltaje, para la amplitud de la señal. Por ejemplo, la señal registrada en forma de voltaje lista para su conversión A/D, podría variar sólo de -5 a 5 volts, teniéndose un rango de voltaje fijo de 10 volts. Si la señal fuera demasiado grande en amplitud antes de ser registrada, el sistema electrónico se saturaría, dando una salida de  $\pm 5$  volts para nuestro ejemplo.

Al normalizar la señal y calcular su energía instantánea, ésta variará en el rango de 0 a 1. Con esta  $|E|$  normalizada, se aplica el proceso descrito anteriormente para obtener la FCED que para un instante de tiempo, variará de 0 a 3 de energía normalizada, al



considerar las tres componentes direccionales  $N$ ,  $E$  y  $V$ . La FCED se deriva entonces la energía instantánea normalizada de la señal, dada por:

$$E_N(t) = |n(t)|^2 + |e(t)|^2 + |v(t)|^2$$

en donde:

$$0 \leq |i(t)|^2 \leq 1, \quad i(t) = n, e, v$$

$n, e$ , y  $v$  son las componentes direccionales.

Analizando varios sismos se verifica que al normalizar, existe un umbral fijo en la FCED en el cual se da la transición de onda  $P$  a onda  $S$ , independientemente del sismo y su duración. Este valor de umbral se estimó de 0.015, verificándose en varios sismos.

Con este resultado, se puede detectar la transición de onda  $P$  a onda  $S$  y viceversa. La transición restante corresponde al cambio de *flat* a onda  $P$  o de onda  $P$  a *flat*.

Debido a que el estado de *flat* indica que no hay señal, la transición de *flat* a  $P$  o viceversa se hará en base a un umbral fijo en la amplitud de la señal. Esto es posible debido a que en teoría, si no existe señal, se estaría recibiendo un cero en el instrumento. En el caso de la señal digitalizada, pueden existir pequeñas variaciones que indican un nivel de cuantización pequeño como si hubiera señal. Realmente estas variaciones se deben al ruido, por lo que un nivel de umbral equivalente a cierto número de niveles de cuantización es suficiente para determinar si existe o no la señal, aún en presencia del ruido.

Por supuesto, este umbral se basa en los sismos ya normalizados, proceso equivalente a fijar un nivel de voltaje en tiempo-real, tal y como se hizo para el caso de la FCED.

Considerando estos umbrales, es posible detectar las transiciones de la señal sísmica que se encuentran dentro del conjunto (*flat*,  $P$ ,  $S$ ). Es decir, el análisis en energía consiste en detectar las transiciones de *flat* a onda  $P$ , de onda  $P$  a onda  $S$ , de onda  $S$  a onda  $P$ , y de onda  $P$  a *flat*. Cualquier transición de la señal se detecta y se considera como alguno de los tipos mencionados anteriormente si el comportamiento en frecuencia indica que se trata de un sismo. En caso contrario, la transición se considera como no-sismo.

#### 4.7 Cálculo del Umbral de la FCED

Para la estimación del umbral de la FCED, aplicaremos la teoría de la detección para el caso de decisión binaria [12], debido a que deseamos conocer el valor del umbral para dos estados de la señal, uno cuando se presenta la señal por debajo del umbral y otro cuando se presenta por encima de este, siendo estas las hipótesis del estado de la señal.  $H_0$  representa la hipótesis de que la señal está por debajo del umbral, es decir, ausente (para el caso de la onda  $S$ ), mientras que la hipótesis  $H_1$  se refiere a que la señal está presente.

En este criterio se tiene cuatro posibles eventos:

1.  $H_0$  verdadera; escoge  $H_0$  (correcto)
2.  $H_0$  verdadera; escoge  $H_1$  (error)
3.  $H_1$  verdadera; escoge  $H_1$  (correcto)
4.  $H_1$  verdadera; escoge  $H_0$  (error)

Este criterio de decisión asigna cierta importancia relativa a cada posible evento.

Este criterio se basa en dos suposiciones:

- (a) La fuente está regida por las probabilidades a priori  $P_0$  y  $P_1$ .
- (b) Existe un costo para cada posible evento:  $C_{00}$ ,  $C_{01}$ ,  $C_{11}$ , y  $C_{10}$ .

En donde  $C_{01}$  se refiere al costo del evento escogido 0 cuando se tuvo el evento ocurrido 1.

Se aplicará el criterio de Bayes como regla de decisión que minimiza el costo promedio. El valor esperado del costo viene dado por:

$$E(\text{costo promedio}) = C_{00} \text{Prob}(\text{escoge } H_0 | H_0 \text{ verdadero})P_0 + C_{10} \text{Prob}(\text{escoge } H_1 | H_0 \text{ verdadero})P_0 + C_{11} \text{Prob}(\text{escoge } H_1 | H_1 \text{ verdadero})P_1 + C_{01} \text{Prob}(\text{escoge } H_0 | H_1 \text{ verdadero})P_1$$

Al minimizar el costo promedio, se llega a la siguiente relación [12]:

$$\frac{P(y|s)}{P(y|o)} \underset{H_0}{\overset{H_1}{>}} \frac{P_0(C_{10} - C_{00})}{P_1(C_{01} - C_{11})}$$

en donde  $P(y|s)$  es la probabilidad de que escogerse  $H_1$  dado que fue verdadero, es decir, es la función densidad de probabilidad cuando hay señal presente, mientras que  $P(y|o)$  es el caso contrario, indicando la probabilidad de escogerse  $H_0$  dado que fue verdadero, es decir, es la función densidad de probabilidad cuando no hay señal.

El primer miembro de la ecuación recibe el nombre de razón de verosimilitud, mientras que el segundo miembro representa el valor del umbral de la señal. La razón de verosimilitud se simboliza por  $\Lambda(y)$  mientras que el umbral se representa por  $\eta$ .

$$\Lambda(y) \underset{H_0}{\overset{H_1}{>}} \eta$$

El criterio de Bayes conduce a la expresión anterior, en donde  $\Lambda(y)$  es independiente de las probabilidades a priori y de los costos asignados, ya que sólo depende de las funciones densidad de probabilidad de cuando hay o no señal.  $\eta$  es una variable

ajustable, ya que si las probabilidades a priori se llegan a conocer, entonces los costos pueden variar. Si las probabilidades a priori se conocen y los costos se fijan, se determina un umbral para esos costos. Aplicando logaritmos naturales en ambos lados de la ecuación llegamos a que:

$$\ln \Lambda(y) \begin{matrix} H_1 \\ \} \\ H_0 \end{matrix} \ln \eta$$

Se expresa de esta manera debido a que las funciones densidad de probabilidad frecuentemente contienen términos exponenciales. La expresión indica que si  $\Lambda(y)$  es mayor que  $\eta$  se escoge  $H_1$ , mientras que si es menor se escoge  $H_0$ .

El umbral se fija en un punto en el que, debido a que las funciones densidad de probabilidad se llegan a traslapar, la probabilidad de error se minimiza, siendo estos errores los dados por:

$$P_{e_1} = \int_{-\infty}^{\infty} P(y|s) dy$$

$$P_{e_0} = \int_{\eta}^{\infty} P(y|o) dy$$

Es decir,  $P_{e_0}$  representa el error que se comete al escoger  $H_1$  debiendo escogerse  $H_0$  (falsa alarma), y  $P_{e_1}$  es el error que se comete al escogerse  $H_0$  cuando se debió escoger  $H_1$  (omisión del sismo). Estos errores se deben al tomar la decisión con el umbral especificado.

Para poder aplicar este criterio es necesario conocer el modelo de las funciones de las densidades de probabilidad. Con el fin de obtener éstas, se graficará el porcentaje de ocurrencia (eje vertical) contra la amplitud de la FCED (eje horizontal), para ver como se distribuye la FCED en su amplitud. Realizando esta paso experimentalmente, obtenemos las gráficas de la distribución de la amplitud de la FCED tanto para cuando no hay señal presente (onda P) como para cuando está presente (onda S). Estas gráficas obtenidas de los sismos anteriores, corresponden a las figuras 24, 25, 26 y 27.

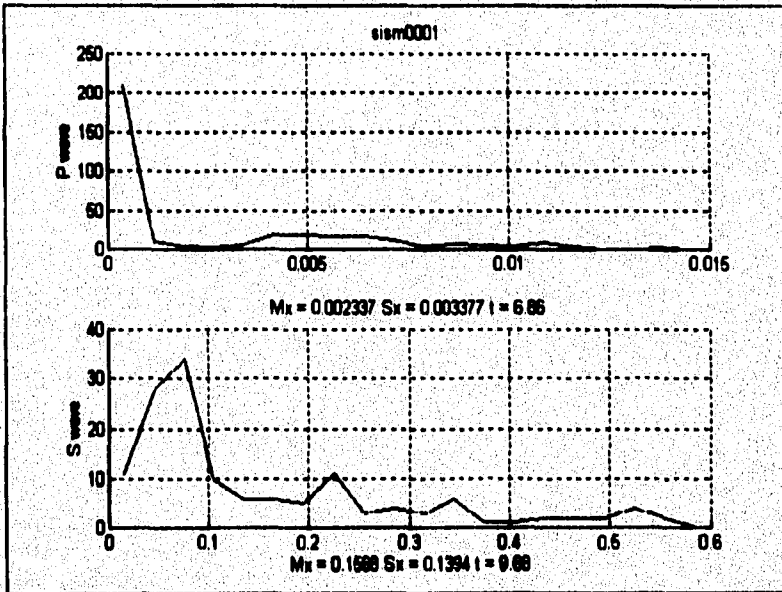


Figura 24.

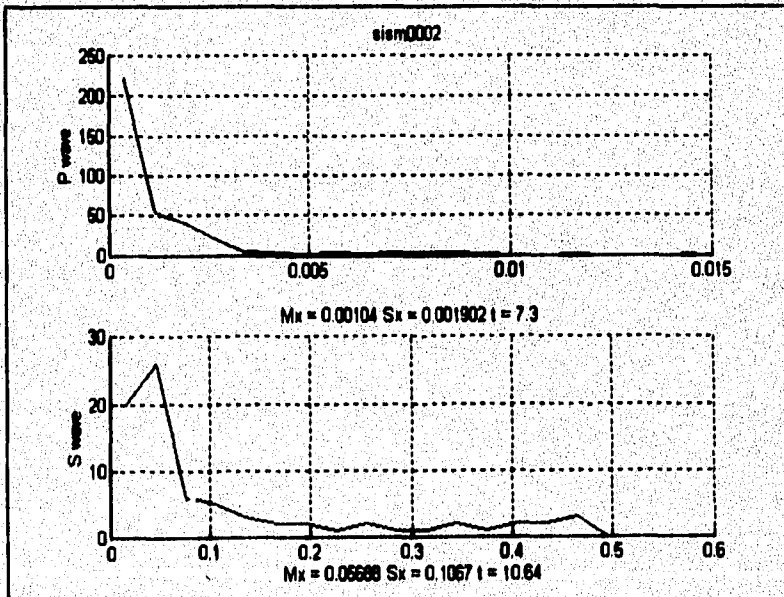


Figura 25.

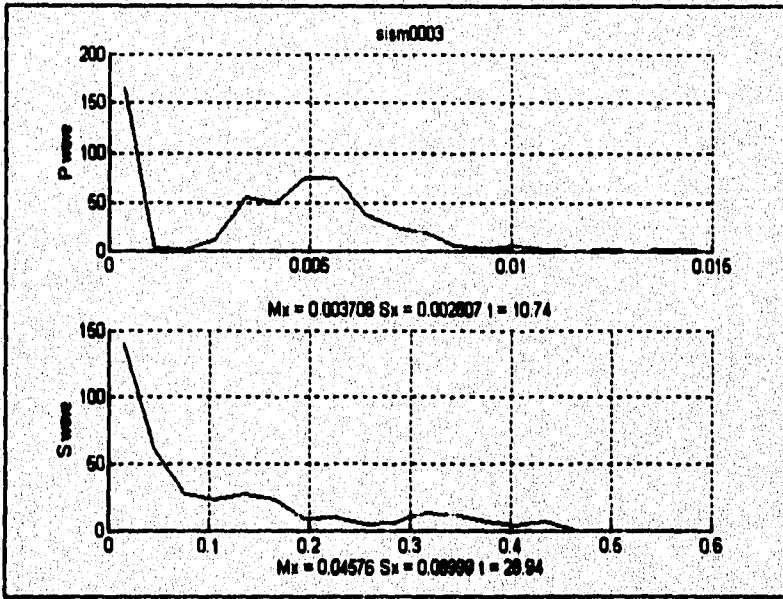


Figure 26.

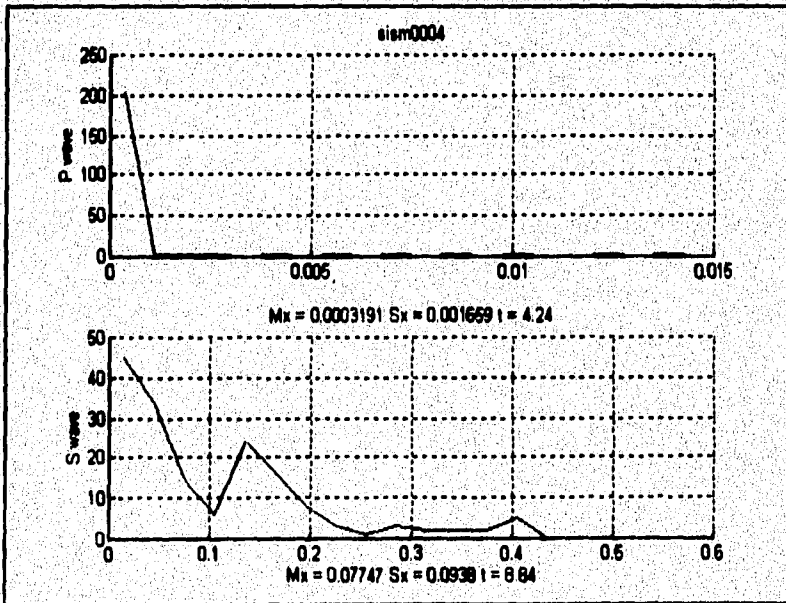


Figure 27.

Para obtener una mejor distribución que represente a la de todos los sismos, las distribuciones anteriores se promediarán, obteniéndose la figura 28 que a continuación se muestra.

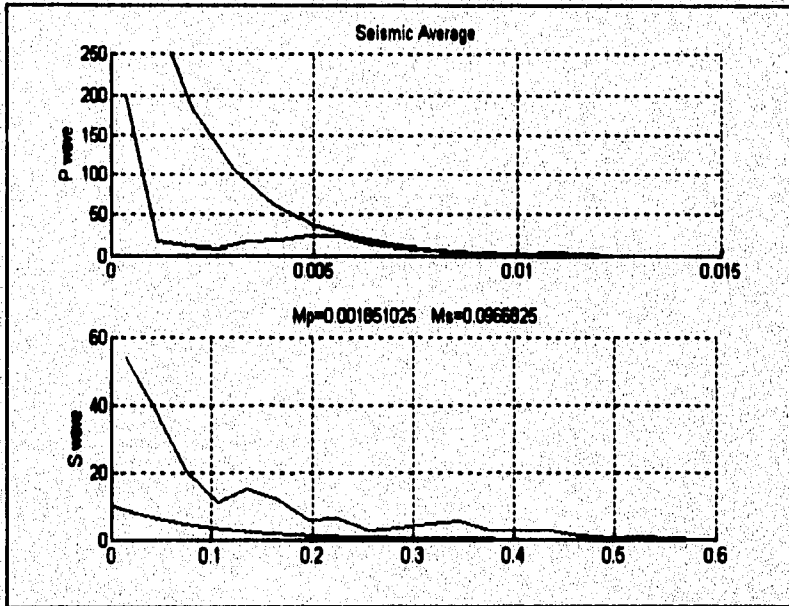


Figura 28.

De acuerdo a los resultados anteriores, en la figura 28 se observa que el comportamiento de la distribución es muy parecido a la de una función exponencial, por lo que el modelo matemático apropiado sería la función densidad de probabilidad definida como:

$$P(y|s) = \lambda_s e^{-\lambda_s y}$$

donde

$$\lambda_s = \frac{1}{\mu_s}$$

siendo  $\mu_s$  el valor de la media de la función densidad de probabilidad. Debido a que este parámetro depende de mediciones estadísticas, es el promedio de las medias de las distribuciones graficadas anteriormente. Estos valores se presentan en la figura 28, obteniéndose  $\mu_D = 0.001851025$  y  $\mu_S = 0.0966825$ . A su vez, los valores de lambda vienen dados por  $\lambda_D = 540.2412177$  y  $\lambda_S = 10.34313345$ . La muestra de cuatro sismos nos proporciona una buena medida de estos parámetros.

Estas funciones densidad de probabilidad exponencial con sus parámetros obtenidos experimentalmente se grafican también en la figura 28 junto con las distribuciones experimentales para los casos de onda P y onda S. Las gráficas de estas funciones se aprecian como curvas suaves y continuas.

Como vemos, una función densidad de probabilidad exponencial es la que mejor se adapta a nuestras características debido a que la señal de energía siempre es positiva con respecto al eje del tiempo, dando como consecuencia una función densidad de probabilidad positiva. Además, estas dos funciones densidad de probabilidad, una para la ausencia de señal (onda P) y otra para la presencia de ella (onda S), siempre se traslapan, teniéndose la necesidad de buscar un punto para colocar el umbral lo mejor posible. Por otro lado, de los parámetros de las funciones densidad de probabilidad exponenciales, se observa que en el cero de las funciones, se tiene el valor máximo dado por las lambdas, existiendo una diferencia enorme entre una y otra, ya que la primera vale cerca de 540 y la segunda cerca de 10.

En la figura 29 se muestra la gráfica de las dos funciones densidad de probabilidad que se traslapan, graficando un acercamiento del punto en que se intersectan, para tener una mejor apreciación del valor del umbral a estimar.

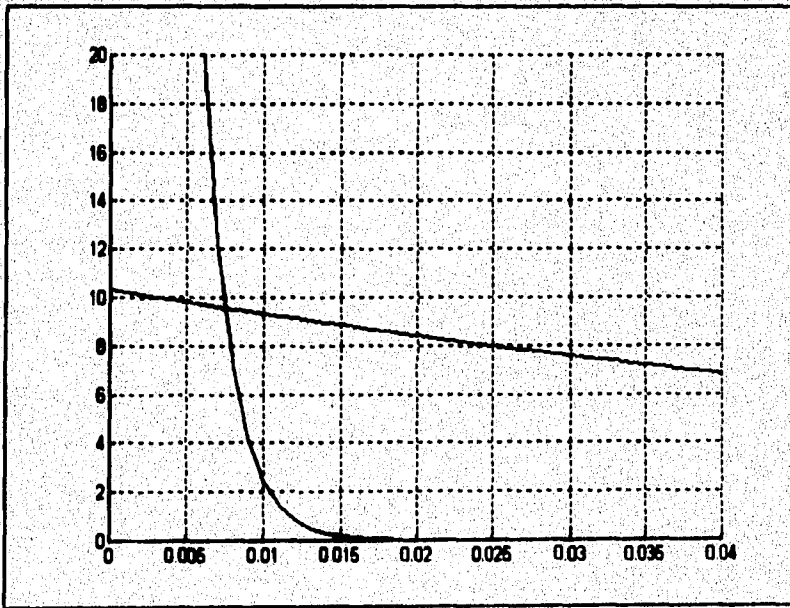


Figura 29.

Para la estimación del umbral requerimos calcular el ratio de verosimilitud en función de las funciones densidad de probabilidad. Substituyendo las funciones densidad de

probabilidad en las expresiones que relacionan el ratio de verosimilitud y el umbral, llegamos a la siguiente expresión general:

$$y_i \left\{ \begin{array}{l} H_1 \\ H_0 \end{array} \right. \frac{\ln(P_0) - \ln(P_1) + \frac{\ln(C_{10} - C_{00}) - \ln(C_{01} - C_{11})}{\lambda_0 - \lambda_1} + \frac{\ln(\lambda_0) - \ln(\lambda_1)}{\lambda_0 - \lambda_1}}$$

Ahora falta determinar el valor de los costos y las probabilidades a priori. Estas probabilidades se fijarán con un valor de 1/2 cada una, debido a que no se tiene un conocimiento a priori de las ocurrencias de un sismo, aunque se puede calcular pero lleva un proceso largo porque se basa en registros anteriores. Por otro lado, al dársele este valor, hacemos que el umbral de decisión decida independientemente de la frecuencia con que ocurren los sismos. Al dársele esta probabilidad, realmente consideramos igualdad de posibilidades de que al tomar la decisión se tenga ausencia o presencia de la señal, forzando a que el criterio decida en condiciones totalmente desconocidas. Entonces, se tiene que:

$$P_0 = P_1 = \frac{1}{2}$$

Cuando se trata de los costos en que el evento ocurrido es igual al evento escogido, para nuestros propósitos este es nulo debido a que el algoritmo no nos va a reportar ningún costo si tenemos éxito. Al contrario, va a ser un beneficio en estos casos, por lo que:

$$C_{00} = C_{11} = 0$$

De acuerdo a estos valores, nuestra expresión para el umbral se reduce a:

$$y_i \left\{ \begin{array}{l} H_1 \\ H_0 \end{array} \right. \frac{\ln(C_{10}) - \ln(C_{01})}{\lambda_0 - \lambda_1} + \frac{\ln(\lambda_0) - \ln(\lambda_1)}{\lambda_0 - \lambda_1}$$

Debido a que  $\lambda_0$  y  $\lambda_1$  son parámetros conocidos, entonces al sustituirlos obtenemos:

$$y_i \left\{ \begin{array}{l} H_1 \\ H_0 \end{array} \right. \frac{\ln(C_{10}) - \ln(C_{01})}{529.898} + 0.00747$$

Con lo que obtenemos una expresión general que depende de los costos en que el evento escogido es opuesto al ocurrido. El valor de  $y_i$  corresponde al valor de la muestra  $i$ -ésima en cuestión de la FCED contra la cual se comparará el umbral estimado.



De acuerdo con lo anterior, consideremos dos casos para la estimación del umbral:

1. Los costos son iguales.  $C_{01} = C_{10} = 1$ .

Consideremos el valor del costo máximo igual a la unidad, como en el caso de las probabilidades, para tenerlo normalizado. Si los costos son iguales, esto significa que el costo debido a una equivocación por falsa alarma, es igual al de equivocarse por una omisión del sismo. La *falsa alarma* indica que se detectó señal cuando ésta no estaba presente. La *omisión del sismo* es el caso contrario, ocurrió el evento y no se alertó sobre él. Si los costos son iguales y a su vez máximos, el valor del umbral se coloca justamente a la mitad del obtenido experimentalmente, teniéndose los siguientes resultados:

$$y_i \left. \begin{array}{l} H_1 \\ \\ H_0 \end{array} \right\} 0.00747$$

$$P_{e_0} = 0.017867$$

$$P_{e_1} = 0.0741623$$

Esto indicaría que el costo es muy elevado para cualquier tipo de error, ya sea falsa alarma u omisión del sismo (falsa supresión). Es por esto que el umbral se coloca en el punto medio, de tal manera que, en la mitad de los casos puede existir omisión del sismo y en la otra mitad falsa alarma. De acuerdo a las probabilidades de error, el error que se comete por omisión del sismo es más elevado que el de la falsa alarma, en el orden de 7 veces.

La figura 30 muestra la gráfica de la funciones densidad de probabilidad y el umbral para este caso.

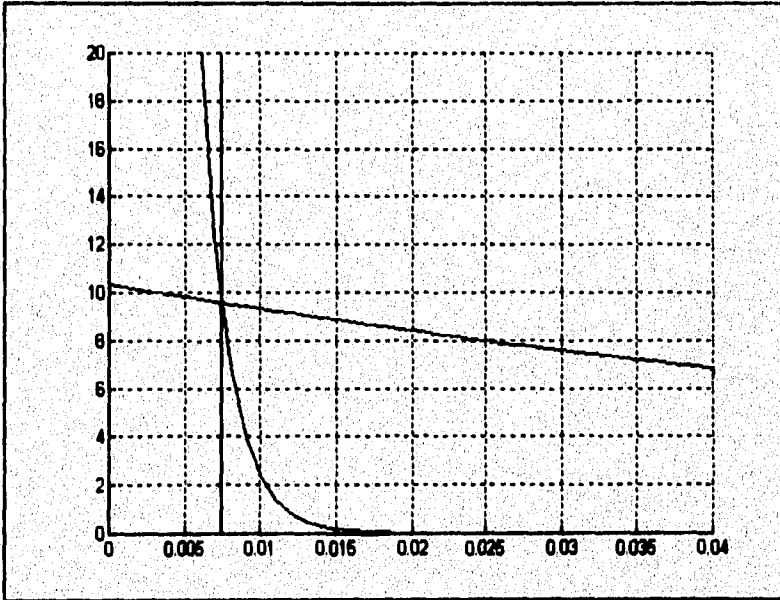


Figura 36.

2. Los costos son distintos y opuestos.  $C_{01} = 0.02$  y  $C_{10} = 0.98$ .

En este caso, el costo por falsa alarma, ya que se escoge la presencia de la señal (1) cuando en realidad no está presente (0), denotado como  $C_{10}$ , es prácticamente la unidad siendo el costo máximo, mientras que el costo por omisión del mismo,  $C_{01}$ , es prácticamente nulo. No se tomaron los valores límites debido a que al substituir los valores en el logaritmo natural que involucra el umbral, se haría indeterminada la expresión del radio de verosimilitud. Por esto, los valores tienden a los extremos para poder calcular el valor del umbral, pero consideremos la idea de que son los extremos.

En este caso, si no se activa la alerta debido a que se dejó pasar la señal, el costo sería nulo, es decir, sin repercusiones. Por el contrario, si se activa la alerta dando una falsa alarma, entonces el costo sería extraordinariamente alto. Esto se debe al indicar que está presente la señal cuando en realidad no es así. Los resultados obtenidos son:

$$y_i \left. \begin{array}{l} H_1 \\ \\ H_0 \end{array} \right\} 0.0149$$

$$P_{e_0} = 0.0003192$$

$$P_{e_1} = 0.1428246$$

En la figura 31 se puede apreciar la localización de este umbral, el cual corresponde a nuestro caso obtenido a través de la experimentación.

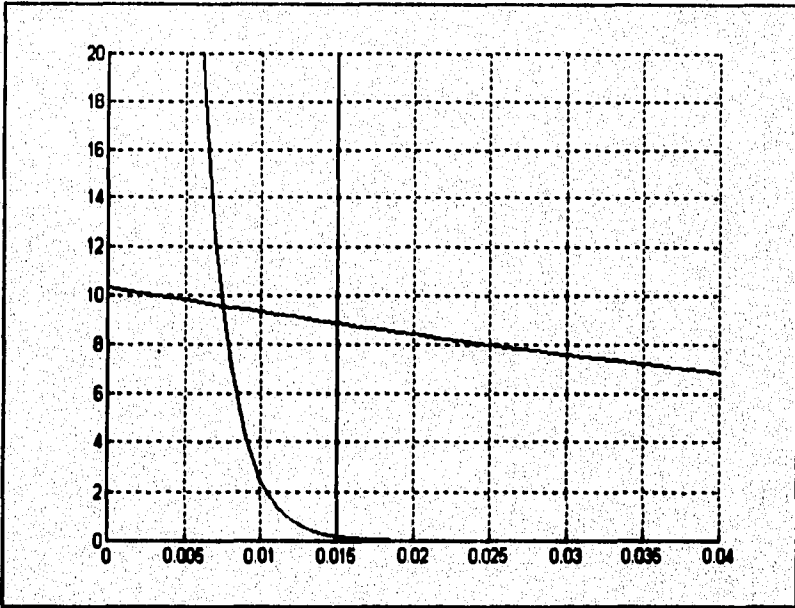


Figura 31.

Para este caso en que el costo de la falsa alarma es elevado, el error por falsa alarma disminuye considerablemente porque prácticamente vale cero, es decir, con este umbral casi no se presentan falsas alarmas. Esto también se refleja en el hecho de que el umbral está totalmente al doble de elevado del umbral con costos iguales, de tal manera que habrá un menor número de señales que lo superen con relación al umbral de costos iguales. Por otro lado, el error por omisión del sismo creció también bastante, pero está dentro de un porcentaje tolerable, indicando que de cada 100 eventos en que se presenta la señal, 14 no serán detectados, y como consecuencia la alerta no será activada.

Debido a que el algoritmo propuesto está diseñado para caracterizar mejor a la señal sísmica y detectarla en una manera más eficiente para distinguirla de otras señales no-sísmicas, es más importante tener el menor número de falsas alarmas, para que le de confiabilidad al sistema. Es por esto que el costo de falsa alarma debe ser el más elevado de los dos costos asociados al error, además la probabilidad de error de cometer falsa alarma debe estar lo más reducida posible, para que el algoritmo sea eficiente. Esto significa que el algoritmo no tenga error al decir que la señal analizada es sísmica, si la señal presente es de este tipo.

Con lo anterior, coinciden los resultados obtenidos experimentalmente con los del segundo caso en la estimación del umbral. Esto le da validez al algoritmo y al umbral obtenido, ya que de forma teórica se respalda el parámetro obtenido para la detección de transiciones, el cual es un indicador de que efectivamente exista una señal sísmica.

Por otro lado, una falsa alarma, es de gran repercusión para la población, debido al pánico que desata la activación de ésta. Además, la credibilidad en el método empleado para la detección de las señales, objetivo esencial de la alarma, se ve disminuida, haciendo menos eficiente el algoritmo.

Cabe mencionar que uno de los objetivos principales para el desarrollo de este trabajo es el hacer un algoritmo más eficiente que esté menos expuesto a fallos de falsa alarma, tal y como se indicó en la introducción en el caso del SAS. Adicionalmente, el objetivo de una alarma es indicar que la señal está presente porque efectivamente así es, y no el de dar falsas alarmas.

### 4.8 Sistema Completo en Tiempo Real

El algoritmo para la detección de sismos que trabaje en tiempo-real se obtiene a través de los resultados y conclusiones obtenidas en el análisis anterior, tanto para la caracterización en frecuencia como en el análisis en energía.

Es importante hacer mención que al menos dos ejes deben comportarse en forma similar, debido a que el sismo se propaga en todas direcciones, se pueden tener sus tres componentes direccionales *N*, *E* y *V*, de las cuales las componentes horizontales son las más similares por ser el caso más común de movimiento, mientras que la componente vertical puede variar ya que depende del tipo de movimiento generado, siendo grande para movimientos traidatorios, y pequeño para movimientos oscilatorios.

De acuerdo a esto, cuando menos en dos ejes se deben cumplir las condiciones especificadas en frecuencia para decidir si la señal se trata de un sismo o no. En el caso de que sólo en una componente se cumplan las condiciones especificadas para la IF y la IDF, la señal analizada se considerará como un no-sismo.

Lo anterior se puede afirmar como consecuencia del análisis en frecuencia de la señal. Esto surge del hecho de que las IFs van de la mano prácticamente, es decir, se comportan de manera similar dentro del rango de frecuencias establecido. Este comportamiento similar es de esperarse si consideramos que cada componente direccional corresponde al mismo evento que se produjo en la misma fuente, presentándose así la distribución de la energía conforme transcurre el tiempo de manera muy similar entre componentes, tanto en la frecuencia como en sus niveles de energía.

Una de las características más importantes presente en el comportamiento de la IF, es que tanto la onda *P* y la onda *S* tienen, en sus tres componentes direccionales *N*, *E* y *V*, el mismo ancho de banda en que la IF se localiza, además de que se comportan en forma similar. Con esto podemos decir que el contenido de frecuencia en la onda *P* y en la onda *S*, y finalmente la de la onda sísmica, es el mismo a lo largo del tiempo. Su característica en frecuencia es similar entre componentes direccionales y entre

distintos eventos sísmicos. Como consecuencia la IF es un parámetro eficiente de la caracterización tiempo-frecuencia de la señal sísmica.

Con esto, la señal sísmica puede ser totalmente caracterizada para ser reconocida como tal, y a su vez distinguida de otras señales no sísmicas.

El análisis en energía se realiza sobre una sola señal, la FCED obtenida, que ya involucra al mismo tiempo las tres componentes para un sólo evento. Este análisis soporta dos cosas: la detección de las transiciones a lo largo del tiempo, y el cálculo de la magnitud del sismo.

El algoritmo trabaja de la siguiente manera:

Una señal cualesquiera de la que se desea saber si es sísmica o no se procesa con el algoritmo definido. Se aplica tanto el análisis en frecuencia como en energía de manera simultánea. La señal conforme se va recibiendo en tiempo-real se analiza dentro de una ventana de aproximadamente 0.32 segs. de longitud con respecto al eje del tiempo. El tamaño de la ventana podría ampliarse en caso necesario pero se eligió este tamaño por ser el intervalo necesario para el filtro FIR-LPF de orden 16 con ventana Hanning que se utiliza en la obtención de la FCED. De esta manera, se aprovecha en tiempo-real los datos procesados dentro de la ventana Hanning tanto para el análisis en frecuencia como el análisis en energía, procesándose 16 muestras a la vez.

Para el análisis en frecuencia primero se obtiene la SPWVD por cada componente de la señal que se está recibiendo, posteriormente se calcula la IF también por cada componente, y al mismo tiempo se calcula la derivada de cada IF. Una vez que se han procesado los parámetros necesarios se procede a hacer el análisis de los mismos.

Este análisis consiste en verificar que al menos la mitad (51%) de las muestras que están dentro de la ventana, no se salgan de los umbrales en frecuencia instantánea. En este caso, al estar dentro de los umbrales, se dice que la señal es un sismo. Además, cuando menos dos ejes deben de indicar que se trata de un sismo, de lo contrario se indica que es un no-sismo. Si en la IF se indica que se trata de un sismo, se verifica su comportamiento a través de su derivada. De manera similar, cuando menos dos ejes y la mitad de las muestras de la ventana por cada componente (51%) deben de estar dentro de los rangos establecidos.

Constantemente se está verificando si la señal tiene las características en frecuencia descritas anteriormente para reconocerla como sismo. De hecho, cada vez que la ventana de análisis avanza una muestra, el algoritmo analiza el comportamiento en frecuencia. Si la señal se considera como un sismo, las transiciones detectadas a través del análisis de energía se consideran para la activación de las prealarmas necesarias que indican la etapa del sismo. De lo contrario, las transiciones detectadas se consideran como la presencia de un no-sismo.

Cuando se tiene reconocida a la señal como una señal sísmica, se manejan dos prealarmas antes de la alarma de alerta, que corresponden la primera al cambio de fase a onda P, y la segunda al cambio de onda P a onda S. La alarma de alerta se activa cuando se tuvieron activadas las dos prealarmas anteriores al ser reconocida la señal

como sísmica a través de su comportamiento en frecuencia, y al superar el nivel de magnitud de 6.0 para el sismo en cuestión.

Si se detecta un transitorio de *flat* a onda *P*, se verifica la frecuencia instantánea dentro de la ventana de análisis, para decidir si se trata o no de un sismo. En caso de que se verifique que es un sismo, se activa la primera prealarma. El mismo procedimiento se aplica a la transición de onda *P* a onda *S* e incluso en cualquier transición posterior. Una vez que se ha detectado la primera transición a partir de *flat*, constantemente se verifica si la IF se encuentra dentro de sus umbrales, cuando menos para dos componentes. Si no se cumple esto último, al tratarse de un no-sismo las prealarmas se desactivan y el acumulamiento en la energía para el cálculo de la magnitud se resetea, es decir, se reinicia con cero para volver a acumularla. Debido a que es posible tener un error durante una sola muestra, éste se reduce al considerar como no-sismo toda la señal dentro de la ventana de análisis, tal y como se mencionó anteriormente. De este modo, se le da tiempo al algoritmo para que se establezcan las condiciones necesarias si sólo se trata de un transitorio, y de esta manera, no se resetea la energía acumulada ni las prealarmas.

Para detectar la transición de *flat* a onda *P*, se compara la amplitud de las tres componentes del sismo contra un umbral fijo. Si al menos dos componentes rebasan el umbral, se considera la transición, de lo contrario, no se reconoce. Al aplicar el algoritmo se verificó que al tratarse de un sismo, al existir la transición de *flat* a onda *P* se cumple generalmente que las tres componentes exceden el umbral.

Se determinaron cuatro tipos de umbral, dos corresponden al análisis en frecuencia y otros dos corresponden al análisis en energía. Estos umbrales se resumen a continuación:

En el análisis de frecuencia, las tres componentes del sismo se encuentran dentro del rango de frecuencias normalizadas de 0.1 a 0.2. La diferencia en frecuencia normalizada entre una componente y las otras, para un instante de tiempo dado, es de 0.12 máximo en valor absoluto. La derivada de la frecuencia se utilizó para verificar las que las oscilaciones de la frecuencia instantánea de las tres componentes son suaves, obteniéndose un rango de operación de -0.01 a 0.01. Al menos el 51% de muestras dentro de la ventana de análisis de la IF para dos componentes como mínimo debe estar dentro del rango establecido de frecuencias. El mismo criterio se aplica para el caso de la derivada de la IF de las tres componentes. Este proceso permite hacer el análisis para las muestras de la ventana y no sólo para una muestra, proporcionando una reducción en el error que comete el algoritmo al equivocarse en la decisión.

En el análisis de energía, el umbral de *flat* a onda *P* se determina en amplitud a través de una estimación dada durante el primer segundo de análisis de la señal. Es por esto, que una condición necesaria para que el algoritmo funcione apropiadamente, es que el sistema que aplica el algoritmo debe partir del reposo, es decir, en ausencia de cualquier señal (*flat*) para poderlo llevar a un estado inicial a partir de aquí. Esto se controla en el reset del sistema que aplica el algoritmo.

La estimación de este umbral se hace considerando la moda en amplitud de las muestras durante el primer segundo mencionado. Por definición, la moda de un conjunto de datos es el valor que más se repite. Si se deseara determinar el valor de

flat a partir de iniciar el sistema en onda *P*, es mejor utilizar la media considerando que el eje del tiempo de la señal está centrado en el cero.

Para el caso del umbral que determina la transición de onda *P* a onda *S* o viceversa, este se encuentra en 0.015 de la FCED. Si la FCED excede este valor, se considera que la señal sísmica está en onda *S*, de lo contrario se considera que puede estar en onda *P* o en flat, verificando esto con el umbral en amplitud mencionado anteriormente.

El último umbral es el determinado por la magnitud del sismo que tiene un valor de 6.0 en la escala de Richter. Si el algoritmo indica que ha terminado un sismo, como resultado de la respuesta en frecuencia, el cálculo de la CE se reinicia a partir de cero (reset), y en el caso de que existan transiciones pero el comportamiento en frecuencia indica que no se trata de un sismo, entonces la energía no se acumula. Si la señal recibida ha sido detectada como sismo, se han reconocido sus transiciones de flat a onda *P* y de onda *P* a onda *S*, la energía se acumula para ir calculando la magnitud. Si se alcanza o excede el umbral de magnitud 6.0, la alerta sísmica se activa. La energía se sigue acumulando para efectos estadísticos, hasta que la señal deje de detectarse como no sísmica y regrese al reposo.

Las conclusiones principales del análisis de las señales sísmicas, tanto en tiempo-frecuencia como en energía, son la base para poder implementar el algoritmo capaz de trabajar en tiempo-real. Estas conclusiones se pueden resumir de la siguiente manera:

#### A. $SPWVD_x^{(s,II)}(t, f)$

1. Los picos de energía están dentro del mismo rango de frecuencias y coinciden tanto en frecuencia como en tiempo para las tres componentes direccionales.
2. El ancho de banda de la frecuencia para un instante de tiempo *t* dado, es angosto y está en el intervalo de [0.1; 0.2] de frecuencia normalizada, a partir de un umbral del 40% del pico máximo de energía de la distribución. Se cumple para las tres componentes direccionales.

#### B. $f_x(t)$

1. Son funciones suaves con algunas oscilaciones, que están dentro de un rango de frecuencias.
2. El rango de frecuencias es fijo tanto para las tres componentes direccionales como para distintos sismos, el cual es de [0.1; 0.2] de frecuencia normalizada.
3. Las tres componentes se comportan de manera similar, pudiéndose decir que van de la mano siguiendo la misma trayectoria, con 0.12 de frecuencia normalizada como desviación máxima entre ejes.
4. Tanto la onda *P* como la onda *S* siguen el mismo rango de frecuencias, de donde se deduce que ambas ondas tienen el mismo contenido espectral.

C.  $\frac{df_x(t)}{dt}$

1. Es una medida de las oscilaciones o rapidez de variación de la frecuencia instantánea, la cual se mantiene dentro de un umbral fijo de  $[-0.01; 0.01]$ .

D.  $FCED_x(t)$

1. El umbral para detectar una transición entre ondas de la señal sísmica es fijo y viene dado por el intervalo de  $[-0.015; 0.015]$ . Se tiene una sola función que involucra las tres componentes direccionales. Si se excede este umbral, se determina una transición de onda P a onda S, mientras que si se atraviesa por debajo de este, significa que hubo una transición de onda S a onda P. La FCED representa la envolvente de la energía instantánea.

En general, cada componente direccional del sismo se comporta de manera similar a las otras componentes. Para cada componente se obtiene el proceso y se analizan las tres componentes al mismo tiempo. Los picos y formas de onda, tanto para  $x(t)$ ,  $f_x(t)$ , y  $FCED_x(t)$  coinciden o se comportan de manera muy parecida, cuando menos en dos componentes. Se manejan umbrales en estos parámetros para los cuales si la señal recibida cae dentro de ellos, esta queda caracterizada como un sismo.

Cuando el sismo inicia existe un incremento en las energías CE y FCED, hay un incremento en la amplitud de cada componente, la IF de cada componente cambia drásticamente para localizarse en el rango de frecuencias establecido, la IFD rastrea a la IF definiéndose dentro del rango de frecuencias establecido, y la FCED sobrepasa el umbral establecido cuando se tiene el arribo de la onda S. El algoritmo verifica que los parámetros estén dentro de los umbrales establecidos. El algoritmo se repite cada muestra en la que avanza la ventana de análisis.

Estos resultados se pueden apreciar en la figura 32 la cual muestra los resultados del algoritmo al procesar con este al sismo de la figura 14. Como resultado de este proceso, se muestran las tres componentes direccionales del sismo y los instantes de tiempo en que el algoritmo detectó las transiciones de flat a onda P, de onda P a onda S, y el momento en que se excedió el umbral de magnitud 6, instante para el cual, el algoritmo activa la alerta sísmica.



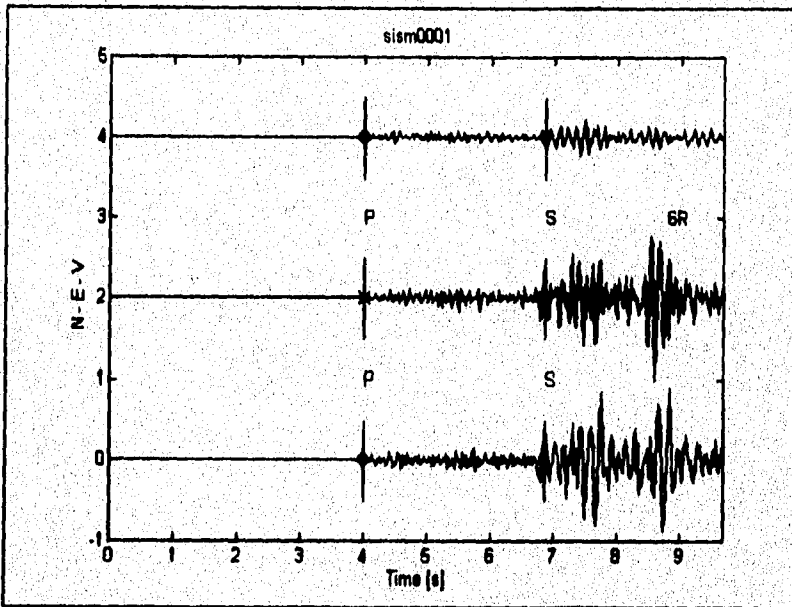


Figura 32.

#### 4.9 Simulación del Algoritmo

Este algoritmo se implementó en MatLab® dentro de una computadora PC, ya que esta tiene la peculiaridad de simular un *procesador digital de señales* (DSP). De hecho, la simulación se debe a que no se trata de un microcomponente electrónico que realiza el algoritmo, pero en realidad se utiliza el microprocesador de la PC para realizar las operaciones del tratamiento de la señal y del algoritmo.

Otros resultados que arroja el mismo programa implementado en MatLab® para el sismo procesado se listan a continuación:

```
> detecta2('sism0001',1);
Analyzed earthquake : SISM0001

Initial time of the P-wave = 4
Initial time of the S-wave = 6.88
Time for 6.0 Richter magnitude = 8.8
Elapsed time = 9.68
Duration of the signal (without flat) = 5.68
Normalized Cumulative Energy = 23.1389
Cumulative Energy = 3.06912e+006
```

Sample	Time	Transition
201	4.02	X
201	4.02	p
201	4.02	P
345	6.90	s
345	6.90	S
441	8.82	R

Para la implementación de este algoritmo, el cual genera como resultado las gráficas de los sismos procesados mostradas en el presente texto, fue necesario basarse totalmente en todas las consideraciones anteriores del análisis de las señales sísmicas en el plano tiempo-frecuencia y con el análisis en la energía. Para esto se tomaron los resultados y conclusiones analizadas anteriormente. El anexo 1 muestra el listado de los programas principales que conforman el presente algoritmo. La culminación de este análisis de señales sísmicas se traduce en la implementación del algoritmo, para verificar su funcionamiento.

Debido a lo anterior, es posible afirmar que el algoritmo es efectivamente realizable en tiempo-real, ya que no requiere conocer la señal de antemano para procesarla. La limitación con una PC es su velocidad de operación, ya que todos los cálculos relacionados con el algoritmo en la ventana de análisis de la señal deben de hacerse entre muestra y muestra. Para nuestro caso, la frecuencia de muestreo es de 50 Hz, por lo que todas las operaciones involucradas en el algoritmo y en el sistema que los contiene, deben hacerse cada  $1/50=0.02$  segundos. Esto sólo es posible con un DSP de alta tecnología.

El algoritmo analiza un archivo que contiene los datos pertenecientes aun sismo ocurrido en alguna de las estaciones de campo en la costa de Guerrero. Estos sismos provienen de un convertidor digital de 10 bits, donde 9 bits se emplean para información y un bit para signo. Se tienen entonces 512 niveles para representar a la señal, con un error de cuantización de  $1/512=0.0019$ .

Primero se carga el archivo de datos, después se corre un proceso que normaliza los sismos además de eliminar el offset de los mismos. Posteriormente se calculan las distribuciones SPWV para cada uno de los ejes. A partir de ellas se calculan las IF y sus derivadas. Todos estos resultados se almacenan en distintos archivos.

Por último, se ejecuta el algoritmo que se divide en dos partes, la primera corresponde a la detección y análisis en energía, mientras que la segunda comprende la graficación y despliegado de resultados, indicando las prealarmas y el momento de la activación de la alerta sísmica. Las gráficas correspondientes son el oscilograma con las transiciones y magnitud de 6.0 detectadas, la CE y la FCED, la IF y su derivada.

El algoritmo completo se representa en forma esquemática por el diagrama de bloques de la figura 33. La rama izquierda muestra la caracterización en frecuencia, mientras que la derecha, se refiere al análisis en energía. Ambas partes se procesan simultáneamente pero en forma independiente una de otra. Cuando las dos partes indican la presencia de un sismo, al superarse la magnitud de 6.0 en esta, la alerta sísmica es activada. Por lo tanto, las dos partes deben trabajar en conjunto para que se tome la decisión.

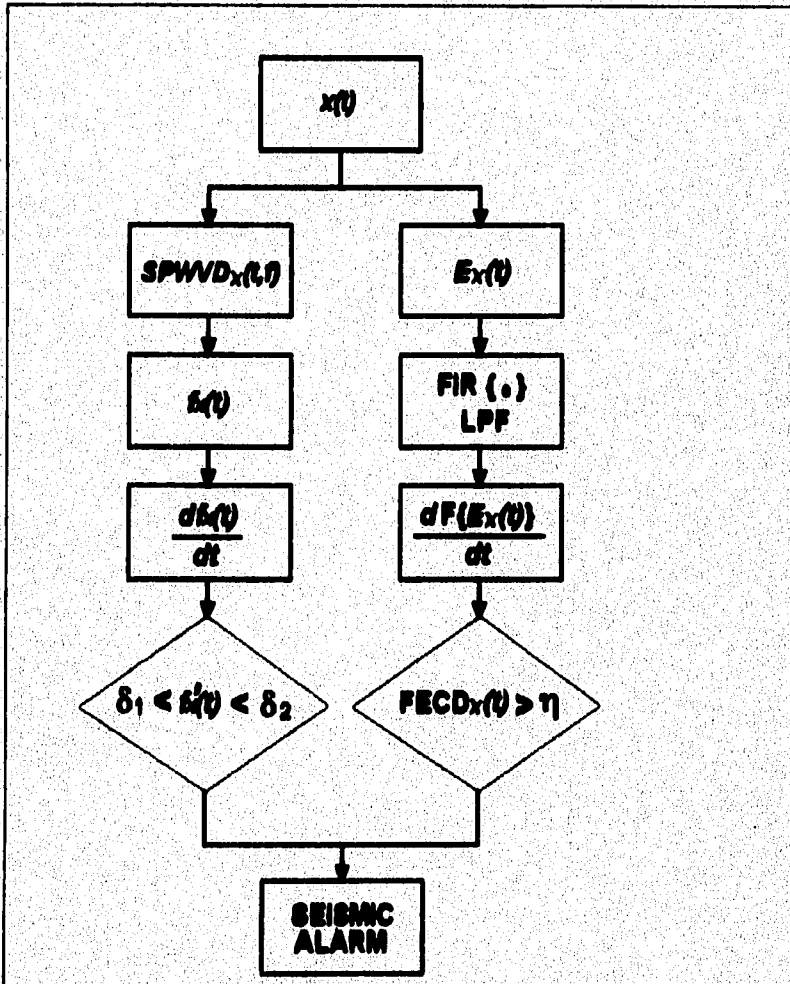


Figura 33.

En conclusión podemos decir que se propuso un algoritmo para detección de señales sísmicas. Este consiste en dos partes principales: análisis en frecuencia a través de la caracterización tiempo-frecuencia, para la detección de la señal, y análisis de la energía para el reconocimiento del patrón de la señal sísmica.

Ambas partes son independientes cuando se procesan aunque el proceso se realiza de manera simultánea para las dos partes. La estimación de la IF indica si la señal

## Capítulo 4. Algoritmo Propuesto

---

recibida es o no una señal sísmica, mientras que el análisis en energía se utiliza para detectar las transiciones en la señal.

El algoritmo está diseñado para que funcione en *tiempo-real*, siendo este un importante resultado debido a que permite implementar una alerta sísmica que opere en la costa de Guerrero, México.

# **CAPITULO 5**

## **RESULTADOS Y EVALUACION**

## CAPITULO 5. RESULTADOS Y EVALUACION

A continuación aplicaremos el algoritmo propuesto a tres sismos adicionales al sismo siem0001 ya analizado en el capítulo anterior. Estos sismos provienen de la costa de Guerrero, México. En la siguiente tabla se muestra el nombre de los sismos, y a su lado las estaciones en que se registraron.

El llevar el algoritmo a la práctica en forma real, permitirá evaluarlo de una manera más eficiente. Pero a pesar de todo, es una alternativa más eficiente a la que trabaja actualmente en Guerrero, siendo esto de gran beneficio para nuestro país.

siem0001	HUEHUETAN
siem0002	MARQUELIA
siem0003	HUEHUETAN
siem0004	LAS VIGAS

A continuación se muestran las gráficas y listados respectivos a los tres últimos sismos de la tabla. El algoritmo se implementó en MatLab<sup>®</sup>. En el anexo 1 se listan los programas más importantes correspondientes al algoritmo.

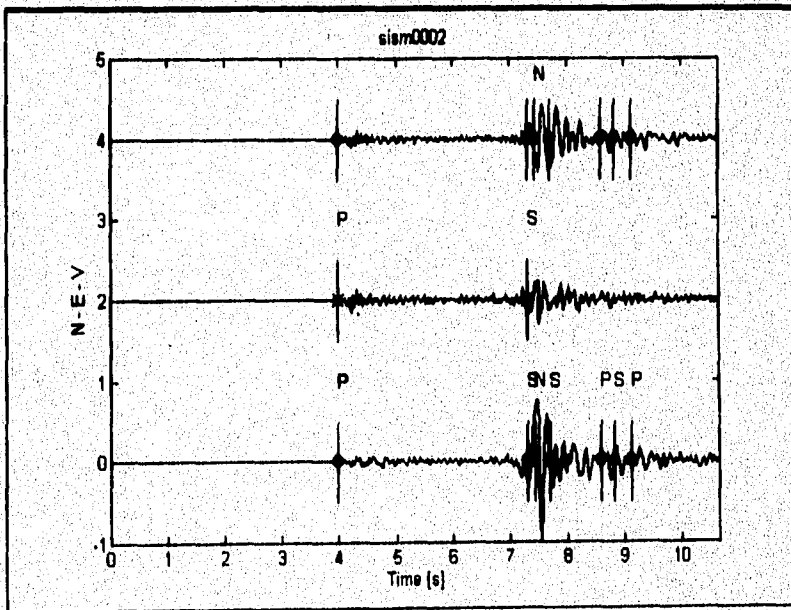


Figure 34.

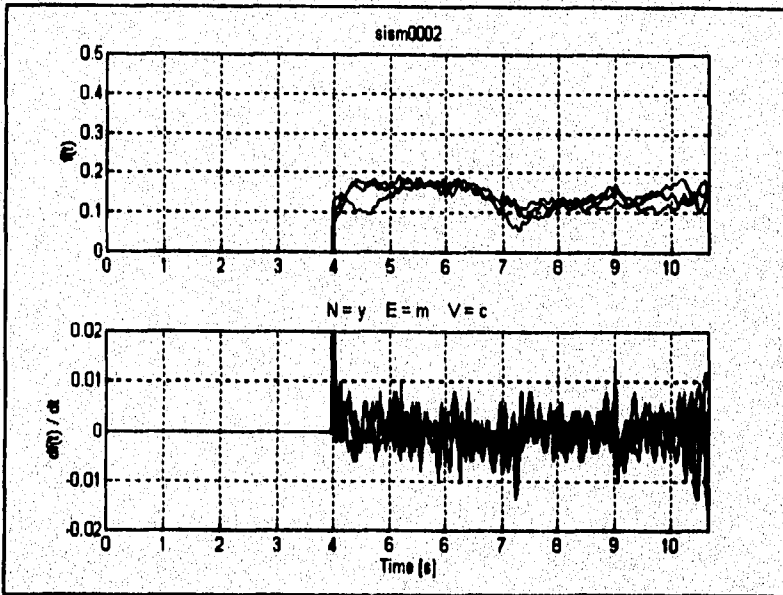


Figura 35.

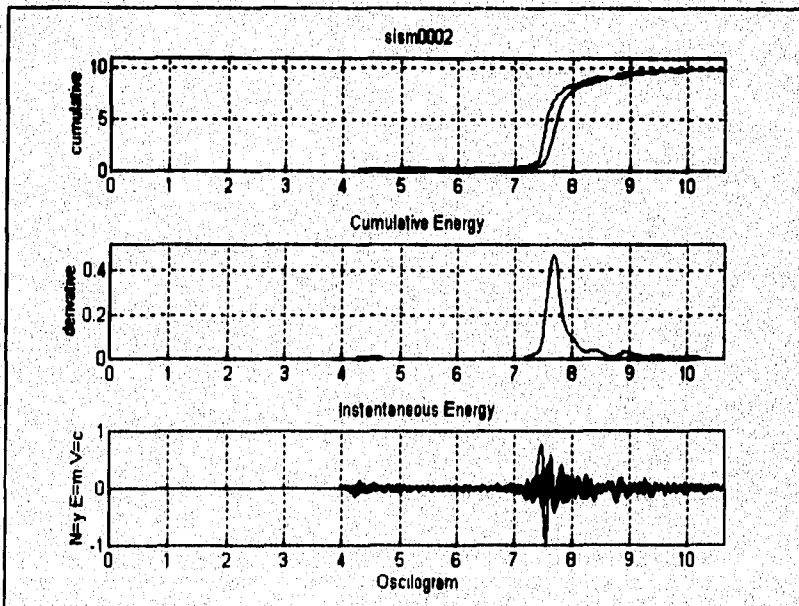


Figura 36.

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

Analyzed earthquake : SISM0002

Initial time of the P-wave = 4  
 Initial time of the S-wave = 7.32  
 Initial time of the No-Seismic wave = 7.44  
 Elapsed time = 10.64  
 Duration of the signal (without flat) = 6.64  
 Normalized Cumulative Energy = 3.11127  
 Cumulative Energy = 43.9616

Sample	Time	Transition
201	4.02	X
201	4.02	P
201	4.02	P
367	7.34	S
367	7.34	S
373	7.46	n
373	7.46	N
386	7.72	S
431	8.62	P
442	8.84	S
457	9.14	P

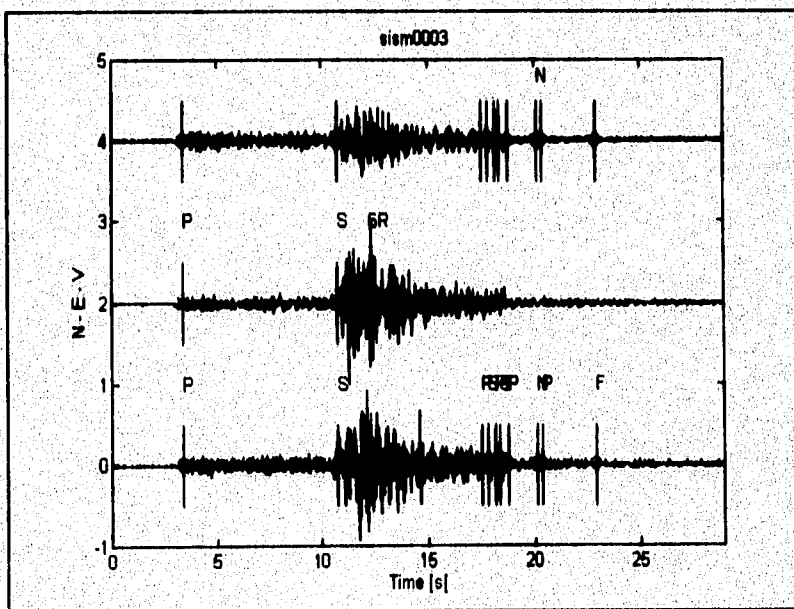


Figura 37.



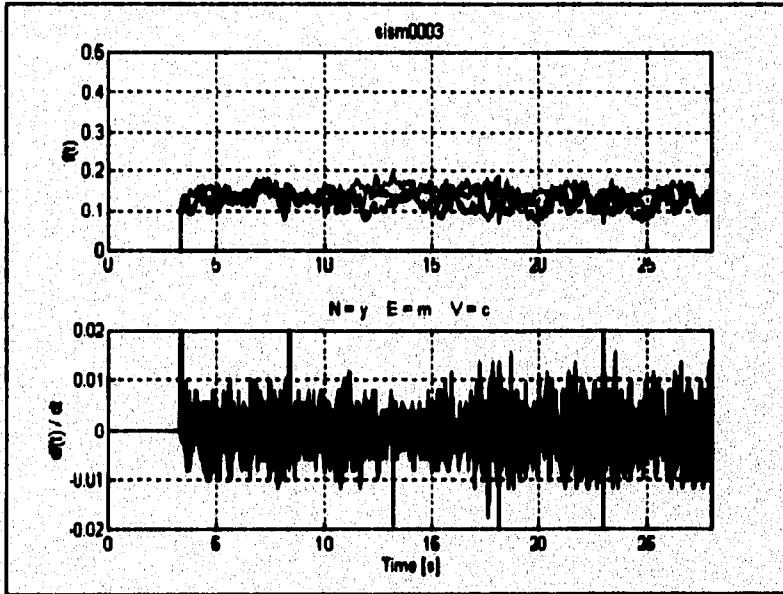


Figura 38.

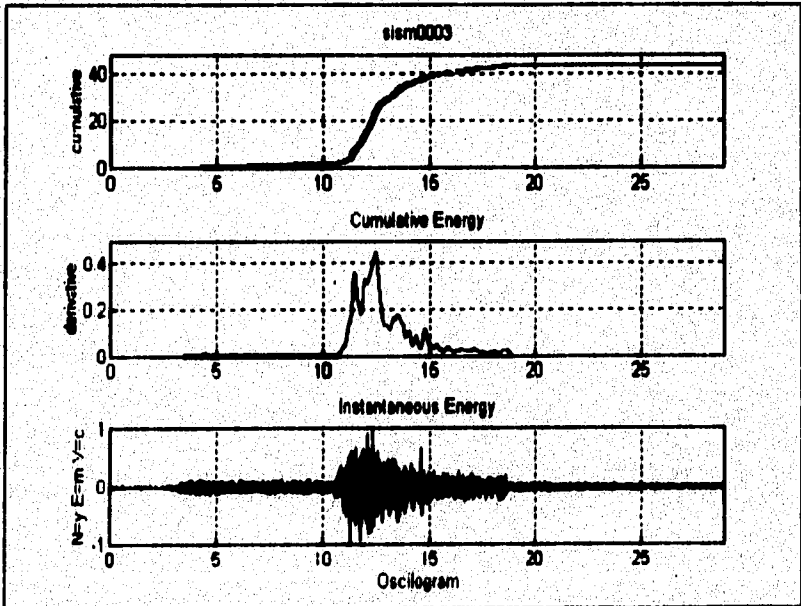


Figura 39.

Analyzed earthquake : SISM0003

Initial time of the P-wave = 3.36  
Initial time of the S-wave = 10.76  
Time for 6.0 Richter magnitude = 12.24  
Initial time of the Mo-Seismic wave = 20.12  
Elapsed time = 25.4  
Duration of the signal (without flat) = 22.04  
Normalised Cumulative Energy = 0.223136  
Cumulative Energy = 716.585

Elapsed time = 27.9  
Duration of the signal (without flat) = 24.54  
Normalised Cumulative Energy = 0.0552811  
Cumulative Energy = 176.027

Elapsed time = 28.94  
Duration of the signal (without flat) = 25.58  
Normalised Cumulative Energy = 0.0203117  
Cumulative Energy = 65.4117

Sample	Time	Transition
169	3.36	X
169	3.36	P
169	3.36	P
539	10.76	S
539	10.76	S
613	12.24	R
879	17.58	P
892	17.84	S
910	18.20	P
919	18.38	S
940	18.80	P
1007	20.14	N
1007	20.14	N
1019	20.38	P
1167	22.94	F

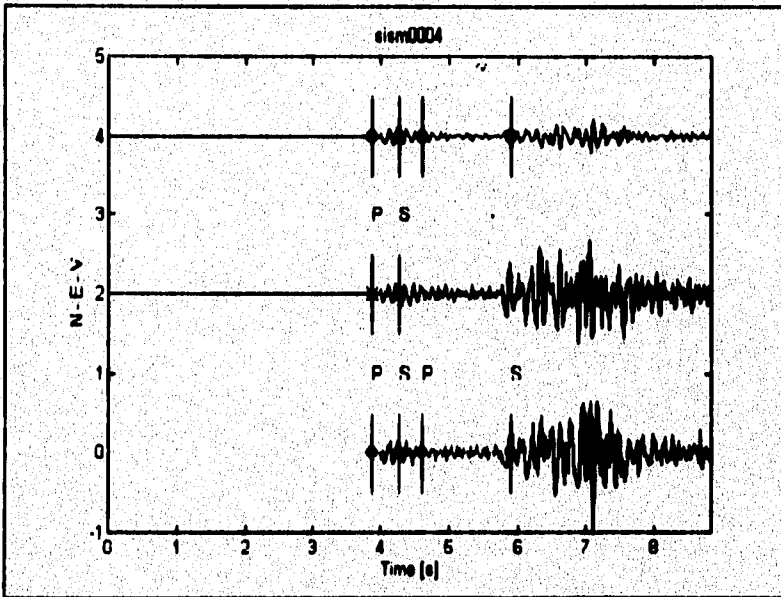


Figura 40.

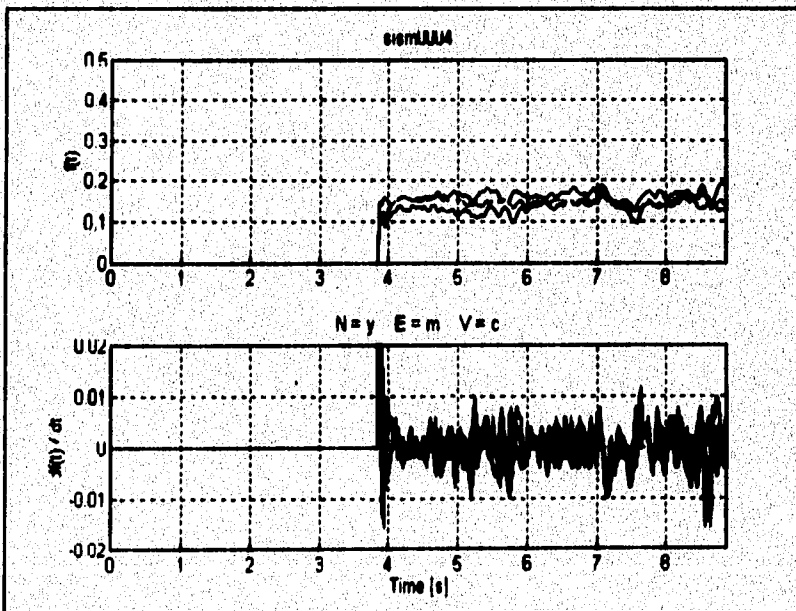


Figura 41.

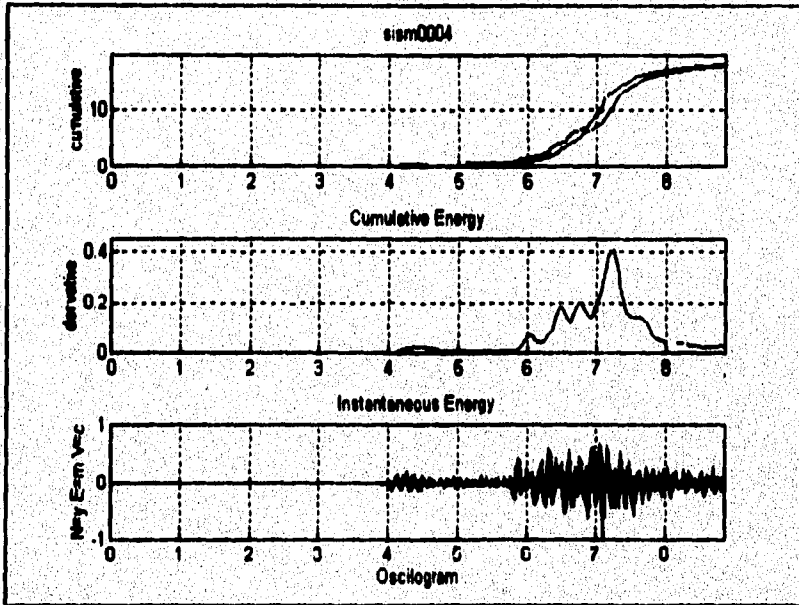


Figura 43.

Analyzed earthquake : SISM0004

Initial time of the P-wave = 3.88

Initial time of the S-wave = 4.26

Elapsed time = 8.84

Duration of the signal (without flat) = 4.96

Normalized Cumulative Energy = 18.0445

Cumulative Energy = 4.61218e+006

Sample	Time	Transition
195	3.90	X
195	3.90	P
195	3.90	P
214	4.28	S
214	4.28	S
231	4.62	P
296	5.92	S

La nomenclatura es la siguiente:

- X: primera transición detectada.
- P: primera vez que se detecta onda P.
- S: primera vez que se detecta onda S.
- N: primera vez que se detecta no-sismo.

- R: tiempo en que se tiene magnitud Richter de 6.
- p: consecutivas veces que se detecta onda P.
- s: consecutivas veces que se detecta onda S.
- n: consecutivas veces que se detecta no-sismo.

De acuerdo a los sismos procesados, considerando el sismo siem0001 analizado en el capítulo anterior como parte de la muestra para los resultados, se aprecia directamente en los resultados que estos concuerdan con lo esperado según el análisis realizado anteriormente. Los resultados son bastante precisos, si consideramos que los sismos procesados pertenecen a distintas estaciones y en general, se comportan de manera diferente entre ellos.

Los aspectos analizados se cumplen para todos los casos, tales como la similitud en el menos dos componentes direccionales de un mismo sismo, el rango de frecuencias en la frecuencia instantánea de cada componente en que se presentan las señales P y S del sismo, las oscilaciones de la derivada de la frecuencia instantánea en el rango previsto, la envolvente de la energía como una medida de los cambios en la pendiente de la energía acumulada que a su vez refleja las transiciones de onda en la señal.

Las gráficas que muestran las transiciones, indican la primera vez que aparece una transición de flat a onda P y de onda P a onda S, así como el momento en que se alcanza la magnitud Richter de 6.0

No se probó con señales no-sísmicas debido a que no se tenía ninguna registrada dentro de la muestra de prueba, pero las condiciones de caracterización en frecuencia son muy estrictas, de manera que discriminan perfectamente a una señal no sísmica de una sísmica. Esto se puede analizar si suponemos que el algoritmo va a analizar una señal no-sísmica como el caso de la patada de una vaca cerca del sensor tal y como ocurrió ya una vez en que se generó una falsa alarma con el algoritmo existente del CIRES.

Debido a que la patada de la vaca genera vibraciones en el suelo que son capetadas por el sensor del sismómetro, éstas aparecerán como un cambio súbito de un estado de reposo a una señal de gran amplitud. Por otro lado, estas vibraciones tenderán a desaparecer en una forma más rápida a las de un sismo, debido que la duración del sismo es mucho mayor que la de las vibraciones generadas por la vaca. De aquí se aprecia que, a pesar del corto tiempo que duran las vibraciones, podrían parecerse a las de la onda S pero con un factor de amortiguamiento mucho más elevado. Debido a que la patada se transmite como un pulso de gran amplitud seguido por un tren de pulsos que van disminuyendo en amplitud, el contenido en frecuencia va a ser similar al de una función "sampling" en su efecto más general. Además, las vibraciones no producen una aceleración de la tierra que se distribuya en las tres componentes del sensor. Con esto, las características de frecuencia no se cumplirían, primero por no estar la frecuencia instantánea en forma permanente a la señal en el rango de frecuencias establecido para señales sísmicas, y segundo por no cumplirse la condición de que al menos dos ejes se comportan de manera similar en frecuencia. El efecto final es que el algoritmo decidiría que la señal presente es no-sismo. La transición detectada en energía a través del umbral que se ha fijado, si se detectaría, pero debido a que el resultado en frecuencia indica no-sismo, esta no se tomaría en cuenta. Y más aún, la energía acumulada para determinar la magnitud, no se acumula debido a que así funciona el algoritmo. Con estas características, el algoritmo no

activaría ninguna prealarma y mucho menos la alerta sísmica. Más bien, se registraría como consecuencia, que la señal presente no es un sismo.

En la figura 37 se observa una transición indicada como un no-sismo, pero que sólo ocurre durante 24 centésimas de segundo, después de este tiempo, el algoritmo vuelve a reconocer la señal como sísmica. Durante ese tiempo, la energía no se acumula, pero tampoco se resetea, para el caso en que hubiera una falla en la detección no perder el valor de la magnitud. Esta transición de no-sismo se debe a que las especificaciones de frecuencia no se cumplen, reflejándose en la figura 38. Para ese tiempo, la señal tiene transitorios que la sacan del rango de frecuencias para señales sísmicas, y sucede en dos componentes cuando menos. Debido a las características del sismo, la frecuencia instantánea tiende a regresar de nuevo al rango de frecuencias adecuado, y entonces el algoritmo vuelve a detectar otra transición pero ahora del tipo sísmica. Con esto se termina de analizar la señal hasta que llega prácticamente al estado de reposo. Finalmente, el algoritmo detectó un sismo.

Es importante mencionar, que los sismos mostrados tienen una magnitud Richter de cuando menos 5.0. Estos sismos se tomaron al azar del pequeño conjunto de sismos disponibles a través del CIREC. Esto hace que los resultados sean independientes unos de otros, además de verificar que no importa cuando haya ocurrido el sismo, con que magnitud y de que estación provenga de la costa de Guerrero, con el algoritmo es posible llevar a cabo el análisis para su detección y según sea el caso para la activación de la alerta sísmica.

Podríamos decir, que con los resultados obtenidos, el algoritmo funciona correctamente de acuerdo con lo previsto y en función de las características tiempo-frecuencia de la señal sísmica, para su reconocimiento y detección. Con esta pequeña muestra observamos que no se presentaron errores, detectando correctamente que se tiene una señal sísmica, además de detectar sus distintas transiciones. El método también cumple su objetivo de activar la alerta sísmica para sismos mayores o iguales a la magnitud de 6.0.

Es importante mencionar que el algoritmo está estrictamente orientado a los sismos de la costa de Guerrero, y adaptado a las condiciones en que se reciben las señales de las estaciones de campo de ese sitio. Si se deseara implementar un tratamiento de la señal anterior a la aplicación del algoritmo, posiblemente habría diferencias que lo conducirían a tomar decisiones erróneas.

El algoritmo no detecta sismos provenientes de otras zonas, debido a que las condiciones del subsuelo cambian con la localización de la fuente del sismo, tal y como se mencionó anteriormente. Sin embargo, el método de análisis es totalmente aplicable a sismos de otros lados, pudiendo obtener un algoritmo adecuado con sólo caracterizar los parámetros necesarios para la detección y reconocimiento de la señal.

Por último, debido a que parte de la decisión en la activación de la alerta sísmica se basa en la detección de la señal como una transición de onda P a onda S, en la que a esta última le seguirán inminentemente las ondas superficiales, es necesario evaluar y tener una buena estimación del umbral de la FCED que determina si un sismo ha arribado como ondas superficiales. Claro está que en primera instancia se deben cumplir las especificaciones de la señal en frecuencia.

## CONCLUSIONES

En conclusión podemos decir que se propuso un algoritmo para detección de señales sísmicas. Este consiste en dos partes principales: análisis en frecuencia a través de la caracterización tiempo-frecuencia, para la detección de la señal, y análisis de la energía para el reconocimiento del patrón de la señal sísmica.

Ambas partes son independientes cuando se procesan aunque el proceso se realiza de manera simultánea para las dos partes. La estimación de la IF indica si la señal recibida es o no una señal sísmica, mientras que el análisis en energía se utiliza para detectar las transiciones en la señal. Además tienen la particularidad de implementarse en *tiempo-real*, siendo una ventaja al algoritmo.

De acuerdo con los resultados, el algoritmo respondió de una manera muy eficiente, ya que resultados similares se obtuvieron al procesar diferentes sismos, todos ellos registrados en la costa de Guerrero, México.

Los umbrales establecidos para cada uno de los parámetros analizados, tales como la IF y su derivada, y la FCED, son válidos para cualquier sismo proveniente de una estación en Guerrero.

Con la IF se detecta si es un sismo, y con la FCED se detectan las transiciones de la señal sísmica. Sólo si la IF indica que se está en un sismo y la FCED indica onda S, al llegar al umbral de magnitud 6.0 se activa la alarma sísmica. Estas tres condiciones deben estar presentes para que el detector indique que sí se trata de un sismo.

Es importante hacer notar que todos los resultados obtenidos sólo son aplicables a los sismos originados en la costa de Guerrero, México. Esto se debe a que las características de la corteza varían con la región. Es por esto que si el algoritmo se aplica a sismos originados en otras fuentes distintas a las de la costa de Guerrero, probablemente fallará. Esto no descarta la posibilidad de aplicar un algoritmo similar con sismos de otra zona, después de haber calculado todos los parámetros y analizado los eventos de una forma similar en que se hizo con los sismos de la costa de Guerrero.

La ventaja principal del nuevo algoritmo y en contraste con el algoritmo existente del SAS se debe a que el primero tiene resuelta de manera efectiva la parte de detección y caracterización dejando de generar las falsas alarmas que como en el caso del SAS se han presentado. Lo que es seguro, es que ante la ausencia de la señal no se disparará la alarma, e incluso en la presencia de otras señales *no-sísmicas*. Esto se debe al riguroso reconocimiento que se hace de la señal para detectarla cuando es sísmica y sin ningún problema descartar aquellas que son *no-sísmicas*.

Otra ventaja es su enorme factibilidad de implementarse en *tiempo-real*, a pesar de las técnicas un tanto complejas que se emplean para el cálculo de los parámetros de la señal que está siendo analizada y así compararla contra los parámetros que caracterizan a una señal sísmica.

Para llevar a cabo lo anterior, se requiere de infraestructura especializada, como es el caso de sensores sísmicos que cuenten con convertidores A/D de alta resolución, procesadores digitales de señales (DSPs) de alta velocidad y gran capacidad en el manejo de memoria, y un eficiente sistema de radio-comunicación entre las estaciones sensoras de campo y la estación de registro. Este sistema se podría ampliar transmitiendo digitalmente la señal y empleando códigos de protección. Además, sería más útil su uso si se implementaran receptores portátiles y de baterías que recibieran la señal de alerta sísmica, para no depender de la energía eléctrica o para el caso en que no se hace del uso de radio como receptor.

Una ventaja importante es la evaluación del detector de transiciones de una manera teórica que verifica los resultados obtenidos en forma experimental, dándole así un soporte más fuerte por estar mejor fundamentado y que a su vez puede ser fácilmente adaptado a otras condiciones de uso, sin perder de vista los efectos secundarios que estos cambios pueden traer consigo.

Como desventajas del nuevo algoritmo se tiene que su probabilidad de omisión del sismo es algo elevada, esto es, de cada 100 eventos 14 no los detectaría. Esto abre las puertas a una nueva investigación que se encargue del análisis de esta parte, para que de esta forma, se obtenga un algoritmo casi 100 % eficiente y confiable.

Otra desventaja que se tiene es el bajo número de sismos sobre al que se hizo la investigación, no pudiendo hacerse un control estadístico riguroso sobre la operación del método. Sin embargo, es una buena propuesta para el análisis de señales sísmicas de tal forma que estas se puedan caracterizar.

Un punto que queda abierto a investigación, es el de utilizar modelos de sismos sintéticos que eliminen los efectos de la tierra, con el fin de obtener información adicional sobre el comportamiento de los sismos, teniendo una caracterización más pura. Así como también el uso de otras distribuciones tiempo-frecuencia en la caracterización de señales sísmicas.

El método ya es operable, pero falta su prueba final y esta se da al aplicarlo en tiempo-real, someténdolo a un estado de observación exhaustivo, de tal modo que se pueda evaluar en forma total su eficiencia, así como poder medir el grado de aceptación de la población hacia el nuevo algoritmo.



## ANEXOS

### Anexo 1

#### Listado de los programas en MatLab para el algoritmo de detección.

Los siguientes programas son los principales del algoritmo propuesto para la "Detección de Señales Sísmicas con Modelos Tiempo-Frecuencia". Los programas fueron elaborados en MatLab<sup>®</sup> 4.0 de ©The MathWorks, Inc. El material de apoyo fue el NSSA, the Non-Stationary Signal Analysis Toolbox desarrollado en MatLab<sup>®</sup> por F. Auger para el procesamiento de señales con representaciones tiempo-frecuencia.

MatLab<sup>®</sup> es un programa que contiene operaciones viables en un procesador digital de señales (DSP), por lo que los programas implementados en MatLab<sup>®</sup> son factibles de implementarse en un sistema basado en un DSP para que el algoritmo trabaje en tiempo real.

No todos los programas utilizados se listaron, sólo los más importantes que están directamente relacionados con el algoritmo. Los programas relacionados con la graficación no se muestran. Los siguientes programas son los que se listan: seismic, procesa, procesa2, detecta, detecta2, garbage, adjust2, calcula3, instifreq, dfreq, filtra, stf, y spwv.

```
*****  
*** FileName: SEISMIC.M  
*****
```

```
function seismic(fname,hfig,garb)  
% SEISMIC(fname,hfig,garb);  
% Runs PROCESA2 which uses PROCESA, and DETECTA2 which uses  
% DETECTA.  
% This is the mainly program for Seismic waves detection.  
% The process is based in the computing of the smoothed  
% pseudo Wigner-ville distribution time-frequency representation  
% (SPWVD-TPR) and the instantaneous frequency (IF) together its  
% derivative (R) for each axis to analyze the FREQUENCY behavior,  
% and then to obtain a PATTERN RECOGNITION.  
%  
% On another hand, the computing of the instantaneous energy Ex(t)  
% and its filtered derivative dEx/dt with the three axes at the same  
% time, are used to analyze the ENERGY behavior, and then to obtain  
% a SIGNAL DETECTION.  
%  
% fname is a MAT-file without an extension corresponding  
% to an earthquake.  
% hfig is figure handle, that is, the number of  
% the visualization figure.  
% (default = next figure from current figure).  
% garb 0 yields that the garbage files are kept, whereas  
% 1 yields that the garbage files are erased from disk.  
% (default = 1).  
%  
% Note : if the MAT-file do not exists then can be generated
```

```

% using the CARGA function, or passing the extension
% too in this function (e.g. seismic('hueh0001.tmp')).
%
% example : seismic('hueh0001',1); draws in the figure 1.
% see also : procesa, procesa2, detecta, detecta2, garbage.

```

```

% C. Rivero, October 1995.
% Please type any error you find or any comment
% to file : c:\matlab\users\carlos\comments.doc

```

```

if (nargin < 3), garb=1; end;
if (nargin < 2), hfig=gcf; hfig=hfig+1; end;
if (nargin < 1) | (~isstr(fname)),
    error('One string parameter is required');
end;

```

```

p=find(fname=='.');
if all(size(p)),
    fname1=fname(1:p(1)-1);
else
    fname1=fname;
end;
clear p;

```

```

procesa2(fname);
detecta2(fname1,hfig);
if (garb == 1), garbage(fname1); end;

```

```

*****
*** FileName: PROCESA.M
*****

```

```

function procesa(fname,normz)
% PROCESA(fname,normz);
% Computes the smoothed pseudo Wigner-ville distribution
% time-frequency representation (SPWVD-TFR) and the
% instantaneous frequency (IF) within its derivative (R) of
% an earthquake and saves the results generating six files.
%
% fname is a MAT-file without an extension corresponding
% to an earthquake.
% normz 0 yields a unnormalized adjusted file A-file, whereas
% 1 yields a normalized adjusted file A-file.
% (default = 1).
%

```

```

% This means that if fname is 'hueh0001' then the files
% generated are : 'hueh00n1.spw', 'hueh00a1.mat',
% 'hueh00e1.spw', 'hueh00f1.spw',
% 'hueh00v1.spw', 'hueh0r1.spw'.
%

```

```

% Note : if the MAT-file do not exists then can be generated
% using the CARGA function, or passing the extension
% too in this function (e.g. procesa('hueh0001.tmp')).
%

```

```

% example : procesa('hueh0001');
% see also : carga, vista6, procesa2.

```

```

% C. Rivero, July 1995.
% Please type any error you find or any comment

```

! to file : c:\matlab\users\carlos\comments.doc

```
if (nargin < 2), norms=1, end;
if (nargin < 1) | (~isstr(fname)),
    error('At least one string parameter is required');
end;

p=find(fname==' ');
if all(size(p)),
    carga(fname);
    fname=fname(1:p(1)-1);
end;
clear p;

if (norms), adjust2(fname); else adjust(fname); end;
calcula(fname,'spw');
instfreq([fname,'.SPW']);
dfreq([fname(1:length(fname)-2),'P',fname(length(fname)),'.SPW']);

disp([fname,' was processed.']);
```

```
*****
*** FileName: PROCESA2.M
*****
```

```
function procesa2(fname)
! PROCESA2(fname);
! Computes the smoothed pseudo Wigner-Ville distribution
! time-frequency representation (SPWVD-TFR) and the
! instantaneous frequency (IF) within its derivative (R) of
! an earthquake and saves the results generating six files.
!
! Differs from PROCESA because this program works over the
! total seismic wave and produces the general files which
! are going to be used by the DETECTA program.
!
! fname is a MAT-file without an extension corresponding
! to an earthquake.
!
! This means that if fname is 'hueh0001' then the files
! generated are : 'huehx0n1.spw', 'huehx0a1.mat',
!                 'huehx0e1.spw', 'huehx0f1.spw',
!                 'huehx0v1.spw', 'huehxr1.spw'.
! with x=1,2,3... depending of the file length. These files
! are temporal for the general files generation because of
! they are erased.
! The general files generated are :
!     'hueh00a1.mat', 'hueh00f1.spw',
!     'hueh00h1.mat', 'hueh00r1.spw'.
! where H-file is the Header, A-file is the Adjusted, IF-file
! is the Instantaneous Frequency, and R-file is the
! Instantaneous Frequency Derivative.
!
! Note : if the MAT-file do not exists then can be generated
! using the CARGA function, or passing the extension
! too in this function (e.g. procesa('hueh0001.tmp')).
!
! example : procesa2('hueh0001');
! see also : carga, procesa, detecta.
```

```

% C. Rivero, October 1995.
% Please type any error you find or any comment
% to file : c:\matlab\users\carlos\comments.doc

```

```

if (nargin < 1) | (~isstr(fname)),
    error('One string parameter is required');
end;

p=find(fname=='.');
if all(size(p)),
    carga(fname);
    fname=fname(1:p(1)-1);
end;
ini=fname(1:length(fname)-2);
fin=fname(length(fname));
clear p;

Nf=256; % <-- Number of frequency bins.
g>window(13,'hanning'); % <-- Time domain window.
% It is only possible odd length.

[grow,gcol]=size(g);
Lg=(grow-1)/2;

eval(['load ',fname]);
tcol=length(n);
maxval=adjust2(fname,tcol);
[tf,flat,delta]=flat3(fname);

fname1=(ini,'A',fin);
eval(['load ',fname1]);

n=nacc; e=eacc; v=vacc;
Leq=tcol-tf+1; % Earthquake length without flat.
if (Leq > 256),
    nfiles=ceil((Leq-Lg)/(256-2.*Lg)); % Number of generated files and
else % each file contains 256 data.
    nfiles=1;
end;

fname1=(ini,'H',fin);
eval(['save ',fname1,' tcol tf flat delta nfiles maxval']);

tini=tf;
for k=nfiles:-1:1,
    if (k == 1),
        lfile=tcol-tini+1; % length of the last file.
        nflats=2^nextpow2(lfile); % lfile*nflats is power of 2.
        nflats=nflats-lfile; % number of flats added.
        fname1=(ini(1:length(ini)-2),int2str(nfiles-k+1),'0A',fin);
        if (nflats > 0),
            nacc=n(tini:tini+lfile-1); flat(1).*ones(nflats,1);
            eacc=e(tini:tini+lfile-1); flat(2).*ones(nflats,1);
            vacc=v(tini:tini+lfile-1); flat(3).*ones(nflats,1);
        else
            nacc=n(tini:tini+lfile-1);
            eacc=e(tini:tini+lfile-1);
            vacc=v(tini:tini+lfile-1);
        end;
        eval(['save ',fname1,' nacc eacc vacc']);
    end;
end;

```

```

else
    fname1={ini(1:length(ini)-2),int2str(nfiles-k+1),'0A',fin};
    nacc=n(tini:tini+255);
    eacc=e(tini:tini+255);
    vacc=v(tini:tini+255);
    eval(['save ',fname1,' nacc eacc vacc']);
    tini=tini+255-2.*Lg+1;
end;
end;

disp(['Numero de Calculos : ',int2str(nfiles)]);
for k=nfiles:-1:1,
    disp(['Calculo numero ',int2str(nfiles-k+1)]);
    fname1={ini(1:length(ini)-2),int2str(nfiles-k+1),'00',fin};
    calcula3(fname1,'spw');
    instfreq([fname1,'.SPW']);
    fname1={ini(1:length(ini)-2),int2str(nfiles-k+1),'0F',fin};
    dfreq([fname1,'.SPW']);
end;

fprintf('\n');
disp(['Generando archivos finales...']);
for k=1:nfiles,
    if (rem(k,16)==0), fprintf('%g \n',k);else fprintf('%g ',k); end;
    fname1={ini(1:length(ini)-2),int2str(k),'0F',fin,'.SPW'};
    eval(['load ',fname1,' -mat']);
    [lrow,lcol]=size(corn);    % <-- lrow=frequency, lcol=time
    lrow=lrow/2;
    [En,frn]=max(corn(1:lrow,:));
    [Ee,fre]=max(core(1:lrow,:));
    [Ev,frv]=max(covr(1:lrow,:));
    if (k == 1),
        freqn=frn(1:length(frn)-Lg);
        freq=fre(1:length(fre)-Lg);
        freqv=frv(1:length(frv)-Lg);
    elseif (k == nfiles),
        freqn=[freqn,frn(1+Lg:length(frn)-nflats)];
        freq=[freq,fre(1+Lg:length(fre)-nflats)];
        freqv=[freqv,frv(1+Lg:length(frv)-nflats)];
    else
        freqn=[freqn,frn(1+Lg:length(frn)-Lg)];
        freq=[freq,fre(1+Lg:length(fre)-Lg)];
        freqv=[freqv,frv(1+Lg:length(frv)-Lg)];
    end;
end;
clear corn core covr
fprintf('\n');

if (tf > 1),
    freqn=[ones(1,tf-1),freqn];
    freq=[ones(1,tf-1),freq];
    freqv=[ones(1,tf-1),freqv];
end;

fn=[0 diff(freqn)];
fe=[0 diff(freq)];
fv=[0 diff(freqv)];

fname1={ini,'F',fin,'.SPW'};
eval(['save ',fname1,' freqn freq freqv']);

```

```

fname1=(ini(1:length(ini)-1),'RF',fin,'.SPW');
eval(['save ',fname1,' fn fa fv']);

disp([fname,' was processed.']);

```

```

*****
*** FileName: DETECTA.M
*****

```

```

function [Result,Seismic]=detecta(fname)
% (Result,Seismic)=DETECTA(fname);
% After computing the seismic wave with PROCESA2 algorithm,
% this program analyzes the results to detect the transitions
% along the wave, and activates the alarm.
%
% fname is a MAT-file without an extension corresponding
% to an earthquake.
%
% Result is a results matrix with order [2xM] where M depends
% on the number of transitions along the seismic wave.
% Each column contains in its first row the sample time
% which indicates the time for the transition and the
% second row contains a character code according the
% next table:
%
% 'p' : change from FLAT or S to (possible) P.
% 's' : change from P or FLAT to (possible) S.
% 'f' : change from P or S to (sure) FLAT.
% 'n' : change to NO-SEISMIC (sure).
% 'P' : indicates the first change to (sure) P.
% 'S' : indicates the first change to (sure) S.
% 'R' : indicates the first change above (sure) 6.0 Richter.
% 'N' : indicates the first change to (sure) No-Seismic wave.
% 'X' : indicates end of an earthquake.
% Seismic is extrainformation refered to the whole signal. This
% information corresponds to a matrix with order [4xM]
% where M depends on the number of flats refered to the
% earthquake according to the next table:
%
% Seismic(1,:) -> elapsed time,
% Seismic(2,:) -> Duration of the signal (without flat),
% Seismic(3,:) -> Normalized Cumulative Energy,
% Seismic(4,:) -> Cumulative Energy.
%
%
% If the output is not present, then the data are sent to a
% T-file which contains the matrix 'Result' and 'Seismic'.
%
% Note : For example, if the earthquake is 'hueh0001', then
% is necessary that has existing the next general
% files :
%
% 'hueh00a1.mat', 'hueh00f1.spw',
% 'hueh00h1.mat', 'hueh00r1.spw'.
%
% example : detecta('hueh0001');
% see also : carga, procesa2, detecta2.
%
% C. Rivero, October 1995.
% Please type any error you find or any comment
% to file : c:\matlab\users\carlos\comments.doc

```

```

if (nargin < 1) | (~isstr(fname)),
    error('One string parameter is required');
end;

p=find(fname==' ');
if ~all(size(p)),
    ini=fname(1:length(fname)-2);
    fin=fname(length(fname));
else
    error(['The ',fname,' file name must be without an extension!']);
end;
clear p;

fname1=[ini,'A',fin,'.MAT'];
if (exist(fname1)==2),
    error(['ERROR: The ',fname1,' file does NOT exist. See PROCESA2.']);
end;
fname1=[ini,'H',fin,'.MAT'];
if (exist(fname1)==2),
    error(['ERROR: The ',fname1,' file does NOT exist. See PROCESA2.']);
end;
fname1=[ini,'F',fin,'.SPW'];
if (exist(fname1)==2),
    error(['ERROR: The ',fname1,' file does NOT exist. See PROCESA2.']);
end;
fname1=[ini(1:length(ini)-1),'RF',fin,'.SPW'];
if (exist(fname1)==2),
    error(['ERROR: The ',fname1,' file does NOT exist. See PROCESA2.']);
end;

fname1=[ini,'A',fin];          % nacc eacc vacc a
eval(['load ',fname1]);
Ex=nacc.^2+eacc.^2+vacc.^2;    % Instantaneous Energy.
Ex=cumsum(Ex);                 % Cumulative Energy.
Ex2=filter(Ex,0.01);          % Filtered Cumulative Energy to Wc=0.01.
dEx=[0; diff(Ex2)];           % Filtered Cumulative Energy derivative.

fname1=[ini,'H',fin];          % tcol tf flat delta nfiles maxval
eval(['load ',fname1]);
Ex=Ex.*(maxval.^2);           % Real value of the cumulative energy.

if ((tf-1)/50 < 1),
    fprintf('ERROR: The seismic signal must begin with flat-wave\n');
    fprintf('      and the minimum value of needed time is 1 second.\n');
    error(['      The time found in flat-wave was: ',num2str(tf/50)];
end;

Nf=256;                         % <-- Number of frequency bins.
g=window(13,'hanning');         % <-- Time domain window,
[grow,gcol]=size(g);           % It is only possible odd length.
Lg=(grow-1)/2;                 % Middle length of the smoothed time window.

Lf=16;                           % Length of the FIR filter.
nLf=ceil(0.51*Lf);             % Number of points which represent the 51%.

% if strcmp(ext,'SPW'), NE2=2*Nf; else NE2=Nf; end;
NE2=2*Nf;                       % Number of frequency bins for a SPWV distribution.
% Necessary for: freqn=freqn-1; freqn=freqn./NE2;

% fs=1./50;                       % Sample frequency.

```

```

fname1={ini,'F',fin,'.SPW'};          % freqn freqe freqv
eval(['load ',fname1,' -mat']);
fname1={ini(1:length(ini)-1),'RF',fin,'.SPW'};  % fn fe fv
eval(['load ',fname1,' -mat']);

freqn=freqn-1; freqe=freqn./NE2;  % Normalized frequency with fs.
freqe=freqe-1; freqe=freqe./NE2;
freqv=freqv-1; freqv=freqv./NE2;

fn=fn./NE2;          % Normalized frequency derivative with fs.
fe=fe./NE2;
fv=fv./NE2;

flagP=0;          % If 'flat to p', then flagP=1.
flagS=0;          % If 'p to s', then flagS=1 else if 's to p', flagS=0.
flagF=0;          % If 'p to flat' then flagF=1.
flagPEQ=0;        % It's one for the first time in P.
flagSEQ=0;        % It's one for the first time in S.
flagNEQ=0;        % It's one for the first time in No-Seismic.
flagEQ=1;         % It's zero when the no-seismic has already indicated.
flagFREQ=0;       % It's one when the frequency is correctly.
flagDFREQ=0;      % It's one when the frequency derivative is correctly.
flagRIGHT=0;      % It's one when the seismic's already reached 6.0 Richter.

BuffEqf=ones(Lf,1);  % Former states of flagEQ.
nLf40=ceil(0.40*Lf); % Percent for flagEQ = 0.
nLf60=ceil(0.60*Lf); % Percent for flagEQ = 1.
nLfL=2*ceil(0.10*Lf); % Percent for flagF = 1.
nLfH=2*ceil(0.20*Lf); % Percent for flagP = 0.

tflat=0;          % Indicates the time that it has been inside flat.
k=tf-1;          % Sample which is being analyzed.
tfini=k;          % It is the beginning of a wave (P, S or No-seismic).
while (k < tc01),
    k=k+1;

    %%%%%%%%%%%
    % Flat2P %%%%%%%%%%%
    %%%%%%%%%%%

    k1=k-1;
    while (k1 < tc01),
        k1=k1+1;
        if (flagP == 0),
            dnk=abs(nacc(k1)-flat(1));
            dek=abs(eacc(k1)-flat(2));
            dvk=abs(vacc(k1)-flat(3));
            if (((dnk > delta) & (dek > delta)) |...
                ((dnk > delta) & (dvk > delta)) |...
                ((dek > delta) & (dvk > delta))),
                % Process FLAT to P-WAVE Finished.
                k=k1;
                Result=[Result [k,'X']];
                Result=[Result [k,'p']];
                k1=tc01;
                tfini=k;
                flagP=1;
            end;
        else

```



```

        kl=tccl;
    end;
end;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%% P2C8 %%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if (dRk(k) > 0.015), % Energy derivative threshold.
    if (flagS==0),
        flagS=1;
        if (flagEQ == 1),
            Result=[Result [k,'s']];
        end;
    end;
else
    if (flagS==1),
        flagS=0;
        if (flagEQ == 1),
            Result=[Result [k,'p']];
        end;
    end;
end;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%% P2Flat %%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

gn=nacc(k-Lf:min([k*Lf,tccl])); % Rectangular window with
ge=nacc(k-Lf:min([k*Lf,tccl])); % signal for flat analysis.
gv=vacc(k-Lf:min([k*Lf,tccl]));
gn=find(abs(gn-flat(1)) > delta);
ge=find(abs(ge-flat(2)) > delta);
gv=find(abs(gv-flat(3)) > delta);
lbn=length(gn); lbe=length(ge); lbv=length(gv);
% Process P-WAVE to FLAT Finished inside the Window.
if (flagF == 1),
    if (((lbn > nLEN) & (lbe > nLEN)) |...
        ((lbn > nLEN) & (lbv > nLEN)) |...
        ((lbe > nLEN) & (lbv > nLEN))),
        flagF=0;
        Result=[Result [k,'p']];
    end;
else
    if (((lbn < nLEN) & (lbe < nLEN)) |...
        ((lbn < nLEN) & (lbv < nLEN)) |...
        ((lbe < nLEN) & (lbv < nLEN))),
        flagF=1;
        Result=[Result [k,'f']];
    end;
end;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%% CheckFlags %%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if (flagF==0), % It is P-Wave or S-Wave.
    tflat=0; % Reset for flat time.
    flagFRQ=1;
    gn=freqn(k-Lg:min([k*Lg,tccl])); % Rectangular window for

```

```

ge=freqe(k-Lg:min([k+Lg,tcoll])); % instantaneous frequency.
gv=freqv(k-Lg:min([k+Lg,tcoll]));
gn2=find(abs(gn-ge) > 0.09); % Frequency deviation threshold
ge2=find(abs(gn-gv) > 0.09); % between two axes.
gv2=find(abs(ge-gv) > 0.09);
if ((length(gn2) > Lg) | (length(ge2) > Lg) | ...
    (length(gv2) > Lg)),
    flagFREQ=0;
end;
gn2=find((gn < 0.10) | (gn > 0.20)); % Frequency Band threshold.
ge2=find((ge < 0.10) | (ge > 0.20));
gv2=find((gv < 0.10) | (gv > 0.20));
if ((length(gn2) > Lg) & (length(ge2) > Lg) | ... % Lg-2
    ((length(gn2) > Lg) & (length(gv2) > Lg)) | ...
    ((length(ge2) > Lg) & (length(gv2) > Lg))),
    % Process check frequency finished.
    flagFREQ=0;
end;

if (flagFREQ==1),
    flagDFREQ=1;
    gn=fv(k-Lg:min([k+Lg,tcoll])); % Rectangular window for
    ge=fe(k-Lg:min([k+Lg,tcoll])); % instantaneous frequency
    gv=fv(k-Lg:min([k+Lg,tcoll])); % derivative.
    gn=find((gn < -0.01) | (gn > 0.01)); % Frequency derivative
    ge=find((ge < -0.01) | (ge > 0.01)); % threshold.
    gv=find((gv < -0.01) | (gv > 0.01));
    if ((length(gn) > Lg-2) & (length(ge) > Lg-2) | ...
        ((length(gn) > Lg-2) & (length(gv) > Lg-2)) | ...
        ((length(ge) > Lg-2) & (length(gv) > Lg-2))),
        % Process check frequency derivative finished.
        flagDFREQ=0;
    end;
else
    flagDFREQ=0;
end;

BuffEqf=[BuffEqf(2:Lf); flagDFREQ];
Lb=length(find(BuffEqf));
if (flagEQ == 1),
    if (Lb <= nLf60),
        flagEQ=0;
        [Row,Rcol]=size(Result);
        if (Result(1,Rcol) == k),
            Result(2,Rcol)='n';
        else
            Result=[Result [k,'n']];
        end;
    end;
else
    if (Lb >= nLf60),
        flagEQ=1;
        if (flagS == 1),
            Result=[Result [k,'s']];
        else
            Result=[Result [k,'p']];
        end;
    end;
end;
end;

```

```

if (flagEQ == 0),
    Ex(k:tc01)=Ex(k:tc01)-Ex(k);
end;

if ((flagP==1) & (flagEQ==1) & (flagPEQ==0)),
    flagPEQ=1;    % It's the first time in seismic P-wave.
    Result=(Result {k,'P'});
    fprintf('Initial time of the P-wave = %g\n', (k-1)/50);
end;
if ((flagS==1) & (flagEQ==1) & (flagSEQ==0)),
    flagSEQ=1;    % It's the first time in seismic S-wave.
    Result=(Result {k,'S'});
    fprintf('Initial time of the S-wave = %g\n', (k-1)/50);
end;
if ((Ex(k)/(maxval.^2) > 20) & (flagRIGHT==0)),
    flagRIGHT=1;    % The magnitude is above 6.0 Richter.
    Result=(Result {k,'R'});
    fprintf('Time for 6.0 Richter magnitude = %g\n', (k-1)/50);
end;
if ((flagP==1) & (flagEQ==0) & (flagNEQ==0)),
    flagNEQ=1;    % It's the first time in no-seismic wave.
    Result=(Result {k,'N'});
    fprintf('Initial time of the No-Seismic wave = %g\n',...
        (k-1)/50);
end;

else
    % It is Flat-Wave.
    tflat=tflat+1./50;
    if (tflat > 2.5)
        % Flat time threshold to insure flat-wave.
        flagP=0;
        flagS=0;
        flagPEQ=0;
        flagSEQ=0;
        flagNEQ=0;
        flagEQ=1;
        flagPREQ=0;
        flagDPREQ=0;
        flagRIGHT=0;
        tflat=0;
        BuffEq=ones(Lf,1);

        % Shows some important data.
        fprintf('Elapsed time = %g\n', (k-1)/50);
        fprintf('Duration of the signal (without flat) = %g\n',...
            (k-tfini)/50);
        fprintf('Normalized Cumulative Energy = %g\n',...
            Ex(k)/(maxval.^2));
        fprintf('Cumulative Energy = %g\n\n', Ex(k));
        Seismic={Seismic [(k-1)/50, (k-tfini)/50];...
            Ex(k)/(maxval.^2); Ex(k)};

        Ex=nacc.^2+secc.^2+vacc.^2;
        Ex(1:k)=zeros(1,k);    % Resets the Cumulative Energy.
        Ex=cumsum(Ex);
        Ex=Ex.*(maxval.^2);
    end;
end;

```

```

end;

% Shows some important data.
fprintf('Elapsed time = %g\n', (k-1)/50);
fprintf('Duration of the signal (without flat) = %g\n',...
        (k-tfini)/50);
fprintf('Normalised Cumulative Energy = %g\n',...
        Ex(k)/(maxval.^2));
fprintf('Cumulative Energy = %g\n\n', Ex(k));
Result2=(Result(1,:); Result(1,:)/50; Result(2,:));
fprintf(' Sample Time Transition\n');
fprintf('%4d %7.4g %c\n', Result2);
fprintf('\n');
Seismic=[Seismic [(k-1)/50; (k-tfini)/50;...
                  Ex(k)/(maxval.^2); Ex(k)]];

if (argout == 0),
    fname1=[ini,'T',fin];
    eval(['save ',fname1,' Result Seismic']);
end;

disp([fname, ' was processed.']);
fprintf('\n');

*****
*** FileName: DETECTA2.M
*****

function detecta2(fname,hfig)
% DETECTA2(fname,hfig);
% After detecting the transitions of the seismic wave with DETECTA
% algorithm, this program analyses the results generated along the
% wave to PLOT the respective alarms and necessary signals.
%
% fname is a MAT-file without an extension corresponding
% to an earthquake.
% hfig is figure handle, that is, the number of
% the visualisation figure.
% (default = next figure from current figure).
%
% Note : For example, if the earthquake is 'hueh0001', then
% is necessary that has existing the next general
% files :
%         'hueh00a1.mat', 'hueh00f1.spw',
%         'hueh00h1.mat', 'hueh00r1.spw'.
%
% example : detecta2('hueh0001',1); draws in the figure 1.
% see also : carga, procesa2, detecta.

% C. Rivero, October 1995.
% Please type any error you find or any comment
% to file : c:\matlab\users\carlos\comments.doc

% Result=detecta(fname);
%
% Result is a results matrix with order [2xM] where M depends
% on the number of transitions along the seismic wave.
% Each column contains in its first row the sample time

```

```

%       which indicates the time for the transition and the
%       second row contains a character code according the
%       next table:
%       'p' : change from FLAT or S to (possible) P.
%       'e' : change from P or FLAT to (possible) S.
%       'f' : change from P or S to (sure) FLAT.
%       'n' : change to NO-SEISMIC (sure).
%       'P' : indicates the first change to (sure) P.
%       'S' : indicates the first change to (sure) S.
%       'R' : indicates the first change above (sure) 6.0 Richter.
%       'N' : indicates the first change to (sure) No-Seismic wave.
%       'X' : indicates end of an earthquake.

```

```

if (nargin < 2), hfig=(gcf); hfig=hfig+1; end;
if (nargin < 1) | (~isstr(fname)),
    error('One string parameter is required!');
end;

```

```

p=find(fname=='.');
if ~all(size(p)),
    ini=fname(1:length(fname)-2);
    fin=fname(length(fname));
else
    error(['The ',fname,' file name must be without an extension!']);
end;
clear p;

```

```

fname1=fname;
fname1=uppercase(fname1);
disp(['Analyzed earthquake : ',fname1]); sprintf('\n');
fname1=[ini,'T',fin,'.MAT'];
flagT=1;

```

```

if (exist(fname1) == 2),
    (Result,Seismic)=detecta(fname);
    fname1=[ini,'T',fin];
    eval(['save ',fname1,' Result Seismic']);
    flagT=0; % Ignore 'Seismic'
else
    fname1=[ini,'T',fin]; % Result Seismic
    eval(['load ',fname1]);
    flagT=1;
end;

```

```

fname1=[ini,'A',fin];
eval(['load ',fname1]);

```

```

figure(hfig); clf;
eqview(fname,hfig); grid;
eqview(fname);
filter2(fname);
fname1=[ini,'P',fin,'.SPW'];
rfview2(fname1);
figure(hfig); hold on;

```

```

[Rrow,Rcol]=size(Result);
for k=1:Rcol,
    t=(Result(1,k)-1)/50;
    if (Result(2,k)=='p'),
        plot([t],[0,'bo',[t],[4], 'go']);
        plot([t t],[0.5 0.6], 'b-');
    end;
end;

```

```

plot([t t], [3.5 4.5], 'g-');
text(t, 1, 'P');
elseif (Result(2,k)=='s'),
plot([t], [0], 'bo', [t], [4], 'go');
plot([t t], [-0.5 0.5], 'b-');
plot([t t], [3.5 4.5], 'g-');
text(t, 1, 'S');
elseif (Result(2,k)=='f'),
plot([t], [0], 'bo', [t], [4], 'go');
plot([t t], [-0.5 0.5], 'b-');
plot([t t], [3.5 4.5], 'g-');
text(t, 1, 'F');
elseif (Result(2,k)=='n'),
plot([t], [0], 'bo', [t], [4], 'go');
plot([t t], [-0.6 0.5], 'b-');
plot([t t], [3.5 4.5], 'g-');
text(t, 1, 'N');
elseif (Result(2,k)=='P'),
plot([t], [2], 'c*');
plot([t t], [1.5 2.5], 'c-');
text(t, 3, 'P');
if (flagT == 1),
    fprintf('Initial time of the P-wave = %g\n', t);
end;
elseif (Result(2,k)=='S'),
plot([t], [2], 'c*');
plot([t t], [1.5 2.5], 'c-');
text(t, 3, 'S');
if (flagT == 1),
    fprintf('Initial time of the S-wave = %g\n', t);
end;
elseif (Result(2,k)=='R'),
plot([t], [2], 'c*');
plot([t t], [1.5 2.5], 'c-');
text(t, 3, 'R');
if (flagT == 1),
    fprintf('Time for 6.0 Richter magnitude = %g\n', t);
end;
elseif (Result(2,k)=='M'),
plot([t], [4], 'ro');
plot([t t], [3.5 4.5], 'r-');
text(t, 4, 8, 'M');
if (flagT == 1),
    fprintf('Initial time of the No-Seismic wave = %g\n', t);
end;
end;
end;
if (flagT == 1),
[Brow, Scol] = size(Seismic);
for k=1:Scol,
    fprintf('Elapsed time = %g\n', Seismic(1,k));
    fprintf('Duration of the signal (without flat) = %g\n', ...
        Seismic(2,k));
    fprintf('Normalised Cumulative Energy = %g\n', ...
        Seismic(3,k));
    fprintf('Cumulative Energy = %g\n\n', Seismic(4,k));
    Result2=(Result(1, :), Result(1, :)/50; Result(2, :));
    fprintf(' Sample Time Transition\n');
    fprintf('%4d %7.4g %c\n', Result2);

```

```

        fprintf('\n');
    end;
end;

figure(hfig); hold off;

*****
*** FileName: GARBAGE.M
*****

function garbage(fname)
% GARBAGE(fname);
% Deletes the 'garbage' files generated by the SEISMIC
% program or PROCBSA2 algorithm.
% Only will stay the general files.
%
% fname is a MAT-file without an extension corresponding
% to an earthquake.
%
% This means that if fname is 'hueh0001' then the garbage
% files are : 'huehx0n1.spw', 'huehx0a1.mat',
%             'huehx0e1.spw', 'huehx0f1.spw',
%             'huehx0v1.spw', 'huehxrf1.spw'.
%
% with x=1,2,3... depending of the file length. These files
% are temporal for the general files generation so they are
% going to be erased.
% too in this function (e.g. procesa('hueh0001.tmp')).
%
% example : garbage('hueh0001');
% see also : procesa2, seismic.

% C. Rivero, October 1995.
% Please type any error you find or any comment
% to file : c:\matlab\users\carlos\comments.doc

if (nargin < 1) | (~isstr(fname)),
    error('One string parameter is required');
end;

p=find(fname=='.');
if ~all(size(p)),
    ini=fname(1:length(fname)-2);
    fin=fname(length(fname));
else
    error(['The ',fname,' file name must be without an extension!']);
end;
clear p;

fname1=[ini,'H',fin];
eval(['load ',fname1]); % tcol tf flat delta nfiles maxval

for k=files:-1:1,
    fname1=[ini(1:length(ini)-2).int2str(nfiles-k+1),'0A',fin,'.MAT'];
    delete(fname1);
end;
for k=files:-1:1,
    fname1=[ini(1:length(ini)-2).int2str(nfiles-k+1),'0N',fin,'.SPW'];
    delete(fname1);
end;

```

```

end;
for k=nfiles:-1:1,
    fname1=[ini(1:length(ini)-2),int2str(nfiles-k+1),'OE',fin,'.SPW'];
    delete(fname1);
end;
for k=nfiles:-1:1,
    fname1=[ini(1:length(ini)-2),int2str(nfiles-k+1),'OV',fin,'.SPW'];
    delete(fname1);
end;
for k=nfiles:-1:1,
    fname1=[ini(1:length(ini)-2),int2str(nfiles-k+1),'OP',fin,'.SPW'];
    delete(fname1);
end;
for k=nfiles:-1:1,
    fname1=[ini(1:length(ini)-2),int2str(nfiles-k+1),'RP',fin,'.SPW'];
    delete(fname1);
end;

disp(['Number of erased files : ',int2str(6.*nfiles)]);
fprintf('\n');

```

```

*****
*** FileName: ADJUST2.M
*****

```

```

function [maxi]=adjust2(fname,lastpoints)
% [maxi]=ADJUST2(fname)
% Loads a MAT-file of an earthquake for its adjustment.
% Save the results of the three axes components:
% nacc, eacc, vacc.
% Differs from ADJUST in that the three components are
% normalized respect to the maximum value of the three
% axes.
%
% fname      is a MAT-file name without extension wich
%             contains earthquake data.
% lastpoints is a number which indicates how many points
%             at the end of the seismic signal will be
%             considered. (default = 256);
%
% maxi       returns the maximum value taken from the
%             maximum value of each axis.
%
% example : adjust('hueh0001'); % generates 'hueh00a1.mat'.
% see also : carga, adjust.

% C. Rivero, July 1995.
% Please type any error you find or any comment
% to file : c:\matlab\users\carlos\comments.doc

if (nargin < 2), lastpoints=256; end;
if (nargin < 1) | (~isstr(fname)),
    error('At least one string parameter is required');
end;

p=find(fname='.');
if ~all(size(p)),
    ini=fname(1,length(fname)-2);
    fin=fname(length(fname));

```



```

else
    error(['The ,fname, file name must be without an extension!']);
end;
clear p;

eval(['load ',fname]);

fname=[ini,'A',fin];

nacc=n-mean(n);
eacc=e-mean(e);
vacc=v-mean(v);

% Only uses the last 'lastpoints' points.

if (lastpoints > length(nacc)), lastpoints=length(nacc); end;

nacc=nacc(length(nacc)-lastpoints+1:length(nacc));
eacc=eacc(length(eacc)-lastpoints+1:length(eacc));
vacc=vacc(length(vacc)-lastpoints+1:length(vacc));

maxi=max((max(abs(nacc)),max(abs(eacc)),max(abs(vacc))));

nacc=nacc./maxi;
eacc=eacc./maxi;
vacc=vacc./maxi;

% d1=max(nacc)+abs(min(eacc));
d1=2;
% d2=max(eacc)+abs(min(vacc))+d1;
d2=4;
a=[nacc eacc*d1 vacc*d2];

eval(['save ',fname,' nacc eacc vacc a']);

*****
*** FileName: CALCULA3.M
*****

function calcula3(fname,method);
% CALCULA3(fname,method);
% Computes a quake's Time-Frequency Representation,
% in the three axes and saves the results to three
% files, one for each axis.
%
% fname is a MAT-file name without extension.
% method is the time-frequency representation type,
% possible names are: 'spwv', 'stft', 'sp'.
%
% Note: This program only uses the functions SPWV and
% STFT, therefore their reassignment versions
% do not exist.
%
% example : calcula3('hueh0001','spwv');
% see also : stftview, stftview2, stftview3, vista3.

% C. Rivero, July 1995.
% Please type any error you find or any comment
% to file : c:\matlab\users\carlo\comments.doc

```

```

if (nargin < 2), error('At least 2 parameters are required'); end;
p=find(fname==' ');
if ~all(size(p)),
    ini=fname(1:length(fname)-2);
    fin=fname(length(fname));
else
    error(['The ,fname, file name must be without an extension!']);
end;
clear p;

fname=[ini,'A',fin];
eval(['load ',fname]);

```

```

NF=256;          % <-- Number of frequency bins
g=window(13,'hanning');
h=window(71,'hanning');
method=uppercase(method);

```

```

if strcmp(method,'SPWV'),
    % [spwv,rspwv]=rtfr(nacc,1:length(nacc),NF,'spwv',g,h);
    % fname=[ini,'M',fin,'.SPW'];
    % eval(['save ',fname,' spwv rspwv nacc g h']);
    % clear spwv rspwv;
    % [spwve,rspwve]=rtfr(eacc,1:length(eacc),NF,'spwv',g,h);
    % fname=[ini,'E',fin,'.SPW'];
    % eval(['save ',fname,' spwve rspwve eacc g h']);
    % clear spwve rspwve;
    % [spwvv,rspwvv]=rtfr(vacc,1:length(vacc),NF,'spwv',g,h);
    % fname=[ini,'V',fin,'.SPW'];
    % eval(['save ',fname,' spwvv rspwvv vacc g h']);
    % clear spwvv rspwvv;

```

```

[spwv]=spwv(nacc,1:length(nacc),NF,g,h);
fname=[ini,'M',fin,'.SPW'];
eval(['save ',fname,' spwv nacc g h']);
clear spwv;
[spwve]=spwv(eacc,1:length(eacc),NF,g,h);
fname=[ini,'E',fin,'.SPW'];
eval(['save ',fname,' spwve eacc g h']);
clear spwve;
[spwvv]=spwv(vacc,1:length(vacc),NF,g,h);
fname=[ini,'V',fin,'.SPW'];
eval(['save ',fname,' spwvv vacc g h']);
clear spwvv;

```

```

elseif strcmp(method,'SP'),
    % [spn,rspn]=rtfr(nacc,1:length(nacc),NF,'sp',g);
    % fname=[ini,'M',fin,'.SP'];
    % eval(['save ',fname,' spn rspn nacc g']);
    % clear spn rspn;
    % [spe,rspe]=rtfr(eacc,1:length(eacc),NF,'sp',g);
    % fname=[ini,'E',fin,'.SP'];
    % eval(['save ',fname,' spe rspe eacc g']);
    % clear spe rspe;
    % [spv,rspv]=rtfr(vacc,1:length(vacc),NF,'sp',g);
    % fname=[ini,'V',fin,'.SP'];
    % eval(['save ',fname,' spv rsrv vacc g']);
    % clear spv rsrv;

```

```

[spn]=abs(stft(nacc,1:length(nacc),NF,g)).^2;
fname=[ini,'N',fin,'.SP'];
eval(['save ',fname,' spn nacc g']);
clear spn;
[spe]=abs(stft(eacc,1:length(eacc),NF,g)).^2;
fname=[ini,'E',fin,'.SP'];
eval(['save ',fname,' spe eacc g']);
clear spe;
[spv]=abs(stft(vacc,1:length(vacc),NF,g)).^2;
fname=[ini,'V',fin,'.SP'];
eval(['save ',fname,' spv vacc g']);
clear spv;

elseif strcmp(method,'STFT'),
[stfn]=stft(nacc,1:length(nacc),length(nacc),g);
fname=[ini,'N',fin,'.STF'];
eval(['save ',fname,' stfn nacc g']);
clear stfn;
[stfe]=stft(eacc,1:length(eacc),length(eacc),g);
fname=[ini,'E',fin,'.STF'];
eval(['save ',fname,' stfe eacc g']);
clear stfe;
[stfv]=stft(vacc,1:length(vacc),length(vacc),g);
fname=[ini,'V',fin,'.STF'];
eval(['save ',fname,' stfv vacc g']);
clear stfv;
end;

```

```

*****
*** FileName: INSTFREQ.M
*****

```

```

function instfreq(fname);
% INSTFREQ(fname);
% Computes the Instantaneous Frequency and saves it
% to a IF-file.
%
% fname is a MAT-file with an extension of time-frequency
% representation of an earthquake. Its possible
% extensions are: spv, stf, sp.
%
% This means that if fname is 'hueh0001.stf' then the
% IF-file generated is 'hueh00f1.stf'.
%
% example : instfreq('hueh0001.stf');
% see also : cordill3.

% C. Rivero, July 1995.
% Please type any error you find or any comment
% to file : c:\matlab\users\carlos\comments.doc

if (nargin < 1) | (~isstr(fname)),
error('At least one string parameter is required');
end;

p=find(fname==' ');
if all(size(p)),
ini=fname(1:p(1)-3);
fin=fname(p(1)-1:length(fname));

```

```

    ext=fname(p(1)+1:length(fname)); ext=uppercase(ext);
else
    error('A file name extension is expected with ',fname));
end;
clear p;

```

```

fname={ini,'N',fin};
eval(['load ',fname,' -mat']);
fname={ini,'E',fin};
eval(['load ',fname,' -mat']);
fname={ini,'V',fin};
eval(['load ',fname,' -mat']);
fname={ini,'P',fin};

```

```

if strcmp(ext,'SPW'),
    spn=abs(spwvn); clear spwvn rpswvn;
    spe=abs(spwve); clear spwve rpswve;
    spv=abs(spwvv); clear spwvv rpswvv;
elseif strcmp(ext,'STF'),
    spn=abs(stftn).^2; clear stftn;
    spe=abs(stfte).^2; clear stfte;
    spv=abs(stftv).^2; clear stftv;
elseif strcmp(ext,'SP'),
    clear rspn rspe rsvp;
end;

```

```

corn=spn; core=spe; corv=spv;
[lrow,lcol]=size(spn);
lrow=lrow/2;
t=lrow=frequency, lcol=time
disp('Calculando Frecuencia instantanea...');
for icol=1:lcol,
    if (rem(icol,16)==0),
        sprintf('%g \n',icol);
    else
        sprintf('%g ',icol);
    end;
    En=sum(corn(1:lrow,icol));
    Ee=sum(core(1:lrow,icol));
    Ev=sum(corv(1:lrow,icol));
    Cn=round(sum((1:lrow)'.*corn(1:lrow,icol))/En);
    Ce=round(sum((1:lrow)'.*core(1:lrow,icol))/Ee);
    Cv=round(sum((1:lrow)'.*corv(1:lrow,icol))/Ev);
    corn(:,icol)=zeros(2*lrow,1);
    core(:,icol)=zeros(2*lrow,1);
    corv(:,icol)=zeros(2*lrow,1);
    corn(Cn,icol)=En;
    core(Ce,icol)=Ee;
    corv(Cv,icol)=Ev;
end;

```

```

eval(['save ',fname,' corn core corv']);

```

```

*****
*** FileName: DFRBQ.M
*****

```

```

function dfreq(fname)
% DFRBQ(fname);

```

```

% Derives a Cordillera or an Instantaneous Frequency.
% Saves the results to a R-File.
%
% fname is a MAT-file with an extension and a COR-file or
% IF-file of a time-frequency representation of an
% earthquake.
% Its possible extensions are: spw, stf, sp.
%
% This means that if fname is 'hush00f1.spw' then the file
% generated is : 'hush0rf1.spw'.
%
% example : dfreq('hush00x1.spw');
%           where x can be 'C' or 'F'.
% see also : cordill3, instfreq.

```

```

% C. Rivero, August 1995.
% Please type any error you find or any comment
% to file : c:\matlab\users\carlos\comments.doc

```

```

if (nargin < 1) | (~isstr(fname)),
    error('At least one string parameter is required');
end;

p=find(fname=='.');
if all(size(p)),
    ini=fname(1:p(1)-4);
    fin=fname(p(1)-2:length(fname));
    ext=fname(p(1)-2); ext=upcase(ext);
else
    error('A file name extension is expected with ',fname);
end;
clear p;

if strcmp(ext,'C'),
    ext='cordillera';
elseif strcmp(ext,'F'),
    ext='frecuencia instantanea';
end;

eval(['load ',fname,' -mat']);
fname=[ini,'R',fin];

[lrow,lcol]=size(corn);
% lrow=frequency, lcol=time
disp(['Calculando Derivada de ',ext,'...']);

lrow=lrow/2;

[En,fn]=max(corn(1:lrow,:));
[Ea,fa]=max(core(1:lrow,:));
[Ev,fv]=max(cov(1:lrow,:));

fn=[0 diff(fn)];
fa=[0 diff(fa)];
fv=[0 diff(fv)];

eval(['save ',fname,' En Ea Ev']);

```

.....

```
*** FileName: FILTRA.M
*****
```

```
function [sig]=filtra(sig,Wc)
% [sig]=FILTRA(sig,Wc);
%
% example : flat2('hush0001',1); draws in the figure 1.
% see also : eqview, adjust, flat1, flat3.
```

```
% C. Rivero, October 1995.
% Please type any error you find or any comment
% to file : c:\matlab\users\carlos\comments.doc
```

```
if (nargin < 2), Wc=0.01; end;
if (nargin < 1),
    error('One parameter is required');
end;
```

```
[sigrow,sigcol]=size(sig);
if (sigcol~=1), error('sig must have one column'); end;
M=fir1(16,Wc,hanning(17));
sig=conv(sig,M);
sig=sig(1:length(sig)-16);
```

```
*****
*** FileName: STFT.M
*****
```

```
function [tfr,Ex]=stft(sig,t,N,g,mode);
% [tfr,Ex]=STFT(sig,t,N,g,mode);
% computes a Short-Time Fourier-Transform with an
% analysing window g.
```

```
% sig is the signal.
% t is (are) the time instant(s).
% N is the number of frequency bins.
% g is the analysing window.
% mode is the calculation mode (default: 'FFT').
```

```
% Possible modes are: 'FFT', 'DFT'.
```

```
% tfr is the short-time fourier-transform time-frequency
% representation, and its elements are complex, thus
% the magnitude can be calculated as ABS(tfr) and the
% phase can be obtained as ANGLE(tfr).
% The Spectrogram is calculated as SP=ABS(tfr).^2
% Ex is the signal energy. (optional).
```

```
% example : [tfr]=stft(sig,1:2;255,256>window(9,'hann'));
%           tfrm=abs(tfr); tfrp=angle(tfr);
% see also : rtfr, spvv, window, calcula, grafica.
```

```
% C. Rivero, June 1995.
% Please type any error you find or any comment
% to file : c:\matlab\users\carlos\comments.doc
```

```
if (nargin < 4), error('At least 4 parameters are required'); end;
if (nargin < 5), mode='FFT'; end;
```

```

[sgrow,sgcol]=size(sig);
if (sgcol~=1), error('sig must have one column'); end;
[trow,tcol]=size(t);
if (trow~=1), error('t must only have one row'); end;
if (t(tcol) > sigrow), error('t is out of range'); end;
if (tcol~=1), Dt=1; else Dt=(t(tcol)-t(1))/(tcol-1); end;
% Dt es el desplazamiento de la ventana
(Nrow,Ncol)=size(N);
if (Nrow~=1) | (Ncol~=1), error('N must be a scalar'); end;
[grow,gcol]=size(g);
if (gcol~=1) | (rem(grow,2)~=0),
    error('g must be a smoothing window as column vector with odd length');
end;
if (N < grow),
    error('N must be a positive integer greater or equal than length(g)');
end;

if (~isstr(mode)), error('mode must be a string of 'dft' or 'fft'); end;
mode=upcase(mode);
MN=log(N)/log(2.0);
if strcmp(mode,'FFT'),
    fprintf('FFT Calculation\n');
    N=2^nextpow2(N); % N es potencia de 2
elseif strcmp(mode,'DFT'),
    if (rem(MN,fix(MN))~=0), % N no es potencia de 2
        fprintf('DFT Calculation\n');
    else % N es potencia de 2
        fprintf('FFT Calculation\n');
    end;
else
    error('mode must be a string of 'dft' or 'fft');
end;
clear MN;

Ex=mean(abs(sig).^2);
Lg=(grow-1)/2; g=g/(Lg+1);

tfr=zeros(N,tcol); % stft-tfr con magnitud y fase (complejos)
disp('STFT distribution');
for icol=1:tcol,
    ti=t(icol);
    points=max(1,ti-Lg):min((ti+Lg),sigrow);
    if (ti-Lg) < 1,
        xi=grow-length(points)+1:grow;
    else
        xi=1:length(points);
    end;
    if (rem(icol,16)~=0), fprintf('%g \n',ti); else fprintf('%g ',ti); end;
    x=zeros(grow,1); % ventana rectangular
    x(xi,1)=sig(points,1);
    tfr(1:grow, icol) = x.*g;
    % Spectrogram calculating:
    % tfr(1:2*grow-1, icol) = xcorr(tfr(1:grow, icol));
    % At the 'end' of the 'for' loop: sp=fft(tfr);
end;
fprintf('\n');
tfr=fft(tfr);
% Spectrogram calculating: sp=abs(tfr).^2;

if (nargout==0),

```

```

    threshold=5.0;
    hfig=gcf; hfig=hfig+1; figure(hfig); clf;
    stfview(abs(tfr).^2,t,50,1,threshold,1,'stft',g);
end;

```

```

*****
*** FileName: SPWV.M
*****

```

```

function [tfr,Ex]=spwv(sig,t,N,g,h,mode);
% [tfr,Ex]=SPWV(sig,t,N,g,h,mode);
% computes a Smoothed Pseudo Wigner-Ville Distribution with
% a time window g and a frequency window h.
%
% sig is the signal.
% t is (are) the time instant(s).
% N is the number of frequency bins.
% g is the time smoothing window.
% h is the frequency smoothing window.
% mode is the calculation mode (default: 'FFT').
%
% Possible modes are: 'FFT', 'DFT'.
%
% tfr is the Smoothed Pseudo Wigner-Ville Distribution (SPWV)
% time-frequency representation, and its elements are
% complex, thus the power can be calculated as ABS(tfr).
% Ex is the signal energy. (optional).
%
% example : [tfr]=spwv(sig,1:255,256>window(9,'hann'));
% see also : rtfr, stft, window, calcula, grafica.
%
% C. Rivero, July 1995.
% Please type any error you find or any comment
% to file : c:\matlab\users\carlos\comments.doc

if (nargin < 5), error('At least 5 parameters are required'); end;
if (nargin < 6), mode='FFT'; end;

[sigrow,sigcol]=size(sig);
if (sigcol~=1), error('sig must have one column'); end;
[trow,tcol]=size(t);
if (trow~=1), error('t must only have one row'); end;
if (t(tcol) > sigrow), error('t is out of range'); end;
if (tcol~=1), Dt=1; else Dt=(t(tcol)-t(1))/(tcol-1); end;
% Dt es el desplazamiento de la ventana
[Mrow,Mcol]=size(N);
if (Mrow~=1) | (Mcol~=1), error('N must be a scalar'); end;
[grow,gcol]=size(g);
if (gcol~=1) | (rem(grow,2)~=0),
    error('g must be a smoothing window as column vector with odd length');
end;
[hrow,hcol]=size(h);
if (hcol~=1) | (rem(hrow,2)~=0),
    error('h must be a smoothing window as column vector with odd length');
end;
if (N < grow),
    error('N must be a positive integer greater or equal than length(g)');
end;
% Lg=(grow-1)/2; g=g/(Lg+1);

```



```

if (~isstr(mode)), error('mode must be a string of 'dft' or 'fft'); end;
mode=uppercase(mode);
MN=log(M)/log(2.0);
if strcmp(mode,'FFT'),
    fprintf('FFT Calculation\n');
    M=2^nextpow2(M); % M es potencia de 2
elseif strcmp(mode,'DFT'),
    if (rem(MN,fix(MN))==0), % M no es potencia de 2
        fprintf('DFT Calculation\n');
    else % M es potencia de 2
        fprintf('FFT Calculation\n');
    end;
else
    error('mode must be a string of 'dft' or 'fft');
end;
clear MN;

Ex=mean(abs(sig).^2);
Lg=(grov-1)/2; g=g/sum(g);
Lh=(hrov-1)/2; h=h/h(Lh+1);

tfr=zeros(M,tcoll); % spwv-tfr con magnitud (reales)
disp('SPWV distribution');
for icol=1:tcoll,
    ti=t(icol); taumax=min([ti*Lg-1, sigrov-ti*Lg, M/2-1, Lh]);
    points= -min([Lg, sigrov-ti]) : min([Lg, ti-1]);
    if (rem(icol,16)==0), fprintf('tg \n',ti); else fprintf('tg ',ti); end;
    xx= sig(ti-points,1) .* conj(sig(ti-points,1));
    tfr(1,icol)= sum( g(Lg+1:points) .* xx) ;
    for tau=1:taumax,
        points= -min([Lg, sigrov-ti-tau]) : min([Lg, ti-tau-1]);
        xx=sig(ti+tau-points,1) .* conj(sig(ti-tau-points));
        tfr(1+tau,icol)= sum( g(Lg+1:points) .* xx);
        tfr(1+tau,icol)= h(Lh+tau+1) * tfr(1+tau,icol) ;
        tfr(M+1-tau,icol)= sum( g(Lg+1:points) .* conj(xx));
        tfr(M+1-tau,icol)= h(Lh-tau+1) * tfr(M+1-tau,icol);
    end;
end;
fprintf('\n');
tfr=real(fft(tfr));

if (argout==0),
    threshold=5.0;
    hfig=gcf; hfig=hfig+1; figure(hfig); clf;
    atfviv(tfr,t,50,1,threshold,1,'spwv',g,h);
end;

```

## Anexo 2

### Propiedades de la distribución Wigner-Ville.

A continuación se muestran resumidas en una tabla, las propiedades de la distribución Wigner-Ville, la cual es una de las más importantes para la distribución de la energía en el plano tiempo-frecuencia. Estas propiedades la hacen una de las distribuciones más de mayor peso para el análisis de señales. En general, estas son algunas propiedades matemáticas "deseables" de las representaciones Tiempo-Frecuencia cuadráticas y de energía [2].

P1 Real-valued

$$T_x^*(t, f) = T_x(t, f)$$

P2 Time shift

$$T_x(t, f) = T_x(t - t_0, f) \text{ para } \tilde{x}(t) = x(t - t_0)$$

P3 Frequency shift

$$T_x(t, f) = T_x(t, f - f_0) \text{ para } \tilde{x}(t) = x(t) e^{j2\pi f_0 t}$$

P4 Time marginal:

$$\int T_x(t, f) df = |x(t)|^2$$

P5 Frequency marginal

$$\int T_x(t, f) dt = |X(f)|^2$$

P6 Time moments

$$\iint t^2 T_x(t, f) dt df = \int t^2 |x(t)|^2 dt$$

P7 Frequency moments

$$\iint f^2 T_x(t, f) dt df = \int f^2 |X(f)|^2 df$$

P8 Time-frequency scaling

$$T_x(t, f) = T_x(at, \frac{f}{a}) \text{ para } \tilde{x}(t) = \sqrt{|a|} x(at) \text{ con } a \neq 0$$

**P9 Instantaneous frequency**

$$\frac{\int_{f_1}^{f_2} f T_x(t, f) df}{\int_{f_1}^{f_2} T_x(t, f) df} = f_x(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \arg\{x(t)\}$$

**P10 Group delay**

$$\frac{\int t T_x(t, f) dt}{\int T_x(t, f) dt} = t_x(f) = -\frac{1}{2\pi} \frac{d}{df} \arg\{X(f)\}$$

**P11 Finite time support**

$$T_x(t, f) = 0 \text{ para } t \text{ fuera de } [t_1, t_2] \text{ si } x(t) = 0 \text{ fuera de } [t_1, t_2]$$

**P12 Finite frequency support**

$$T_x(t, f) = 0 \text{ para } f \text{ fuera de } [f_1, f_2] \text{ si } X(f) = 0 \text{ fuera de } [f_1, f_2]$$

**P13 Moyal's formula (unitarity)**

$$(T_{x_1, y_1}, T_{x_2, y_2}) = (x_1, x_2)(y_1, y_2)^*$$

**P14 Convolution**

$$T_{\tilde{x}}(t, f) = \int T_h(t-t', f) T_x(t', f) dt' \text{ para } \tilde{x}(t) = \int h(t-t') x(t') dt'$$

**P15 Multiplication**

$$T_{\tilde{x}}(t, f) = \int T_h(t, f-f') T_x(t, f') df' \text{ para } \tilde{x}(t) = h(t)x(t)$$

**P16 Fourier transform**

$$T_{\tilde{x}}(t, f) = T_x\left(\frac{-t}{c}, cf\right) \text{ para } \tilde{x}(t) = \sqrt{|c|} x(ct) \text{ con } c \neq 0$$

**P17 Chirp convolution**

$$T_{\tilde{x}}(t, f) = T_x\left(t \frac{f}{c}\right) \text{ para } \tilde{x}(t) = x(t) e^{j2\pi c \frac{t^2}{2}}$$

**P18 Chirp multiplication**

$$T_{\tilde{x}}(t, f) = T_x(t, f - ct) \text{ para } \tilde{x}(t) = x(t) e^{j2\pi c \frac{t^2}{2}}$$

### Anexo 3

#### Referencia de las gráficas incluidas en el texto.

A continuación se indican las referencias de las gráficas presentadas en el texto por orden numérico. La referencia correspondiente se encuentra indicada entre corchetes, la cual corresponde a la citada en la bibliografía si es el caso.

- Figura 1, ref. [2], cap. 3, pp. 37, fig. 3.
- Figura 2, ref. [2], cap. 4, pp. 64, fig. 6.
- Figura 3, ref. [2], cap. 2, pp. 27, fig. 5.
- Figura 4, ref. [3], pp. 486, fig. 3.
- Figura 5, ref. [MatLab, Carlos R.], siem0001, osciograma.
- Figura 6, ref. [2], cap. 7, pp. 106, fig. 3.
- Figura 7, ref. [2], cap. 6, pp. 89, fig. 2.
- Figura 8, ref. [4], cap. 5, fig. 5.1.
- Figura 8, ref. [4], cap. 5, fig. 5.11.
- Figura 10,11,12, ref. [MatLab], cose0001, distribuciones STFT y SPWV.
- Figura 13, ref. [centro de instrumentación siemica], mapa de la costa de Guerrero.
- Figura 14, 15, 16, 17, ref. [MatLab], hueh0001, osciograma y SPWVD N,E, y V.
- Figura 18, ref. [MatLab, Carlos R.], hueh0001, RSPWVD del eje N.
- Figura 19, ref. [MatLab], siem0001, SPWVD e IF del eje N.
- Figura 20, ref. [MatLab], siem0001, RSPWVD e IF del eje N.
- Figura 21, ref. [MatLab], siem0001, IF de los tres ejes N, E y V.
- Figura 22, ref. [MatLab], siem0001, derivada de la IF en los tres ejes N, E y V.
- Figura 23, ref. [MatLab], siem0001, CE, FCED y osciograma.
- Figura 24, ref. [MatLab], siem0001, densidad de distribución de la FCED.
- Figura 25, ref. [MatLab], siem0002, densidad de distribución de la FCED.
- Figura 26, ref. [MatLab], siem0003, densidad de distribución de la FCED.
- Figura 27, ref. [MatLab], siem0004, densidad de distribución de la FCED.
- Figura 28, ref. [MatLab], densidad de distribución promediada de la FCED y sus fdp.
- Figura 29, ref. [MatLab], función densidad de probabilidad de la FCED en general.
- Figura 30, ref. [MatLab], fdp de la FCED y el umbral estimado con costos iguales.
- Figura 31, ref. [MatLab], fdp de la FCED y el umbral estimado con costos diferentes.
- Figura 32, ref. [MatLab], siem0001, transiciones detectadas con el algoritmo.
- Figura 33, ref. [PaintBrush], diagrama de bloques.
- Figura 34, ref. [MatLab], siem0002, transiciones detectadas con el algoritmo.
- Figura 35, ref. [MatLab], siem0002, derivada de la IF en los tres ejes N, E y V.
- Figura 36, ref. [MatLab], siem0002, CE, FCED y osciograma.
- Figura 37, ref. [MatLab], siem0003, transiciones detectadas con el algoritmo.
- Figura 38, ref. [MatLab], siem0003, derivada de la IF en los tres ejes N, E y V.
- Figura 39, ref. [MatLab], siem0003, CE, FCED y osciograma.
- Figura 40, ref. [MatLab], siem0004, transiciones detectadas con el algoritmo.
- Figura 41, ref. [MatLab], siem0004, derivada de la IF en los tres ejes N, E y V.
- Figura 42, ref. [MatLab], siem0004, CE, FCED y osciograma.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Fernando Bolaños, "Análisis de Ondas Sísmicas," *Mundo Electrónico*, No. 136, pp. 77-84, 1984.
- [2] Bruce A. Bolt, Terremotos, Editorial Reverte S.A., Barcelona, España, 1981.
- [3] Adem M. Dziewonski and Don L. Anderson, "Seismic Tomography of the Earth's Interior", *American Scientist*, Vol. 72, pp. 483-494, Sept.-Oct., 1984.
- [4] Thorne Lay and Terry C. Wallace, Modern Global Seismology, Academic Press Inc., California, USA, 1995.
- [5] Keiichi Aki and Paul G. Richards, Quantitative Seismology. Theory and Method, Vol. 1, W.H. Freeman and Company, USA,
- [6] A. Papoulis, Signal Analysis, McGraw-Hill Book Co., New York, USA, 1977.
- [7] John G. Proakis and Dimitris G. Manolakis, Digital Signal Processing. Principles, Algorithms, and Applications, 2nd. ed., Macmillan Publishing Company, New York, USA, 1992.
- [8] F. Hlawatsch and G.F. Boudreaux-Bartels, "Linear and Quadratic Time-Frequency Signal Representations," *IEEE Signal Proc. Mag.*, pp. 21-67, 1992.
- [9] F. Auger and P. Flandrin, "The why and how of Time-Frequency Reassignment," *Proc. IEEE-SP Symp. on Time-Frequency and Time-Scale Analysis*, pp. 197-200, Philadelphia, PA, Oct. 25-28, 1994.
- [10] T.A.C.M. Classen and W.F.G. Mecklenbräuker, "The Wigner Distribution—A Tool for Time-Frequency Signal Analysis; Part II: Discrete Time Signals," *Philips J. Res.*, Vol. 35, pp. 217-250, 1980.
- [11] L. Cohen, "Time-Frequency Distributions—A review," *Proc. IEEE*, vol. 77, no. 7, pp. 941-981, Philadelphia, July, 1989.
- [12] Ferrel G. Stremier, Introduction to Communication Systems, 2nd. ed., Addison-Wesley Publishing Company Inc., Massachusetts, USA, 1982.
- [13] C. Rivero-Moreno and B. Escobedo-Ramírez, "Seismic Signal Detection with Time-Frequency Models," *IEEE-Signal Processing Society, International Symposium on Time-Frequency and Time-Scale Analysis*, pp. 345-348, Paris, France, June 18-21, 1998.