



**DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO**  
**Facultad de Ingeniería**

**CONTROL DE UNA ESTACION SISMOLOGICA DIGITAL**

**Y**

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE DETECCION AUTOMATICA DE LA SEÑAL SISMICA**

**Tan Yi**

**T E S I S**

**PRESENTADA A LA DIVISION DE ESTUDIOS DE  
POSGRADO DE LA**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**DE LA**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**COMO REQUISITO PARA OBTENER**

**EL GRADO DE**

**MAESTRO EN INGENIERIA**

**( Control )**

**CIUDAD UNIVERSITARIA**

**Julio, 1989**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## INDICE

RESUMEN		1
CAPITULO I	INTRODUCCION	2
CAPITULO II	SISMOS Y SEÑALES SISMICAS	
II.1	Parámetros y Ondas sísmicas	4
II.2	El registro sísmico y sus características	5
CAPITULO III	DESARROLLO DE UNA ESTACION SIMOLOGICA DIGITAL	
III.1	Instrumentación sísmológica	8
III.2	Una nueva estación sísmológica digital	
III.2.1	Descripción general de la estación	15
III.2.2	Control y programación de la estación	19
CAPITULO IV	EL SISTEMA DE PROCESAMIENTO DE DATOS SISMICOS	
IV.1	Descripción general	35
IV.2	EL problema de localización	37
IV.3	El problema de detección automática	40
IV.4	EL método de detección automática	42
CAPITULO V	DESARROLLO DE UN SISTEMA DE DETECCION AUTOMATICA EN EL SSN	
V.1	Antecedentes históricos del SSN	49
V.2	Nuevo sistema de detección automática en el SSN	53
V.3	Desarrollo de un sistema de detección automática en el SSN	59
CAPITULO VI	CONCLUSIONES Y COMENTARIOS	69
BIBLIOGRAFIA		71

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## RESUMEN

Siendo México una de las regiones con más actividad sísmica en el mundo, la investigación de la sismología en este país tiene gran importancia. El desarrollo de una red sísmica con instrumentos modernos y un sistema de procesamiento avanzado es necesario y muy importante.

Este trabajo presenta una serie de desarrollos en instrumentación sismológica y en el sistema de detección y procesamiento de la señal sísmica. Se diseñó el software de control para una nueva estación sísmica digital construida en base a un microprocesador. Esta estación es moderna, económica y comerciable, y representa un gran avance en el desarrollo de la instrumentación sismológica en México. La adaptación y el diseño de un sistema de detección automática para la señal sísmica analógica forma parte importante en la modernización del Servicio Sismológico Nacional (SSN) y también representa el primer paso del diseño de un sistema de detección para la señal sísmica digital. Actualmente este sistema ya está operando rutinariamente en el SSN y hasta fecha ha proporcionado resultados muy positivos. Ahora se trabaja para optimizar el funcionamiento del sistema.

## CAPITULO I INTRODUCCION

Los terremotos constituyen una de las catástrofes naturales más devastadoras y más aterradoras que existen. A lo largo de la historia humana, los terremotos han causado cientos de miles de muertes y grandes pérdidas materiales. El hombre siempre ha experimentado un terror especial hacia los terremotos y a su manera especial, ha intentado explicar, entender y hasta querer predecirlos. Aunque los estudios y observaciones de los terremotos se iniciaron hace mucho tiempo, la ciencia que se dedica al estudio sistemático de estos es bastante reciente.

La sismología, la ciencia que estudia todo lo referente a los sismos llega a ser una ciencia establecida, sólo después de que la instrumentación sísmica pudo registrar las ondas sísmicas. Este tipo de instrumentación fue desarrollada a finales del siglo 19. Los datos sísmicos registrados son informaciones elementales de gran utilidad para la investigación y el desarrollo de la sismología. Con los grandes y rápidos avances de la electrónica y la computación, los instrumentos sismológicos han progresado rápidamente. En la actualidad, estos instrumentos son muy sensibles, tienen alta ganancia y son relativamente de bajo costo. Además tienen la capacidad de detectar sismos pequeños, y son útiles para formar redes sísmicas regionales o locales.

La red sísmica se diseña para detectar y registrar los movimientos sísmicos de la región de interés, así como para procesar e interpretar dichas señales. Los datos obtenidos por estas redes son de gran importancia para la evaluación del riesgo sísmico, el cual es bastante necesario para la toma de decisiones que afectan directamente a muchos proyectos de ingeniería y al desarrollo socioeconómico. Una red sísmica generalmente consiste de dos sistemas: el de instrumentación de campo y el de procesamiento de datos. En una red sísmica, las señales captadas por los instrumentos de diferentes lugares generalmente son telemetrizadas en forma analógica o digital a una estación central en donde se realiza el registro, el procesamiento, y el análisis.

El uso de computadoras permite procesar las señales sísmicas en tiempo real. Las ventajas principales de un sistema de procesamiento centralizado son: la facilidad de establecer una base común de tiempo, la cual elimina la necesidad de corregir por separado el tiempo para cada estación y el de permitir el monitoreo inmediato de la actividad sísmica dentro de la red. El diseño de la instrumentación sísmica y del sistema de procesamiento son trabajos principales para el desarrollo de una red sísmica.

México es uno de los países con más actividad sísmica en el mundo, gran parte de su territorio está sometida a enormes esfuerzos tectónicos que causan, entre otros efectos, grandes terremotos. Por esto, en este país, es muy importante la investigación de la sismología y el desarrollo de la red sísmica con instrumentos modernos y un sistema de procesamiento avanzado.

En el presente trabajo se describen una serie de desarrollos realizados en instrumentación sismológica y en el sistema de detección y procesamiento de la señal sísmica. Se presenta el diseño del software de control para una nueva estación sísmica digital desarrollada en el Instituto de Geofísica de la UNAM y la adaptación y el diseño de un sistema de detección automática para la señal sísmica analógica. La estación está construida en base a un microprocesador y mediante su programación puede tener una gran capacidad de operación y utilidades. Es la estación más moderna y avanzada que existe en México. El sistema de detección y procesamiento es una modificación y rediseño en base a un Sistema de Adquisición y procesamiento desarrollado en el U. S. Geological Survey (USGS). Este sistema representa un gran paso en la modernización del Servicio Sismológico Nacional (SSN) y proporciona una gran utilidad en la investigación sismológica.

En el capítulo II de este estudio se presentan algunos conceptos básicos de sismología, así como las características principales de la señal sísmica. En el capítulo III se describe el desarrollo de una nueva estación sísmica digital basada en un microprocesador y el proceso de control de dicha estación. El esquema general del sistema de procesamiento de los datos sísmicos y los métodos de detección automática se analizan en el capítulo

IV. La adaptación y el diseño de un sistema de detección automática para señales sísmicas analógicas son presentados y discutidos en el capítulo V. El capítulo VI contiene discusiones y comentarios.

## CAPITULO II SISMOS Y SEÑALES SISMICAS

### II.1 Parámetros y Ondas Sísmicas

Un sismo es una ruptura o perturbación súbita en el interior de la tierra que da origen a vibraciones o movimientos del suelo liberando una gran cantidad de energía elástica que se propaga en forma de ondas sísmicas. Las ondas generadas por la fuente sísmica consisten de dos tipos principales: ondas internas o de cuerpo que se propagan a través de la tierra, y ondas superficiales que se propagan a lo largo de la superficie terrestre.

Dependiendo de la distancia del lugar en donde se origina el sismo a la estación en la que se observan las ondas sísmicas, un sismo puede clasificarse en tres tipos: local, regional, o telesismo. Los sismos locales corresponden a temblores que ocurren a una distancia menor de 1000 km, y los telesismos son aquellos que ocurren a una distancia mayor que 2000 km. Los sismos dentro de una distancia entre 1000 y 2000 km son considerados sismos regionales.

A continuación se presentan brevemente algunos términos y conceptos básicos de sismología, mucho de los cuales serán utilizados frecuentemente en el presente trabajo. Una exposición más amplia puede encontrarse en cualquier libro básico o manual de sismología ( Richter, 1958; Udías, 1971; Willmore, 1979).

- FOCO o HIPOCENTRO: Lugar de la tierra donde se origina el sismo.
- EPICENTRO: Proyección del foco desde el centro de la tierra sobre la superficie terrestre.
- TIEMPO DE ORIGEN: Momento en que se inicia la ruptura que causa el sismo.
- MAGNITUD: Medida del "tamaño" del sismo (e.g. de Richter), relacionada con la energía de la fuente, y generalmente tiene escala logarítmica.
- INTENSIDAD: Medida de los efectos causados por el sismo en algún punto en particular. La escala más común es la de Mercalli modificada (MM), la cual tiene doce grados; el grado I corresponde a sismos muy pequeños que pueden ser detectados

sólo por instrumentos de alta sensibilidad, mientras que el grado XII corresponde a destrucción total.

- ONDA P: Es una onda de cuerpo compresional o longitudinal. El movimiento de las partículas del medio que atraviesa la onda es en el sentido de propagación, causando compresión y rarefacción. Es la onda más veloz, su velocidad varía entre 6 y 14 km/seg. El periodo de la onda P varía entre 0.1 y 2 segundos.
- ONDA S: Onda de cuerpo transversal o de cizalla (el movimiento de las partículas del medio que atraviesa la onda es perpendicular a la dirección de propagación). Es más lenta que la onda P por un factor cercano a  $\sqrt{3}$ . Su periodo es usualmente dos veces al de la onda P.
- ONDA DE CABEZA o CRITICAMENTE REFRACTADAS: son ondas de cuerpo que han sido críticamente refractadas en una interfase entre dos medios con distintas velocidades. A menudo, para sismos locales o regionales, aparecen al principio ("a la cabeza") del sismograma.
- ONDAS SUPERFICIALES LOVE y RAYLEIGH: ondas que se propagan por la superficie terrestre, generadas por interferencia de ondas S polarizadas horizontalmente (LOVE), o de ondas P y S polarizadas horizontalmente (RAYLEIGH). Sus velocidades van de aproximadamente 2.5 a 4.5 km/seg. para la onda Love y de 1.0 a 4 km/seg. para la onda Rayleigh. Son ondas de periodos largos.
- POLARIDAD: Se refiere a la dirección (hacia arriba o abajo) del movimiento inicial de la onda P o S, registrada en un sismograma. Normalmente corresponde a la dirección del movimiento del suelo.
- SISMOGRAFO: Instrumento que detecta y registra los movimientos del suelo, generalmente con información del tiempo.
- SISMOGRAMA: El registro de los movimientos del suelo obtenido por el sismógrafo.

## II.2 El registro sísmico y sus características

Llamaremos registro sísmico a la señal digital o analógica de las ondas sísmicas, registradas por uno o más sismógrafos. Las señales sísmicas registradas por sismógrafos similares situados a

una misma distancia del foco son bastante parecidas. Algunos factores que puede afectar esa similitud son: (1) la respuesta del instrumento, porque diferentes sismógrafos pueden tener una característica de respuesta muy distinta; (2) la distancia entre el sismógrafo y el hipocentro del sismo; (3) El mecanismo de la fuente sísmica; y (4) la trayectoria de propagación de la onda sísmica. Por lo tanto, estas señales representan la información más o menos filtrada del movimiento del terreno bajo los sensores sísmicos, y también contienen información acerca del terreno local, de la fuente sísmica y del terreno a lo largo de la trayectoria de las ondas. La señal sísmica está compuesta de ondas de cuerpo y superficiales y de fases correspondientes a ondas reflejadas en la superficie de la tierra o en discontinuidades subterráneas. Dos fases principales de la señal sísmica son la fase de la onda P y de la onda S. Además presenta fases correspondientes a ondas transformadas de P a S o viceversa.

El movimiento del suelo causado por un sismo puede ser muy irregular y las ondas sísmicas generadas pueden tener un amplio rango de amplitud y de período. Para sismos locales, digamos localizados a una distancia menor que 500 km, la onda sísmica de período corto entre 0.1 a 1 segundo es la predominante. Para una distancia mayor, las ondas de período largo (entre 1 a 50 segundos o más) son las importantes, ya que las ondas de período corto son filtradas por la tierra. El ruido causado por viento, tráfico, etc, tienen un período predominante de 3 a 9 segundos.

Las señales de ruido generalmente tiene una amplitud baja y una frecuencia moderada, su apariencia puede ser bastante periódica o muy aleatoria. Debido a ruidos instrumentales y a la actividad cultural (tráfico), las señales de ruidos transitorios pueden presentarse a menudo y a veces con una amplitud bastante elevada. Las señales de sismos regionales o telesismos tienen un rango de amplitud muy amplio que puede variar desde muy pequeño, siendo apenas perceptible, hasta un nivel muy grande que satura el instrumento. La primera llegada de estas señales sísmicas es comunmente tardía y emergente. Generalmente la frecuencia predominante de la señal de un telesismo es menor que la de un sismo regional. La señal de un sismo local posee ciertas

características particulares, usualmente tiene una duración total corta, gran contenido de altas frecuencias y una envoltura de la onda que típicamente decrece exponencialmente. Además, el primer arribo (fase P) o el inicio de la llegada es en general impulsivo. La característica global tanto para telesismos, sismos regionales, así como para sismos locales es que la frecuencia de la señal decrece con el tiempo desde su llegada. Por otro lado, una señal transitoria, ruido instrumental o natural (viento, ola de mar) o ruido cultural, normalmente tiene una frecuencia predominante idéntica o similar a la de un sismo. La identificación precisa de las diferentes fases de la señal sísmica requiere de gran habilidad que sólo se adquiere con bastante práctica. La detección de la señal sísmica y sus fases no es trivial, aún para un lectorista de sismogramas con experiencia.

## CAPITULO III DESARROLLO DE UNA ESTACION SIMOLOGICA DIGITAL

### III.1 Instrumentación sismológica

EL instrumento sismológico elemental para detectar y registrar los movimientos de la tierra con información de tiempo es el sismógrafo, el cual consiste usualmente de tres partes: (1) un sismómetro que responde a los movimientos de la tierra y que produce una señal que puede registrarse; (2) un dispositivo que produce marcas de tiempo usualmente cada segundo, minuto y hora. (3) un dispositivo registrador que graba las señales recibidas con la información de tiempo y que produce un registro visual llamado sismograma. En la actualidad, el sismógrafo moderno contiene también un dispositivo electrónico adicional para acondicionar las señales producidas por el sismómetro, tal como filtrar, amplificar y/o digitalizar esas señales.

#### A) Sismómetro

EL sismómetro es un instrumento para detectar el movimiento del suelo que genera una señal que varía de acuerdo con ese movimiento. De tal manera conociendo las características del instrumento se puede medir el desplazamiento real del suelo, calculado directamente de los sismogramas. Existen varios tipos de sismómetros, el sismómetro de componente vertical detecta los movimientos verticales del suelo y el sismómetro horizontal registra una o dos de las direcciones horizontales del movimiento de la tierra. El sismómetro de tres componentes registra las tres direcciones de movimiento. Actualmente los sismómetros han alcanzado un alto grado de sofisticación, pero el principio básico empleado no ha cambiado.

EL principio físico de todos los sismómetros se basa en la propiedad del péndulo o masa suspendida de un bastidor, que al producirse un movimiento del suelo, éste se desplaza con respecto a la masa en virtud de su inercia. Los sismómetros de péndulo consisten esencialmente de una masa inercial suspendida por elementos elásticos dentro de una armadura rígida. Cuando la armadura es alterada por el paso de una onda sísmica, la inercia

de la masa reacciona contra las fuerzas transmitidas a través de la suspensión y tiene lugar un movimiento relativo entre la masa y la armadura. Estos movimientos pueden ser detectados y amplificados por medio de sistemas mecánicos, mecánico-ópticos o electromagnéticos.

Los sismómetros de tipo mecánico o mecánico-óptico como por ejemplo el Wiechert y el Wood-Anderson, son actualmente comunmente utilizados. Debido a la poca amplificación que pueden alcanzar, es difícil de detectar sismos pequeños con este tipo de sismómetros. Su uso ha quedado restringido principalmente para estudios de movimientos fuertes.

Actualmente los sismómetros fabricados generalmente son del tipo electromagnético, porque son de alta amplificación, más sensibles y registran fácilmente. EL principio de este tipo de sismómetro es convertir el movimiento de la masa a una variación de campo magnético, y generar una pequeña corriente eléctrica variable proporcional a la amplitud y al período del movimiento de la masa. Un equipo electrónico puede acondicionar esa pequeña corriente eléctrica variable, y producir la señal deseada para el registro.

Los sismómetros electromagnéticos más usados son de bobina móvil y de reluctancia variable. En el caso de bobina móvil, la masa consiste básicamente de una bobina que se desliza alrededor de un imán permanente. Al moverse la masa, la bobina se mueve a través del flujo magnético del imán generando así una pequeña corriente variable proporcional a la velocidad relativa entre la bobina y el imán. En el caso de reluctancia variable, la masa es ligada a una armadura metálica a una determinada distancia de un imán. El movimiento de la masa cambia el espacio de separación entre el imán y la armadura metálica. Esto genera una variación de la intensidad del flujo magnético y crea una corriente inducida.

Como el ruido del suelo causado por viento, actividad cultural, etc, tiene un período predominante entre 3 a 9 segundos, los instrumentos sísmicos son diseñados generalmente para evitar esos ruidos, así que tenemos sismómetros de período corto (menos de un segundo) y de período largo (más grande que 10 segundos).

Dependiendo del tipo de movimientos al que son sensibles

(desplazamientos, velocidades, aceleraciones) se tienen los tres tipos principales de instrumentos sísmicos. El aparato que mide la aceleración del suelo es el acelerómetro y tiene gran utilidad en la ingeniería sísmica. En la zona cercana del epicentro de un sismo, el movimiento del suelo produce desplazamiento, velocidades y aceleraciones elevadas. La onda sísmica causada por el movimiento tiene un gran contenido de altas frecuencias. Esta zona es de gran interés en ingeniería sísmica, puesto que en ella se producen los mayores daños a las estructuras. EL movimiento en esta región no se puede extrapolar de los registros obtenidos a grandes distancias, por lo tanto es necesario registrarlo directamente con instrumentos adecuados situados cerca del epicentro. El acelerómetro es el aparato indicado, ya que posee baja amplificación para evitar la saturación y una curva plana de sensibilidad en altas frecuencias.

#### **B) Registrador y marca de tiempo**

Los movimientos del suelo, detectados y amplificados por un sismómetro, pueden registrarse por medios mecánicos, ópticos y electrónicos.

Con el método mecánico, el movimiento del péndulo es amplificado por medio de palancas a un estilete fino. El estilete se monta ligeramente sobre un tambor cubierto con un papel ahumado o sobre papel normal cuando el estilete contiene tinta. Cuando el tambor gira lentamente a lo largo de su eje de rotación, el estilete registra las señales de movimiento sobre el papel. Este método da registros o trazas visuales inmediatamente, pero tiene el problema de fricción, también hay que ahumar y enlazar el papel si se graba la señal en un papel ahumado. Debido a las características del sistema mecánico y al tamaño del papel, el rango dinámico es muy limitado y la resolución es, a lo más 1 mm/seg. por día de grabación.

EL método óptico puede resolver el problema de fricción del sistema mecánico ya que se reemplaza el estilete por un rayo óptico. La amplificación puede ser por medios ópticos, ópticos mecánicos u ópticos electrónicos. El registro se realiza sobre papel fotográfico el cual está adaptado a un tambor. Las mayores desventajas de este método es que el registrador tiene que estar

en un cuarto oscuro para evitar el efecto de la luz externa y que los registros no pueden verse inmediatamente.

La resolución del registro puede mejorar considerablemente por medios electrónicos, ya que la señal producida por el sismómetro es acondicionada electrónicamente y grabada en cinta magnética o disco en forma analógica o digital. Este método permite utilizar la computadora para procesar y analizar los datos grabados.

Todos los registros producidos por el sismógrafo tienen que llevar la información o marca precisa del tiempo, ya que esta información es sumamente importante para la determinación de los parámetros sísmicos. Muchos sismógrafos registran la información del tiempo utilizando la señal de radio de WWV o WWVB transmitida por el National Bureau of Standards de los Estados Unidos.

### C) Calibración y rango dinámico del instrumento

La calibración de un sismógrafo consiste básicamente en la determinación de las curvas de respuestas en amplitud y fase en función del período (o frecuencia) del sistema completo. Las curvas de respuesta son necesarias para la determinación de la amplitud de las diferentes componentes del movimiento real del suelo y para la estimación de la magnitud de los temblores.

Existen varios métodos de calibración, los cuales pueden ser divididos en dos clases. En la primera clase, la respuesta integral es calculada a partir de las constantes de los elementos individuales del sistema y en la otra el sistema se considera como una "caja negra" en la cual una entrada que simula el movimiento de la tierra, produce una salida en el registro final.

La respuesta de frecuencia de un sistema sísmico se describe por la amplitud relativa y fase a la cual el sistema responde al movimiento de la tierra como una función de la frecuencia. El rango dinámico es la razón entre la máxima y mínima señal de entrada que el sistema puede medir sin distorsión. En general ambos de estos parámetros son función de la frecuencia y describen el funcionamiento esperado del sistema. Un instrumento sísmico que puede registrar sismos con magnitudes de 0 a 6 requiere un rango dinámico aproximadamente de 120db, ya que estas magnitudes corresponden a una razón de amplitud de  $10^6:1$ . Alcanzar tal rango dinámico es un desafío en el diseño de instrumentación sísmológica.

#### D) La estación sísmica

La estación sísmica consiste de un sismógrafo moderno formado generalmente por un sismómetro de uno o de tres componentes, un circuito electrónico que acondiciona las señales del sismómetro y un dispositivo que registra esas señales junto con la información del tiempo en algunos medios de almacenamiento tal como papel, cinta magnética o disco (Ver figura III.1). Algunas estaciones pueden detectar automáticamente la presencia de la señal sísmica por medio de un circuito electrónico y/o programas que registran sólo las señales. Una estación sísmica puede operar en forma sensora y/o autónoma. En el caso de la estación sensora, la señal amplificada y filtrada por la estación es transmitida a una estación central en donde se realiza el trabajo de grabación. La estación autónoma registra las señales sin transmitir las.

Hay dos tipos de estaciones sísmicas: la analógica y la digital, dependiendo de las señales generadas por la estación. La estación analógica es simple y fácil de controlar, sin embargo, el rango dinámico es muy limitado. Además al telemetrizar la estación analógica, la señal puede ser distorsionada y contaminada fácilmente. La ventaja que tiene la estación digital es que el rango dinámico puede incrementarse y el procesamiento de los datos por computadora es fácil de realizar. La transmisión de señales digitales es mucho más confiable que la de las señales analógicas, aunque la velocidad de transmisión es limitada por el ancho de banda del medio de comunicación.

Una estación sísmica clásica de tipo digital está formada generalmente por uno o tres sensores sísmicos, un preamplificador, un filtro pasa baja o pasa banda, un convertidor analógico a digital, y un sistema de control y de transmisión de datos. Una estación digital con ganancia variable también tiene un amplificador autoajutable por hardware. En México existen dos tipos de estaciones sísmicas digitales. Una es la estación T desarrollada en el Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas (IIMAS) y la otra es la estación que se usa en la Red Sísmica del Norte de Baja California (RESNOR) del Centro de Investigaciones y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). Estas estaciones fueron diseñadas y construidas a fines

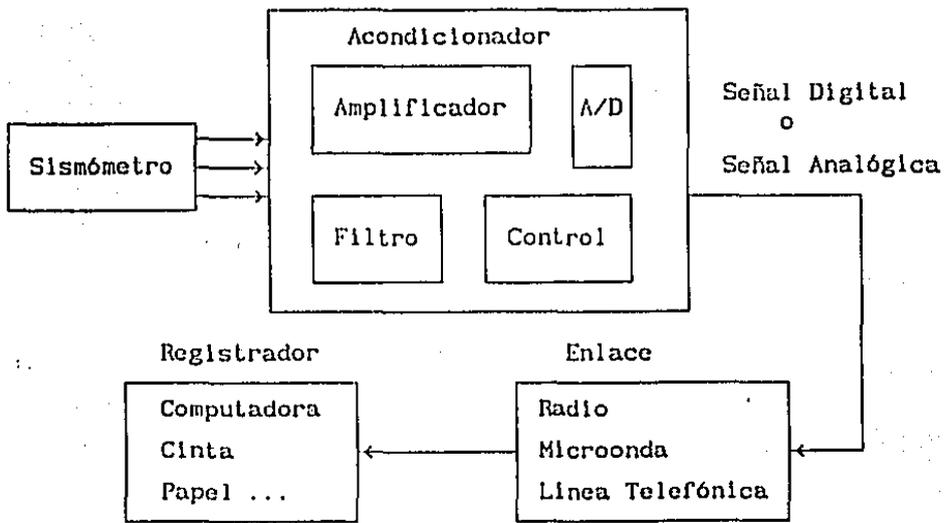


FIG. III.1 ESQUEMA GENERAL DE UNA ESTACION SISMICA

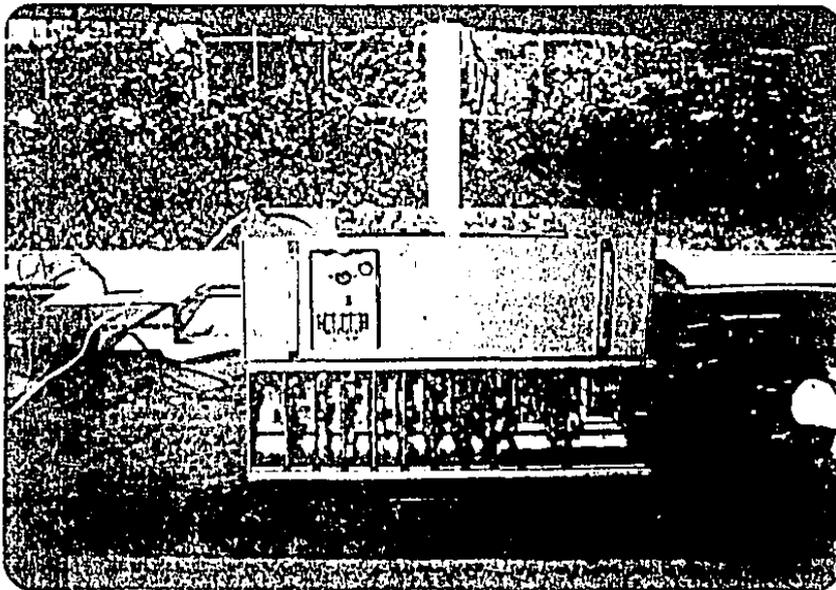


FIG. III.2 LA ESTACION DIGITAL TIPO T

de la década de los setenta con la tecnología de la época, por lo tanto las aplicaciones de estas estaciones son limitadas. La estación digital T (Ver figura III.2) opera con señales provenientes de un sismómetro de período corto y/o tres sismómetros de período largo, y tiene control de ganancia de 4 pasos (x1, x4, x16, x64). Las señales son digitalizadas a una razón de 36 muestras por segundo para las de período corto y de 4 muestras por segundo para las de período largo con una precisión de 12 bits. Los circuitos electrónicos de la estación están distribuidos en 10 tarjetas montadas sobre un chasis tipo rack de aluminio anodizado (Gómez y otros, 1985). La estación de RESNOR incluye tres sismómetros de período corto, tres amplificadores de ganancia seleccionable, un filtro, un convertidor analógico digital de 12 bits, un transmisor de radio en la banda de VHF, un panel solar y un regulador de voltaje (Medina y Duarte, 1983).

Debido a los avances actuales de la electrónica y de la computación, es posible y necesario diseñar una estación sismológica digital moderna, flexible y multi-uso para satisfacer las necesidades que crecen cada día con el desarrollo de las redes sísmicas y de las investigaciones sismológicas.

### III.2 Una nueva estación sismológica digital

#### III.2.1 Descripción general de la estación

La nueva estación sismológica digital, desarrollada en el Instituto de Geofísica de la U N A M, se diseñó con la filosofía de tener un instrumento moderno y flexible con características óptimas para realizar diversos trabajos de sismología haciendo sólo cambios menores en sus componentes internos para un trabajo específico. Con este fin se seleccionó la circuitería más moderna e integrada con el objeto de reducir el tamaño del instrumento y al mismo tiempo tener la flexibilidad deseada en diferentes aplicaciones. El resultado es una estación diseñada en base a un microprocesador el cual proporciona a la estación una gran capacidad de operación y de utilidad, ya que la mayor parte de sus parámetros son controlados por este microprocesador. Con esto, se ofrece la posibilidad de cambiar fácilmente el modo de operación para una tarea dada y el de tener un control inteligente sobre la

estación. Para el diseño y la implementación de esta estación sísmológica digital intervino el grupo de diseño del SSN y el grupo de instrumentación del Instituto de Geofísica (Medina y otros, 1988).

Los circuitos que integran la estación son de tipo moderno y comercial. Esto asegura el fácil mantenimiento de la estación en el futuro. Además facilita el mejoramiento continuo del sistema en materia de circuitos, programación, etc.

La estación utiliza un microprocesador de la familia MCS-51 para controlar el funcionamiento del sistema. Esta familia de microprocesadores está diseñada especialmente para el control del proceso. Es un procesador del tipo booleano, ya que es capaz de manipular directamente y de probar a un bit individualmente, además permite el uso de una variable con un simple bit para realizar las operaciones. También puede trabajar como un procesador de byte, como las mayorías de los microprocesadores. El microprocesador contiene internamente 4 puertos de entrada y salida, 2 contadores de tiempo, un full duplex UART programable, y 128 bytes de RAM interno. El microprocesador 8751H de la misma familia que es totalmente compatible con el 8051, también está integrado a un EPROM internamente de 4K. Estas características nos facilitan tanto el diseño del hardware de la estación como del programa de control de la misma.

Se usa un convertidor de analógico a digital de 13 bits para tener una mayor resolución. La estación usa un filtro pasa-bajas de quinto orden con un punto de corte controlable, ya que el punto de corte del filtro está determinado por un reloj interno o externo. La razón entre la frecuencia de corte y la frecuencia del reloj externo es 100:1. Para tener un mayor rango dinámico y evitar la saturación del equipo, se utiliza un amplificador con ganancia programable (LH0086C). Este amplificador variable tiene 3 bits de control de ganancia y pueden seleccionarse 8 ganancias diferentes. Los códigos de 0 a 7 generados por 3 bits de control, obtienen las ganancias 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200 respectivamente. Esto ofrece que la estación tenga un mejor control sobre el nivel o amplitud de las señales recibidas por el sismómetro y permite que la estación registre sin saturación o

distorsión la señal producida por sismos de diferentes magnitudes. Un CMOS reloj de tiempo real con memoria RAM (CDP6818) es utilizado para controlar la frecuencia de corte del filtro y para programar el tiempo de la estación en el caso de que esta estación opere en forma autónoma. Debido a que este reloj puede generar una señal cuadrada con frecuencia programable, la cual puede ser utilizada como el reloj externo del filtro, la frecuencia de corte puede ser controlada mediante la programación de esta señal cuadrada.

Las características internas de la estación son:

- 1.- Resolución de 13 bits
- 2.- Ganancia variable x1 a x200 autoajustable (controlada por un programa)
- 3.- Rango dinámico de 120 db
- 4.- Transmisión de tipo FSK Mod asíncrono
- 5.- Filtro Butterworth de 5o. orden con punto de corte programable
- 6.- Respuesta de dc a la frecuencia programada de corte en octavas de la frecuencia inicial
- 7.- La estación contiene los elementos para trabajar de modo autónomo (con memoria adicional)
- 8.- Capacidad de operar de uno a tres canales
- 9.- Circuitería de tipo CMOS de bajo consumo de energía.

La estación está contenida básicamente en tres tarjetas de 9x9cm, una contiene la sección analógica y de conversión A/D, la otra contiene el microprocesador con sus circuitos auxiliares de control, la tercera contiene los circuitos reguladores de alimentación y comunicación de la estación. Estos elementos están contenidos en un cilindro hermético de aluminio de 10cm de diámetro por 30cm de alto que puede contener un sismómetro tipo Mark Products o tres acelerómetros del tipo Terra Tech (Ver figura III.3). El enlace de radio se hace por medio de un transmisor FM de 1/2 watt de potencia con antenas direccionales y con ganancia de 12 dbs a una frecuencia de 450 mgz (recomendable). El transmisor que se ha estado usando es de marca Monitrón; estos transmisores han demostrado ser confiables y resistentes a ambientes extremos. Los resultados que se han obtenido, demuestran

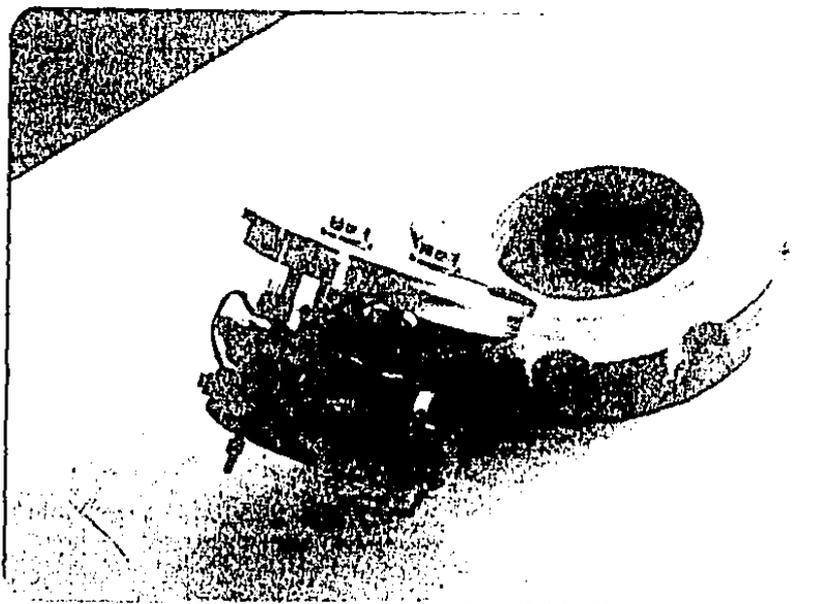
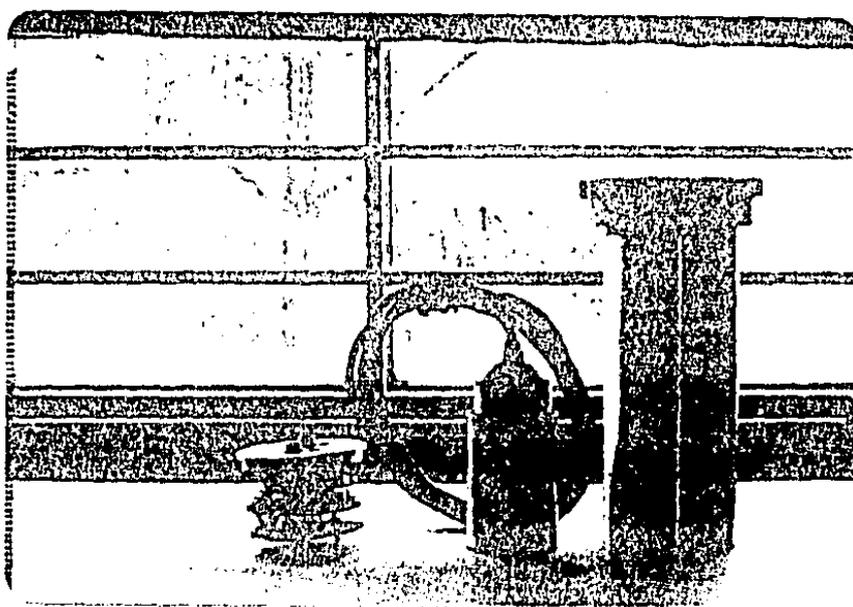


FIG. III.3 LA NUEVA ESTACION DIGITAL

que la nueva estación sísmica digital con estas características es poderosa, compacta, confiable y económica. Es la estación más moderna y avanzada que existe en México, y técnicamente está entre las mejores del mundo.

### III.2.2 EL control y programación de la estación

El funcionamiento y la operación de la estación están determinados directamente por el programa. El microprocesador a través del programa controla la mayoría de los circuitos integrados que forman la estación, tales como el filtro, interruptor, muestreador, convertidor analógico digital y el reloj de tiempo. Para realizar el control sobre la estación, es necesario conocer estos circuitos integrados y por supuesto el microprocesador que es el más importante. A continuación se realiza una amplia descripción al respecto.

#### A) El Micro-8051 y sus registros de control

El Micro-8051 esta separado del espacio direccional de la memoria del dato y del programa y ambos tienen 64Kb. El Micro tiene 128kb de RAM interno más unos registros especiales, 16 bytes de ellos son bits direccionables; 32 bytes (de 0 a 1FH) son de 4 bancos de registro, cada uno contiene 8 registros, de los cuales sólo los registros R0 y R1 son útiles en el modo de direccionamiento indirecto y para acceder la memoria externa. El resto está disponible para el uso del usuario (*Figura III.4*). La selección del banco de registros se puede realizar por programación de los bits RS1 y RS0 y del registro PSW. Los registros especiales incluyen acumulador, registro del puerto, registro de control de interrupción etc., algunos de ellos son bits direccionables (INTEL, Handbook, 1986). El significado de bit direccionable es que permite ejecutar las instrucciones de manipulación de bit directamente sobre los bits del registro.

El Micro tiene dos contadores que contienen dos registros de 16 bits, cada registro está formado por un par de registro de 8 bits ( (TH0,TL0), (TH1,TL1) ). El contador puede trabajar como contador de tiempo (Timer) o de conteo (Counter). En el caso de contador de tiempo, el registro se incrementa uno por cada ciclo de máquina que es 1/12 de la frecuencia del oscilador o del cristal del Micro y en el otro caso se aumenta uno por cada dos ciclos de máquina.

Cuando el contenido de registro del contador son todos igual a uno, o sea llegan a su valor máximo, entonces se vuelve al valor cero, y se genera una interrupción.

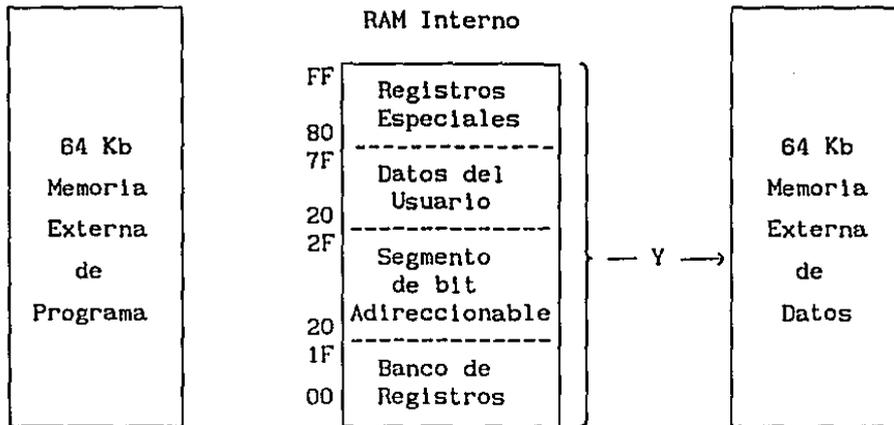


FIG. III.4 Distribución de memoria del Micro 8051

Hay 4 modos de operación para cada contador:

- a) Modo0: En este modo, el registro del contador está configurado como un registro de 13 bits. La frecuencia de la señal de interrupción (TF) está determinada por el valor inicial del registro (VR) y la frecuencia del cristal que se utiliza en el Micro.

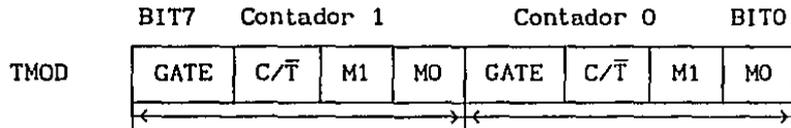
$$TF = \frac{\text{frecuencia del cristal}}{12 \text{ (o } 24) \times (2^n - VR)} \quad (F.1)$$

En este caso,  $n = 13$ , porque el registro del contador es de 13 bits.

- b) Modo1: Es lo mismo que el modo0, excepto que el registro del contador es de 16 bits.
- c) Modo2: En este caso el registro del contador es un registro (TLO o TL1) de 8 bits. Cada vez que TLO (o TL1) llega a su límite (Overflow), se reinicia su valor automáticamente con el valor de TH0 (o TH1) que ya está preestablecido por el programador.
- d) Modo3: El contador 1 en este modo simplemente no trabaja y retiene su estado. El contador 0 usa solamente el registro TLO,

y TH0 es controlado por el contador 1.

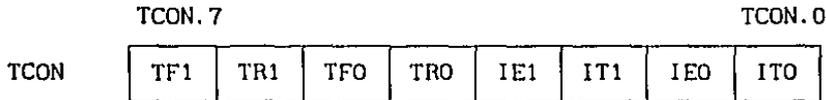
El modo de operación del contador puede seleccionarse programando el registro de control de modo TMOD y la operación del contador es determinada por el registro de control del contador TCON. Las descripción de los registros TMOD y TCON se muestran a continuación:



GATE: 0/1 contador controlado por interno/externo  $\overline{INT0}$  o  $\overline{INT1}$ .

C/ $\bar{T}$ : 0/1 contador de tiempo/conteo.

M1 MO: 00 modo 0; 01 modo 1; 10: modo 2; 11: modo 3



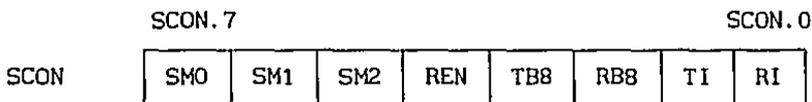
TF1, TFO: La bandera de sobrecarga del contador 0 o contador 1.

TR1, TRO: El bit coloca o limpia (1/0), controla el contador que avanza o se detiene.

IE1, IE0: La bandera de interrupción 1 ó 0.

IT1, IT0: Bit de control de interrupción 1 ó 0.

El Micro tiene un puerto de serie que puede simultáneamente transmitir y recibir datos. El puerto de serie opera en 4 modos, en el modo 1 ó 3, el baudage de transmisión o de recepción puede generarse usando el contador 1. La selección de modo de operación y control del puerto de serie se logra a través de la programación del registro de control del puerto en serie SCON.



TI, RI: Son banderas de transmisión y recepción. Colocar (Set) por hardware, y se tiene que limpiar a través de software.

TB8, RB8: Bit 9 de la transmisión o recepción. Colocar/Limpiar por software.

REN: Colocar/Limpiar (1/0), habilita/deshabilita la recepción.

SM2: Control de comunicación del multiprocesador.

SM0	SM1	MODO	DESCRIPCION	BAUDAGE
0	0	0	Registro de corrimiento	Fosc/12
0	1	1	8 bit UART	Variable
1	0	2	9 bit UART	Fosc/64 o Fosc/32
1	1	3	9 bit UART	Variable

Modo 0: Sólo transmite o recibe 8 bits de datos. El baudage es igual a 1/12 de la frecuencia del oscilador.

Modo 1: Se transmite o se recibe 10 bits: Un bit de comienzo (0), 8 bits de datos y un bit de parada (1). El baudage es variable y se puede calcular por la siguiente fórmula:

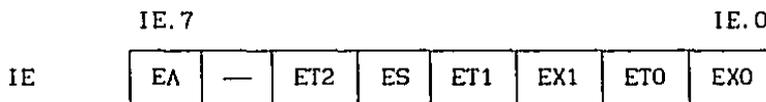
$$\text{Baudage} = 2^{\text{SMOD}} \times \text{TF} / 32 \quad (\text{F.2})$$

donde SMOD es el bit 7 del registro de control de la fuente PCON y TF es la frecuencia de interrupción generada por el contador 1.

Modo 2: Se transmite o se recibe 11 bits: Un bit de comienzo (0), 9 bits de datos y un bit de parada (1). EL bit 9 del dato está en TB8 o RB8 del registro SCON. El baudage es programable a 1/32 o 1/64 de la frecuencia del cristal, dependiendo de que si SMOD es uno o cero.

Modo 3: La transmisión y recepción son 11 bits en total, igual que el modo 2, sólo el baudage es variable como el modo 1.

Para controlar las interrupciones causadas por los contadores o las señales externas, hay que programar el registro de interrupción IE.



EA: Si EA = 0 se deshabilitan todas las interrupciones. Si EA = 1 cada fuente de interrupción se habilita o deshabilita para colocar o limpiar su bit correspondiente.

—: No se usa.

ET2, ET1, ETO: Habilitan o deshabilitan la interrupción del contador 2 (Solo 8052), 1, 0 respectivamente.

EX1, EX0: Habilitan o deshabilitan la interrupción externa 1 y/o 0 respectivamente.

ES: Habilita o deshabilita la interrupción del puerto en serie.

La tabla del vector de dirección de interrupción se muestra abajo:

Fuente de interrupción	Vector de dirección
RESET (RST)	0000H
Interrupción externa ( $\overline{\text{INT0}}$ ) IE0	0003H
Interrupción de contador 0 TFO	000BH
Interrupción externa ( $\overline{\text{INT1}}$ ) IE1	0013H
Interrupción de contador 1 TF1	001BH
Transmisión o recepción RI + TI	002BH

El programa de control de la estación usa el contador 0 para generar la razón de muestreo y el contador 1 para el baudage de transmisión. Para esto se requiere programar adecuadamente a los registros de control de tiempo. En el caso de la estación, si queremos recibir 40 muestras por segundo en cada canal, cada muestra contiene 2 bytes de información, más un byte de identificación, entonces el total de bytes que se necesitan transmitir son 3600 bytes (3 x 40 x 3 (numero de canales)). Como cada byte se transmite en 10 bits ( modo 1: un bit de inicio, 8 bits de dato y un bit de final), el baudage de transmisión y recepción tiene que ser  $360 \times 10 = 3600$  bit/seg. EL proceso de programación para lograr esto se muestra a continuación:

— Usando el contador 1, se calculan los valores requeridos para obtener un baudage de 3600, y usando el contador 0, se establece una frecuencia de interrupción de 40 Hz. Si la frecuencia de cristal del Micro es 12MHz, el contador como contador de tiempo (Timer), SMOD = 0, y n = 16. Usando las formulas (F.1) y (F.2) se puede obtener lo siguiente:

$$\text{VRO} = 2^{16} - \frac{12000000}{12 \times 40} = 40536 = 9E58(\text{Hex})$$

$$\text{VR1} = 2^8 - \frac{12000000}{12 \times 32 \times 3600} \approx 247 = F7(\text{Hex})$$

Donde VRO y VR1 son los valores iniciales que tienen que tomar

los registros de contador 0 y 1. Lo anterior implica que el contador0 está en modo 1 y el contador1 está en modo 2.

— Se asignan los valores a los registros del contador correspondiente; se selecciona los modos para el contador 0 y 1; Se programa el puerto en serie en modo 1, estos son:

TH0 ← 9eH, TLO ← 58H; TH1 ← F7H, TL1 ← F7H.

TMOD ← 00100010; SMOD ← 0; SCON ← 40H

— Se habilita la interrupción del contador 0 y se ponen en marcha los dos contadores:

EA ← 1; ETO ← 1; TRO ← 1; TR1 ← 1.

Para la transmisión y recepción de los datos se usa el registro SBUF. En todos los modos, la transmisión se inicia por cualquier instrucción que use SBUF como un registro de destino. Cuando finaliza la transmisión, TI (bit 1 de registro SCON) es igual a uno. Para continuar la transmisión hay que limpiar el bit TI. La recepción comienza con la condición de que REN (bit 4 de registro SCON) sea igual a uno. En el modo 0 también se necesita que RI (bit 0 de registro SCON) sea igual a cero. Cuando se recibe el dato en el registro SBUF, el bit RI es activado. Es necesario limpiar el bit RI para la siguiente recepción de datos. Un ejemplo de transmisión y recepción de datos se muestra a continuación:

#### - TRANSMISION

```
MOV SBUF, #DATO ; Carga el dato
Espera: JNB TI, Espera ; Espera fin de transmisión
CLR TI ; Prepara futura transmisión
```

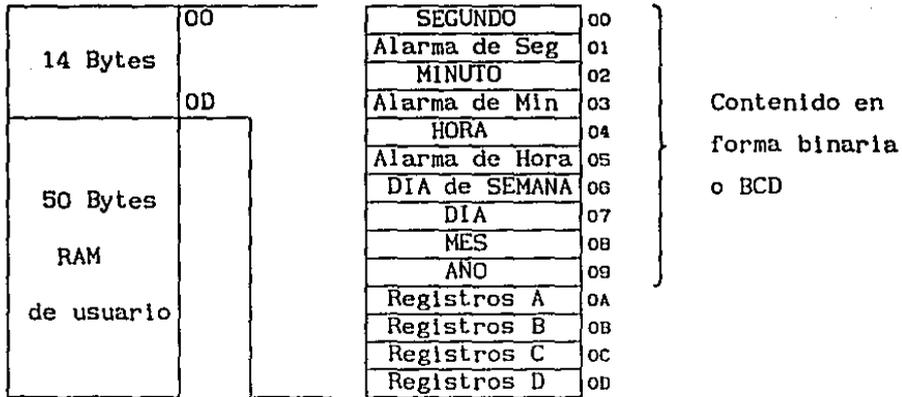
#### - RECEPCION

```
SETB REN ; Habilita la recepción
CLR RI
Espera: JNB RI, Espera ; Espera fin de recepción
MOV A, SBUF ; Recibe el dato
CLR RI ; Prepara futura recepción
```

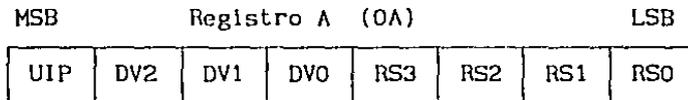
#### B) EL reloj de tiempo real

El reloj de tiempo real con memoria RAM (CDP6818) es utilizado para controlar la frecuencia de corte de los filtros que se utilizan en la estación digital. El reloj tiene 64 bytes de RAM

interno, 50 de ellos son de uso general; 10 bytes para la información y alarma del tiempo, y además tiene 4 registros de control y de estado. El mapa de dirección se muestra a continuación (RCA DATABOOK, 1984):



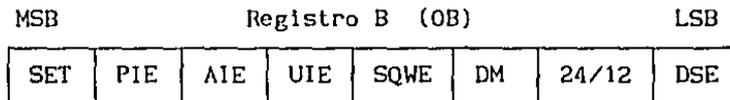
Los registros C y D son de estado y sólo pueden leer. Los registros A y B son de control del reloj.



UIP: Bit de estado, solo puede leer.

DV2, DV1, DVO: Son para seleccionar el tiempo de base del reloj que puede ser 4.194, 1.048, o 32.768MHz.

RS3, RS2, RS1, RS0: Para seleccionar 16 posibles periodos de interrupción y de frecuencia de la salida SQW.



SET, DM, 24/12, DSE: son bits de control de la operación y del formato de la información de tiempo.

PIE, AIE, UIE: son bits de control para habilitar o deshabilitar la interrupción y alarma de segundo.

SQWE: 0/1 habilita/deshabilita la salida de una señal cuadrada con una frecuencia determinada por registro A (R3 - R0).

La frecuencia de corte del filtro puede determinarse por un reloj externo. Como la señal de salida SQW se utiliza como reloj

externo, mediante una programación adecuada se puede generar una señal deseada SQW que controle la frecuencia de corte del filtro. Por ejemplo, si el oscilador que usa el reloj CDP6818 es de 4.194 MHz y se quiere generar una señal de frecuencia de 1KHz, entonces al registro A hay que asignar un valor de 6 y al registro B un valor de 8.

### C) EL convertidor ADC1205

EL convertidor que se usa en la estación es un convertidor analógico digital de 13 bits (12 bits mas un bit que contiene el signo) de resolución. La operación de conversión se comienza con cualquier operación de escritura a la memoria externa (e.g. MOVX @DPTR,A). Cuando se termina la conversión, la salida  $\overline{INT}$  tiene un nivel bajo. Hay dos tipos de operaciones de lectura: leer el dato o leer el estado del convertidor, esto es de acuerdo a que si el nivel de la señal de entrada  $\overline{STATUS}$  es alto o bajo. El valor de conversión está en formato de complemento'2 y su lectura se procesa en dos pasos: la primera lectura es el byte más significativo y la siguiente es el byte de 8 bits menos significativo (NATIONAL, 1984).

Byte más significativo	DB12	DB12	DB12	DB12	DB11	DB10	DB9	DB8
Byte menos significativo	DB7	DB6	DB5	DB4	DB3	DB2	DB1	DB0

EL byte de estado del convertidor se puede leer si  $\overline{STATUS}$  está en nivel bajo. Si bit 6 SARS del dato de estado es uno, esto indica que la conversión está en progreso; el bit 2 BYST 0/1 implica que el siguiente dato que va a leer es el byte más significativo/byte menos significativo; cuando el bit1 EOC es uno, indica el fin de la conversión y el bit0 INT igual a uno, indica que el dato está listo para ser leído. Hay dos métodos para verificar la terminación de la conversión A/D: uno es usar o checar directamente la salida  $\overline{INT}$  y el otro es leer el dato de estado, luego se verifica el bit0. La selección del método está relacionado con la configuración del hardware.

A continuación se muestra el proceso para leer un dato en convertidor A/D, mediante dos pequeños programas escritos en ensamblador 8031 (8051):

#### - Método 1

```

MOV DPTR, #Dir_de_A/D ; Carga la dirección de A/D
MOVX @DPTR, A ; Comienza la conversión
Espera: JB INT_señal, Espera ; Espera fin de conversión
MOVX A, @DPTR ; Lee primer byte
MOV Byte1, A ; más significativo
MOVX A, @DPTR ; Lee segundo byte
MOV Byte0, A ; menos significativo

```

- Método 2

```

MOV DPTR, #Dir_de_Estado ; Carga la dirección de A/D
MOVX @DPTR, A ; Comienza la conversión
Espera: MOVX A, @DPTR ; Lee estado de A/D
JNB A.0, Espera ; Espera fin de conversión
MOV DPTR, #Dir_de_A/D ; Carga la dirección de A/D
MOVX A, @DPTR ; Lee primer byte
MOV Byte1, A ; más significativo
MOVX A, @DPTR ; Lee segundo byte
MOV Byte0, A ; menos significativo

```

D) EL control y funcionamiento de la estación

El esquema general de la estación se muestra en la Figura III.5. Las señales analógicas de uno o tres canales que provienen de un sismómetro de una o tres componentes es amplificada por un preamplificador con ganancia fija y luego pasa por un filtro con un punto de corte programable. El programa controla la selección del canal a través de un interruptor analógico, ajusta automáticamente la ganancia para mantener la señal a un buen nivel, envía los datos digitales a través de UART que está integrado dentro del microprocesador, y transmite los datos modulados por radio. El puerto uno (8 líneas de control) del Micro se usa para controlar los parámetros y algunos circuitos integrados (tres líneas para la selección de los canales; tres líneas para el control de ganancia; una línea para el muestreador; una línea para la verificación del final de la conversión A/D). EL funcionamiento de la estación está controlado por el microprocesador a través de un programa almacenado en la memoria EPROM. El proceso de control para operar la estación como una estación sensora se describe a continuación

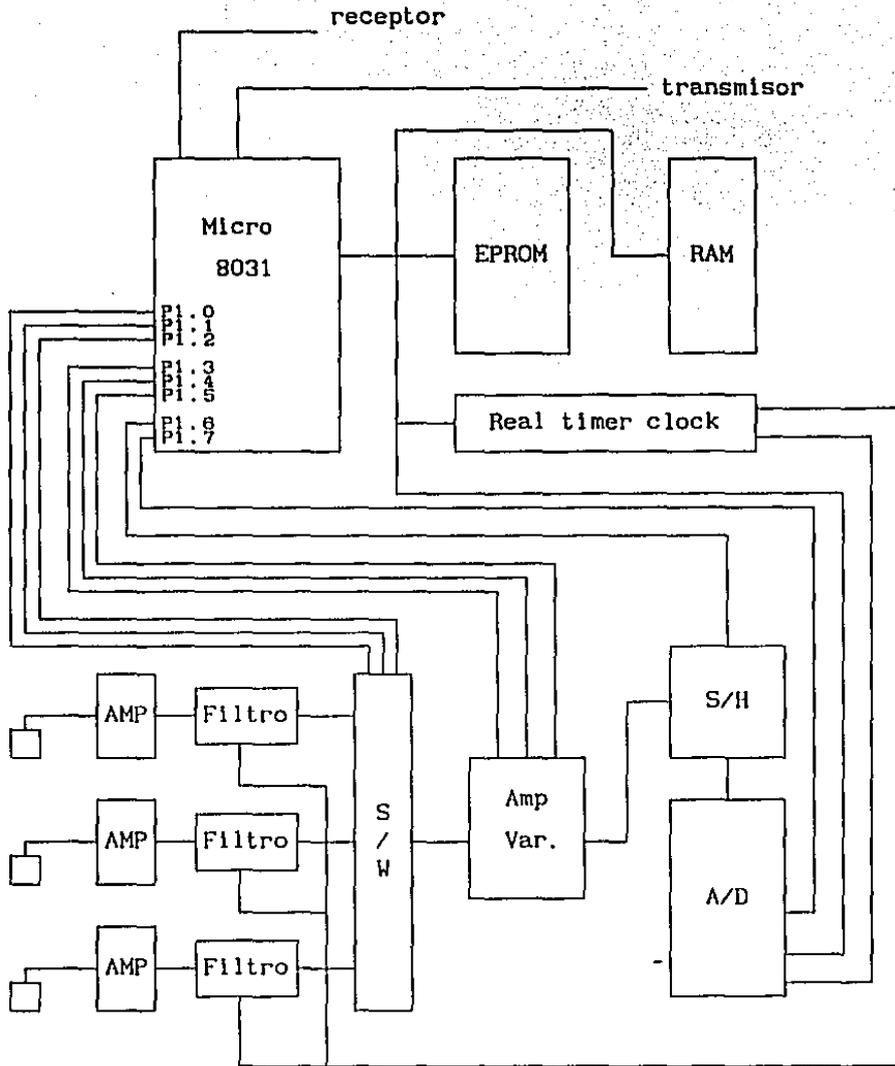


FIG III.5 ESQUEMA GENERAL DE LA ESTACION SISMICA DIGITAL

(Yi y Medina, 1988):

1. Iniciar las variables y parámetros para el uso de control de la estación; programar la razón de muestreo y el baudage de transmisión usando los contadores del microprocesador; programar Real-Timer Clock para fijar el corte del filtro pasa-baja e iniciar el tiempo. Habilitar la interrupción del contador 0 para el uso de muestreo de la señal de entrada.

2. Cuando el microprocesador genera una interrupción, de acuerdo al tiempo de muestreo programado inicial, el programa de servicio de interrupción controla el interruptor para seleccionar los canales y tomar el dato del canal seleccionado. A partir del dato leído desde el convertidor analógico digital, el programa controla el amplificador variable para dar una ganancia adecuada a la señal de entrada, y para mantener la señal recibida dentro de un rango de nivel preestablecido. Esto se logra mediante el siguiente procedimiento de control:

- Mientras que la señal sea mayor que un nivel máximo permitido y la ganancia controlada no sea mínima, la ganancia disminuye hasta que la señal de salida de amplificador variable tenga un nivel adecuado.
- Si la señal de entrada es menor que un nivel mínimo preestablecido durante un cierto periodo, se aumenta un paso más de la ganancia actual, al menos que la ganancia ya sea máxima.

3. Ordenar los datos con un formato preestablecido y controlar la transmisión de datos.

#### E) El circuito auxiliar

En parte, se desarrolló un circuito auxiliar con el mismo microprocesador cuyo finalidad es la de convertir la señal digital recibida de la estación a la señal analógica, pudiendose de esta manera ser grabada en tambores sismológicos. Este circuito es muy útil para verificar el funcionamiento operacional de la estación digital y para obtener registros en papel de las señales producidas por la estación. EL diagrama de bloque de este circuito se muestra en la Figura III.6.

El convertidor DAC1230 que usa el circuito auxiliar es un convertidor de 12 bits. Una característica importante de este

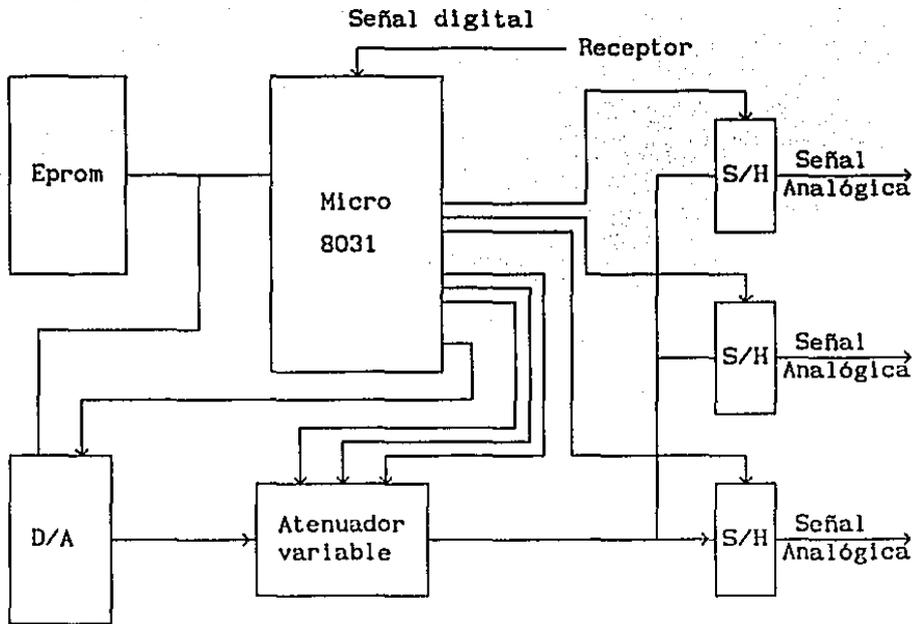


FIG. III.6 DIAGRAMA DE BLOQUE DEL CIRCUITO AUXILIAR

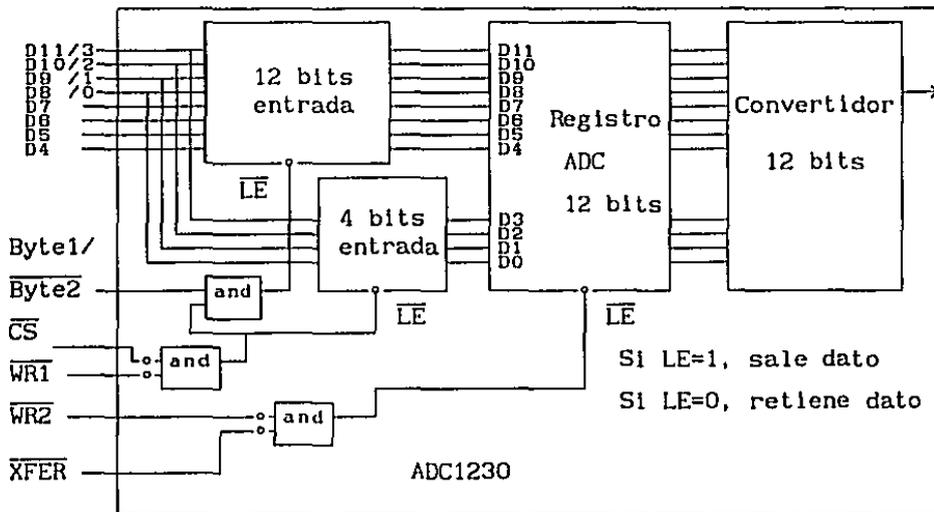


FIG. III.7 DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO DEL ADC1230

convertidor es que tiene dos registros internos asociados con alguna línea de control para la entrada del dato. La conversión se realiza sólo cuando las dos señales  $\overline{XFER}$  y  $\overline{WR2}$  están en nivel bajo (Ver figura.III.7). Eso permite que el Micro pueda mandar dos bytes los cuales forman un dato de 12 bits por el mismo bus de datos e implica que el Micro sólo necesite usar 8 en lugar de 12 líneas para mandar el dato y tener un mejor control sobre la conversión. Como la señal digital producida por la estación es de 13 bits, y el circuito de recepción sólo tiene una resolución de 12 bits por la razón de convertidor D/A, el programa de control del circuito ignora el bit menos significativo.

El programa de control de circuito auxiliar escrito en lenguaje de ensamblador 8051 se muestra a continuación:

```

XFER   =   P1.3           ; Control de la conversión D/A
TIMER  =   20h           ; para contador 1

;      Programa principal

      ORG   0000h         ; RESET vector
      LJMP Inicio

;
Inicio: MOV   TH1, #0F7H   ; Razón de muestreo
        MOV   TL1, #0F7H   ; 3600/seg.
        MOV   TMOD, #TIMER ; Contador1 en modo 2
        ORL   PCON, #00     ; SMOD = 0
        MOV   SCON, #40     ; UART modo 1 (8 bits)
        CLR   EA           ; Desabilita interruptor
        MOV   P1, #08      ;
        SETB  TR1          ; Enciende contador 1
        SETB  REN          ; Activa recepción
Lee:    MOV   RO, #Dir_de_canal ; Dirección de canal
        MOV   R1, #Dir__de_dato ; Dirección de dato
        MOV   Flag, #00     ; Bandera de identificación
Busca:  MOV   R2, #00       ; # de byte de identif.
        MOV   R3, #03       ; # de canal
Espera: JNB   RI, Espera    ; Espera fin de recepción

```

```

MOV    A,  SBUF                ; Recibe el dato
CLR    RI                      ; Para futura recepción
JB     Flag.0, datos           ; flag = 1 lee los datos
CJNE   A, #01, Busca          ;
INC    R2                      ; cuenta # de identificación
DJNZ   R3, Espera
CJNE   R2, #03, Busca
SETB   Flag.0
SJMP   Espera
dato:  MOV   @R1, A              ; Guarda el dato
INC    R1
CJNE   R1, #Dir_de_dato+6, Espera
MOV    R1, #Dir_de_dato        ;
MOV    R2, #03                 ;
For3:  MOV    A, #0EO
ANL    A, @R1                  ; A = G2G1G000000
RR     A                       ; A = 0G2G1G00000
ACALL  Canal                   ; Meter número de canal
MOV    @RO, A                  ; Guarda ganacia y # canal
MOV    A, #1F                  ; Ordenar 1er. byte
ANL    A, @R1                  ; A = 000B12B11B10B9B9
RR     A                       ; A = B9000B12B11B10B9
MOV    @R1, A
INC    R1
MOV    A, #0EO                 ; saca 3 bits de 2do. byte
ANL    A, @R1                  ; meter al 1er byte
RR     A                       ; A = 0B7B6B50000
DEC    R1
ORL    A, @R1                  ; OR con 1er. byte
MOV    @R1, A                  ; B9B7B6B5B12B11B10B9
INC    R1
MOV    A, #1E                  ; Ordenar 2do byte
ANL    A, @R1                  ; A = 000B4B3B2B10
RR     A                       ; A = 0000B4B3B2B1
MOV    @R1, A                  ; ignora B0
INC    RO                      ; al siguiente canal
INC    R1

```

```

        DJNZ R2, For3
        MOV  R0, #Dir_de_canal      ;
        MOV  R1, #Dir__de_dato     ;
        MOV  R2, #03
Do:     ACALL Envía                 ; Envía los datos
        INC  R0
        INC  R1
        DJNZ R2, Do
        SJMP Lee

; Subrutina para meter el número de canal y la ganancia
Canal: CJNE R2, #01, Dos
        ORL  A, #0C                 ; A = 0G2G1G01100
        RET
Dos:    CJNE R2, #02, Tres
        ORL  A, #0A                 ; A = 0G2G1G01010
        RET
Tres:   ORL  A, #09                 ; A = 0G2G1G01001
        RET

; Subrutina para enviar dato
Envía: MOV  DPTR, #Dir_D_A         ; Carga la dirección de D/A
        MOV  A, @R1                ; Byte más significativo
        CPL  ACC.3                 ; ordenar el dato
        MOVX @DPTR, A              ; Manda 1er. byte
        INC  R1
        INC  DPTR
        MOV  A, @R1                ; Byte menos significativo
        MOVX @DPTR, A              ; manda 2do. byte
        ANL  P1, #0F8              ; Retiene el valor en S/H
        CLR  XFER                  ; Haz la conversión D/A
        SETB XFER
        MOV  P1, @R0               ; Controla la atenuación
        RET                         ; y el canal

```

Algunos sismogramas obtenidos por la estación digital usando el circuito auxiliar pueden verse en la Figura III.8.

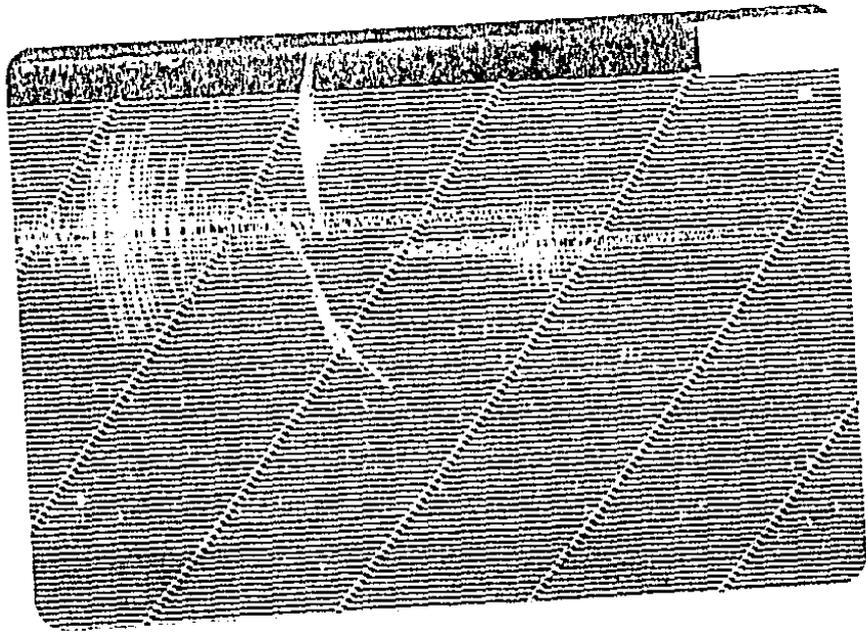
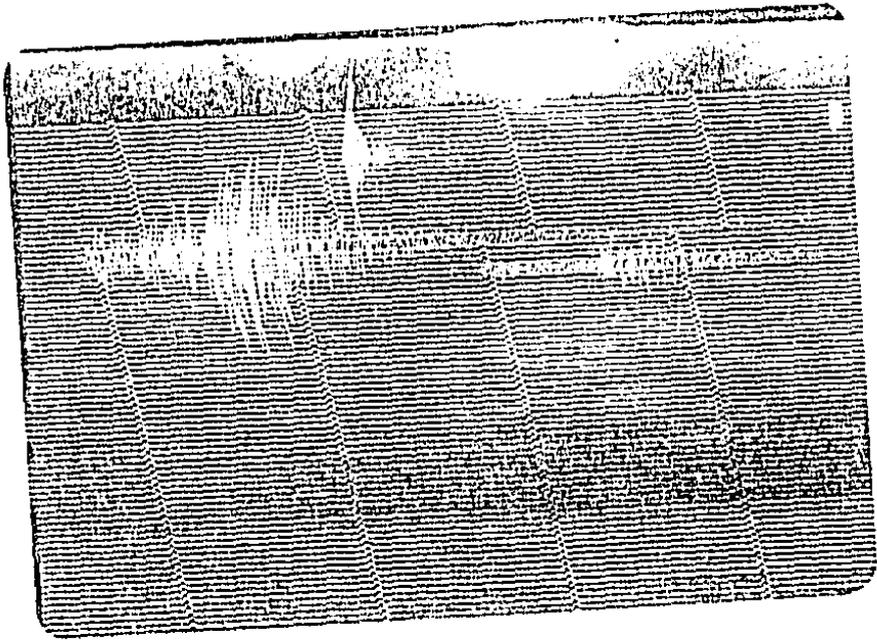


FIG. III.8 SISMOGRAMAS OBTENIDOS POR LA NUEVA ESTACION DIGITAL

## CAPITULO IV EL SISTEMA DE PROCESAMIENTO DE DATOS SISMICOS

### IV.1 Descripción General del Procesamiento de Eventos Sísmicos

Las tareas principales de una red sismológica son el detectar y procesar las señales sísmicas. Debido a la gran cantidad de datos producidos por una red sísmica, se requiere de un sistema planeado cuidadosamente y de métodos modernos para su procesamiento. Los datos asociados a una red se pueden clasificar en varios niveles (Lee, 1981):

- Nivel 0: Datos sobre la localización, características y funcionamiento de la estación.
- Nivel 1: Datos registrados continuamente desde que salen de la estación sísmica.
- Nivel 2: Datos sísmicos registrados.
- Nivel 3: Datos de las fases sísmicas, tales como tiempos de arribo de P y S, máxima amplitud, dirección del primer movimiento de la fase P, duración del evento, etc.
- Nivel 4: Boletín sísmico que contiene tiempo de origen, epicentro, profundidad, magnitud, etc.
- Nivel 5: Artículos y reportes científicos que describen la sismicidad, mecanismo focal, etc.

El procesamiento de datos de una red se refiere básicamente a dos aspectos, uno es la detección del evento que consiste simplemente en registrar y detectar la presencia de la señal (nivel 1,2); y el otro es el procesamiento del evento que consiste en determinar sus parámetros sísmicos (nivel 3,4). Los parámetros son determinados a partir de los datos de las fases sísmicas (nivel 3). Una medida precisa de estos datos es sustancialmente importante para calcular el tiempo de origen, hipocentro y magnitud, así como para deducir el mecanismo focal y para otras aplicaciones científicas. Tres métodos usuales de procesamiento son el método visual, el automático y el iterativo.

El método tradicional es el método visual, el cual consiste en analizar visualmente la traza del registro sobre papel, película, o pantalla, y en determinar la presencia de la señal sísmica y los

parámetros asociados a ella. Los resultados de este método dependen fuertemente de la capacidad y experiencia del lectorista. Un buen lectorista generalmente puede distinguir fácilmente entre evento y ruido, y determinar los parámetros deseados con una precisión razonable, incluso para algunos casos difíciles de identificar. Sin embargo, este método puede ser muy tardado cuando los registros por analizar son numerosos, además los diferentes criterios utilizados por diferentes lectoristas pueden proporcionar resultados distintos. Si las trazas sísmicas son registradas sólo en papel o en película, algunas fases tales como la polaridad de la fase P, y los arribos de P y S, son difíciles de obtener. Esto es debido a la limitación del rango dinámico y a la limitación de la velocidad del medio de almacenamiento.

Con excepción de alguna situación especial como por ejemplo las réplicas de un evento fuerte, la mayoría de las señales recibidas por una red no son señales sísmicas. Para evitar registrar innecesariamente las señales no sísmicas y con el propósito de reducir el tiempo de procesamiento, se han desarrollado varios sistemas de detección automática implementados con hardware y/o software. En el método automático, la señal sísmica es detectada y procesada automáticamente, incluso la determinación de algunos parámetros de las fases y la localización del evento. A pesar de que con el método automático es difícil procesar correctamente todo tipo de señales recibidas por una red, principalmente debido a la forma tan variada y compleja que poseen esas señales (tales como distinguir entre la señal sísmica y la señal de tránsito no sísmica y el determinar con precisión los arribos sísmicos), este método puede liberar mucho el trabajo tedioso para los lectoristas. Con este método es posible obtener una localización preliminar rápida de los eventos sísmicos y procesar una gran cantidad de datos.

El método iterativo combina los dos métodos, el visual y el automático para obtener una mejor eficiencia. La detección del evento se hace generalmente en forma automática y en tiempo real; el procesamiento del evento detectado se hace manualmente o semiautomáticamente. Si la señal sísmica puede digitalizarse y

almacenarse en la computadora, mediante un programa, el analista puede fácilmente y cómodamente, visualizar la señal graficada en la pantalla y determinar los parámetros sísmicos de interés. Se localiza el epicentro y se calcula la magnitud, también se pueden corregir los errores de detección y/o localización de los eventos grabados.

Debido a los avances rápidos en el campo de la computación y de la electrónica, el sistema de procesamiento automático está progresando, y realiza cada día más los trabajos rutinarios de procesamiento que antes eran ejecutados por analistas.

#### IV.2 El problema de localización

La localización del hipocentro y el tiempo de origen de los eventos detectados es el trabajo fundamental y rutinario de una red sísmica. El problema de localización se refiere a determinar el tiempo de origen  $t_0$  y el hipocentro  $(x, y, z)$  de un evento sísmico usando en conjunto los tiempos de arribo obtenidos por las estaciones de la red. Este problema ha sido estudiado intensamente en la sismología.

La determinación rápida del epicentro de un sismo dado es muy importante y útil en muchos casos prácticos. Debido a que muchos sismos tienen una profundidad somera, a menudo sólo unos cuantos kilómetros abajo de la superficie terrestre, el hipocentro es prácticamente igual al epicentro. La manera más simple de localizar un sismo es mediante el conocimiento de los tiempos de llegada de las señales sísmicas. Generalmente la estación que registra primero es la que se encuentra más cercana a la fuente del sismo, si el tiempo de arribo de P y S están disponibles, se puede usar el intervalo de S - P para estimar la distancia epicentral D aproximada entre el epicentro y la estación:

$$D = \frac{V_p \times V_s}{(V_p - V_s)} \times (T_s - T_p)$$

donde  $V_p$ ,  $V_s$  son las velocidades y  $T_p$ ,  $T_s$  son los tiempos de llegada de la onda P y S respectivamente. Como la velocidad típica de la onda P es aproximadamente 8 km/seg y  $V_p = \sqrt{3} \times V_s$ , la distancia D en kilómetros es aproximadamente 8 veces el intervalo

de tiempo  $T_p - T_s$  en segundos. Cuando hay tres o más datos de distancia  $D$ , el epicentro real puede estar dentro de la región situada en la intersección de los círculos formados con la estación como centro y la distancia  $D$  como radio. Para localizar un sismo que se encuentre a una gran distancia de la estación, normalmente se usa una gráfica o tabla estandar de los tiempos de llegada de las fases sísmicas para estimar el epicentro.

La determinación precisa del tiempo de origen y el hipocentro de un sismo, en la actualidad se calcula comúnmente por computadora. La formulación matemática del problema de localización fue establecido por L. Geiger en 1911 y es conocido como el método de Geiger y se describe a continuación.

Para cualquier evento ocurrido en el lugar  $(x, y, z)$  con tiempo de origen  $t_0$  y  $m$  observaciones de tiempos de llegadas  $t_i$  en estaciones con coordenadas  $(x_i, y_i, z_i)$ , podemos calcular el tiempo de recorrido teórico de las ondas desde el foco a cada estación. Con este fin se usan tablas o algún modelo conocido de la distribución de la velocidad con la profundidad. El tiempo de llegada teórico es  $T_i(x_i, y_i, z_i)$ . El error o residual entre el tiempo observado y el teórico para cada estación  $i$  es:

$$e_i = t_i - T_i(x_i, y_i, z_i) - t_0 \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, m;$$

el problema consiste en encontrar el vector  $(x, y, z)$ , de tal manera que el residual sea mínimo en el sentido del método de mínimos cuadrados. Esto es que el error cuadrático total  $E$  sea mínimo:

$$E = \sum e_i^2 = \sum (t_i - T_i(x, y, z) - t_0)^2 \quad (1)$$

Como el tiempo de viaje de la onda sísmica que se propaga dentro de la tierra es generalmente una función no-lineal con coordenadas espaciales, el problema de localización es un problema de optimización no-lineal. En realidad el método de Geiger consiste en usar el proceso iterativo de Gauss-Newton para la optimización no-lineal. El sistema de ecuaciones que se necesita resolver es:

$$\begin{bmatrix} m & \sum a_i & \sum b_i & \sum c_i \\ \sum a_i & \sum a_i & \sum a_i b_i & \sum a_i c_i \\ \sum a_i & \sum a_i b_i & \sum b_i & \sum b_i c_i \\ \sum a_i & \sum a_i c_i & \sum b_i & \sum c_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dt \\ dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum e_i \\ \sum a_i e_i \\ \sum a_i e_i \\ \sum a_i e_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

Donde la sumatoria  $\sum$  es para  $i = 1, 2, \dots, m$  y

$$a_i = \partial T_i / \partial x, \quad b_i = \partial T_i / \partial y, \quad c_i = \partial T_i / \partial z,$$

Dado un conjunto de tiempos de arribos de P y/o S, se calcula el tiempo de llegadas teóricas de esos arribos y las derivadas parciales para un vector de prueba  $X=(t,x,y,z)$ . El problema consiste en encontrar un vector de ajuste  $\delta X = (dt,dx,dy,dz)$  que resuelva la ecuación (2). Entonces se reemplaza el vector  $X$  por  $X + \delta X$ , y se repite el proceso hasta satisfacer algunos criterios de terminación preestablecidos.

Existen varios algoritmos computacionales para resolver el problema de localización, entre ellos se debe mencionar por su extendido uso, el algoritmo desarrollado por W.H.K. Lee y J.C. Lahr en 1971, bajo el nombre genérico de HYPO. Este es un programa de localización para eventos sísmicos locales y existen varias versiones (Lee, W. and J. Lahr, 1972).

En el método de Geiger, no se especifican tiempos de arribos particulares, normalmente sólo se utiliza el tiempo del primer arribo P para la localización, debido a que el arribo P es relativamente fácil de detectar y de identificar en un sismograma. Además la distribución de la velocidad de la onda P dentro de la estructura de la tierra es mejor conocida que para otras ondas sísmicas. Sin embargo, es deseable tener otros tiempos de arribo, principalmente el de la fase S para lograr un mejor resultado en la localización. Si se pueden detectar e identificar algunas otras fases sísmicas como S o Pn, se pueden establecer algunas ecuaciones adicionales, las cuales ayudan a la solución numérica de la ecuación (2). Además si el tiempo absoluto no está disponible o no es con fiable, se puede usar el intervalo de tiempo

$T_s - T_p$  para calcular el hipocentro, ya que el intervalo de tiempo  $T_s - T_p$  no depende del tiempo de origen.

El proceso de localización incluye varios parámetros y la calidad del resultado de la localización depende de muchos factores. Las lecturas precisas de los tiempos de arribos tales como  $T_p$  y  $T_s$ , así como el modelo que describe la estructura de la tierra dentro de la cobertura de la red, son factores principales que afectan la precisión de la localización de los eventos sísmicos. La distribución de las estaciones de la red y el algoritmo que se emplea para resolver el problema de localización son factores también importantes que afectan la calidad de los resultados.

#### IV.3 EL problema de detección automática

El problema de detección automática consiste principalmente en dos partes:

(1) La detección del evento sísmico

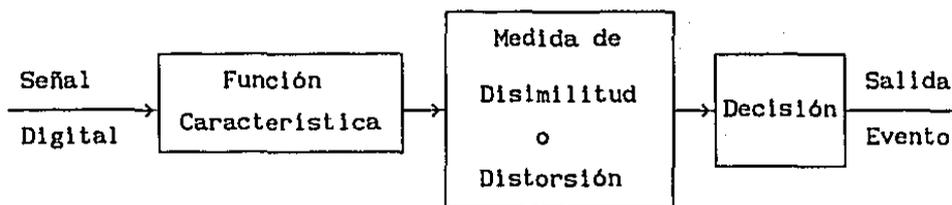
La detección automática de la presencia y duración de un evento sísmico en tiempo real con un mínimo posible de omisiones y de falsas alarmas.

(2) La medida de los tiempos de arribos

La medida automática de los tiempos de arribos de las fases sísmicas P y/o S, así como la determinación de la coda o duración del evento y de otros parámetros con una precisión aceptable para la localización del epicentro, la estimación de su magnitud, etc.

Han sido desarrollados varios algoritmos de detección automática. Estos algoritmos consisten en la detección del evento y/o la medición de arribos, algunos de ellos han sido implementados para monitorear redes sísmicas locales. Las diferencias entre el algoritmo de detección del evento y el de medida de los tiempos de arribos son principalmente en la precisión requerida para determinar los tiempos de arribo detectados y en el tiempo de consumo de las operaciones. El algoritmo para determinar los tiempos de arribo necesita una precisión usualmente no menos de un décimo de segundo para su uso en la localización y en otros estudios. Por esta razón, este tipo de algoritmos es más complicado que el algoritmo de detección del

evento y requiere más tiempo de operaciones. A pesar de estas diferencias, los procesos generales para la detección automática son muy similares y se pueden representar en la forma siguiente:



Se usa una función característica (FC) para extraer o enfatizar las características más importantes de la señal de entrada, tales como amplitud, frecuencia, etc. En base a esta FC se establece una medida de disimilitud o distorsión (MD) que cuantifica la diferencia entre la señal actual y la señal pasada, con esto se determina la presencia y la terminación de un evento sísmico. Algunas medidas adicionales se requieren para confirmar que el evento detectado es un sismo y para encontrar los parámetros sísmicos de interés durante el proceso de decisión (Allen, 1982).

Debido a las formas tan variadas que pueden tener tanto la señal como el ruido, la detección automática se enfrenta a varios problemas:

**(1) La falsa alarma**

Algunos ruidos y picos generados por tránsito, explosión local, la línea de transmisión, etc, pueden causar una falsa detección que a veces puede ocasionar la saturación de los medios de almacenamiento de la información.

**(2) La omisión**

Si los requerimientos para distinguir entre presencia de la señal sísmica y el ruido son demasiado rigurosos o inadecuados, o la señal recibida es muy ruidosa, la señal sísmica puede no ser detectada. Se pierde la información cuya adquisición es la finalidad principal de cualquier red sísmica.

**(3) Asociación de Evento**

Como dos sismos en diferentes lugares pueden ocurrir dentro

de un pequeño intervalo de tiempo, los arribos detectados podrían ser no asociados con el evento adecuado.

El algoritmo de detección necesita tener una alta sensibilidad ante un arribo sísmico para evitar la omisión, pero esto puede producir que también sea muy sensible al ruido, especialmente a algunos ruidos que tengan características similares a las del sismo. Para disminuir las falsas alarmas, el algoritmo de detección debe realizar algunas verificaciones después de declarar un arribo para confirmar que la decisión sea correcta. Usando algunos criterios de chequeo se puede, relativamente fácil, reconocer algunos ruidos transitorios si sus duraciones son cortas o si sólo hay uno o dos canales que tengan esos ruidos dentro de un pequeño intervalo de tiempo. Sin embargo un chequeo demasiado estricto puede causar la pérdida de eventos sísmicos verdaderos. Después de detectarse un evento sísmico, se necesita decidir su duración. Su detección precisa es importante para calcular la coda del evento la cual sirve para estimar la magnitud. EL problema de asociación del evento es un poco complicado. Para una red local, un evento sísmico es considerado válido si hay una cantidad mínima (generalmente 3) de estaciones que declaren un arribo sísmico dentro de un intervalo de tiempo o ventana. El intervalo de tiempo puede estimarse en base a la distribución de las estaciones en la red y a la estructura de la velocidad de P debajo de la red. La ventana puede ser el tiempo máximo de propagación de la onda P al atravesar la red. Como las lecturas de los tiempos de arribos sísmicos pueden tener ciertos errores, es necesario evaluar la calidad de estas lecturas de alguna manera. Tales informaciones son sumamente importantes para la localización del sismo. En general, la confiabilidad de un sistema de detección automática depende fuertemente del algoritmo de detección y de los criterios de confirmación que se usan.

#### IV.4 El método de detección automática

##### (1) El método de promedio corto vs. promedio largo

Este es el método más común para detectar la aparición de la señal sísmica en un registro. Este método consiste en comparar los valores del promedio corto y del largo. Estos promedios se

obtienen de la función característica (FC), la cual es una transformación de la señal de entrada, y está diseñada para enfatizar algunas características de la señal sísmica. El método puede representarse en la forma siguiente:

$$C(t) = t_1^{-1} \int_{t-t_1}^t |FC(t)|$$

$$L(t) = t_2^{-1} \int_{t-t_2}^t |FC(t)| \quad t_2 \gg t_1$$

El promedio largo  $L(t)$  representa el nivel de referencia que es el nivel del ruido ambiente. El promedio corto  $C(t)$  refleja el arribo de la señal. Un evento es detectado si  $C(t)/L(t) > \text{THR}$  donde el umbral  $\text{THR}$  es usualmente una constante, aunque puede ser una función que depende debilmente de  $L$  (Michael y otros, 1982).

Existen algunas variaciones de este método dependiendo de la función característica y el criterio usado.

a) El método directo

Este método usa como función característica el valor absoluto ( $CF(i) = |S(i)|$ ) o el cuadrado ( $CF(i) = S(i)^2$ ) de la señal de entrada  $S(i)$ . Algunas verificaciones se realizan tras el disparo para disminuir la falsa alarma. Este método es sencillo y rápido, pero no puede detectar con exactitud el tiempo de arribo de la fase sísmica como P o S. Generalmente el método se usa para la detección del evento o para medir el tiempo exacto de arribo.

b) El método de Allen

Allen (1978) propuso una función característica (CF) que es sensible a las variaciones de amplitud de la señal y a sus primeras derivadas:

$$CF(i) = R(i)^2 + C_2 \times (S(i) - S(i-1))^2$$

$$\text{y} \quad R(i) = C_1 \times R(i-1) + (S(i) - S(i-1))$$

donde  $C_1$  y  $C_2$  son constantes de peso que varía dependiendo de la razón de muestreo y de la característica de ruido de la estación. El promedio largo  $L$  y corto  $C$  de  $CF$  se calculan mediante un filtro pasa-baja recursivo:

$$C(i) = C(i-1) + C_3 \times (CF(i) - C(i-1))$$

$$L(i) = L(i-1) + C_4 \times ( CF(i) - L(i-1) )$$

donde  $C_3$  y  $C_4$  son constantes cuyo valor está entre 0 y 1. Allen uso la medida de frecuencia y la forma de la coda de la señal detectada para verificar la validez de la detección. El peso de calidad para el tiempo del primer arribo de P detectado está relacionado con el nivel de ruido y la amplitud de la señal. La determinación de la duración del evento está basada en el numero consecutivo de que el promedio corto  $C(i)$  sea menor que un nivel de terminación. El método de Allen ha sido utilizado para el monitoreo de una red local del USGS (U. S. Geological Survey Calnet System) dando resultados razonables.

c) El método "ASP"

El método fue utilizado por McEvelly y Majer (1982) en la operación de redes portátiles ASP (Automated Seismic Processor) para monitoreo de sismos locales. Trabaja en base a promedio cortos y largos de una función característica  $CF(i)$  obtenida de la señal original de entrada  $X(i)$  como:

$$CF(i) = \sum | X(i) | / n \quad (n=16 \text{ o } 32 \text{ muestras})$$

El promedio corto C se obtiene de 16 muestras; y el largo L de 4096 muestras ( la razón de muestreo utilizada por McEvelly y Majer es de 100/sec ).

Una característica interesante de este método es que utiliza dos umbrales; el algoritmo se "dispara" (i.e. detecta la presencia de la señal sísmica) si  $C > L \times THR1$ , donde  $THR1$  es un umbral que se puede fijar bastante alto para evitar falsas alarmas. Como el tiempo real de arribo es usualmente anterior al de disparo, el algoritmo se regresa buscando el punto donde  $C > L \times THR2$ , donde  $THR2$  es un umbral que se fija lo suficientemente bajo para poder distinguir un cambio del nivel de ruido.

Otra característica interesante del método ASP es que realiza la detección de la onda S y toma en cuenta que las condiciones para la detección, en general, son distintas que para la onda P. Para la detección de S , L se calcula promediando los 64 puntos de  $X(i)$  posteriores al arribo de P. Tras el disparo, cuando  $C > L \times THR3$ , el arribo de S se situa donde una recta, ajustada a la señal inmediatamente antes del punto de disparo, intersecta el nivel  $L \times THR4$ ; donde  $THR3$  y  $THR4$  son valores de umbral especiales

para S. Como muchos arribos de S no son claramente marcados por sus cambios grandes de amplitud, la detección de la fase S por este método puede ser no tan consistente y confiable como la detección de la fase P.

### (2) EL método de Anderson

Anderson (1977) desarrollo un método que representa la señal de entrada en una serie de segmentos "blips". Cada segmento es un intervalo entre dos cruces consecutivos del nivel cero. La CF es la máxima amplitud de la señal de entrada en cada segmento. El promedio del nivel de ruido L se calcula por la siguiente fórmula

$$L(i) = (n + 1)^{-1} \sum_{k=1-n}^i |S(k) - \overline{S(k)}|$$

donde  $\overline{S(k)}$  es el promedio de la señal de entrada S(i). Un arribo es detectado si  $|CF(i)|/L(i)$  es mayor que 6 y la duración del segmento es mayor que 0.06 segundos. Para confirmar si es un arribo sísmico, se checa si la representación de la señal satisface la condición de que la frecuencia predominante se encuentra entre 1 y 10 Hz y si por lo menos hay tres amplitudes mayores que el umbral de disparo dentro de un segundo. Aunque este método no se implemento en un sistema de detección de tiempo real, es aplicable porque requiere muy pocas operaciones.

### (3) El método de Stewart

El método consiste en transformar la señal original de entrada X(i) en una función característica CF(i) de la siguiente manera:

$$CF(i) = \begin{cases} DX(i) & \text{si } U(i) \neq U(i-1) \text{ y } S(i) \geq 8 \\ CF(i-1) + DX(i) & \text{si } U(i) = U(i-1) \text{ y } S(i) < 8 \end{cases}$$

Donde  $DX(i) = X(i) - X(i-1)$ ,

$$U(i) = \begin{cases} +1 & \text{si } DX(i) \geq 0 \\ -1 & \text{si } DX(i) < 0 \end{cases}$$

$$\text{y } S(i) = \left| \sum_{k=7}^i U(k) \right|$$

Las características de esta CF(i) son las siguientes:

- i.- Se preserva la naturaleza oscilatoria de la señal.
- ii.- Se preserva la polaridad del primer arribo.

iii.- Se reducen las componentes de periodos muy largos comparados con los de los eventos locales.

iv.- Sirve para detectar arribos ligeramente emergentes, pues es sensible a cambios de frecuencia.

Se declara una detección tentativa de la fase P cuando el valor absoluto de CF, normalizado por su promedio largo, supera un nivel de referencia. A continuación se procesan 0.5 segundos de la señal posteriores al arribo, se examina su frecuencia, amplitud y radio de señal contra ruido para determinar si se trata efectivamente, de una señal sísmica. Después, si se trata de una señal sísmica, se procesa la coda, la máxima amplitud y la frecuencia predominante.

Este método ha sido utilizado en el monitoreo por la red del USGS (Central California), dando buenos resultados, especialmente para la detección de eventos sísmicos locales.

#### (4) El método espectral

Este método se basa en la detección de las diferencias en el contenido espectral entre la señal sísmica y el ruido. La detección automática de la señal sísmica dentro de un ambiente relativamente ruidoso, puede realizarse con mejores resultados en el dominio de la frecuencia ya que se tiene más sensibilidad a los cambios de la amplitud y de la frecuencia. Sin embargo, el método generalmente toma más tiempo de operación, ya que es necesario transformar la señal de entrada al dominio de la frecuencia. Además la capacidad y eficiencia de este método para detectar y resolver una distribución espectral particular, depende en gran parte de la longitud de la ventana que se toma para su transformada. Los arribos sísmicos detectados usualmente están dentro de la ventana siendo difícil determinar las posiciones exactas de esos arribos y como consecuencia la precisión del tiempo detectado disminuye. Como la medida precisa de las fases sísmicas es un factor vital para la localización y el estudio de un sismo, este método no es fácil de aplicar a la detección de arribos. Generalmente se usa para la detección del evento o para confirmar si algún evento detectado es un sismo.

Se han desarrollado e implementado algunos sistemas de detección automática en tiempo real usando la Transformada

Discreta de Fourier (DFT) (Gledhill, 1985) o la Transformada Discreta de Walsh (TDW) (Goforth y Herrin, 1981; Michael y otros, 1982). Este último método necesita mucho menos tiempo de operación que el de DFT (Bath, 1974).

(5) EL método AR

El modelo autoregresivo (AR) ha sido ampliamente utilizado en varios campos de procesamiento de señales digitales (Makhoul, 1975). En el modelo AR, la enésima muestra de la señal  $s_n$  puede representarse por:

$$s_n = \sum_{i=1}^p a_i s_{i-n} + e_n$$

donde  $a_i$  son coeficientes y  $e_n$  es un valor de la señal residual con variancia  $\sigma_n^2$ . Los cambios de los coeficientes  $a_i$  y los residuales  $e_n$  puede utilizarse como una función característica (FC) para la detección de la señal sísmica, especialmente para la detección de la fase S. Dos medidas de disimilitud (MD) basada en el modelo AR han sido analizados en la detección de la señal sísmica (Yi y Nava, 1988).

i) Medida de suma cumulativa (Basseville y Benveniste, 1983)

$$MD = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (e_i^2 / \sigma^2 - 1)$$

ii) Medida de distorsión de Itakura-Saito

Esta medida puede interpretarse como una medida de la disimilitud o distorsión de la función de densidad espectral entre dos segmentos de la señal  $S_0$  y  $S_1$  (Gray y otros, 1980). Si la señal es modelada por el modelo AR, la disimilitud entre dos segmentos  $DM(S_0, S_1)$  es:

$$DM(S_0, S_1) = T_p(A_1) / \sigma_1^2 - \ln(\sigma_0^2 / \sigma_1^2) - 1$$

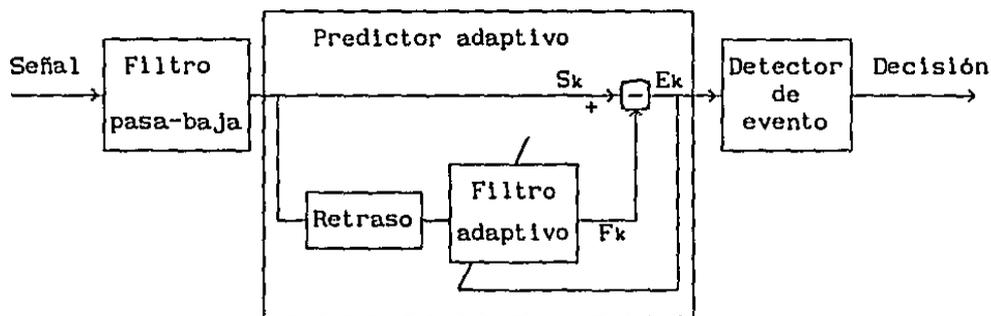
$$\text{donde } T_p(A_1) = \sum_{k=0}^p \sum_{k=1}^p a_k a_1 r(k-1)$$

$a_i$  son los coeficientes correspondientes al segmento  $S_1$  y  $r(n)$  es la autocorrelación de la señal segmentada  $S_0$ .

(6) El método de filtro adaptivo

Los sismos muy pequeños son difíciles de detectar porque el nivel de ruido es muy cercano al nivel de la señal sísmica. En

este caso es factible utilizar alguna técnica especial para mejorar la razón de señal contra ruido como el filtro adaptivo (Clark y Rodgers, 1981). El esquema general de detección de evento sísmico usando filtro adaptivo se muestra a la continuación:



La señal entra por un filtro pasa baja que elimina los ruidos de altas frecuencias. El predictor adaptivo es un simple cancelador de ruido con referencia de ruido igual a la señal de entrada retrasada (Widrow, 1975). Cuando la señal sísmica no está presente, el valor predicho  $F_k$  es muy cercano al valor real  $S_k$ , por consiguiente el error  $E_k$  es muy pequeño; cuando ocurre un evento, el cancelador no puede predecir ese cambio y causa un error grande en la salida  $E_k$ , lo cual puede ser una indicación de la presencia del evento.

## CAPITULO V DESARROLLO DE UNA SISTEMA DE DETECCION AUTOMATICA EN EL SSN

### V.1 Antecedentes históricos del SSN

El Servicio Sismológico Nacional (SSN) fue creado el 5 de septiembre de 1910 por Decreto Presidencial. Su inauguración fue parte de la celebración del centenario de la independencia de México. Inicialmente el SSN formó parte del Instituto Geológico Nacional. A partir de 1929, se incorporó al Instituto de Geología de la UNAM. Posteriormente con la creación del Instituto de Geofísica, en 1949 el Servicio Sismológico Nacional pasó a depender de este Instituto hasta la actualidad.

La red inicial estuvo constituida por el Observatorio Central de Tacubaya y estaciones ubicadas en Guadalajara, Mazatlán, Mérida, Oaxaca, Monterrey y Zacatecas. Se eligieron como aparatos registradores a los sismógrafos mecánicos Wiechert de período corto, por ser en aquel tiempo los mejores. (Espíndola y Jiménez, 1984).

En la década de los 60's, dentro de un programa de colaboración entre el SSN y el Servicio Geológico de los Estados Unidos, se empezó a expandir la red y se instalaron seis estaciones de alta ganancia en diferentes puntos de la República Mexicana. Posteriormente la Comisión Federal de Electricidad realizó un convenio con el Instituto de Geofísica de la UNAM para instalar una red de estaciones en el noreste de México con la finalidad de observar la actividad sísmica del Golfo de California. Este conjunto de estaciones es controlado actualmente por el Centro de Investigaciones y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE).

Hasta 1984 el Servicio Sismológico Nacional cuenta con una red de 20 estaciones siendo el Observatorio Central de Tacubaya la estación más completa y en donde se recibe la información sísmica de toda la red (Jiménez, 1986). En este período, las estaciones sísmicas del SSN son todas autónomas, algunas de ellas son mecánicas, las cuales tienen poca ganancia. Además para procesar

los datos registrados (localización, calculo de magnitud, etc.) se necesita mucho tiempo. Esto es debido a que es necesario reunir los sismogramas de todas las estaciones foráneas, los cuales son enviados por autobús o por correo. El proceso también se retrasa debido a que se tienen que corregir los tiempos de arribo y tomar en cuenta las diferentes escalas y/o amplificaciones de las estaciones.

Durante mucho tiempo, el SSN no modernizó la red como hubiera sido recomendable hacerlo. No se adquirieron ni se diseñaron nuevos aparatos, se utilizaron los sismómetros y equipos que se trajeron desde la primera década de este siglo. Estos instrumentos se utilizaron y se siguen utilizando. Hasta final de los años setenta se compraron, por fin, equipos e instrumentos modernos. A partir de 1982 se empezó a diseñar algunos equipos para su uso en las estaciones sismológicas analógicas y telemétricas.

La necesidad de que México contara con una red sísmica moderna que permitiera aprovechar las técnicas de la electrónica digital y telemétrica, monitorear eficientemente y con capacidad de respuesta inmediata los procesos sísmicos del país, así como registrar señales sísmicas susceptibles de análisis conducentes a una mejor comprensión de los procesos sísmicos, surgió el proyecto de la creación de la Red Sísmica Mexicana de Apertura Continental (RESMAC) ( Lomnitz y Gil, 1976 ). El convenio fue acordado en 1974 entre la UNAM (el Instituto de Geofísica (IGF) y el Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas, (IIMAS)), la SCT, SOP, SRH, CFE y CONACYT. La red como parte del IIMAS empezó a operar en forma preliminar en 1979, y desde entonces se obtuvieron resultados de gran valor sismológico. En 1984, RESMAC regresó al IGF oficialmente y el traslado físico se llevo a cabo en mayo de 1986. En el mismo año, RESMAC fue incorporado al SSN, con lo cual la red sismológica nacional creció y tuvo por primera vez estaciones digitales.

El sistema RESMAC consiste en estaciones digitales cuyos datos son telemetrizados a través de la red de microondas de SCT. Las señales se transmiten a la Torre de Telecomunicaciones en México, D.F. , de allí, son enviadas a una base central en la UNAM. La transmisión a la UNAM es a través de líneas telefónicas privadas

de TELMEX. RESMAC contaba con 11 estaciones digitales de periodo corto y 1 estación de tres componentes de periodo largo conocidas como estaciones tipo "T". Además recibía las señales de 3 estaciones analógicas de la red SISMEX del Instituto de Ingeniería las cuales eran digitalizadas e incluidas en el sistema de captura. Las operaciones de detección y captura de eventos sísmicos se realizaban con una computadora PDP11-40. Periodicamente los eventos sísmicos registrados se trasladaban a otra computadora PDP11-40, en donde se accesaban para su procesamiento rutinario y para todo tipo de análisis especiales (Nava, 1986).

A pesar de su potencial, RESMAC también tenía sus debilidades. Las computadoras PDP11-40 usadas para la detección y el procesamiento ya tenían un gran numero de años en operación, y por lo tanto presentaban problemas a menudo. El mantenimiento era, por lo mismo, incosteable. Con el objeto de mejorar y actualizar el sistema de detección y de procesamiento de datos, se decidió reemplazar las computadoras originales por una computadora más moderna y poderosa. Con este fin se compró una computadora MASSCOMP MC500, pero de nuevo se presentaron problemas de mantenimiento y de respaldo en caso de falla. Por falta de planeación y otras razones diversas, las computadoras PDP11-40 dejaron de funcionar sin que el nuevo sistema se hubiera implementado. Cuando RESMAC fue integrado al SSN, sólo se dejaron unas líneas con datos digitales que no se podían graficar directamente en tambor ni se contaba con computadora para procesarlas.

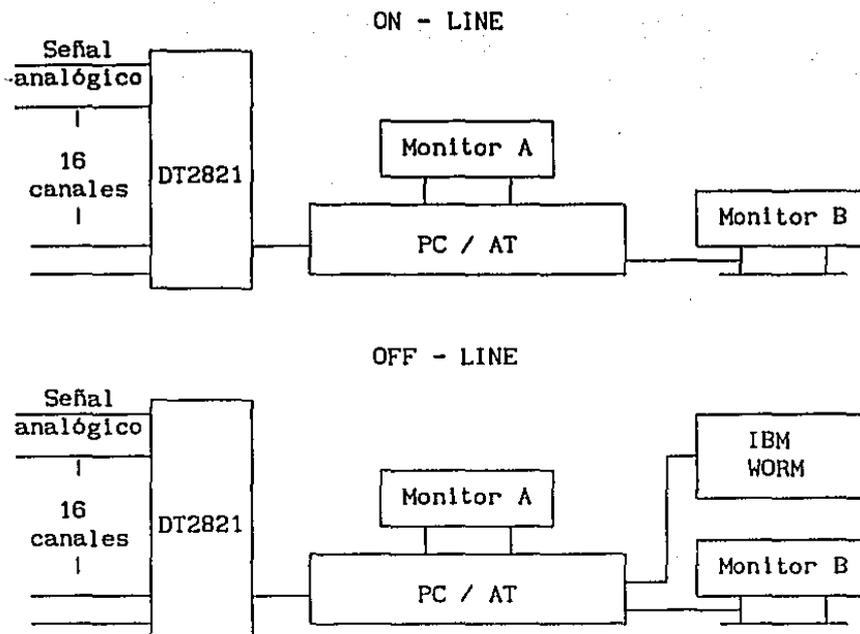
Con el objeto de aprovechar las informaciones digitales, mientras se planeaba diseñar un nuevo sistema de detección y procesamiento de señales digitales, se desarrolló un circuito auxiliar denominado  $T^{-1}$ . Este circuito se diseñó en base a un microprocesador cuya función principal es convertir la señal digital recibida de la estación "T" a una señal analógica, lo cual permitió su grabación en un tambor sísmológico. Con ayuda de este sistema, el SSN puede en la actualidad monitorear 8 canales de señales digitales de las estaciones del original RESMAC (Yi, y Medina, 1987).

Actualmente el Servicio Sismológico Nacional consta de 42 estaciones, de las cuales 8 son estaciones digitales, 9 mecánicas y 25 analógicos. Hay 17 estaciones telemetrizadas desde su origen al Instituto de Geofísica, incluyendo digitales y analógicas (Ver figura V.1).

El Servicio Sismológico Nacional ocupa un papel histórico importante en el desarrollo de la sismología en México, además tiene una función social palpable ya que es el vocero oficial en la divulgación de la información sismológica relacionada a la ocurrencia de temblores o terremotos asociados en el país. A pesar de los problemas y dificultades que a enfrentado el SSN desde su fundación en 1910, el Servicio Sismológico Nacional ha generado interrumpidamente gran cantidad de datos que hoy forman el archivo sismológico del país. Ellos constituyen por sí mismo un valioso acervo que contiene una fuente de información muy importante. Debido al papel social y científico tan importante que tiene el SSN, es necesario modernizar y mejorar la red sísmica, renovar y actualizar las estaciones sismológicas para obtener registros de alta calidad y para dar mayor apoyo a las investigaciones científicas multidisciplinarias.

## V.2 Un sistema de detección automática en el SSN

Con la ampliación y modernización de la Red Sismológica, el Servicio Sismológico Nacional (SSN) instaló un sistema de adquisición y procesamiento de datos sísmicos analógicos. Este sistema fue diseñado originalmente en el U.S. Geological Survey (USGS) por Willie Lee y otras personas (1988) con el objetivo de tener un sistema simple, económico y confiable, capaz de digitalizar, detectar, almacenar y localizar eventos sísmicos automáticamente usando hasta 32 canales de señales sísmicas analógicas. Dicho sistema actualmente trabaja con 16 canales, las señales analógicas se digitaliza por una tarjeta de adquisición de datos, y la detección y localización del evento se realiza por medio de una computadora PC/AT. El esquema general del sistema del USGS se muestra a continuación.



DT2821 : Tarjeta de adquisición de datos, producto de la compañía DATA TRANSLATION.

Monitor A (EGA) : para mostrar estatus del sistema.

Monitor B (Mono): para dibujar las trazas de la señal de entrada

IBM WORM : un dispositivo que utiliza discos ópticos para almacenar las señales sísmicas registradas.

## V.2.1 Descripción general del sistema

### (1) Descripción del Hardware del sistema

- Dos tarjetas de adquisición (producto de la compañía DATA TRANSLATION). Cada tarjeta puede digitalizar 16 canales como máximo de señales analógicas y entrega las señales digitalizadas a la computadora PC/AT.
- Dos computadoras AST( 286 Premium AT ) IBM/AT compatibles con 1.5Mkb de RAM, coprocesador matemático 80287, 40Mkb de disco duro, tarjetas de graficación EGA, MGA y monitor de multifunciones.

- Un dispositivo para almacenar datos en discos ópticos. Con este sistema una vez escritos los archivos de los eventos sísmicos, estos ya no se pueden borrar. Cada disco óptico tiene capacidad para almacenar 200 Mb.

## (2) Descripción del Software del sistema

El software de control del sistema es un conjunto de varios programas escritos por diferentes personas. La compañía DATA TRANSLATION ofrece junto con la tarjeta de adquisición, un paquete de software para comunicar la tarjeta con la computadora PC/AT. El programa principal de detección fue escrito por Dean Tottingham, el programa de medida de los tiempos de arribo de P fue escrito por Will Kohler usando el algoritmo de Rex Allen, el programa de localización del evento es una modificación del programa HYPO71PC por Willie Lee.

## (3) Descripción de la operación del sistema

La tarjeta de adquisición digitaliza 16 canales de señales analógicas de los cuales 15 reciben las señales enviadas por las estaciones y un canal es reservado para la señal de marca del tiempo. La tarjeta manda los datos digitales a la computadora a través de DMA (Direct Memory Access) con una resolución de 12 bits y un tiempo de muestreo programable (actualmente es 100 muestras por segundo). El proceso de detección utiliza un algoritmo clásico de promedio de periodo corto (C) contra de periodo largo (L), cuando C/L es mayor que un cierto umbral preestablecido, se declara un arribo sísmico. El sistema se dispara cuando por lo menos 3 canales declaran arribos. Una vez detectado un evento se realiza la medida del tiempo de arribo de la onda P para su localización, y se graban todos los datos de los 16 canales en el disco duro. Si hay suficientes tiempos de arribos de la fase P, el sistema localiza el evento.

## (4) Algunas consideraciones del sistema

El sistema de detección que se adquirió para el SNN procedente del USGS no es un sistema totalmente terminado y su desarrollo todavía sigue en proceso. El software del sistema versión 2.0 se encuentra en la etapa experimental. hay que considerar ciertos aspectos :

- El sistema original utiliza dos monitores, uno para muestrear

el estado actual del sistema y el otro para dibujar las trazas de las señales de entrada. Esto aumenta el costo del sistema y crea trabajo innecesario para nuestros propósitos.

- El sistema fue diseñado en base a la experiencia del desarrollo de la red sísmica local en el USGS. Por lo tanto, en realidad es un sistema de detección automática para una red local. Para una red con una cobertura tan grande y de relativamente pocas estaciones como la del SSN, es necesario diseñar e implementar un nuevo algoritmo de detección.

- La tarjetas de adquisición DT2821 es una tarjeta de multi-uso, y cuenta con un paquete de software para facilitar su uso, pero la desventaja es que cada tarjeta cuesta 2 mil dolares. Para monitorear 32 canales, se necesitan 2 tarjetas. Esto implica un costo muy elevado del sistema.

- El tiempo del sistema no es suficientemente exacto.

- El sistema original no tiene software para procesar los datos grabados.

#### V.2.2 Análisis del sistema de detección del USGS

Los elementos principales del sistema de detección son la tarjeta de adquisición DT2821, la computadora PC/AT y el software que es la clave del sistema. El software del sistema consiste en una serie de programas escritos por diferentes personas y en distintos lenguajes de programación. A continuación se hace una descripción y análisis de los programas.

(1) La compañía DATA TRANSLATION ofrece junto con la tarjeta de adquisición, un paquete de software el cual consiste en tres partes: ATLAB, ATL y ATLSETUP.EXE. ATLAB es una librería de subrutinas a las cuales se puede tener acceso por medio de tres lenguajes C, PASCAL y FORTRAN. Estas subrutinas proporcionan el control sobre el subsistema de entrada y salida de la tarjeta DT2821. ATL consiste en un manejador (driver) cargable de MSDOS, y es un dispositivo estandar de interface entre la tarjeta DT2821 y la computadora PC/AT. ATLSETUP.EXE contiene el programa de configuración para la tarjeta (ATLAB manual, 1987).

Las funciones que puede realizar el ATLAB son:

1. Transferencia de un sólo valor, no DMA A/D, D/A y digital IO.
2. Transferencia de valor múltiple , no DMA A/D, y D/A, desde y

hacia la memoria.

3. Transferencia DMA A/D, y D/A, desde y hacia a la memoria.
4. Asignación y manejo de la memoria extendida de PC/AT.
5. Manejo del buffer de datos.
6. Inicialización de la tarjeta y el reloj de la tarjeta.
7. Manejo de errores.

La transferencia de los datos entre la tarjeta y la computadora PC/AT puede realizarse a través del DMA (Direct Memory Access) sin intervención del CPU. Esto permite una alta velocidad de adquisición de datos liberando CPU para ejecutar otras tareas. La IBM PC/AT tiene tres canales de DMA seleccionables. La tarjeta DT2821 puede usar uno o dos canales de estos. Es la razón principal de que la tarjeta necesite una computadora PC/AT.

ATLAB requiere un sistema operativo MSDOS versión 3.0 ó una versión posterior. La memoria mínima requerida para la operación de ATLAB es 256 Kb. El manejador (driver) ATL ocupa una memoria entre 8 a 10 KB. ATLAB es soportado sólo por Microsoft compilador C V3.0, Pascal V3.3, FORTRAN V3.3 o versiones posteriores.

(2) El programa principal está escrito en C, excepto algunas subrutinas que están escritas en ensamblador y es compilado por Microsoft C V4.01 en modelo mediano.

Se utiliza un paquete de graficación (Symmetric Research) para dibujar las señales de entrada en tiempo real. Este paquete puede manejar la tarjeta EGA o Hercules y contiene varias subrutinas las cuales estan escritas en C y ensamblador. Se puede tener acceso desde el Microsoft C y se pueden realizar rápidamente algunas funciones sencillas de graficación.

El programa principal recibe un archivo de entrada y genera dos archivos de salidas, además de los archivos sísmicos grabados. El archivo de entrada contiene todas la información sobre los parámetros que se requieren para la operación del sistema. Uno de los dos archivos de salida es el diario de la operación que contiene la información acerca del funcionamiento del sistema y el otro archivo contiene el índice de los eventos sísmicos grabados.

El programa principal realiza la detección de eventos usando el algoritmo de promedio corto (C) contra promedio largo (L). Los detalles se describen a continuación:

- 1) Calcula el promedio corto  $C(i)$  y el promedio largo  $L(i)$  de las señales de entrada  $S(i)$ .

$$C(i) = C(i-1) + (S(i) - C(i-1)) / 16$$

$$L(i) = L(i-1) + (S(i) - L(i-1)) / 512$$

- 2) Si  $C(i) / L(i) > \text{umbral\_de\_arriba}$ , se declara un arribo detectado. Un posible evento sísmico es detectado si dentro de un intervalo de tiempo (*ventana\_de\_tiempo*), por lo menos hay un número preestablecido (en general es 3) de arribos detectados (*arribos\_en\_ventana*).

- 3) Para confirmar si la detección es correcta, se realiza una verificación con el siguiente criterio:

Para todos los canales de interés

si  $C(i) / L(i) > \text{umbral\_de\_confirmación}$  ( $i = 1, \dots, 512$ )

$\text{numero\_de\_picos} = \text{numero\_de\_picos} + 1$

Un evento es confirmado si el número de canales con

$\text{numero\_de\_picos} > \text{MAXIMO\_PICOS}$  es mayor o igual que  $\text{NUM\_MINIMO}$ .

- 4) Para encontrar la terminación de un evento detectado, se usa un criterio similar al del punto 3), con la excepción de que el umbral es diferente al del *umbral\_de\_confirmación*. La grabación del evento se termina si el número de canales con  $\text{numero\_de\_picos} > \text{MAXIMO\_PICOS}$  es menor que  $\text{NUM\_MINIMO}$ .

Al analizar el algoritmo de detección descrito arriba, se puede notar que la detección de un evento depende de muchos parámetros. Si la ventana de detección no es adecuada, se puede perder un evento sísmico o el inicio del evento, ya que para detectar un evento se necesitan encontrar ciertos números de arribos dentro de un intervalo de tiempo. Desafortunadamente esta ventana no puede ser demasiado grande debido a las limitaciones de la memoria de la computadora. Además una ventana grande puede tener mayor posibilidad de falsas alarmas que afectan la detección de los eventos y causa la saturación del medio de almacenamiento del sistema. La verificación del arribo detectado se realiza después de que se detectan varios arribos dentro de un pequeño intervalo de tiempo. Esto puede causar la pérdida de algunos eventos, ya que es difícil esperar que todos estos arribos estén dentro del intervalo de verificación, especialmente para el caso de eventos

regionales.

(3) El programa para medir los tiempos exactos de los arribos está escrito en FORTRAN77 y es una implementación simplificada del algoritmo de detección Allen (ver sección IV.4). El programa no identifica la polaridad de los arribos de P. El cálculo para medir los tiempos exactos de la fase P se realiza con 512 muestras para todos los canales y sólo se asignan dos niveles de calidad para la lectura de la fase P: cero si hay lectura de P; cuatro si no lo hay. Esto implica que para obtener tiempos exactos en las lecturas, todos los arribos deben de estar dentro de un intervalo de tiempo muy pequeño (5.12 segundos para una razón de muestreo de 100/seg). Para una red regional como la del SSN, las separaciones de tiempo entre los arribos de un evento sísmico generalmente son muy distantes, como consecuencia es difícil obtener lecturas de la fase P y naturalmente no se puede localizar el evento. El algoritmo de Allen de la medición de las fases no es muy eficiente para los sismos regionales y requiere muchos parámetros (Baer y Kradolfer, 1987). Además como el algoritmo implementado no es una realización completa, por lo tanto tiene muy poca resolución, incluso para sismos locales (Lee y otros, 1988). Es necesario refinar el algoritmo o diseñar un nuevo algoritmo.

El programa de localización es una versión modificada del HYPO71PC escrito en FORTRAN77 (Lee y Valdes, 1985). El programa requiere dos archivos de entradas, uno contiene las información de las estaciones sísmicas y los parámetros que se necesitan para la localización. El otro archivo contiene los tiempos de las fases P determinados por el programa de medición del tiempo. El programa usa las lecturas de la fase P con una calidad entre 0-3, una lectura con calidad 4 se considera como una lectura inválida. El programa genera un archivo de salida que contiene los resultados de localización del evento.

### V.3 Desarrollo de un sistema de detección automática para el SSN

Con el análisis del sistema descrito en la sección anterior, se muestra que el software no es el adecuado para la red del SSN. Es necesario modificar y reescribir la gran parte del software original para mejorar el funcionamiento del sistema. Además se

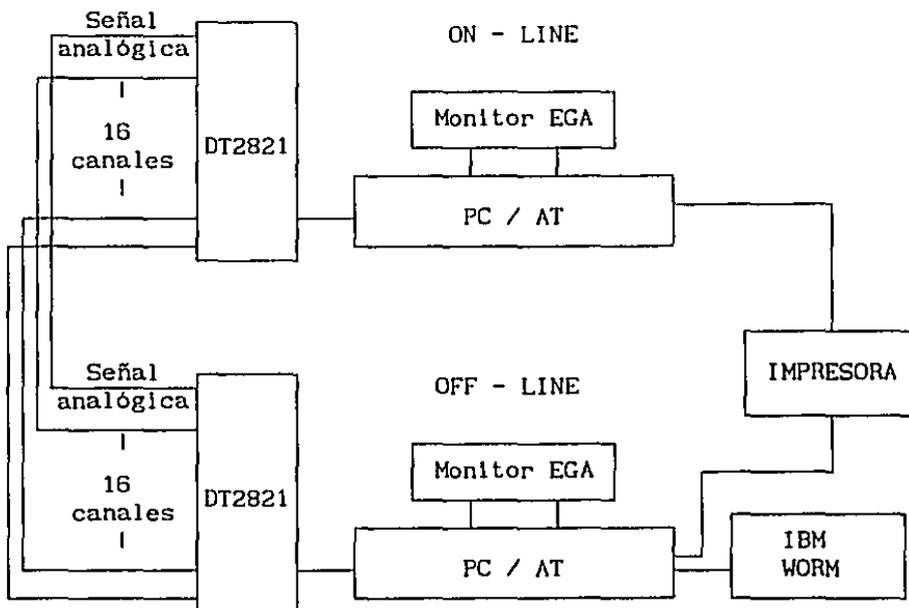
requieren nuevos programas para el procesamiento de los eventos sísmicos registrados. El software aquí diseñado se basó en el software original del USGS versión 2.0. Algunas subrutinas son tomadas directamente del original. Algunos comentarios del programa del USGS versión 2.63 son útiles para el nuevo diseño del software (Tottingham, 1988). A continuación se describen los desarrollos en el sistema de detección del SSN.

### V.3.1 Descripción general del sistema

El sistema de detección del SSN actualmente consiste de lo siguiente:

- dos tarjetas de adquisición de datos DT2821.
- dos computadoras AST ( 286 Premium AT ) IBM/AT compatibles con 1.5Mkb de RAM, coprocesador matemático 80287, 40Mkb de disco duro, tarjetas de graficación EGA y monitores de multifunciones.
- Un dispositivo para almacenar datos en discos ópticos. Cada disco óptico tiene capacidad para almacenar 200 Mb.
- Una impresora Epson.

El esquema general del sistema se muestra a continuación:



Por el momento las dos computadoras reciben las mismas señales de 16 canales de los cuales 15 son dedicados a las señales sísmicas y un canal a la señal del tiempo WWV con marca de minuto. Con cualquiera de las dos computadoras se puede realizar la detección y el procesamiento de los eventos sísmicos. Con el crecimiento de la red telemétrica del SSN cada computadora del sistema recibirá señales de diferentes estaciones (Ver figura V.2).

### V.3.2 El monitoreo del sistema

El sistema de detección del SSN utiliza un sólo monitor para muestrear la información. Esta información consiste básicamente de tres partes: el estado del sistema, la señal de entrada y el mapa de México. Cada una de estas partes están distribuidas en tres ventanas que puede seleccionar el operador mediante el teclado.

El estado del sistema contiene los nombres y situación de los canales que envía las señales, el tiempo, y la información acerca del funcionamiento del algoritmo de detección y algunos mensajes sobre la operación del sistema. Los canales pueden estar en dos clases de estados, el canal con estado ON indica que realiza la detección de arribos en esta canal y OFF indica que es un canal con señales ruidosas, por lo tanto no se utiliza para la detección (Ver figura V.3).

El operador puede ver en la pantalla de la computadora las graficas de las señales que entran al sistema de detección y también puede cambiar la escala de graficación si así lo desea. Esto permite que el operador pueda fácilmente revisar las señales de entrada y verificar el nivel de ruido. Si un canal es demasiado ruidoso, se puede cambiar el estado de este canal sin detener el sistema (Ver figura V.4).

El sistema puede graficar el mapa de México, tal mapa es de gran utilidad para mostrar la ubicación de las estaciones sísmicas que mandan la información al sistema. El mapa también es útil para ilustrar la localización de los epicentros preliminares de los eventos sísmicos localizados (Ver figura V.5).

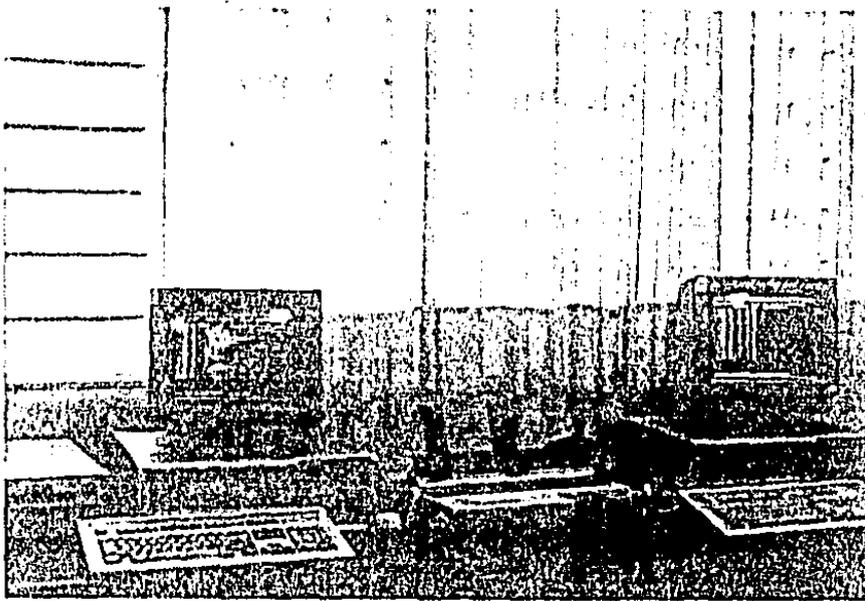


FIG. V.2 EL SISTEMA DE DETECCION AUTOMATICA EN EL SSN

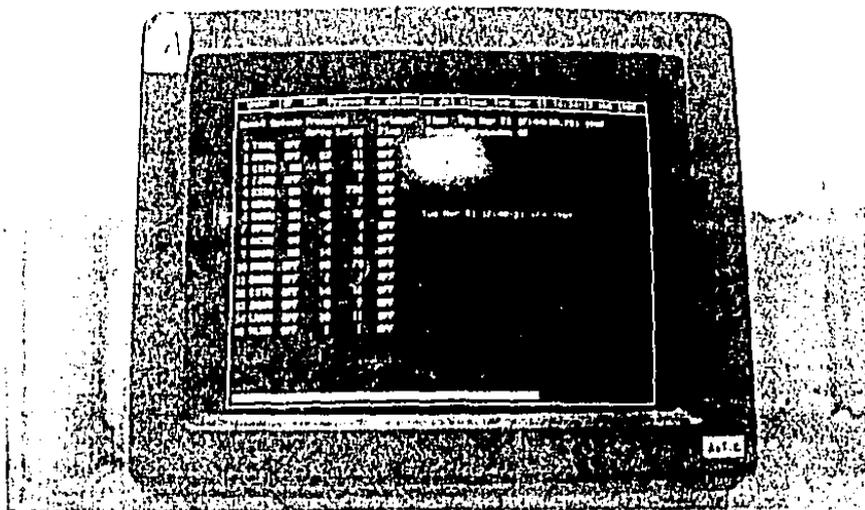


FIG. V.3 EL ESTADO DEL SISTEMA DE DETECCION

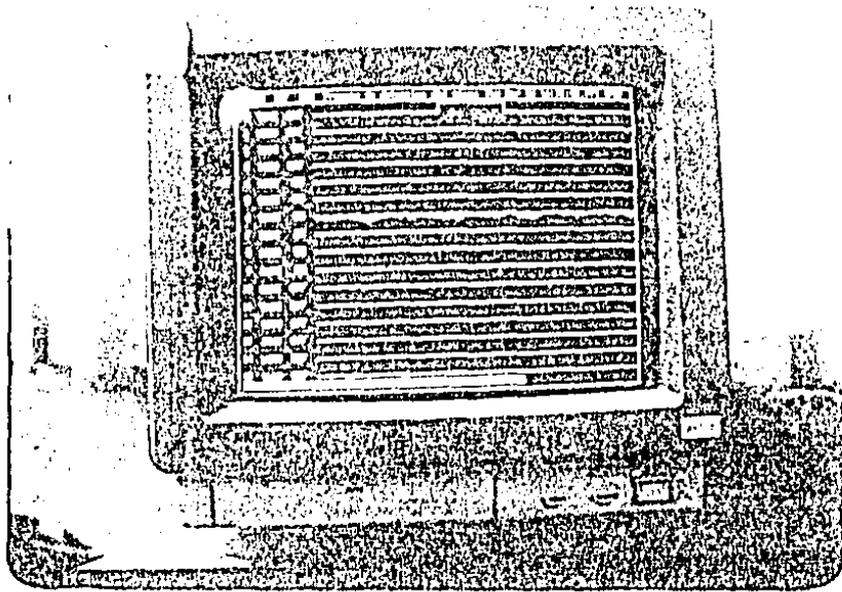


FIG. V.4 LA SEÑAL DE ENTRADA AL SISTEMA DE DETECCION

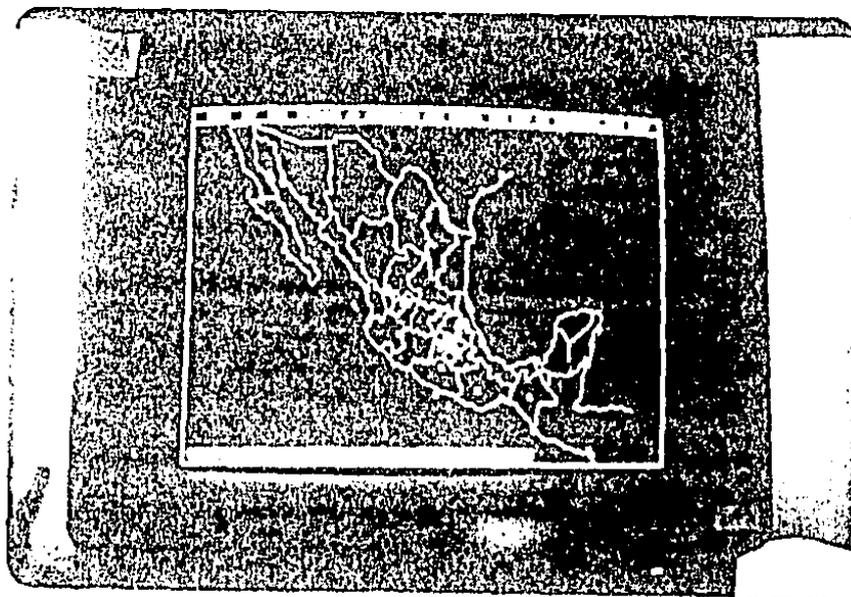


FIG. V.5 EL MAPA DE MEXICO Y LA UBICACION DE LAS ESTACIONES

### V.3.3 El tiempo del sistema

El tiempo del sistema se inicia con el reloj de la computadora PC. Posteriormente el tiempo se calcula a partir de las muestras recibidas que están controladas por el reloj de acuerdo a la frecuencia de digitalización de la tarjeta. La razón de muestreo puede establecerse por la subrutina `al_set_frequency` ( `frecuencia_de_muestreo` ) que está en la librería ATLAB de la tarjeta DT2821. Desgraciadamente esta subrutina no puede generar cualquier frecuencia de muestreo debido al mecanismo del reloj de la tarjeta. La frecuencia de digitalización verdadera a la que está programada por la subrutina no siempre es igual a la deseada. Es necesario e importante conocer la frecuencia de digitalización verdadera, ya que la precisión del tiempo del sistema depende fuertemente de ella.

La frecuencia de digitalización esta determinada por dos parametros: el valor del divisor y el del preescalar. Los valores de estos dos parametros pueden asignarse a través de la programación del registro TMRCTR. Este registro es de 16 bits y sólo es accesible por la palabra. La dirección del registro es Dirección de Base + E (DT2821 manual, 1987).

Bit		Preescala				Divisor									
15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0

Bits 15-12: no se usa.

Bits 11-8: Estos bits seleccionan el valor del preescalar.

Bits 7-0: Estos bits son del valor del divisor. El valor esta en complemento'1 del valor deseado.

La frecuencia de digitalización (F) esta determinada por el valor del preescalar (N) y el valor del divisor (X).

$$F = 4\text{Mkz} / 2^N / (255 - X)$$

Como la subrutina `al_set_frequency()` no es confiable, es mejor generar la frecuencia de muestreo directamente a través de la programación del registro TMRCTR. Sin embargo es difícil confirmar que la programación sea correcta, debido a la falta de información precisa sobre el hardware de la tarjeta DT2821. Otra alternativa

es usar la subrutina `al_set_frequency()` para obtener una frecuencia de muestreo aproximada, y luego leer el registro TMRCTR para calcular la frecuencia verdadera.

La precisión del tiempo del sistema depende de dos factores principales, el reloj de la PC y la frecuencia de muestreo de la tarjeta de adquisición. El sistema usa un canal para registrar exclusivamente la señal de tiempo de WWV con marca de minuto. Esta señal de tiempo es sumamente importante para mejorar la precisión del tiempo del sistema.

#### V.3.4 El algoritmo de detección del sistema

El programa principal realiza la detección de eventos usando el algoritmo de promedio corto (C) contra promedio largo (L). Los detalles se describen a continuación:

- 1) Calcula el promedio corto  $C(i)$  y el promedio largo  $L(i)$  de las señales de entrada  $S(i)$ .

$$C(i) = C(i-1) + (S(i) - C(i-1)) / C1$$

$$L(i) = L(i-1) + (S(i) - L(i-1)) / C2 \quad C2 \gg C1$$

Donde  $C1$  y  $C2$  son constantes.

- 2) Si  $C(i) / L(i) > \text{umbral\_de\_arribo}(\text{canal})$ , se declara un arribo detectado. Para cada arribo detectado, se realiza una verificación con el siguiente criterio:

si  $C(i) / L(i) > \text{umbral\_de\_confirmación}$  ( $i = 1.. \text{chequeo\_num}$ )  
 $\text{numero\_de\_picos} = \text{numero\_de\_picos} + 1$

Un arribo es confirmado si  $\text{numero\_de\_picos} > \text{MAXIMO\_PICOS}$ .

- 3) Un posible evento sísmico es detectado si dentro de un intervalo de tiempo ( $\text{ventana\_de\_tiempo}$ ), hay por lo menos un número preestablecido (en general es 3) de arribos detectados y confirmados ( $\text{arribos\_en\_ventana}$ ).
- 4) Para encontrar la terminación de un evento detectado, se usa un criterio similar al del punto 2), con la excepción de que el umbral es diferente al del  $\text{umbral\_de\_confirmación}$ . La grabación del evento se termina si el número de canales con  $\text{numero\_de\_picos} > \text{MAXIMO\_PICOS}$  es menor que  $\text{NUM\_MINIMO}$ .

En este algoritmo, los dos constantes  $C1$  y  $C2$  son parámetros que puede fijar el operador y el umbral de disparo es individual para cada canal. La verificación del arribo detectado se realiza

imediatamente después de que se detecta un arribo. De esta manera pueden eliminarse los arribos falsos y detectarse los eventos con mayor eficacia que el algoritmo original.

### V.3.5 El algoritmo de detección de las fases

El algoritmo de medición de las fases es un algoritmo modificado del método "ASP" (ver sección IV.4). Los detalles se describen a continuación:

$$FC(i) = \sum_{j=1-N}^i S_j^2(i) / N$$

$$C(i) = C(i-1) + (FC(i) - C(i-1)) / C_1$$

$$L(i) = L(i-1) + (FC(i) - L(i-1)) / C_2 \quad C_2 \gg C_1$$

donde  $FC(i)$  es la función característica de la señal de entrada  $S(i)$ ,  $C(i)$  y  $L(i)$  son el promedio corto y largo de  $FC(i)$ .

Cuando  $C(i) / L(i) > \text{umbral1}$ , el arribo de  $P$  se considera detectado. Para encontrar el tiempo preciso de la fase  $P$ , el algoritmo se regresa buscando el punto donde empieza  $C(i) / L(i) > \text{umbral2}$ , donde  $\text{umbral2}$  es menor que  $\text{umbral1}$ , ya que el arribo real es generalmente antes de un disparo claro. Se utiliza el criterio de duración para checar que el arribo detectado de  $P$  sea el correcto.

### V.3.6 El procesamiento de datos sísmicos digitales

Los eventos sísmicos grabados en el sistema de detección requiere de software para su procesamiento. Las tareas elementales del procesamiento son revisar los eventos detectados y localizar los eventos que no son localizados o mal localizados por el sistema. Se diseñó un programa con este propósito.

El programa está escrito en C para tener una mejor compatibilidad con la estructura de datos del sistema de detección. Con este programa, el lectorista puede ver las señales grabadas de todos los canales y graficar la señal del canal seleccionado (Ver figura V.6). También se puede segmentar y amplificar la señal para poder observar los detalles del registro. Mediante el cursor, el analista puede determinar fácilmente las fases sísmicas de interés y generar un archivo de salida para

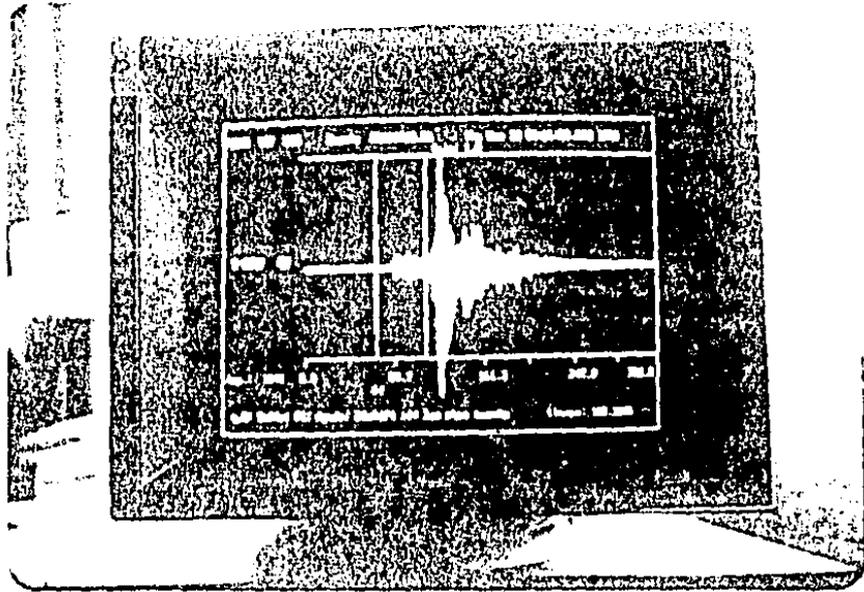
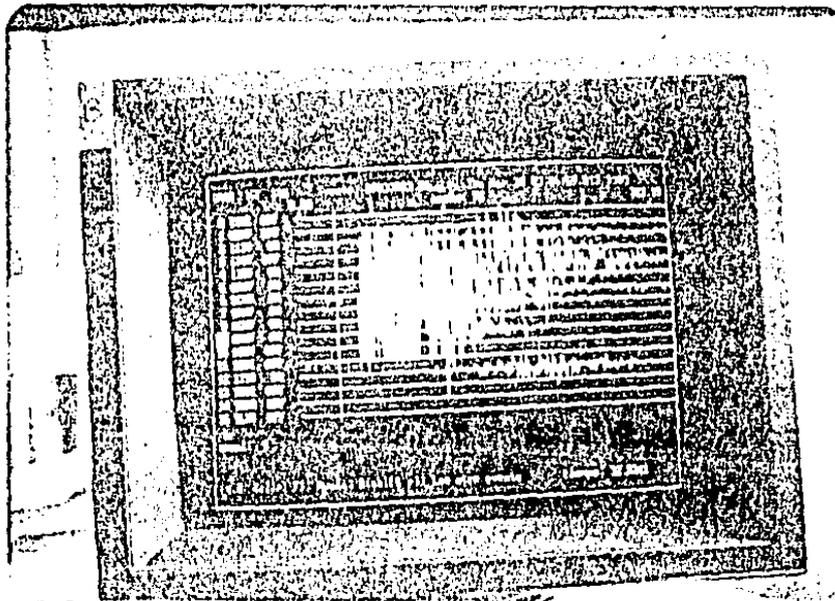


FIG. V.6 SEÑALES SISMICAS PROYECTADAS EN LA PANTALLA DE LA COMPUTADORA PARA SU PROCESAMIENTO

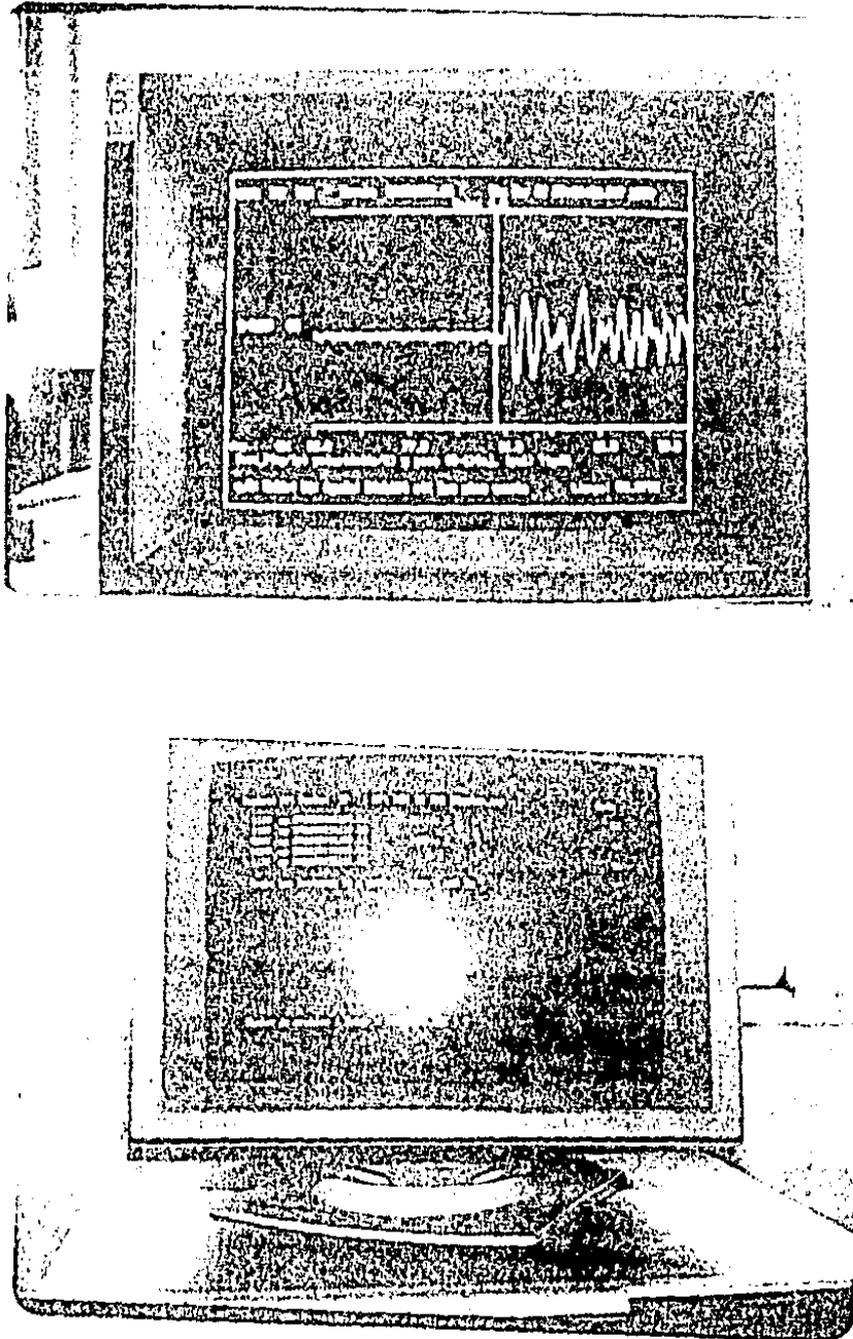


FIG. V.7 DETERMINACION DE LOS TIEMPOS DE LLEGADA DE LAS FASES SISMICAS

localizar el evento (Ver figura V.7). El programa también puede procesar los datos grabados por el antiguo sistema RESMAC haciéndose mínimas modificaciones.

### V.3.7 Algunas consideraciones y limitaciones del sistema del SSN

(1) El sistema de detección actualmente es capaz de detectar eficientemente sismos de magnitud mayor que 4, pero es deficiente para detectar sismos con magnitud menor que 4. Las fallas de detección son causadas por dos razones principales: la mala calidad de la señal original de las estaciones y la poca cobertura de la red telemétrica del SSN.

La calidad de la señal es un factor importante para el sistema de detección. La mala calidad de las señales y la falta de estaciones estratégicas telemétricas en el SSN, dificulta en general la detección del evento. Para un evento pequeño, el sistema normalmente tiene pocas estaciones con arribos claros debido a que muchas estaciones están separadas por distancias bastante grandes. Esto dificulta la detección del evento. Por otro lado, ante esta circunstancia el algoritmo necesita mayor inteligencia y requiere refinación.

(2) La exactitud de tiempo del sistema depende mucho del reloj de la PC, ya que éste se utiliza para iniciar el tiempo del sistema. Para obtener una precisión mayor del tiempo, es necesario sincronizar el reloj de la PC con la señal del tiempo WWV o WWVB, o inducir la señal de tiempo al sistema. Actualmente el sistema utiliza un canal para registrar la señal WWV con la marca del minuto. Esta marca es utilizada por el programa de procesamiento para ajustar el tiempo con una precisión no menor a una centésima de segundo.

(3) El sistema puede caerse en ciertas ocasiones. Muchos eventos consecutivos, señales demasiadas ruidosas y disco duro lleno o fragmentado pueden causar que el buffer de adquisición de datos se llene (overflow) y ocasionar la caída del sistema. El programa de localización HYPO a veces también puede causar la caída del sistema. Para evitar y disminuir la ocurrencia de este problema es necesario tomar ciertas precauciones tales como periódicamente limpiar y optimizar el disco duro, disminuir el acceso al disco

del programa, aumentar la memoria RAM para el buffer de datos etc.

(4) El algoritmo de detección de la fase S no se ha implementado todavía, ya que requiere mucho tiempo de operación en la computadora y puede causar la caída del sistema. El algoritmo de detección del arribo de P también necesita refinarse.

## CAPITULO VI CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

La nueva estación sísmica digital es un producto de la aplicación del microprocesador en el diseño de un instrumento sísmológico y representa una nueva generación en su tipo. Con el uso del microprocesador se simplifica enormemente la circuitería de la estación y se aumenta mucho la utilidad de la misma. Con simples cambios del programa de control, la estación puede tener diferentes aplicaciones sin necesitar ningún cambio físico. Esta estación será utilizada en la red sísmica local de Guerrero y en la red regional del Servicio Sísmológico Nacional (SSN). El uso de la nueva estación puede mejorar la calidad de las señales y estandarizar la red sísmica. La estandarización de la red es muy importante y ventajosa, ya que puede proporcionar una respuesta homogénea de las señales sísmicas de la red y facilitar la calibración de las ganancias de estas señales. Con esto será más fácil estimar la magnitud de los eventos sísmicos, dar mantenimiento a la red y realizar investigaciones sísmológicas detalladas.

El nuevo sistema de detección automática representa un gran avance y una nueva perspectiva para el procesamiento de la señal sísmica en el SSN. Este sistema puede funcionar tanto para una red local como para una red regional. El software del sistema y de procesamiento también son útiles para la detección de las señales digitales de la nueva estación y forman parte integral de su desarrollo. Con la modernización y expansión de la red sísmológica del SSN la importancia de este sistema será cada día mayor. Actualmente el sistema se encuentra trabajando rutinariamente en el SSN y ha registrado numerosos eventos sísmicos a pesar de no contar con un número suficiente de señales de buena calidad y de tener pocas estaciones. Es muy útil tanto para sacar reportes sísmicos preliminares con gran rapidez y mejor precisión así como para facilitar la investigación y el análisis, ya que los datos son digitales y son más fácil de procesar que los sismogramas. El sistema de detección todavía requiere ciertas mejoras para obtener

un funcionamiento óptimo. Además se necesitan estaciones con señales de calidad.

En un futuro proximo se implementará este sistema de detección en una minicomputadora de multi-trabajo SUN. Con esta computadora se podrá realizar el trabajo de detección y de procesamiento al mismo tiempo. Con el sistema SUN será posible un enlace con la red de computadoras del Departamento de Sismología así como procesar los datos sísmicos a través de línea telefónica.

## BIBLIOGRAFIA

- Allen, R. (1978) Automatic earthquake recognition and timing from single traces. Bull. Seism. Soc. Am., 68, 1521-1532.
- Allen, R. (1982) Automatic phase pickers: their present use and future prospects. Bull. Seism. Soc. Am., 72, S225-S242.
- Anderson, K. (1977) Automatic analysis of microearthquake network data. Proc. Int. Sym. On Computer Aided Seismic Analysis and Discrimination, June 9&10, 1977, 40-51.
- ATLAB (1987) User Manual for ATLAB (DATA TRANSLATION).
- Basseville, M. and A. Benveniste (1983) Sequential detection of abrupt changes in spectral characteristics of digital signals. IEEE Trans. Inform. Theory, IT-29, 709-724.
- Bath, M. (1974) Spectral analysis in geophysics. Elsevier Pub. Co., 653pp.
- Baer, M. and U. Kradolfer (1987) An automatic phase picker for local and teleseismic events. Bull. Seism. Soc. Am., 77, 1437-1445.
- Clark, G. and P. Rodgers (1981) Adaptive prediction applied to seismic event detection. Proceeds. IEEE, Vol. 69 No. 9 1166-1168.
- DT2821 (1987) User Manual for DT2821 series (DATA TRANSLATION).
- Espindola J. y Jiménez Z. (1984) Terremotos y ondas sísmicas Cuadernos del Instituto de Geofísica/1 45pp.
- Gledhill, K. (1985) An earthquake detector employing frequency domain techniques. Bull. Seism. Soc. Am., 75, 1827-1835.
- Goforth, T. and E. Herrin (1981) An automatic seismic signal detection algorithm based on the Walsh transform. Bull. Seism. Soc. Am., 71, 1351-1360.

- Gómez, H., Hernandez, J. & Tovar, R. (1985) Estación sismológica modelo T con tecnología CMOS. Com. Tec. IIMAS, Inv.386, 64pp.
- Gray, R. A. Buzo, A. Gray and Y. Matsuyama (1980) Distortion measures for speech processing. IEEE Trans. Acoust. Sig. Pro., ASSP-28, 367-376.
- INTEL Microcontroller Handbook (1986)
- Jiménez Z. (1986) 75 años del Servicio Sismológico Nacional GEOS boletín, época II Vol.6 No 1 enero 1986.
- Lee, W. and J. Lahr (1972) HYPO71: a computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquakes. U.S. Geol. Surv. Open-file Report 75-311.
- Lee, W. and Valdes, C. (1985) HYPO71PC: A Personal Computer Version of the HYPO71 Earthquakes Location Program. U.S. Geol. Surv. Open-File Report 85-749.
- Lee, W. and S. Stewart (1981) Principles and applications of microearthquake networks. Academic Press, 293pp.
- Lee, W. et al. (1988) A PC-Based Seismic Data Acquisition and Processing System. U.S. Geol. Surv. Open-File Report 88-751. 31pp.
- Lomnitz, C. & Gil, J. (1976) Resmac: the new Mexican seismic array. EOS, 57, 68-69.
- Makhoul, J. (1975) Linear prediction: A tutorial review. Proceeds. IEEE, 63, 561-580.
- McEvelly, T. and E. Majer (1982) ASP: An automated seismic processor for microearthquake networks. Bull. Seism. Soc. Am., 72, 303-325.
- Medina, M. y Duarte, C. (1983) RESNOR: Red de telemetría sísmica del CICESE. Memoria de la Reunión 1982-1983 de la Unión Geofísica Mexicana, México D.F. pp 254.

- Medina, M. Yi, T., Valadez, J.L., Carcia, C. y Ceja, J. (1988) Diseño y construcción de la estación sísmica digital. Reunión Anual de Unión Geofísica Mexicana, Colima.
- Michael, A., S. Gildea, and J. Pulli (1982) A real-time digital seismic event detection and recording system for network applications. Bull. Seism. Soc. Am., 72, 2339-2348.
- NATIONAL (1984) DATA CONVERSION/ACQUISITION DATABOOK.
- Nava, F. (1986) RESMAC 1986 GEOS Vol.6 No.4, 1986.
- RCA (1984) CMOS Microprocessors, Memories and Peripherals DATABOOK
- Richter, C. (1958) Elementary seismology. W.H.Freeman and Co., 768pp.
- Stewart, S. (1977) Real time detection and location of local seismic events in central California. Bull. Seism. Soc. Am., 67, 433-452.
- Tottingham, D. (1988) MDETECT.C version 2.0 y 2.63  
( Programa principal del sistema de detección en USGS )
- Udías, A. (1971) Introducción a la sismología y estructura interna de la tierra. Instituto Geográfico y Catastral, Madrid pp163.
- Widrow, B. et al. (1975) Adaptive noise cancelling: Principles and applications. Proc. IEEE, Vol.63, No.17, Dec.
- Willmore, P. (ED.) (1979) Manual of seismological observatory practice. World Data Center A Solid Earth Geophys., SE-20, 144pp.
- Yi, T. y Medina, M. (1987) El proyecto T<sup>-1</sup>. Reunión Anual de Unión Geofísica Mexicana, Ensenada Baja California.
- Yi, T. y Nava, F. (1988) Automatic seismic wave detection and the AR method. Math. Geol., Vol.20, No.1, 37-48.
- Yi, T. y Medina, M. (1988) Control de la estación sísmológica. Memoria de V Simposio de Instrumentación. Queretaro, Queretaro.