



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE FISICA Y MATEMATICAS

**LA DETECCION DE PRECURSORES
SISMICOS COMO UNA POSIBLE
ALARMA SISMICA**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
LICENCIADO EN FISICA Y MATEMATICAS

P R E S E N T A
ROBERTO JUAN PEREZ PEREZ

DIRECTOR DE TESIS
FIS. JOSE ANTONIO PERALTA



MEXICO D.F.

NOVIEMBRE DEL 2006.

AGRADECIMIENTOS

AL PUEBLO DE MEXICO

Que a través del Politécnico me dió educación superior.

A MI FAMILIA

Mis padres, Roberto y Rafaela H. por la primera y la segunda... y todas las oportunidades que me han dado, por ser como son y por ser mis papás. A mis hermanas Minerva, Olimpia y Rafaela, mi ejemplo. Rafael, la esperanza, Everardo y Olimpia. Antonio, Eufemia y Antoine, mi amigo.

A KARINA.

Por el tiempo que me has dado, por caminar la misma senda de la física y de la vida.

AL FIS. JOSE ANTONIO PERALTA

Por creer en mí.

AL M. EN C. PORFIRIO REYES LOPEZ

Por la elaboración de los programas en Lab View y por su dedicación como docente en el Politécnico.

A LOS PROFESORES SINODALES

Por aceptar ser parte de este trabajo.

A LOS HOMBRES LIBRES QUE QUEDAN EN MEXICO.

INDICE.

	Pag.
I. INTRODUCCION.	
1.1 LOS CAMPOS ELECTRICOS DEL SUELO Y LAS ONDAS DE RADIO COMO POSIBLES PRECURSORES SISMICOS.	1
1.2 ALGUNAS DE LAS RAZONES PARA ASOCIAR PERTURBACIONES ELECTRICAS Y ELECTROMAGNETICAS A LA OCURRENCIA DE UN SISMO.	2
1.3 REGISTROS ASOCIADOS A LA OCURRENCIA DE SISMOS.	3
1.4 CONCLUSIONES.	3
II INSTALACION DE SENSORES PARA DETECCION DE PERTURBACIONES EN EL CAMPO ELECTRICO DEL SUELO.	
2.1 INSTALACIONES DE LAS LINEAS DE ELECTRODOS.	5
2.2 CIRCUITOS DE FILTRADO Y AMPLIFICACIÓN.	8
III. CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE SENSORES PARA DETECCIÓN DE LAS ONDAS DE RADIO AMBIENTALES.	
3.1 CONSTRUCCIÓN DE BOBINAS PARA ENSAYOS DE DETECCIÓN EN EL LABORATORIO.	9
3.2 ENSAYOS DE REGISTRO DE SEÑALES DE RADIO EN EL LABORATORIO.	9
3.3 ELABORACIÓN DE PROGRAMA DE REGISTRO EN 2 CANALES.	12
3.4 PRUEBAS CON LOS SENSORES DE ONDAS DE RADIO Y ELABORACIÓN DEL PROGRAMA DE CAPTURA Y PROCESAMIENTO.	12
3.5 INSTALACIÓN DE LOS SENSORES DE RADIOFRECUENCIA EN EL EXTERIOR.	15
IV. PRUEBAS DE CAMPO DEL SISTEMA Y ANÁLISIS DE ARCHIVOS PARA LAS SEÑALES ELÉCTRICAS.	
4.1 ARCHIVOS DE LAS SEÑALES ELÉCTRICAS.	16
4.2 PROGRAMA DE ANÁLISIS DE LAS SEÑALES ELÉCTRICAS.	20
V. PRUEBAS DE CAMPO Y ANÁLISIS DE ARCHIVOS PARA LAS SEÑALES DE RADIO.	
5.1. ANÁLISIS DE LAS SEÑALES DE RADIOFRECUENCIA.	26
5.2 CONCLUSIONES.	33
VI. MODIFICACIONES A LOS PROGRAMAS DE CAPTURA Y ANÁLISIS DE ARCHIVOS.	
6.1 COMPARACIÓN DE LAS SEÑALES ELÉCTRICAS Y DE RADIOFRECUENCIA CON LOS SISMOS REPORTADOS POR EL SERVICIO SISMOLÓGICO NACIONAL.	34
6.2 ANÁLISIS SIMULTÁNEO DE LAS SEÑALES SÍSMICAS Y LOS POSIBLES PRECURSORES.	35
6.3 BREVE DESCRIPCIÓN DEL SISMÓGRAFO.	36

6.4 PROGRAMA MODIFICADO.	37
VII. CONCLUSIONES.	41
REFERENCIAS	42

I. INTRODUCCION.

1.1 LOS CAMPOS ELECTRICOS DEL SUELO Y LAS ONDAS DE RADIO COMO POSIBLES PRECURSORES SISMICOS.

Un objetivo que parece utópico es la detección de señales físicas que indiquen con un tiempo adecuado de anticipación la ocurrencia de un sismo. En la actualidad hay posturas contrarias en el ámbito de la comunidad científica respecto a este tema. Las hay, que consideran imposible el registro de tales señales [1], y las hay de quienes a pesar de todas las dificultades y razones en contra, persisten en buscar tales señales.

En las pasadas décadas la creencia en que efectivamente existían tales señales y que además era posible registrarlas, resurgió a partir de los trabajos de los investigadores griegos Varotsos, Alexopoulos y Nomicos, quienes afirmaban que el registro de las perturbaciones del campo eléctrico del suelo abría esta posibilidad. Su método, conocido como “método VAN” por las iniciales de sus apellidos, fue explicado en diferentes trabajos [2], y esencialmente consiste en registrar el voltaje del suelo entre diferentes electrodos enterrados a lo largo de líneas perpendiculares. El voltaje registrado se deberá a la influencia de diferentes fuentes; por ejemplo, a que muchas máquinas eléctricas al tener una conexión física a la tierra depositarán en ella importantes cantidades de carga eléctrica. Durante una tormenta eléctrica, los rayos también inyectarán cargas importantes en el suelo, etc. El método VAN propone una técnica para discriminar de entre todas las señales aquellas que provengan de una fuente sísmica y se explicará en detalle más adelante.

Otros investigadores han propuesto que hay señales de tipo electromagnético que también aparecen antes de un sismo, y éstas son perturbaciones en las ondas de radio ambientales que pueden aparecer en diferentes frecuencias. En este caso también se plantea, y aún de manera más aguda, el problema de discriminar las señales de radio producidas por una fuente sísmica, de aquellas producidas por fuentes artificiales o naturales como son las emisoras de las estaciones de radio, de televisión, los sistemas de telefonía, y aún las ondas de radio producidas durante una tormenta eléctrica o por un rayo. La forma como se propone discriminar a todas estas señales también se explicará más adelante.

1.2 ALGUNAS DE LAS RAZONES PARA ASOCIAR PERTURBACIONES ELECTRICAS Y ELECTROMAGNETICAS A LA OCURRENCIA DE UN SISMO.

Es sabido que en la corteza terrestre los minerales de silicatos son los más abundantes formando el 95 % de ella, y que de estos silicatos el cuarzo es el componente principal de muchos tipos de rocas y de hecho el mineral más abundante [3], [4], [5]; este material tiene la propiedad de ser piezoeléctrico, es decir, que bajo compresión genera señales eléctricas; como un sismo es producido por la acumulación a lo largo de muchos años de esfuerzos gigantescos entre las diferentes placas que conforman la corteza terrestre, es de esperar que estos esfuerzos sobre materiales piezoeléctricos generen señales eléctricas, las cuales, en caso de ser detectadas jugarían el papel de precursores sísmicos.

En cuanto a la posibilidad de emisiones de radio causadas por la ruptura de las fallas sísmicas se puede aducir las siguientes razones:

Durante las explosiones producidas para fragmentar la roca en canteras algunos investigadores detectaron emisiones de radiofrecuencia [6], [7]; los registros se detectaron en la banda audible, esto es entre los 20 y los 20 KHz. Los registros se hicieron acoplando antenas rectas tipo monopolo a una grabadora de audio, y las señales se analizaron en computadora una vez que fueron digitalizadas. Se propuso que el mecanismo principal que genera la radiación es alguna forma de separación de cargas producida durante la fractura de las rocas. Ahora bien, las fragmentaciones de roca a gran escala que ocurren durante un sismo, también deben implicar la generación de señales de radio, tres mecanismos propuestos son:

- Efectos piezo magnéticos
- Efectos electrocinéticos
- Inducción

Sin embargo, en un temblor la energía de la radiación de alta frecuencia generada a grandes profundidades debe ser atenuada durante su propagación a través de la tierra, y solamente la radiación de baja frecuencia es probable que tenga la posibilidad de atravesar las capas de la corteza terrestre y llegar a la superficie.

Detectar las señales electromagnéticas asociadas a la ocurrencia de un sismo puede ser de interés por las siguientes razones: a) Contiene información acerca de los procesos que ocurren durante la generación de un sismo, b) Puesto que las ondas electromagnéticas se generan durante todo el proceso de fracturación previo a la gran fractura que provoca un gran sismo, su detección puede jugar el papel de detección de los precursores que anuncian la ocurrencia de un sismo y por tanto puede facilitar la puesta en práctica de acciones de prevención.

1.3 REGISTROS ASOCIADOS A LA OCURRENCIA DE SISMOS.

En cuanto a las correlaciones que se han establecido en forma directa entre las perturbaciones en la radiación electromagnética y la ocurrencia de sismos algunos investigadores [8], utilizando un arreglo experimental conformado por:

Una antena circular de 3 m de diámetro y 50 vueltas
Un receptor de radio en la banda de 14 KHz-600 KHz
Un modulador
Un integrador
Un graficador

en el Space Radio Wave Observatory de Sugadaira, Japón, luego de monitorear diversas frecuencias encontraron que a 81 KHz la señal sufría un incremento de entre 15 y 20 decibeles una hora antes de un sismo de 6.1 grados, y otro de 5 decibeles en la réplica; algo semejante ocurrió durante un sismo de 5 grados .

Medidas semejantes se han desarrollado en Japón [9], pero en la frecuencia de 163 KHz; en este caso se cuentan los pulsos de radiación por hora que superan un cierto umbral, seleccionando solamente las señales que aparecen y desaparecen en forma abrupta. Se reportan resultados de 2 años de monitoreo y se encuentra que de 22 sismos solamente 8 presentaron anomalías asociadas como son el incremento del número de pulsos antes y después de la ocurrencia de un sismo en períodos que van desde horas hasta días. Se propone que los sismos que no presentaron anomalías es debido a las capas de agua que se interponen entre la estación y el foco, ya que estos sismos ocurrieron en el fondo del mar. Se encuentra, como veremos más adelante, que las respuestas más sensibles del sistema se dan en las horas centradas en la medianoche, cuando cesa relativamente la actividad humana que puede generar señales de radio artificiales..

1.4 CONCLUSIONES.

Algunas de las conclusiones que se plantean de estos resultados son:

- a) Que la ruptura de la falla sísmica trae consigo la emisión de energía eléctrica y electromagnética, ya que el cuarzo, que es uno de los principales componentes de la corteza terrestre, debido a su naturaleza piezoeléctrica conlleva a la generación de campos eléctricos y la emisión de ondas de radio en una amplia gama de frecuencias.
- b) Que es posible que de todas las ondas de radio producidas durante la fractura de las masas de material piezoeléctrico las que puedan propagarse a distancias mayores sean las de frecuencia baja.
- c) Que afortunadamente de todas las bandas en que se ha dividido el espectro de ondas de radio (ver tabla 1), es la banda más baja la que está

menos contaminada por señales artificiales, y por ello es conveniente seleccionar esta banda para desarrollar un monitoreo continuo y detectar posibles anomalías asociadas a la ocurrencia de sismos.

<i>Banda</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>Longitud de onda</i>
MBF	3 KHz – 30 KHz	100 Km – 10 Km
BF	30 KHz – 300 KHz	10 Km – 1 Km
FM	300 KHz – 3 MHz	1 Km – 100 m
AF	3 MHz – 30 MHz	100 m – 10 m
MAF	30 MHz – 300 MHz	10 m – 1 m
UAF	300 MHz – 3 GHz	1 m – 10 cm
SAF	3 GHz – 30 GHz	10 cm – 1 cm
EAF	30 GHz – ...	1 cm - ...

Tabla 1. Bandas de frecuencia

II INSTALACION DE SENSORES PARA DETECCION DE PERTURBACIONES EN EL CAMPO ELECTRICO DEL SUELO.

2.1 INSTALACIONES DE LAS LINEAS DE ELECTRODOS.

En esta etapa del trabajo se instaló un sistema de sensores enterrados en el suelo para registrar los cambios del campo eléctrico subterráneo que, de acuerdo con el método VAN (expuesto en el capítulo anterior), se dan antes de la ocurrencia de un sismo.

Si se supone que la fuente del campo eléctrico es de origen sísmico, y más específicamente, debido a la compresión de las placas tectónicas, entonces a gran distancia de la zona fracturada, el cambio en el campo eléctrico debe afectar de manera general a amplias zonas del terreno, y el cambio en el campo será el mismo si se considera que el material del suelo es homogéneo. Bajo estos supuestos la diferencia de voltaje entre 2 puntos dados del terreno en magnitud será proporcional a la distancia entre esos puntos.

$$E = -dV/dL \quad (1)$$

y por tanto

$$V = E.L \quad (2)$$

De lo cual se deduce que la diferencia de voltaje registrada entre dos electrodos enterrados en el suelo sobre una misma línea, en caso de ser generada por una fuente de carga lejana y de gran magnitud, será proporcional a la distancia entre electrodos.

Así, este tipo de cambios en el campo eléctrico del suelo a lo largo de una línea de electrodos deberán de aparecer simultáneamente entre todo par de electrodos que tengan la misma referencia, pero con magnitudes que dependerán de su separación relativa. Este criterio, por otra parte, discrimina los cambios en el campo eléctrico producidos por fuentes cercanas, tales como las descargas a tierra de las corrientes que típicamente se realizan a través de barras metálicas enterradas en el suelo cerca de los cimientos de los edificios, para eliminar ruidos e inestabilidades de los instrumentos, o cualquier otro tipo de fuentes locales, ya que en estos casos los cambios de voltaje no serán proporcionales a la distancia entre electrodos.

En la figura 2.1 se ve el arreglo de electrodos que se instalaron en el suelo en las cercanías del laboratorio. Las figuras 2.3 y 2.4 muestran las líneas de electrodos.

La experiencia muestra que los electrodos de fierro recubiertos con cobre se oxidan y se corroen fácilmente por acción de la humedad del suelo, por ello se

utilizaron como electrodos barras de acero inoxidable de $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro y 50 cm. de longitud. Para unir firmemente el cable de cobre que lo conectará a los sistemas de registro de la señal, se hizo una cuerda en un extremo de la barra, y con un tornillo se sujetó fuertemente el extremo del cable terminado en forma de rosca, tal como se observa en la figura 2.1. Finalmente, para evitar la corrosión del cobre expuesto se recubrió ésta parte con barniz impermeabilizante.

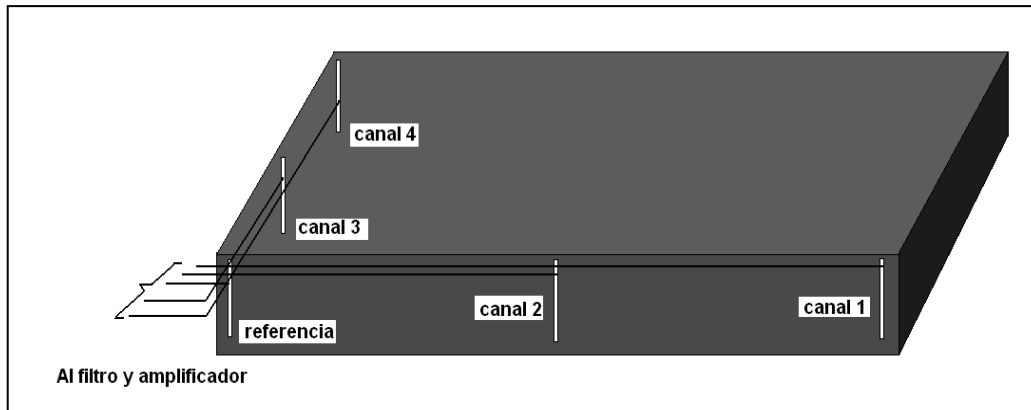


Fig. 2.1.- Arreglo de los electrodos enterrados en el suelo en las cercanías del laboratorio.

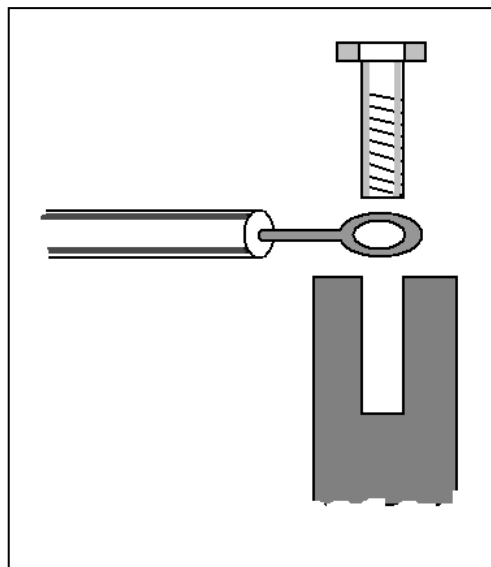


Fig. 2.2.- Conexión de la barra de acero inoxidable al cable que llevará la señal al sistema de registro.



Fig. 2.3.- Forma como se enterraron los electrodos.



Fig. 2.4.- Tendido de las líneas para cada electrodo.

2.2 . CIRCUITOS DE FILTRADO Y AMPLIFICACIÓN.

Puesto que las señales que se detectan son de muy pequeña amplitud (unos cuantos mv.) es necesario eliminar el ruido de fondo que usualmente es de 60 Hz, así como realizar una etapa de amplificación. El filtro y amplificador que se seleccionó es el que se muestra en la figura 2.5, es un filtro pasabajos con una atenuación de la amplitud en función de la frecuencia como la que se muestra en la figura 2.6.

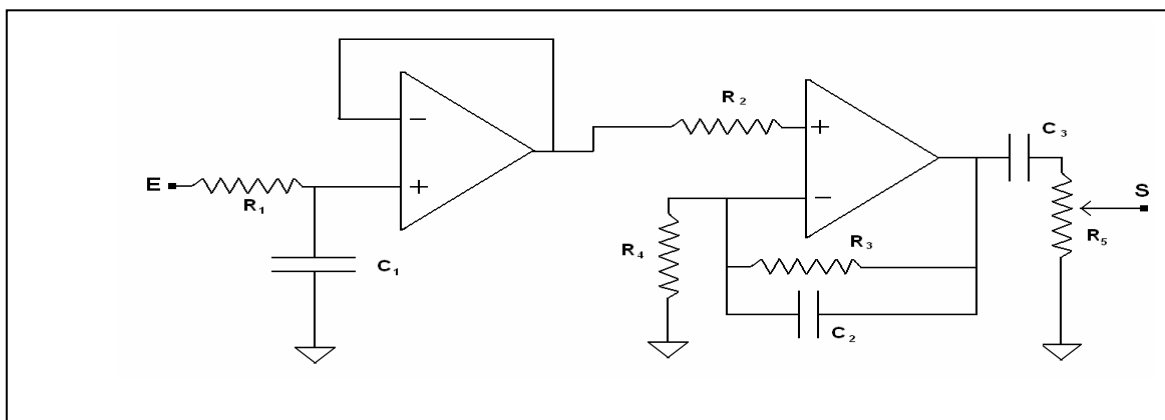


Fig. 2.5.- Circuito para filtrar ($f_c = 5 \text{ Hz}$) y amplificar la señal ($A = 100$). Los valores de las resistencias y capacitores son: $R_1 = 270 \, \Omega$, $R_2 = 100 \, \Omega$, $R_3 = 100 \text{ K } \Omega$, $R_4 = 1 \text{ K } \Omega$, $R_5 = \text{pot. de } 100 \text{ K } \Omega$; $C_1 = 47 \, \mu\text{F}$, $C_2 = 0.47 \, \mu\text{F}$, y $C_3 = 470 \, \mu\text{F}$.

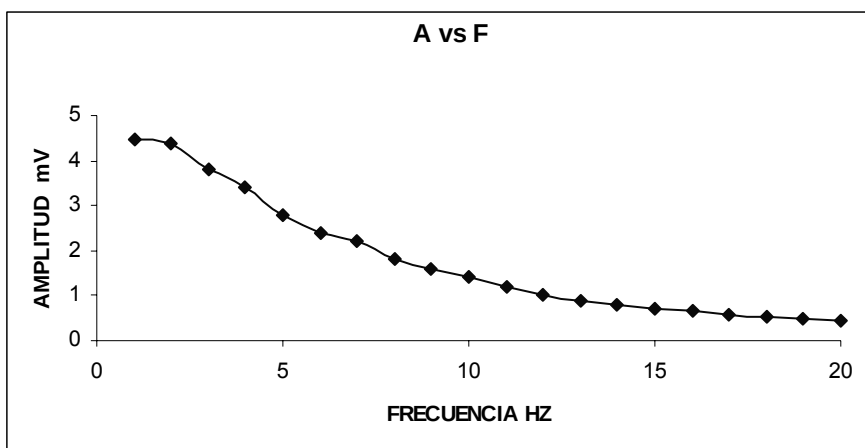


Fig. 2.6.- Curva de atenuación para el filtro de la figura 5.

De esta manera el filtrado y amplificación se realizó para cada uno de los 4 canales de los electrodos enterrados en el suelo. Después de esto se conectó la salida de los circuitos a la tarjeta PC-LPM- 16PNP de National Instruments, para realizar posteriormente la captura y el procesamiento de los datos.

III. CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE SENSORES PARA DETECCIÓN DE LAS ONDAS DE RADIO AMBIENTALES.

3.1 CONSTRUCCIÓN DE BOBINAS PARA ENSAYOS DE DETECCIÓN EN EL LABORATORIO.

Puesto que, de acuerdo a la tabla 1 del capítulo 1, las longitudes de onda características de la banda de MBF no permiten la construcción de antenas resonantes para detectar la radiación electromagnética ambiental, ya que sus dimensiones tendrían que ser del orden de las decenas de kilómetros, se hicieron 3 tipos diferentes de bobinas: a) una de 11 cm de largo con 1000 vueltas y un radio interior de 0.5 cm, b) otra de 2 cm de largo con 10 000 vueltas y un radio interior de 1 cm, y c) una de 11 cm de largo con 700 vueltas con un radio interior de 8 cm. Fig. 3.1



Fig 3.1. Tipo de bobinas construidas.

3.2 ENSAYOS DE REGISTRO DE SEÑALES DE RADIO EN EL LABORATORIO

Los primeros ensayos de registro se hicieron usando como emisor de radiofrecuencia una bobina de 50 vueltas de alambre magneto calibre 22 conectada directamente a un generador de funciones, pero limitando la corriente con una resistencia de 100 Ω . En cuanto a la bobina receptora ésta se conectó directamente a un osciloscopio de memoria. La señal detectada fue muy débil en todos los casos y fácilmente se confundía con el ruido.

En función de los resultados anteriores, se diseñó y construyó un circuito pasabanda que amplifica la señal original. El circuito consta de las siguientes etapas:

- a) Circuitos tipo amplificador inversor tal como el que se muestra en la figura 3.2.

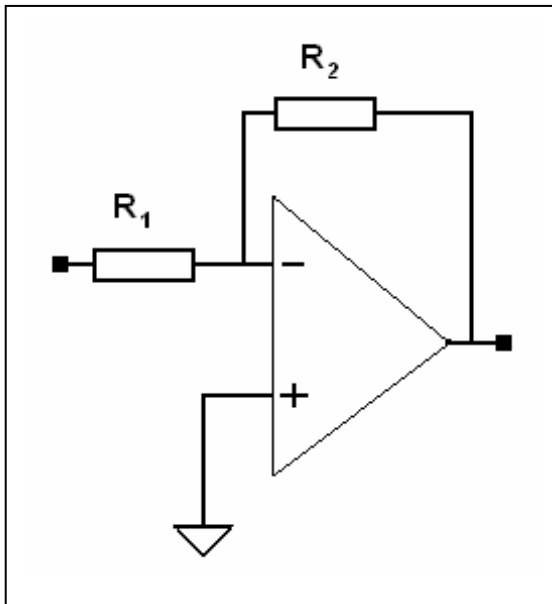


Fig. 3.2. Amplificador inversor, la ganancia está dada por R_2/R_1 .

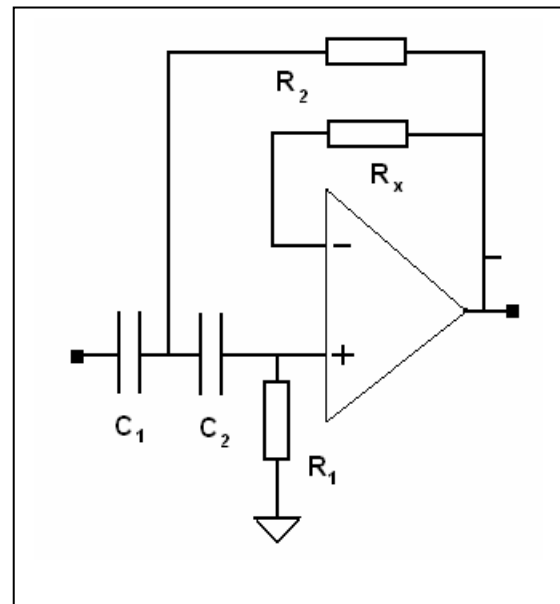


Fig. 3.3. Filtro pasa-alta.

b) Dado que una frecuencia ambiental de gran amplitud es la de 60 Hz, generada por los aparatos y dispositivos conectados a las líneas de alimentación, en caso de que las señales de radio de baja frecuencia se amplifiquen, la señal de 60 Hz saturará los detectores, por ello es necesario filtrar la señal ambiental y para esto recurrimos a un filtro pasa-altas como el de la figura 3.3.

En el circuito pasa –altas los valores de los elementos se han seleccionado de tal manera que $C_1 = C_2 = C$, $R_1 = R_x = R$ y $R_2 = R_1/2$, en este caso la frecuencia de corte está dada por la relación

$$f_c = \frac{\sqrt{2}}{2\pi RC} \quad [10].$$

c) Luego de la etapa de filtrado se agregaron otras dos etapas de amplificación tal como se ve en la figura 3.4, y de esta manera la amplificación total es de 1000. Ahora bien, en teoría el circuito total debería operar como un filtro amplificador pasa alta, pero al probarlo con un generador de funciones ha funcionado como un filtro pasa banda que satisface nuestros requerimientos, esto es, que deja pasar la banda que va de los 200 a los 10 000 Hz tal como se observa en la figura 3.5.

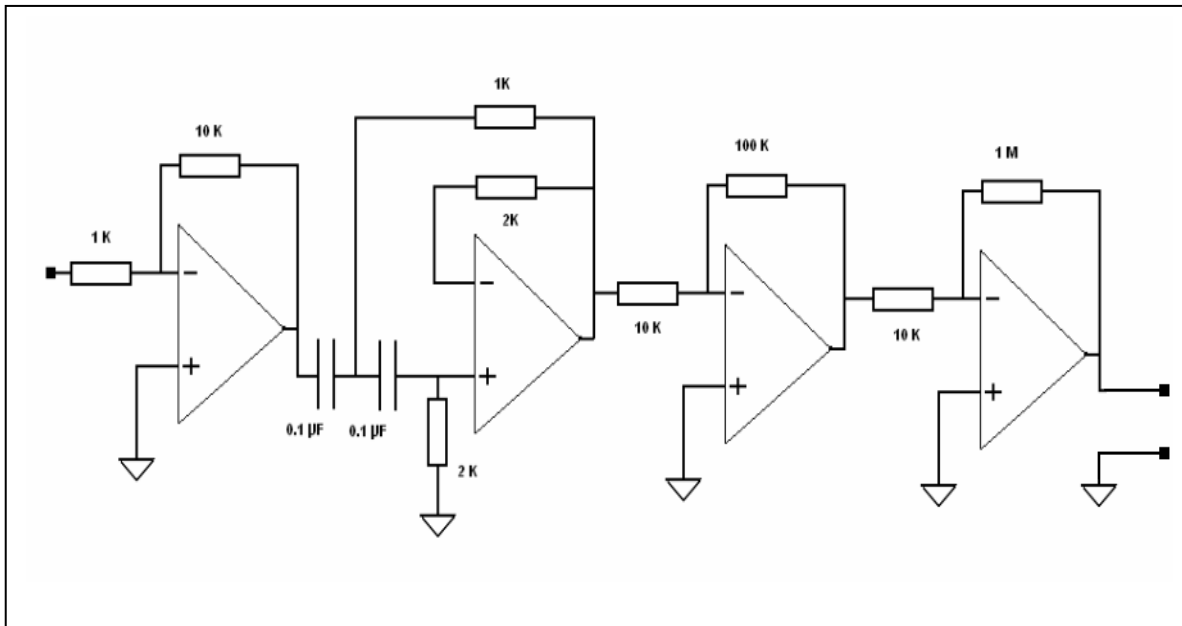


Fig. 3.4. Circuito amplificador y pasabanda en el que se muestran los valores utilizados

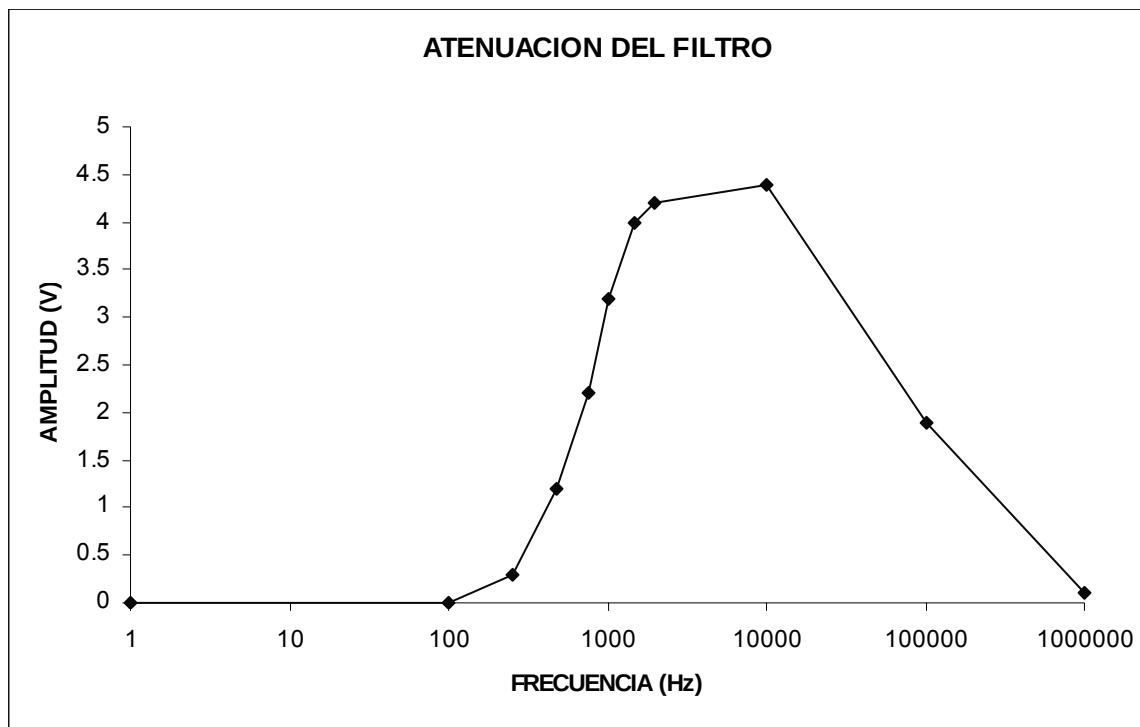


Fig. 3.5.- Curva de atenuación del circuito total.

3.3 ELABORACIÓN DE PROGRAMA DE REGISTRO EN 2 CANALES

Se elaboró un programa en lenguaje gráfico de LabVIEW para que en modo osciloscopio mostrara la señal en 2 canales. Para las primeras etapas de pruebas de laboratorio este programa no muestrea de manera continua, sino que se programa el número de muestras que se quieren capturar y la frecuencia del muestreo. El programa cuenta con cursores para seleccionar la parte de la señal que se quiere analizar, así como diversas utilerías de acercamiento. Con este programa se puede visualizar también el espectro de frecuencias de la señal capturada, es decir, la gráfica de amplitud (Vrms) en función de la frecuencia. Fig. 3.6.

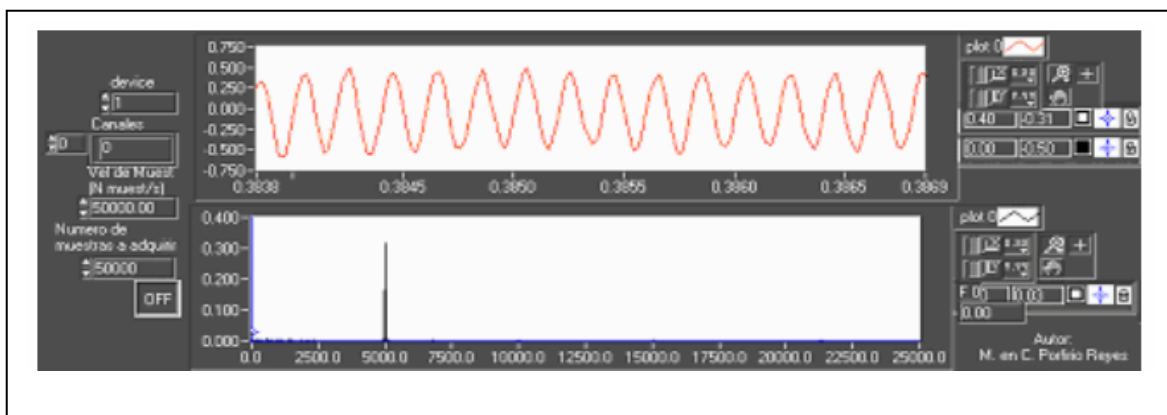


Figura 3.6.- Programa que exhibe en modo osciloscopio la señal y su contenido de frecuencias. El valor de la frecuencia de la señal senoidal se observa claramente en el analizador espectral de la parte inferior.

3.4 PRUEBAS CON LOS SENSORES DE ONDAS DE RADIO Y ELABORACIÓN DEL PROGRAMA DE CAPTURA Y PROCESAMIENTO

La bobina que tuvo mejor respuesta fue la de 11 cm de largo, 700 vueltas de alambre magneto y con un radio interior de 8 cm; para continuar las pruebas se instalaron 3 bobinas en el interior de nuestro laboratorio: una con el eje orientado en la dirección N-S, otra con el eje orientado en la dirección E-W, y otra con el eje perpendicular a la superficie de la tierra. . Una vez que la señal generada por ellas fue filtrada y amplificada se conectaron a la computadora a través de una tarjeta PC-LPM- 16PNP de National Instruments. Ahora bien, como para observar el comportamiento general del sistema era necesario tener las bobinas dentro del laboratorio para analizar de manera directa la forma como respondía el programa de registro, captura y procesamiento de las señales, hicimos el programa y dejamos para más adelante la instalación de los sensores en el exterior del laboratorio.

Elaboración del Programa de registro y procesamiento de señales.

Una vez que las señales de las bobinas han sido filtradas y amplificadas se les captura durante un tiempo de 50 ms a una frecuencia de muestreo de 20 mil muestras por segundo.

A las mil muestras capturadas se les aplica un análisis espectral de amplitud contra frecuencia.

Se divide la banda total que va de los 0 a los 10 000 Hz en 5 bandas:

Banda (Hz)

0 - 2000
2000 – 4000,
4000 – 6000,
6000 – 8000

Se mide para cada una de ellas el área bajo la curva.

El proceso se repite 20 veces durante aproximadamente un segundo y se suman para cada banda los 20 valores obtenidos.

Los valores sumados para cada banda se guardan en la memoria del disco duro.

El proceso se reinicia y continúa en forma indefinida hasta que el usuario decide detener el proceso de captura.

Todas las señales se muestran en tiempo real, en modo osciloscopio. El programa también muestra el análisis espectral de las señales de radiofrecuencia, así como el comportamiento de cada una de las 5 bandas correspondientes a las 3 bobinas.

En la figura 3.7 se muestra el panel virtual del programa.

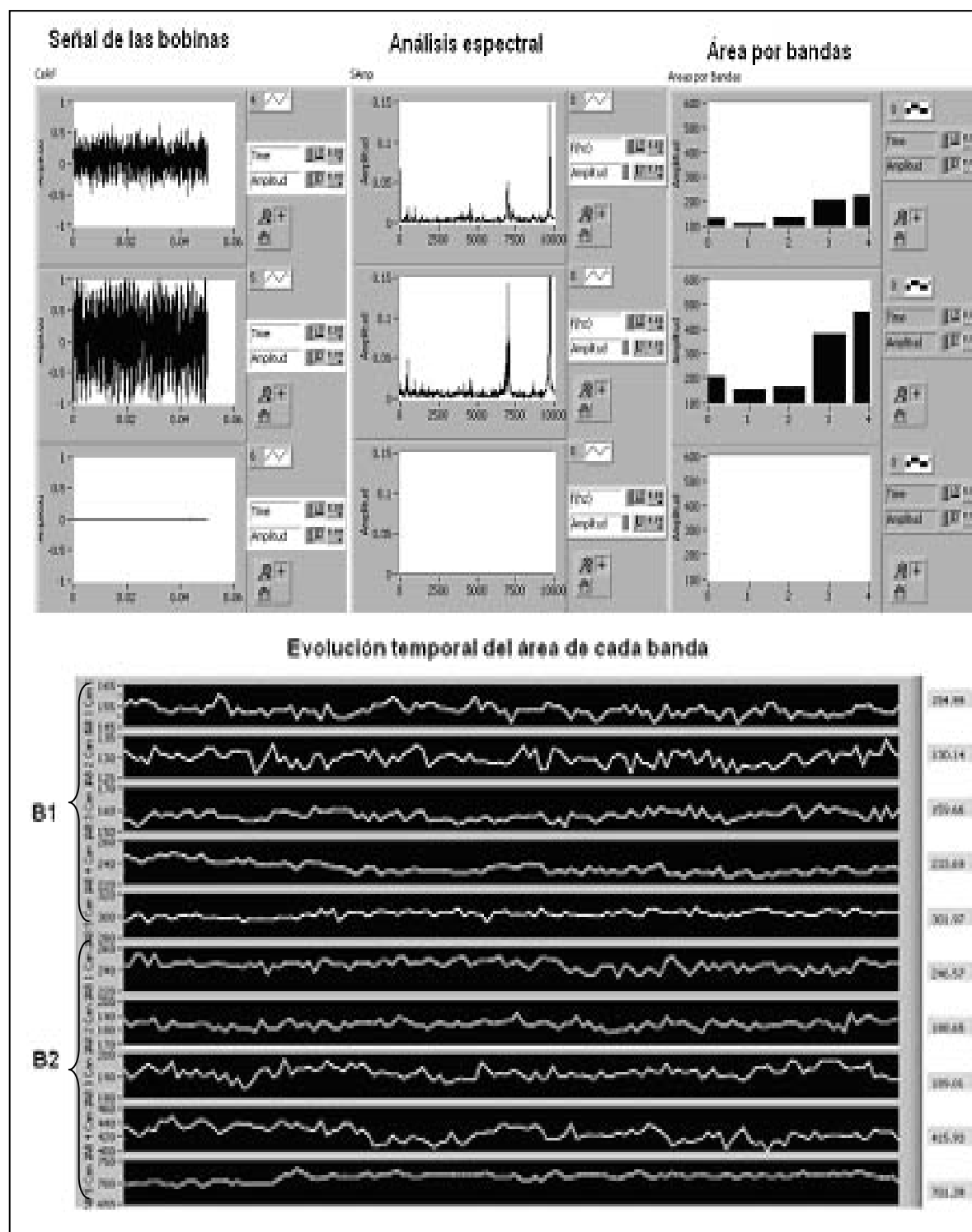


Fig. 3.7.- Panel del sistema de registro para la señal de las bobinas, así como evolución temporal del área para cada banda.

3.5 INSTALACIÓN DE LOS SENSORES DE RADIOFRECUENCIA EN EL EXTERIOR.

Una vez probado el programa con las 3 bobinas en el interior del laboratorio, se instalaron 2 bobinas en el exterior, en la azotea del edificio Z; Una de ellas fue orientada en sentido N-S, y la otra en sentido E-W respectivamente, la tercera se utilizó para pruebas dentro del laboratorio, considerando además que la orientación vertical solamente captaría el ruido propio de todas las máquinas e instrumentos instalados en los diferentes pisos del edificio.

En las figuras 3.8 y 3.9 se muestra la forma como fueron instaladas las bobinas.



Fig. 3.8.- Forma como se instalaron las bobinas en el techo del edificio Z.



Fig. 3.9.- En la foto se muestran las 2 bobinas orientadas perpendicularmente.

IV. PRUEBAS DE CAMPO DEL SISTEMA Y ANÁLISIS DE ARCHIVOS PARA LAS SEÑALES ELÉCTRICAS.

4.1 ARCHIVOS DE LAS SEÑALES ELÉCTRICAS

Con el programa de captura y procesamiento de las 4 señales de los electrodos y de las 3 bobinas, cuyo esquema de funcionamiento global se muestra en la figura 4.1, se hicieron pruebas de campo realizando muestreos de 24 horas, de 2 o 3 días seguidos, o de algunas horas, con el fin de conocer de qué tamaño eran los archivos correspondientes, la forma de las señales y en consecuencia desarrollar programas adecuados de análisis.

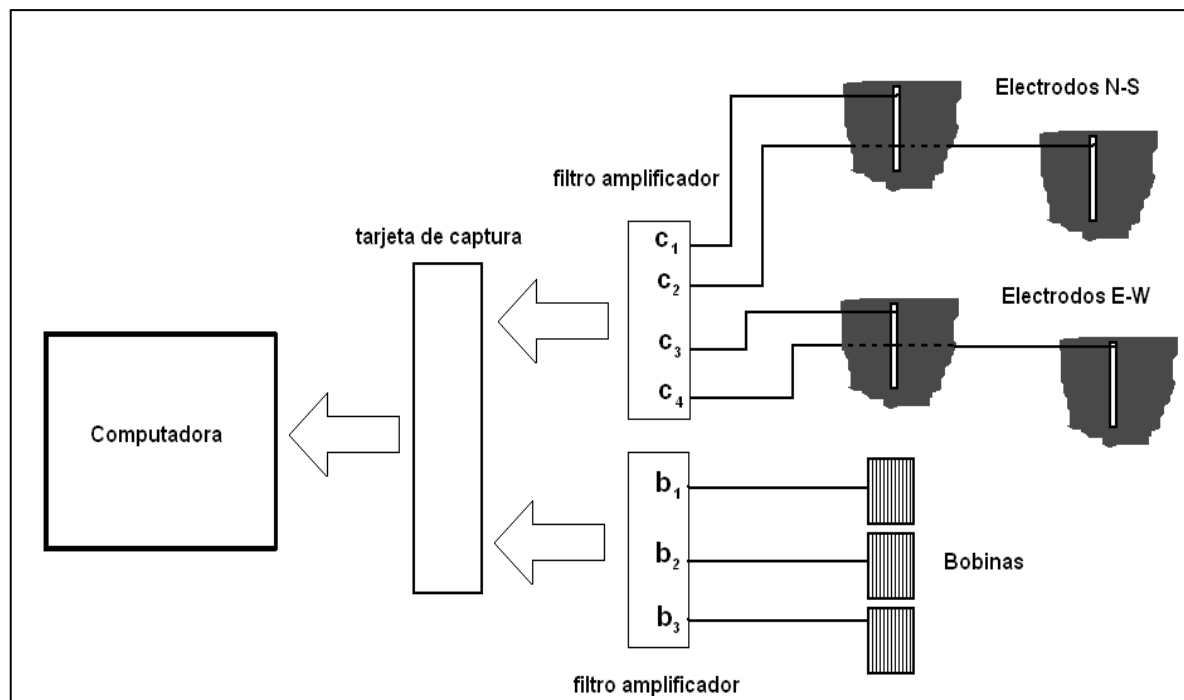


Fig. 4.1.- Esquema global del sistema de registros de las señales eléctricas y de radiofrecuencia.

Se realizaron cerca de 30 muestreos durante el período de pruebas de campo. Las figuras 4.2, 4.3 y 4.4 muestran algunos de los archivos típicos para las señales de los electrodos.

Como se observa en las gráficas a simple vista es posible detectar algunas perturbaciones que ocurren simultáneamente en algunos de los canales, sin embargo, dado que el objetivo de este trabajo es detectar no sólo la simultaneidad de las perturbaciones sino que sus amplitudes estén en la misma razón que la distancia entre electrodos, es preciso realizar, además de operaciones de acercamiento para comparar intervalos semejantes de la gráfica, filtrados pasabajas de diferente orden y con diferentes frecuencias de corte con el objeto de obtener análisis más precisos.

Por otra parte conviene visualizar la señal original junto con la señal filtrada, además de introducir cursores horizontales entre la parte inferior y superior de una determinada señal para establecer de manera precisa su magnitud. Para lograr todos estos objetivos es que hemos desarrollado el programa de análisis para las 4 señales de los electrodos que se describe en la siguiente sección.

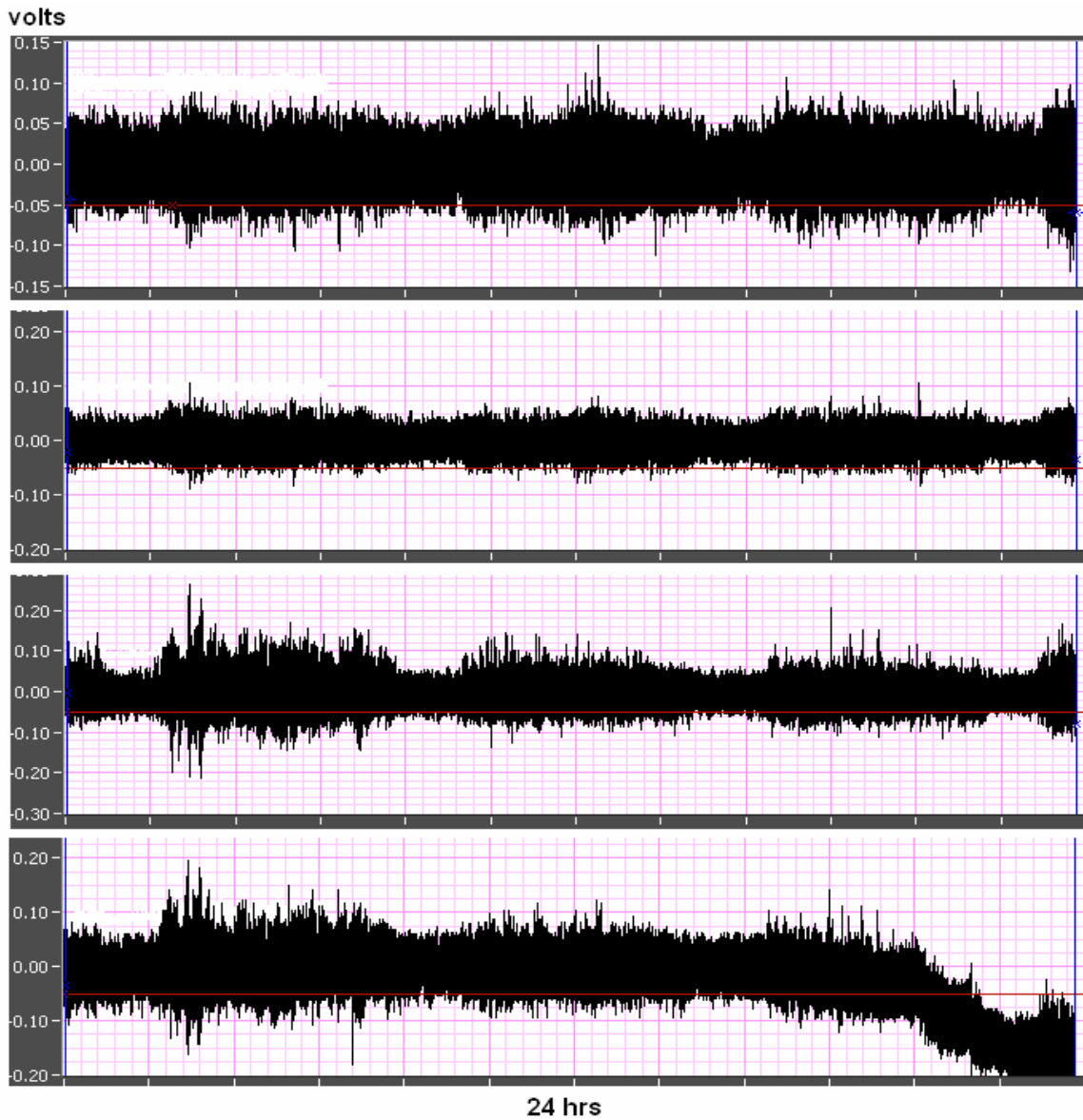


Fig. 4.2.- Archivo de 24 horas para las señales de los electrodos correspondiente al 1 de junio de 2006.

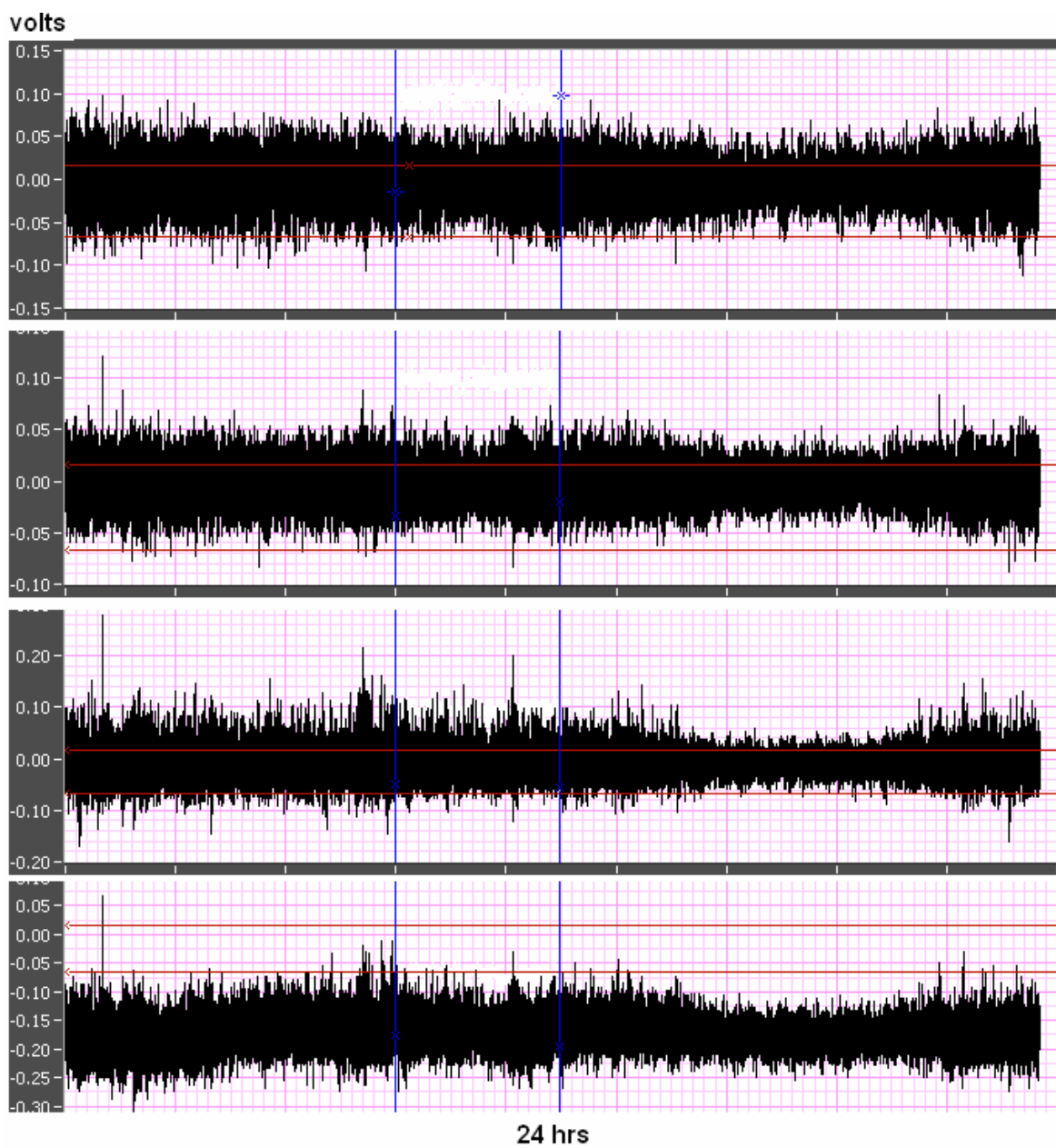


Fig. 4.3.- Archivo de 24 horas para las señales de los electrodos correspondiente al 5 de junio de 2006

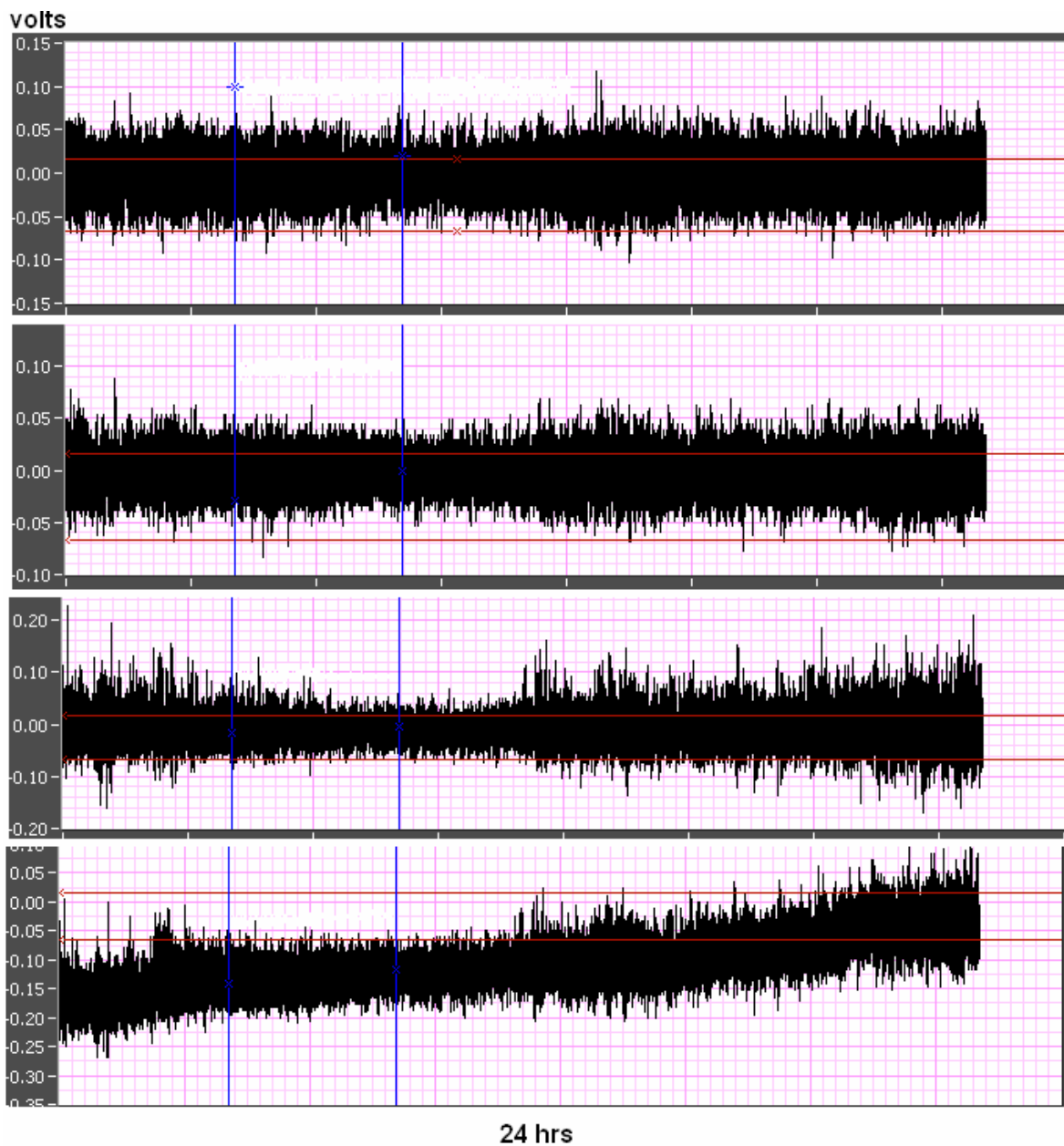


Fig. 4.4.- Archivo de 24 horas de las señales de los electrodos correspondiente al 6 de junio de 2006

4.2 PROGRAMA DE ANÁLISIS DE LAS SEÑALES ELÉCTRICAS

El programa desarrollado en lenguaje gráfico de LabVIEW tiene varias opciones que permiten hacer un análisis muy detallado de las señales eléctricas.

Canal Maestro

Dado que se analizan cuatro señales y se compara lo que ocurre simultáneamente en todos ellos, se tiene la opción de Canal Maestro, el cual indica en función de cual canal se analizan los 3 restantes, esto es: si por ejemplo en el canal 0 se encuentra una perturbación en el intervalo 3000 – 7000, es posible observar lo que ocurre en ese mismo intervalo para todos los demás canales en forma automática, con solo activar la instrucción escalar. Sin embargo también el programa presenta la opción de trabajar el análisis de los canales en forma independiente.



Fig.4.5.- Dispositivo virtual para seleccionar el canal en función del cual se analizarán todos los demás, el tipo de filtro, las frecuencias de corte y el orden del filtro digital.

Filtrado digital

El programa realiza un filtrado digital de tipo pasabajas, y tiene la opción de seleccionar el orden del filtro (1,2,3, etc) así como la frecuencia de corte; en la figura 4.5, por ejemplo, la Fc es de 0.05 Hz.

Panel frontal

El programa muestra en un panel virtual los archivos correspondientes a un período de muestreo. Como se observa en la figura 4.6, a primera vista la señal está compuesta de puro ruido, pero para analizarla en detalle es necesario aplicar acercamientos y filtrados que brinden más información.

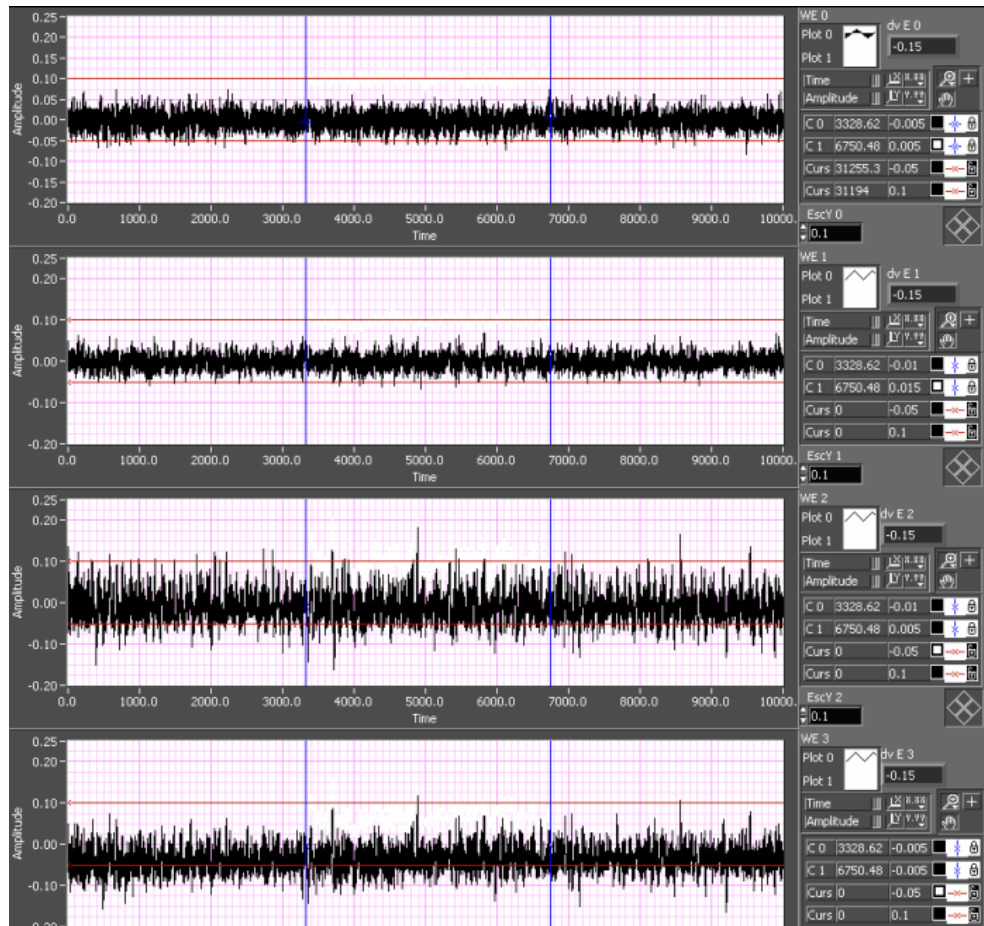


Fig. 4.6.- Panel frontal que muestra la gráfica de los archivos completos.

Separación de las señales filtradas

En la figura 4.7 se observa la siguiente etapa de análisis que permite el programa. En este caso la señal procesada se separa de la señal original, teniendo la opción de ver cada canal en diferentes colores así como el efecto de los diferentes filtros aplicados. El programa tiene también la opción de:

- variar el offset con el que la porción de señal analizada se separa de la señal original,
- seleccionar el segmento de señal a analizar mediante cursores,
- realizar diferentes tipos de acercamiento (horizontal, vertical, encuadre),
- autoescalamiento.

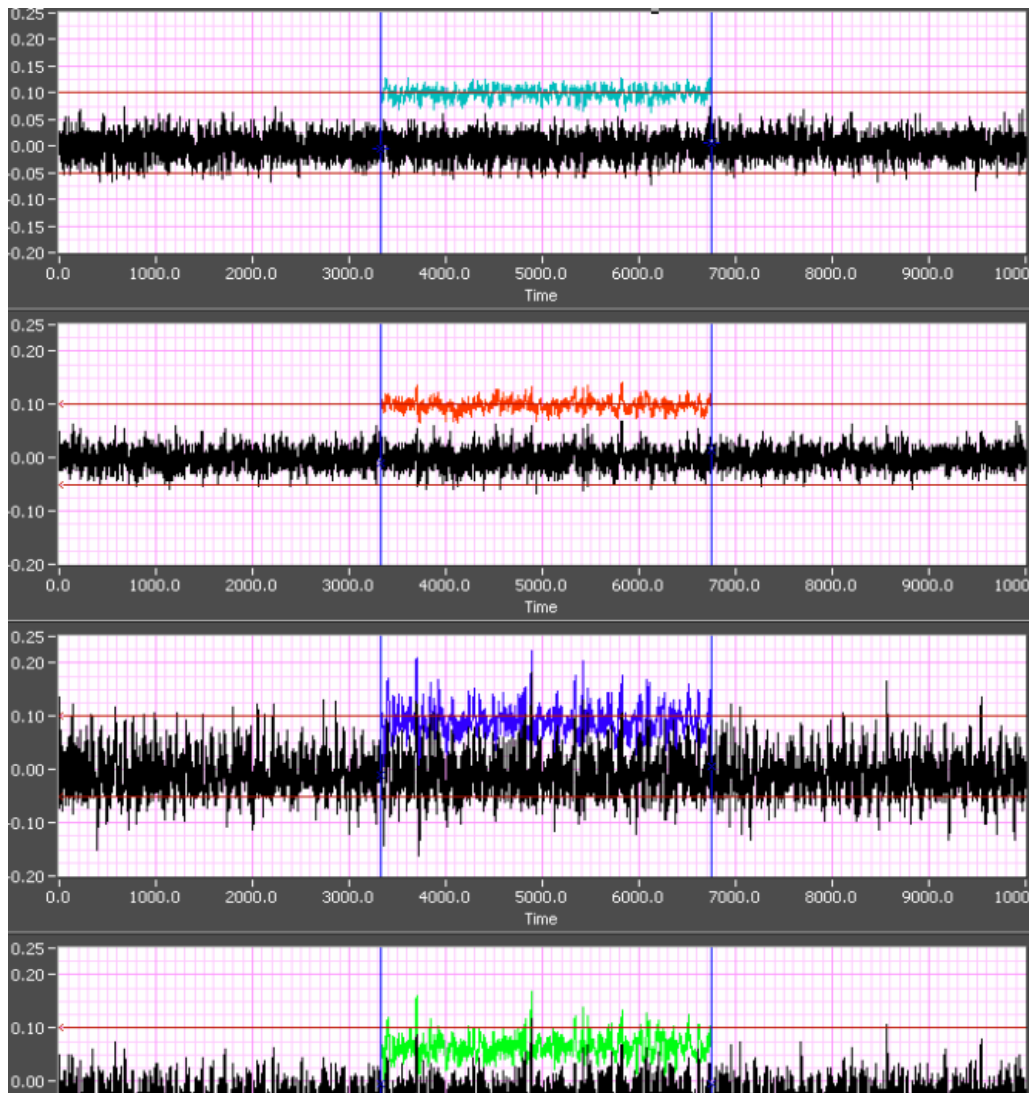


Fig. 4.7.- Separación de las señales filtradas.

Análisis detallado de la señal

La selección de una frecuencia de corte y un orden adecuados para el filtro pasabajas permite distinguir (ver figura 4.8) unas pequeñas perturbaciones indicadas con una flecha que sin el procesamiento eran imperceptibles. Un acercamiento final (figura 4.9) permite observar y medir con los cursores el tamaño de las señales coincidentes. Dado que su amplitud no está en la relación de proporcionalidad correspondientes a la separación entre electrodos, (2:1) se concluye que no son señales producidas por una fuente lejana, es decir, que no presentan las características que Varotsos propone para las señales electrosísmicas precursoras de un sismo. En la figura 4.10 se muestra otro análisis detallado de perturbaciones simultáneas pero cuyas amplitudes tampoco están en proporción de la separación entre electrodos.

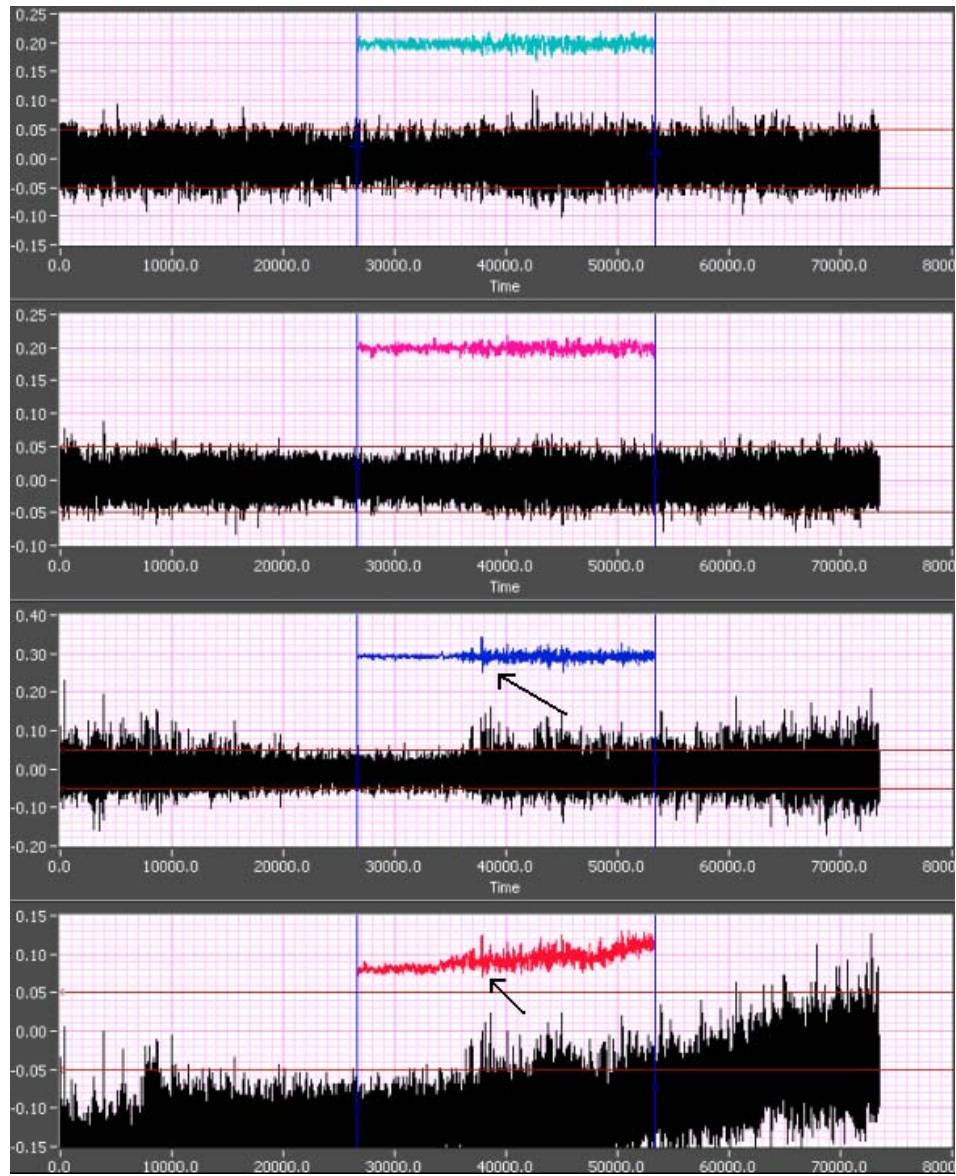


Fig. 4.8.- Detección de pequeñas perturbaciones con selección de filtros adecuados.

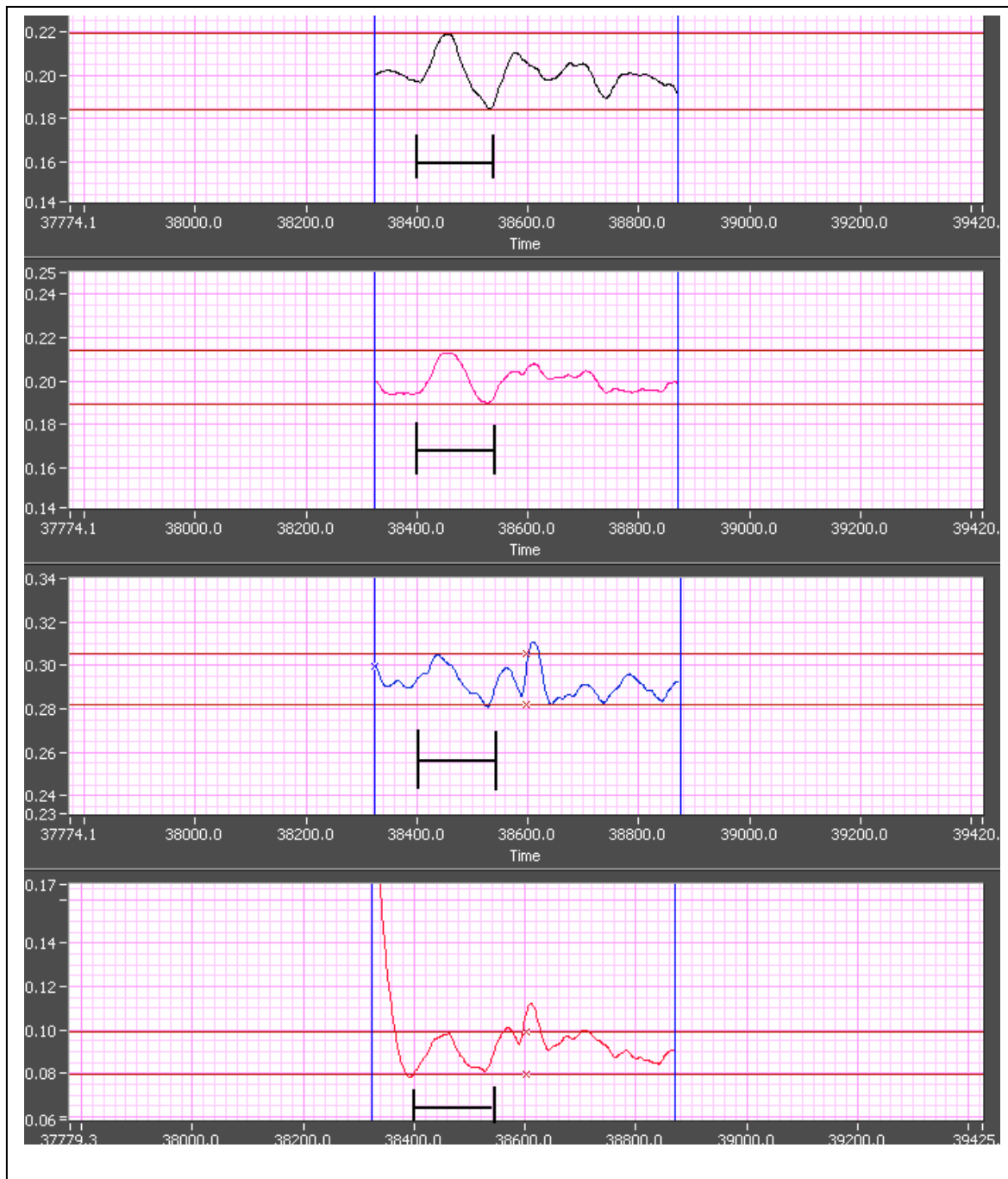


Fig. 4.9.- El análisis detallado de la señal dentro del intervalo marcado en la figura 8 permite observar su simultaneidad y su magnitud (entre cursores).
Obsérvese como el marcador temporal, permite comprobar su simultaneidad.

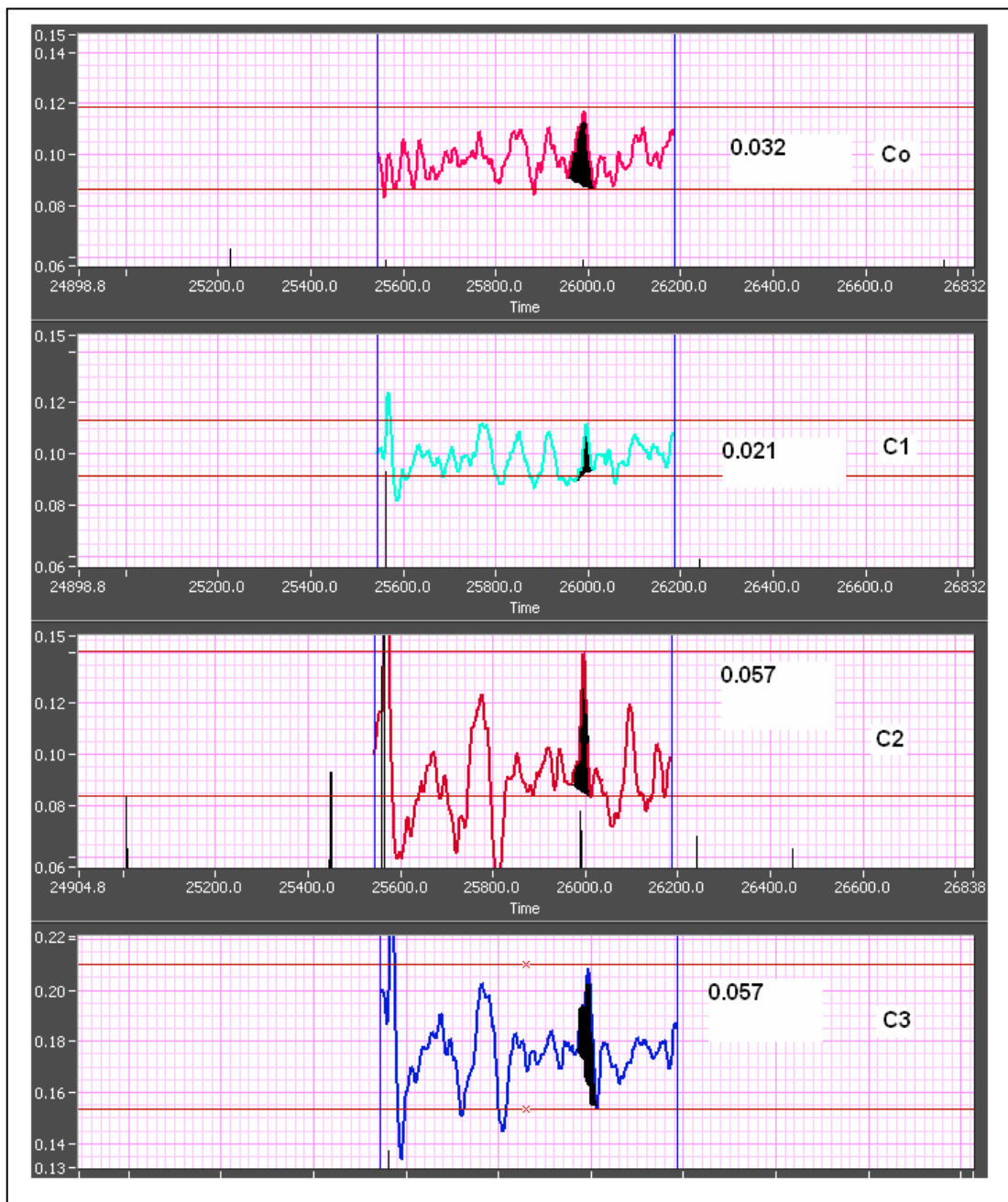


Fig. 4.10.- Se muestra en la figura otro caso de perturbaciones simultáneas marcadas con color negro junto con sus amplitudes. Su razón de amplitudes no indica que provengan de una fuente lejana.

V. PRUEBAS DE CAMPO Y ANÁLISIS DE ARCHIVOS PARA LAS SEÑALES DE RADIO

5.1. ANÁLISIS DE LAS SEÑALES DE RADIOFRECUENCIA

Programa de análisis de las señales de la bobinas

Se ha dividido el espectro de frecuencia, en 5 intervalos. En la figura 5.1, se presenta el espectro correspondiente a un día. Como se observa en la figura se visualizan para cada bobina las 5 bandas en diferentes colores y corresponden a los siguientes intervalos de frecuencia:

- | | |
|--------------------|----------|
| 1) 0-2000 Hz | Blanco |
| 2) 2000-4000 Hz | Rojo |
| 3) 4000 – 6000 Hz | Verde |
| 4) 6000 – 8000 Hz | Azul |
| 5) 8000- 10 000 Hz | Amarillo |



Fig. 5.1.- Panel frontal virtual que muestra el comportamiento de todas las bandas de las 2 bobinas en una corrida de 24 horas.

Después de analizar varios archivos de 24 hrs., se llegó a la conclusión de que las bandas 5 y 4 no son propias para el análisis, ya que presentan grandes fluctuaciones. Fig. 5.2.

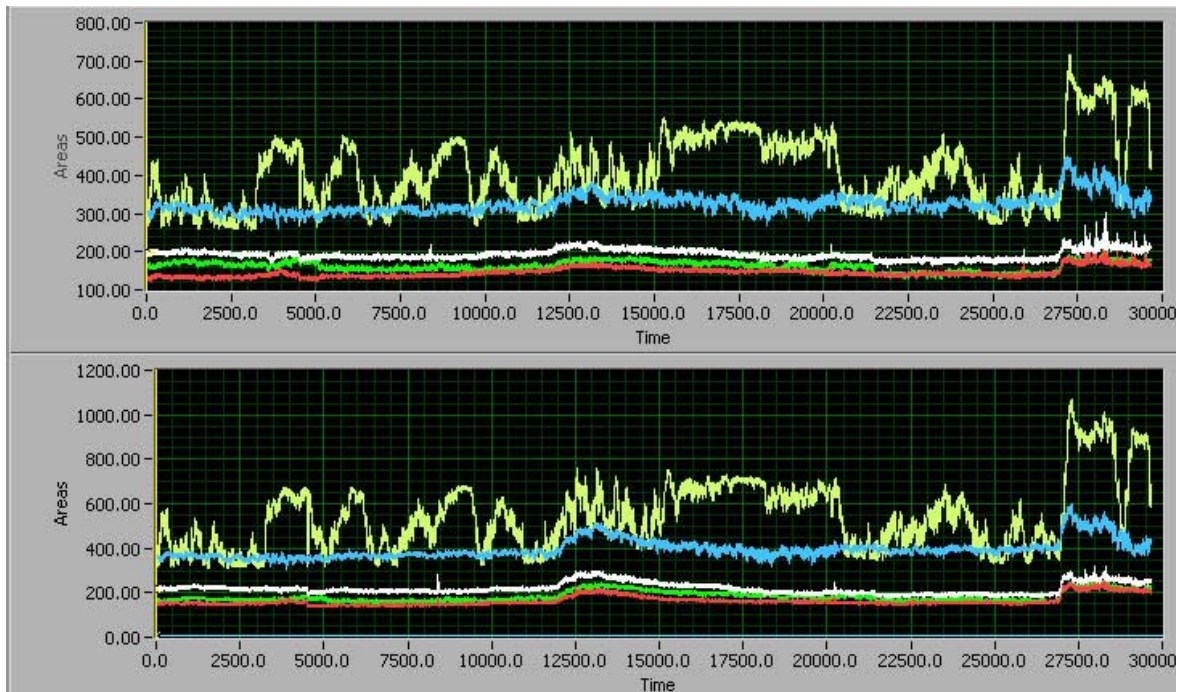


Fig. 5.2. Comportamiento de todas las bandas. Obsérvese en particular las bandas 4 y 5.

Así se concluye que las bandas 1, 2 y 3 son las aptas para realizar un análisis exhaustivo.

Análisis detallado de las señales

Una vez que se eligieron las 3 primeras bandas para su análisis, se monitoreó la señal proveniente de las bobinas por un periodo de un mes.

El análisis se efectuó por medio de un programa elaborado en Lab View (Fig. 5.3) el cual permite:

- Analizar por separado, el comportamiento de cada banda.
- Dar un seguimiento por hora de dicho comportamiento en función de la hora
- Colocar un umbral, el cual puede variar, que permite medir el número de pulsos que lo superen para cada hora.

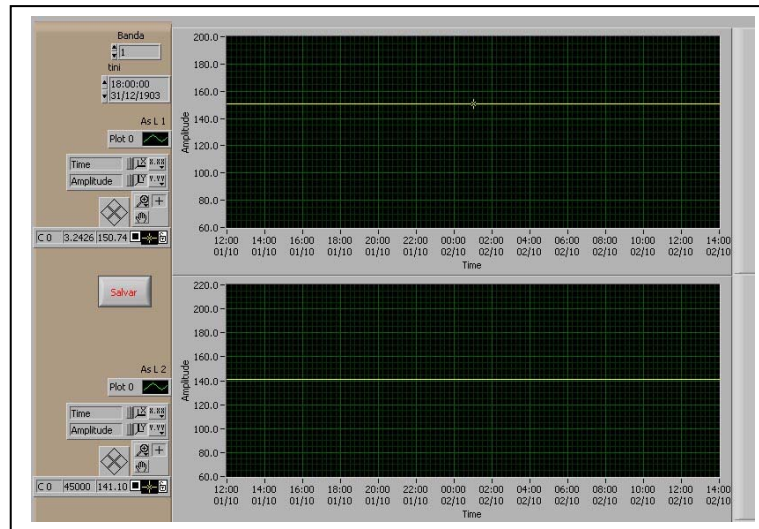


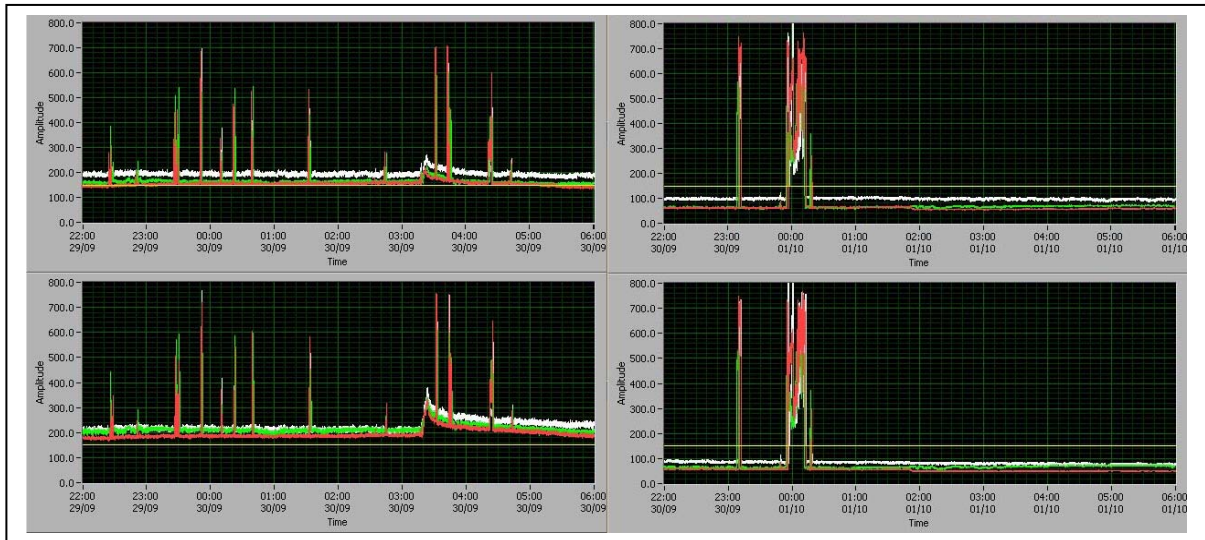
Fig. 5.3. Panel Frontal del programa de análisis que marca la hora en el eje horizontal.

Luego de examinar los archivos correspondientes a 10 días, se observó que existe en casi todos ellos, un intervalo de tiempo en el cual, las señales de las bobinas se estabilizan, por lo que se tomó la decisión de concentrar el análisis en este intervalo: de las 22:00 a las 6:00 hrs. del día siguiente. Ver Fig. 5.4.

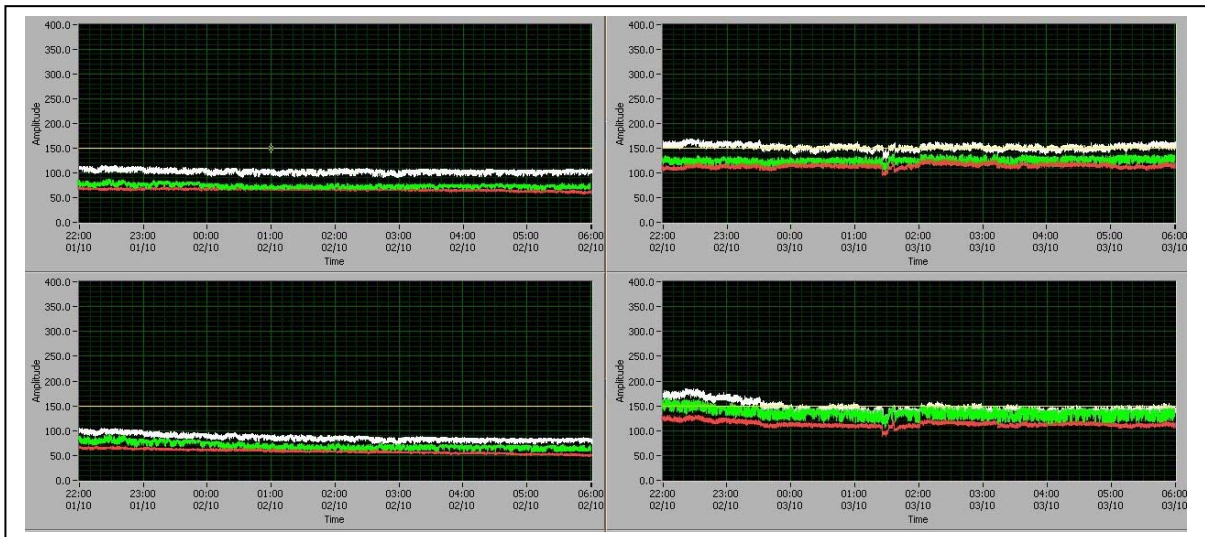


Fig. 5.4. Corrida de 24 hrs. Indicando el intervalo de 22:00 a 6:00 donde se estabiliza el espectro correspondiente a la banda 1 de la bobina N-S

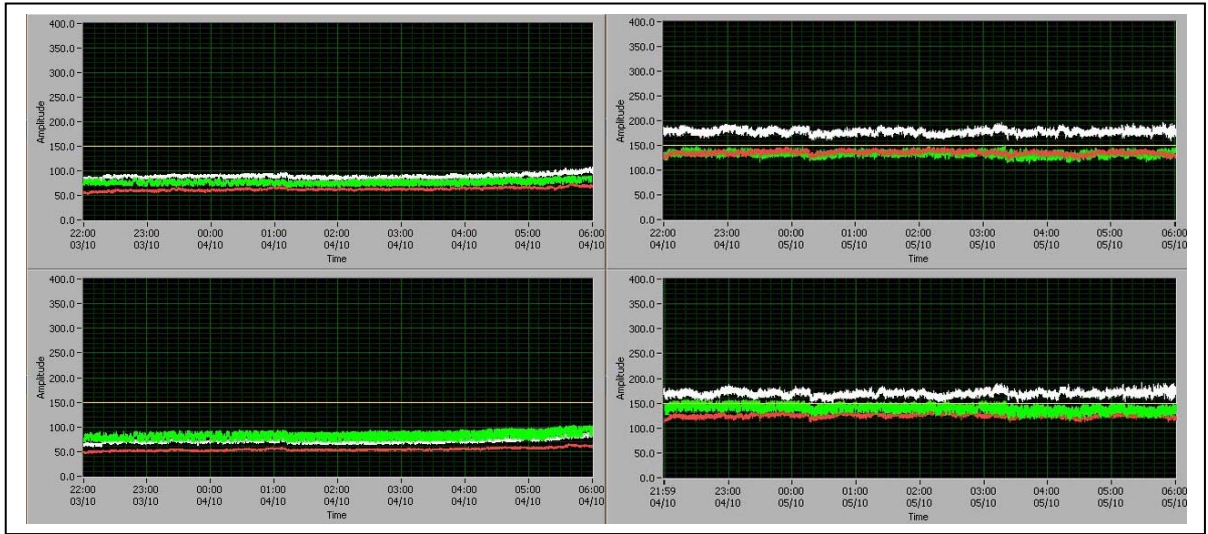
Se acotó y estandarizó el intervalo de tiempo, tomando el anteriormente mencionado. Para los 10 archivos de datos, el comportamiento mostrado se presenta en las siguientes figuras. 5.5 a 5.9



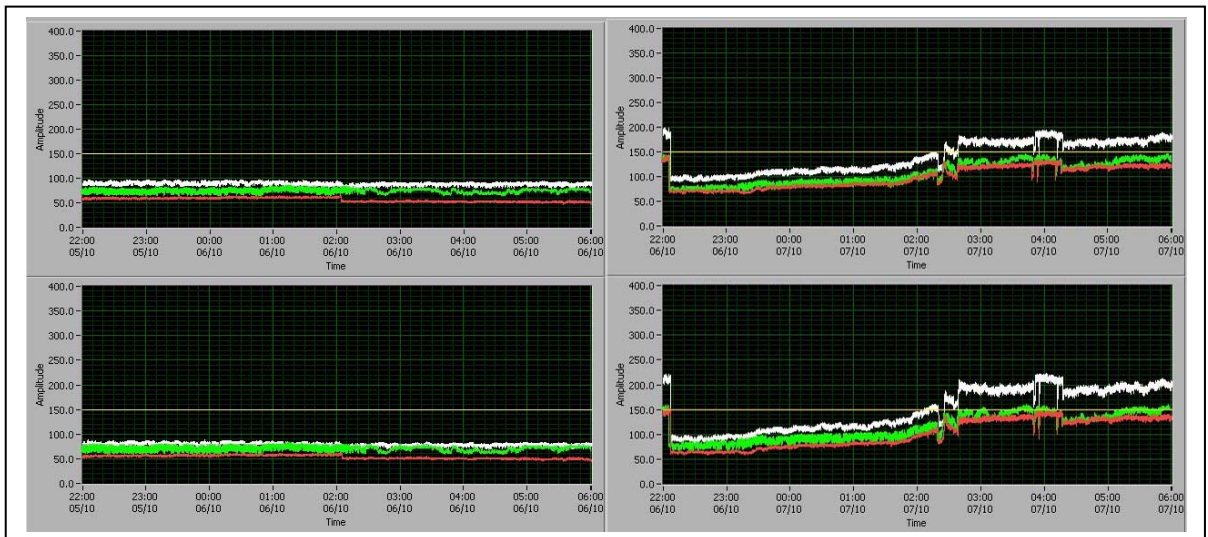
(A) (B)
Fig.5.5. Espectro de los días 29 al 30 (A) y del 30 de septiembre al 1° de octubre (B)



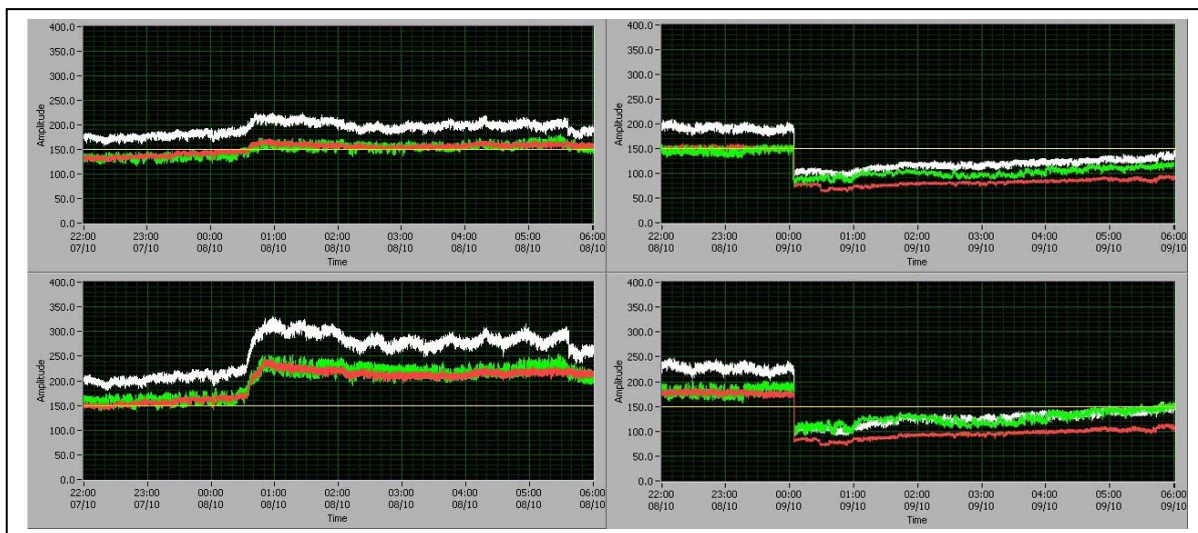
(A) (B)
Fig.5.6. Espectro de los días 1 al 2 de octubre (A) y del 2 al 3 de octubre. (B)



(A) (B)
Fig.5.7. Espectro de los días 3 al 4 de octubre (A) y del 4 al 5 de octubre (B).



(A) (B)
Fig.5.8. Espectro de los días 5 al 6 de octubre (A) y del 6 al 7 de octubre (B)



(A) (B)
Fig.5.9. Espectro de los días 7 al 8 de octubre (A) y del 8 al 9 de octubre (B).

Como se menciona anteriormente, el programa, cuenta con una opción que propone un valor umbral en la amplitud, con el fin de establecer un criterio de análisis en el caso de las señales de radiofrecuencia. Se grafica una corrida correspondiente a un archivo, se fija el valor umbral y se observa cuántos valores sobrepasan dicho valor propuesto, y en que horas, además el programa almacena en archivo los datos correspondientes a las 3 bandas para su análisis posterior. Fig 5.10. El programa permite seleccionar la banda a analizar.

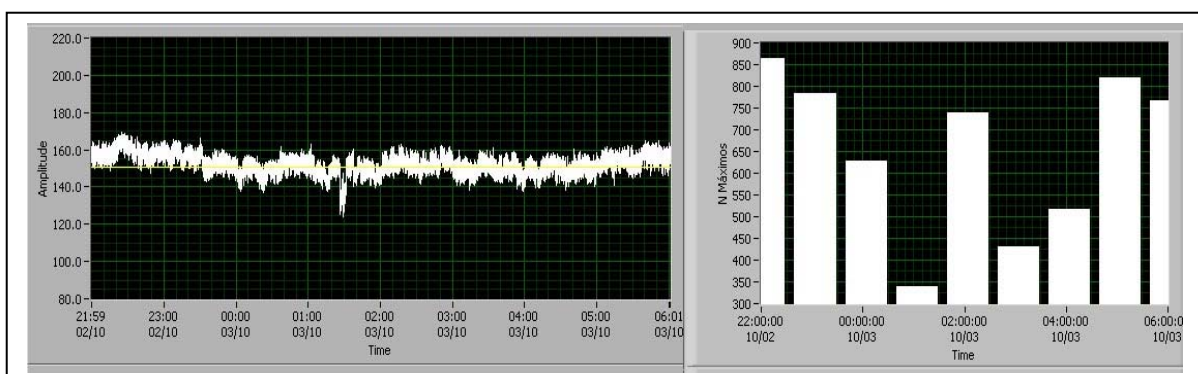


Fig. 5.10. Espectro correspondiente al intervalo de tiempo propuesto, que muestra el número de máximos que sobrepasan un valor umbral propuesto para la banda 1.

Al igual que para el caso de las señales eléctricas es conveniente hacer el análisis de las señales en función de una de la bobina para analizar lo que ocurre simultáneamente en las demás Fig. 5.11. Para ello se aplica una opción que nos permite trabajar en forma acoplada o independiente a las 3 bobinas. En el estudio,

sólo se consideran dos bobinas, una tercera se encuentra dentro del laboratorio para realizar pruebas con ella.

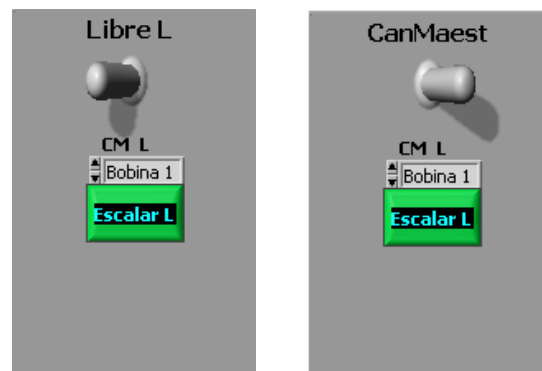


Figura 5.11.- Opciones para hacer el análisis de las 3 bobinas en forma independiente o en función de una de ellas.

Los procedimientos de acercamiento permiten comparar pequeñas perturbaciones ocurridas simultáneamente en las 3 bobinas en las bandas más estables. Por ejemplo, en la figura 5.12 se observa una pequeña perturbación en la banda 1 (0-2000 Hz, color blanco), y en la figura 5.13 se observan las perturbaciones con una amplificación tal que permite comparar su amplitud.

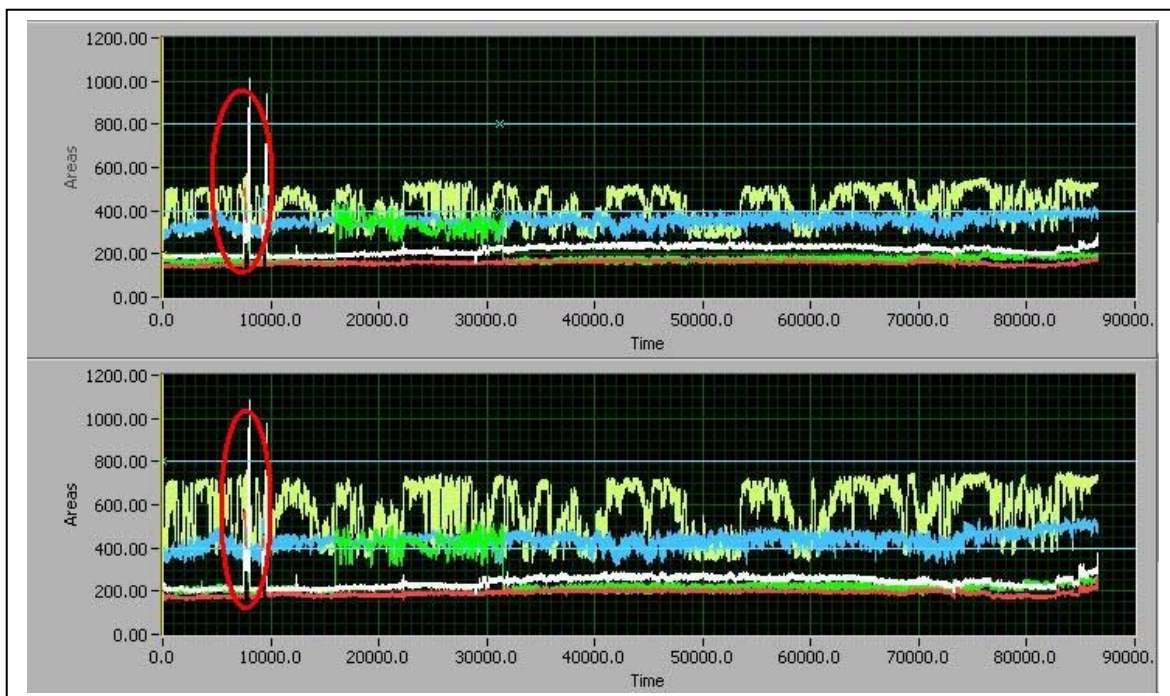


Figura 5.12.- Observamos cómo en la banda 1 (0-2000 Hz, color blanco) se presenta una perturbación.

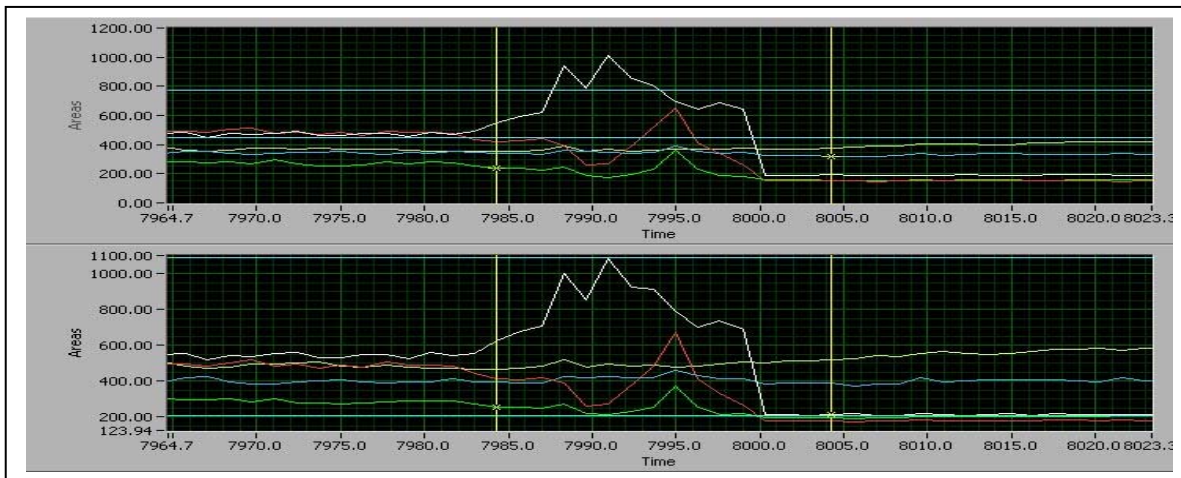


Figura 5.13.- Las herramientas del programa nos permiten amplificar las perturbaciones y medir su amplitud

El hecho de que su amplitud dependa del canal eventualmente permitirá determinar la dirección de la fuente.

5.2 CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un programa que permite análisis comparativos muy detallados de las perturbaciones que ocurren simultáneamente en los diferentes bobinas. Resta ahora saber si las perturbaciones están asociadas a la ocurrencia de sismos.

VI. MODIFICACIONES A LOS PROGRAMAS DE CAPTURA Y ANÁLISIS DE ARCHIVOS.

6.1 COMPARACIÓN DE LAS SEÑALES ELÉCTRICAS Y DE RADIOFRECUENCIA CON LOS SISMOS REPORTADOS POR EL SERVICIO SISMOLÓGICO NACIONAL.

Los últimos sismos superiores a $M = 3$ se muestran en la tabla 1[10] proporcionada por el Servicio Sismológico Nacional, en ella se observa que durante el período de muestreo continuo el mayor sismo fue de $M = 4.7$ ocurrido el 2 de agosto a las 20:04 hrs al suroeste de Manzanillo Colima.

Dado que el método VAN propone que hay alteraciones en el campo eléctrico del suelo que son solamente perceptibles en un medio físico alejado de los centros urbanos, es natural que no se haya detectado ninguna perturbación correlacionada con algún sismo, ya que de hecho la estación piloto está instalada en un medio sumamente urbanizado y diseñada para funcionar (cuando sea posible instalarla) en las costas de Guerrero y en zonas alejadas de las poblaciones importantes.

Evento	Fecha	Hora	Lat	Long	Prof(Km)	Mag	Zona.
01	2006/08/02	21:40:47	15.83	-98.40	15	3.9	68 km al SUROESTE de PINOTEPA NACIONAL, OAX
02	2006/08/02	20:04:36	18.40	-104.59	16	4.7	78 km al SUROESTE de MANZANILLO, COL
03	2006/08/02	19:49:49	16.51	-100.04	10	3.9	43 km al SUROESTE de ACAPULCO, GRO
04	2006/08/02	14:24:04	15.88	-96.27	40	3.5	19 km al NOROESTE de CRUCECITA, OAX
05	2006/08/02	13:17:15	15.67	-96.44	20	3.8	9 km al SURESTE de S PEDRO POCHUTLA, OAX
06	2006/08/02	08:37:42	16.32	-94.41	78	3.9	48 km al SURESTE de UNION HIDALGO, OAX
07	2006/08/02	02:01:30	14.98	-94.65	16	4.2	145 km al SURESTE de SALINA CRUZ, OAX
08	2006/08/02	01:04:26	16.59	-94.89	90	3.7	14 km al NOROESTE de UNION HIDALGO, OAX
09	2006/08/01	00:56:10	18.18	-104.45	10	4.0	97 km al SUR de MANZANILLO, COL
10(A)	2006/07/31	09:23:29	17.10	-100.19	38	3.4	15 km al NOROESTE de COYUCA DE BENITEZ, GRO
11(B)	2006/07/31	13:25:20	18.83	-104.11	10	5.2	19 km al SUROESTE de CD DE ARMERIA, COL
12(C)	2006/07/31	07:32:12	16.76	-101.80	16	4.2	101 km al SUROESTE de ZIHUATANEJO, GRO
13(D)	2006/07/31	04:53:40	17.06	-96.41	70	3.9	14 km al NORESTE de TLACOLULA, OAX
14(E)	2006/07/30	21:54:13	15.20	-93.04	60	4.3	31 km al SUROESTE de MAPASTEPEC, CHIS
15(F)	2006/07/30	03:17:09	17.02	-100.14	7	3.2	6 km al OESTE de COYUCA DE BENITEZ, GRO
16(G)	2006/07/29	15:06:24	15.46	-93.28	51	4.1	26 km al SUROESTE de PIJIAPAN, CHIS
17(H)	2006/07/28	14:13:40	16.27	-94.81	51	3.6	23 km al SUR de UNION HIDALGO, OAX
18(I)	2006/07/28	11:43:17	17.61	-95.12	137	3.6	35 km al SUROESTE de SAYULA DE ALEMAN, VER
19(J)	2006/07/25	21:58:01	16.86	-98.33	95	3.9	21 km al NORESTE de OMETEPEC, GRO
20(K)	2006/07/25	19:38:18	17.26	-95.07	129	3.6	43 km al NORTE de MATIAS ROMERO, OAX
21(L)	2006/07/25	16:45:02	15.74	-96.33	39	3.6	14 km al ESTE de S PEDRO POCHUTLA, OAX
22(M)	2006/07/25	12:43:36	15.99	-97.23	17	3.6	22 km al ESTE de RIO GRANDE, OAX
23(N)	2006/07/25	20:48:24	17.35	-100.49	25	4.0	17 km al NOROESTE de ATOYAC DE ALVAREZ, GRO
24(O)	2006/07/25	04:46:19	14.64	-94.42	42	4.5	174 km al SUROESTE de PIJIAPAN, CHIS
25(P)	2006/07/24	14:39:28	17.53	-97.98	63	4.2	37 km al SUROESTE de H HUAJUAPAN DE LEON, OAX
26(Q)	2006/07/23	05:03:13	17.16	-92.33	145	4.4	1 km al SUR de YAJALON, CHIS

Tabla 1.- Sismos recientes reportados por el SSN superiores a $M = 3$.

6.2 ANÁLISIS SIMULTÁNEO DE LAS SEÑALES SÍSMICAS Y LOS POSIBLES PRECURSORES.

Dado que por falta de personal de apoyo es complicado consultar diariamente al Servicio Sismológico Nacional para averiguar el reporte del sismo más reciente de magnitud importante, y comparar los archivos guardados de las señales posiblemente precursoras con el momento justo en que ocurrió el sismo, o con sus vecindades, se decidió desarrollar un nuevo programa de captura que incorpore en el panel frontal la señal sísmica tal como fue registrada en nuestro propio sistema que sensa los movimientos del suelo, para de esta manera hacer una comparación instantánea entre la perturbación sísmica y las posibles perturbaciones eléctricas y electromagnéticas asociadas. En la figura 6.1, se muestra el esquema global del nuevo sistema de análisis.

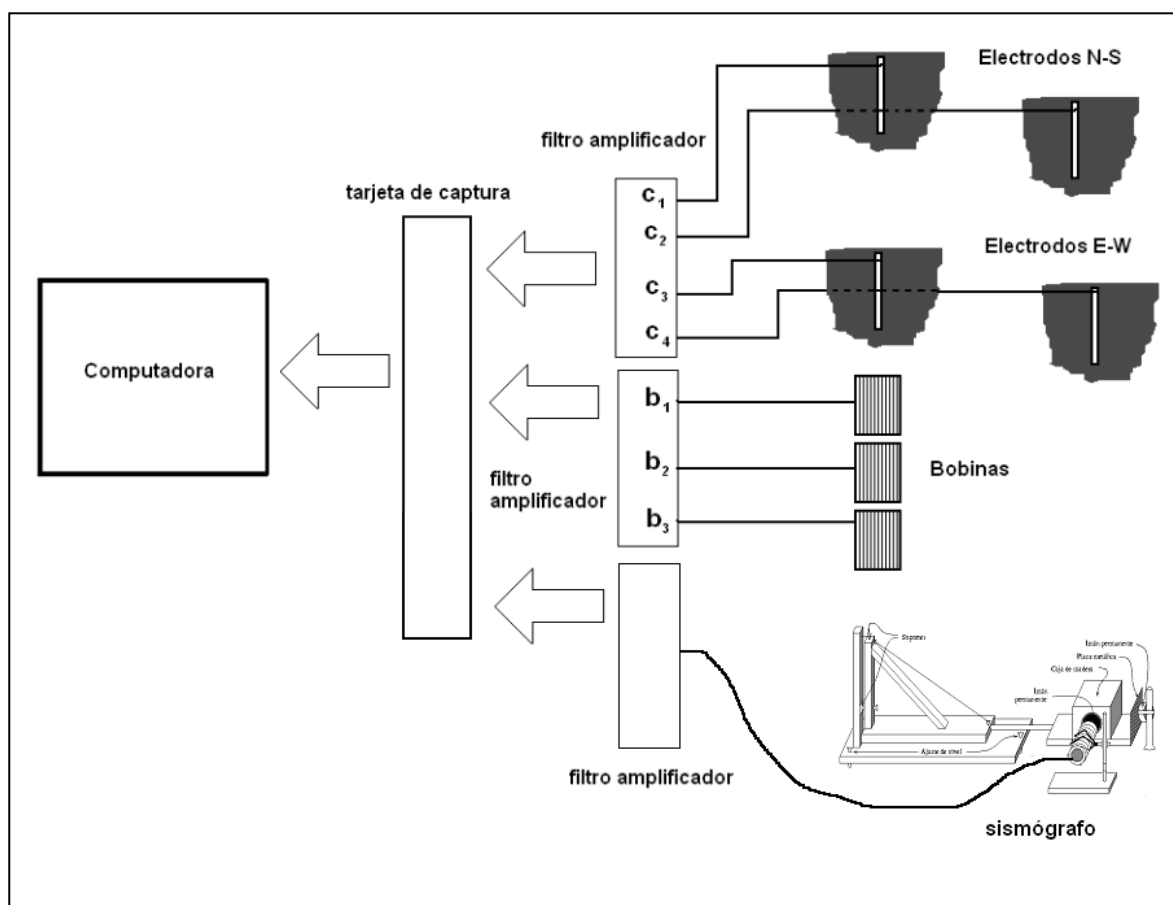


Fig. 6.1.- Nuevo esquema del sistema global de registro y análisis de posibles precursores sísmicos; en él se ha incorporado el registros de los sismogramas.

6.3 BREVE DESCRIPCIÓN DEL SISMÓGRAFO.

Con el objeto de detectar y analizar las diferentes ondas que se generan durante un sismo, se ha diseñado y construido un sismógrafo que consiste en un detector de los movimientos horizontales del suelo acoplado a un sistema de registro y análisis computarizado. Este sistema ha registrado el movimiento del suelo durante las 24 horas del día desde hace más de tres años, primero de manera intermitente y luego, durante los últimos dos años de manera continua (abril 2002- Junio 2004) . Todos los registros están en dispositivos de almacenamiento. Un programa complementario nos permite seleccionar los intervalos que contienen señales sísmicas para aplicarles diferentes tipos de análisis. Se hace uso de una tarjeta de captura y de programas elaborados con el lenguaje gráfico de LabVIEW. Como se ha señalado en el capítulo anterior, el fin de este sensor es identificar en la ciudad de México a las ondas P que preceden por algunas decenas de segundos a las ondas S, R y L y así eventualmente poder implementar una alarma sísmica.

Este detector con algunas modificaciones se basa en un diseño publicado por Lehman [1]; consta de un péndulo horizontal construido de madera y aluminio (figura 2.2) cuya longitud es de 1.2 m, con una frecuencia de oscilación natural de 0.22 Hertz. El péndulo pivotea sobre dos puntos de baja fricción situados en una placa vertical; la frecuencia de oscilación se puede regular con tres tornillos que orientan la base del péndulo; en el extremo libre del péndulo está montado un imán que es capaz de levantar 2 Kg de metal. Una bobina de 1000 vueltas colocada a 5mm del imán genera señales de voltaje proporcionales a la velocidad relativa imán-bobina. En una primera etapa estas señales son filtradas con una frecuencia de corte de 5 Hz, le sigue una etapa de amplificación de 1000 y un filtrado a frecuencia de corte de 30 Hz lograda mediante tres amplificadores inversores en serie con un factor de amplificación de 10 como el de la figura 6.2

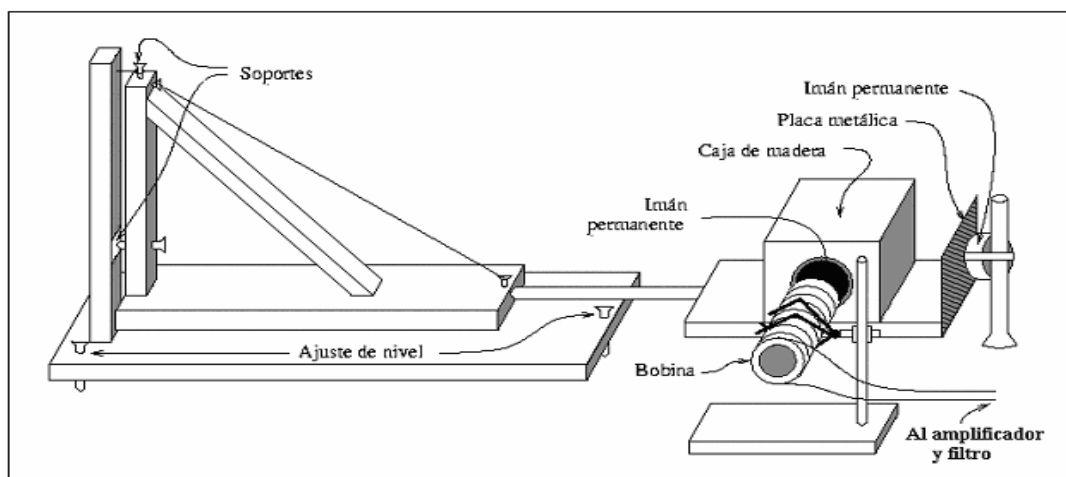


Fig. 6.2. Péndulo horizontal, el movimiento de la base produce un desplazamiento relativo entre el imán y la bobina que genera una señal de voltaje proporcional a la velocidad del desplazamiento relativo. El imán y la placa del extremo juegan un papel de amortiguación.

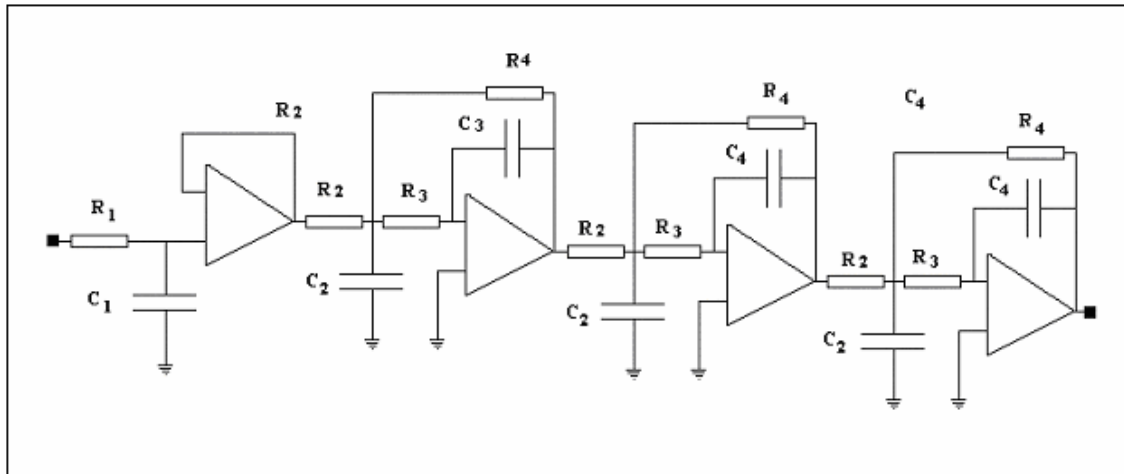


Fig. 6.3 Circuito de filtrado y amplificación

Una vez que las señales de la bobina han sido filtradas y amplificadas son capturadas con una tarjeta comercial PC-LPM- 16PNP de National Instruments, para ser procesadas y aplicar sobre ellas diferentes tipos de análisis. El programa de captura ha sido construido utilizando el lenguaje grafico G de LabVIEW y se ha ido modificando y afinando con la experiencia, en su última versión permite:

- * Mostrar la señal capturada en tiempo real en modo osciloscopio.
- * Seleccionar la frecuencia de muestreo
- * Programar la captura para un tiempo de 24 horas
- * Guardar automáticamente en un archivo las muestras capturadas
- * Reiniciar automáticamente el proceso de muestreo.

Las características del programa permiten reducir a un mínimo los tiempos muertos de captura, y la intervención humana se reduce a asegurarse que las fuentes de energía que alimentan a la computadora y a los circuitos no se interrumpan.

6.4 PROGRAMA MODIFICADO

El nuevo programa contiene las mismas herramientas de análisis del programa anterior, excepto que ahora permite visualizar simultáneamente la señal del sismógrafo así como las señales eléctricas y las de radiofrecuencia. En la figura 6.4 se muestra el panel virtual del programa y se puede observar cómo en el canal superior se muestra la señal del sismógrafo y en los inferiores las señales de los electrodos.

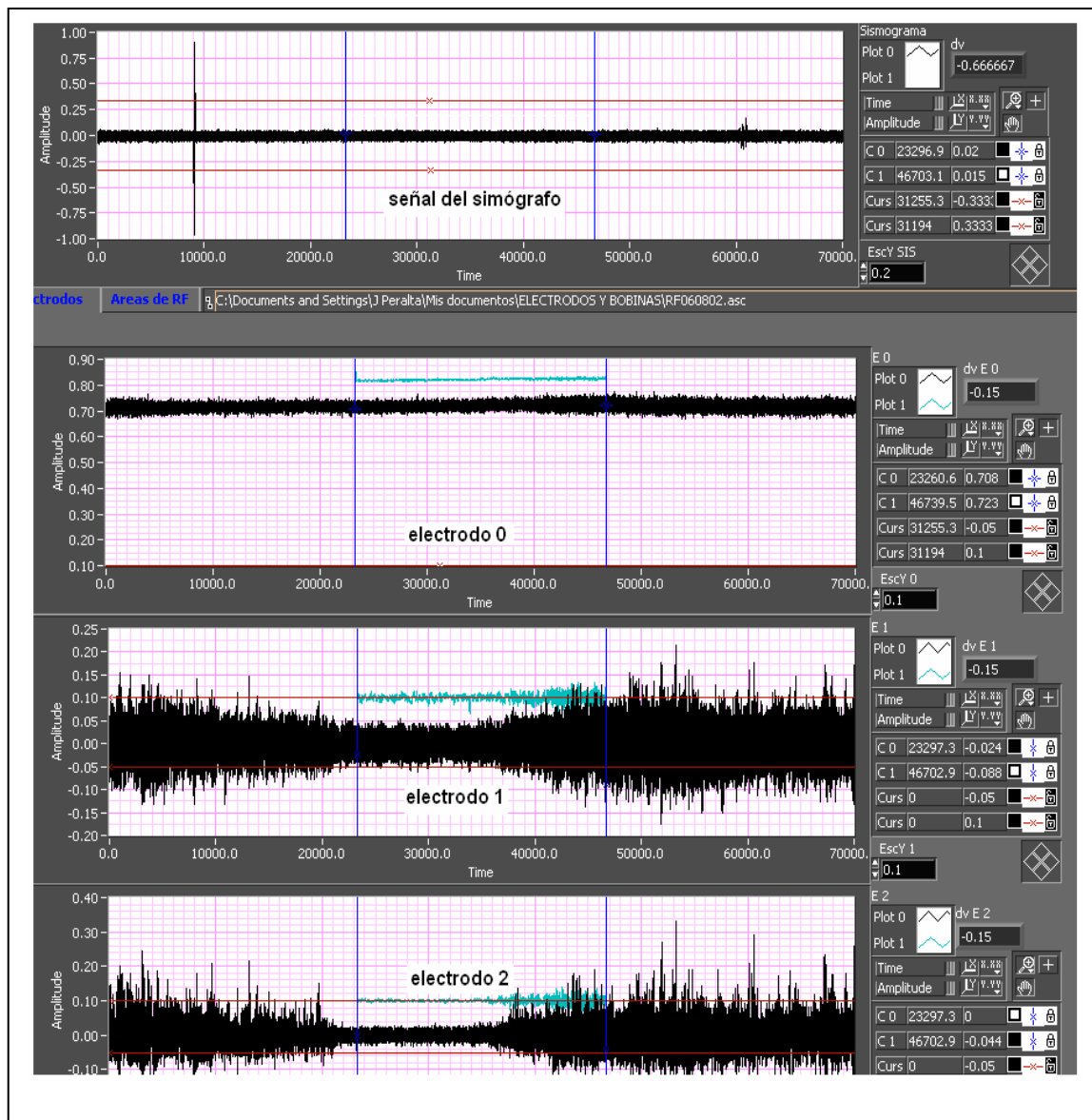


Fig. 6.4.- Panel virtual con las señal anexada del sensor de movimiento y las señales de los electrodos.

Utilizando las herramientas de análisis detallado se observa en la fig. 6.5 que, en caso de un sismo, también se puede analizar lo que ocurre en el mismo lapso de tiempo en los canales de los electrodos. Puesto que la señal del sísmógrafo ha sido generada artificialmente no se observa ningún comportamiento significativo en los canales de las señales eléctricas.

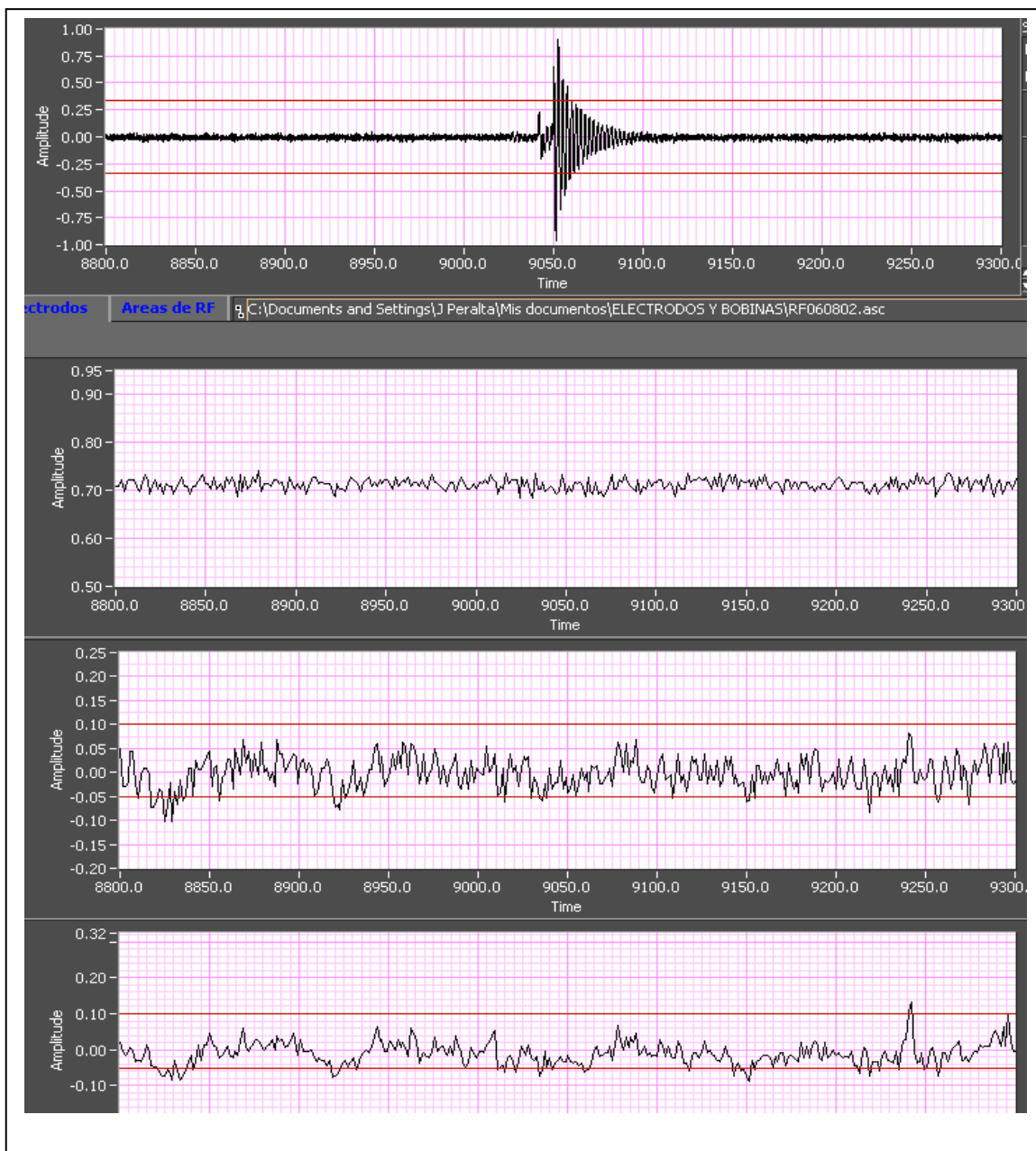


Fig. 6.5.- Señal del sismógrafo generada artificialmente junto con las señales de los electrodos. Nótese la simultaneidad de las señales registradas.

También para el caso de las señales de radiofrecuencia el programa de análisis permite visualizar simultáneamente la señal del sismógrafo y las señales de las bobinas, tal como se observa en la figura 6.6. En este caso aparecen en las bobinas unas perturbaciones coincidentes con la señal del sismógrafo, pero éstas fueron también inducidas artificialmente solamente con la intención de mostrar las capacidades de análisis de nuestro programa. En la figura 6.6 se muestra la

respuesta de las diferentes bandas ante una señal inducida en las bobinas de baja frecuencia.



Fig. 6.6.- Panel virtual del programa que muestra simultáneamente la señal sísmica artificial con las señales de radiofrecuencia en 2 de las bobinas también inducidas artificialmente

VII. CONCLUSIONES

Los diferentes elementos de la estación piloto para detección y registro de posibles precursores sísmicos han sido probados satisfactoriamente a nivel de campo en esta última fase del proyecto ya que se han almacenado un cierto número de archivos con señales reales que incluyen tanto las señales eléctricas del suelo, como de las bobinas que registran las ondas de radio ambientales para frecuencias bajas en el rango de 0 – 10 000 Hz.

Se han desarrollado programas adecuados de análisis que son capaces de analizar señales muy sutiles, con herramientas para verificar si su ocurrencia simultánea en todos los canales cumplen con los requisitos que debe satisfacer un posible precursor sísmico.

Para establecer correlaciones de la forma más rápida y eficaz con los sismos hemos agregado a los programas de captura y análisis las señales sísmicas del sismógrafo que se ha diseñado y construido en el laboratorio

Con todas estas características del sistema de detección, registro y análisis, resta ahora instalarlo en lugares adecuados de la costa del Estado de Guerrero, lo cual será, el objetivo de un proyecto futuro.

REFERENCIAS

- [1] Críticos de precursores.
- [2] Método VAN.
- [3] http://html.rincondelvago.com/corteza-terrestre_1.html
- [4] <http://es.wikipedia.org/wiki/Cuarzo>
- [5] <http://www.uam.es/cultura/museos/mineralogia/especifica/mineralesAZ/Cuarzo/cuarzo.html>
- [6] S.G. O'Keefe y D.V. Thiel, *Electromagnetic emissions during rock blasting*, Geophysical Research Letters, Vol. 18, No. 5, 889-892, may 1991.
- [7] N.I. Gershenzon, M.B. Gokhberg, y S.L. Yunga., *On the electromagnetic field of an earthquake focus*, Physics of the Earth and Planetary Interiors 77 (1993) 13-19, Elsevier Sciences Publishers, B.V., Ámsterdam.
- [8] M.B. Gokhberg et al, *Experimental measurements of electromagnetic emissions possibly related to earthquakes in Japan*, J. Geophys Res (87, 7824-7828).
- [9] K. Oike y T. Ottawa, *Electromagnetic radiations from shallow earthquakes observed in the LF range*, J. Geomag.Geolectr., 38 1031-1040 (1986).
- [10] Fundamentos de Electricidad. Milton Gussow. Mc. Graw Hill.
- [11] <http://www.ssn.unam.mx>