

CAPTURA Y PROCESAMIENTO DE DATOS MAGNETOTELURICOS

J. M. ROMO*
M. MARTINEZ*
H. FABRIOL*
R. VEGA*
R. FERNANDEZ*
R. VAZQUEZ*

(Recibido: 15 de Nov. de 1982)

(Aceptado: 7 de enero de 1983)

RESUMEN

Se describe en este trabajo un sistema de adquisición y procesamiento de datos magnetotelúricos. El sistema tiene la capacidad de procesar datos en tiempo real, esto es, simultáneamente a la adquisición y además utiliza la técnica de referencia remota con el propósito de llevar a cabo una mejor estimación del tensor de impedancia.

Primero se hace una descripción general del sistema y sus principales componentes de cálculo. En seguida se presenta en particular la interacción entre estas componentes y la programación del sistema. Por último, se describen las pruebas llevadas a cabo con datos sintéticos y de campo. Los resultados de estas pruebas indican que el sistema funciona satisfactoriamente.

Este sistema forma parte integral del trabajo de investigación en el método magnetotelúrico llevado a cabo por el grupo de exploración geofísica del CICESE.

ABSTRACT

This work describes in detail a data acquisition and processing system for magnetotelluric data. The system is capable of doing real time data processing, that is, at the time of acquisition and also uses the remote reference technique to get a better estimation of the tensor impedance.

* *Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C.
Ave. Espinoza 843, Ensenada, B. C., MEXICO.*

First we describe the system as a whole, pointing out the principal hardware components. Next, we present the hardware-software link of the system and finally we show the tests carried out with synthetic and field data. The results from these tests indicate that the system performs satisfactorily.

This system is an integral part of the research carried out by the geophysical exploration group at CICESE on the magnetotelluric method.

INTRODUCCION

El método magnetotelúrico (MT) usa como fuente de excitación las perturbaciones electromagnéticas naturales que alcanzan la superficie de la Tierra, para determinar la distribución de conductividad eléctrica en el subsuelo. Una pequeña parte de la onda electromagnética incidente penetra verticalmente, difundiéndose en el medio y generando las corrientes telúricas. Las características de la fuente permiten alcanzar profundidades considerables en zonas donde otros métodos geoelectrónicos enfrentarían serias limitaciones en equipo y en potencia.

La pequeña amplitud de las señales, del orden de 1γ (10^{-9} teslas) para el campo magnético y 4 mV/Km para el eléctrico, impone severas restricciones sobre la sensibilidad del equipo de medición y obliga a tener especial cuidado en la eliminación de ruido y en el tratamiento de las señales (amplificación, filtraje, etcétera).

La interpretación del método MT se basa en la evaluación de la razón entre el campo eléctrico y el magnético sobre la superficie de la Tierra, conocida como impedancia de superficie, la cual está relacionada directamente con la resistividad del subsuelo (Cagniard, 1953). En los casos en que el medio es homogéneo e isotrópico, o presenta estratificación horizontal, la impedancia es un escalar. Sin embargo, en el caso más general, cuando existen heterogeneidades laterales y/o anisotropía, la relación entre los campos adquiere un carácter tensorial (Vozoff, 1972).

La técnica de campo consiste en medir en un punto en la superficie las componentes ortogonales del campo eléctrico y magnético de variación en una amplia gama de frecuencias, y con estas mediciones estimar el tensor de impedancia para varias frecuencias. Dado que la frecuencia guarda relación con la profundidad de penetración de la onda, estas mediciones constituyen lo que se llama un "Sondeo Magnetotelúrico".

La estimación del tensor de impedancia ha sido discutida por varios investigadores (Swift, 1967; Sims y Bostick, 1969; Madden y Netson, 1969; Word *et al.*, 1970;

Sims *et al.*, 1971; Vozoff, 1972, etcétera). Debido a que frecuentemente existe ruido de carácter local, correlacionado en ambos campos, la estimación del tensor se presenta sesgada (biased). Para solucionar este problema, Gamble (1978) y Gamble *et al.* (1979) proponen el uso de una referencia remota, es decir, medir simultáneamente las componentes horizontales de uno de los campos en un lugar alejado del sitio del sondeo y usarlos como referencia, correlacionándolos con los campos en el sitio de interés, obteniéndose así una estimación no-sesgada del tensor de impedancia.

En el pasado (Hermance, 1973) los datos de campo se grababan en cinta magnética y se procesaban en un centro de cómputo al finalizar todo el trabajo de campo. La desventaja más seria de esto era que en muchos casos una gran cantidad de datos resultaban de baja calidad, debido a exceso de ruido local o a una actividad geomagnética muy baja o incluso a problemas instrumentales no detectados en el momento de la adquisición. Ante la imposibilidad de poder regresar al sitio de estudio, por razones de costo y tiempo, la efectividad del levantamiento se veía seriamente afectada.

Con el propósito de eliminar estas dificultades y adoptar el uso de la referencia remota, fue diseñado un sistema con las características siguientes:

- a) Procesamiento en el campo en tiempo real, con un control visual de las señales.
- b) Obtención de los parámetros geofísicos de interés *in situ*.
- c) Instrumentación de una estación de referencia remota.
- d) Capacidad de almacenamiento de datos sin procesar, para poder corroborar en el laboratorio los resultados obtenidos en el campo.

El propósito de este trabajo es entonces llevar a cabo una descripción detallada de un sistema de procesamiento y captura de datos con las características anteriores, el cual fue armado en el CICESE y utilizado satisfactoriamente en levantamientos magnetotelúricos (Martínez *et al.*, 1982).

CARACTERISTICAS GENERALES DEL SISTEMA MT

Con este sistema se miden cinco señales en el sitio del sondeo (E_x , E_y , H_x , H_y , H_z) y se reciben por radio dos más (R_x , R_y) medidas en un sitio alejado de la estación base, E es el campo eléctrico, H el magnético y R puede ser cualquiera de los dos. Todas las señales son preamplificadas, filtradas y postamplificadas, para ser digitali-

zadas y procesadas en tiempo real, usando una microcomputadora DEC-LSI-11. El instrumental electrónico está instalado en un vehículo acondicionado para este propósito y se alimenta con un generador de corriente alterna con una potencia de 4.5 Kw.

En la figura 1 se presenta un esquema de la distribución del equipo en el campo, y la figura 2 muestra un diagrama de bloques del sistema.

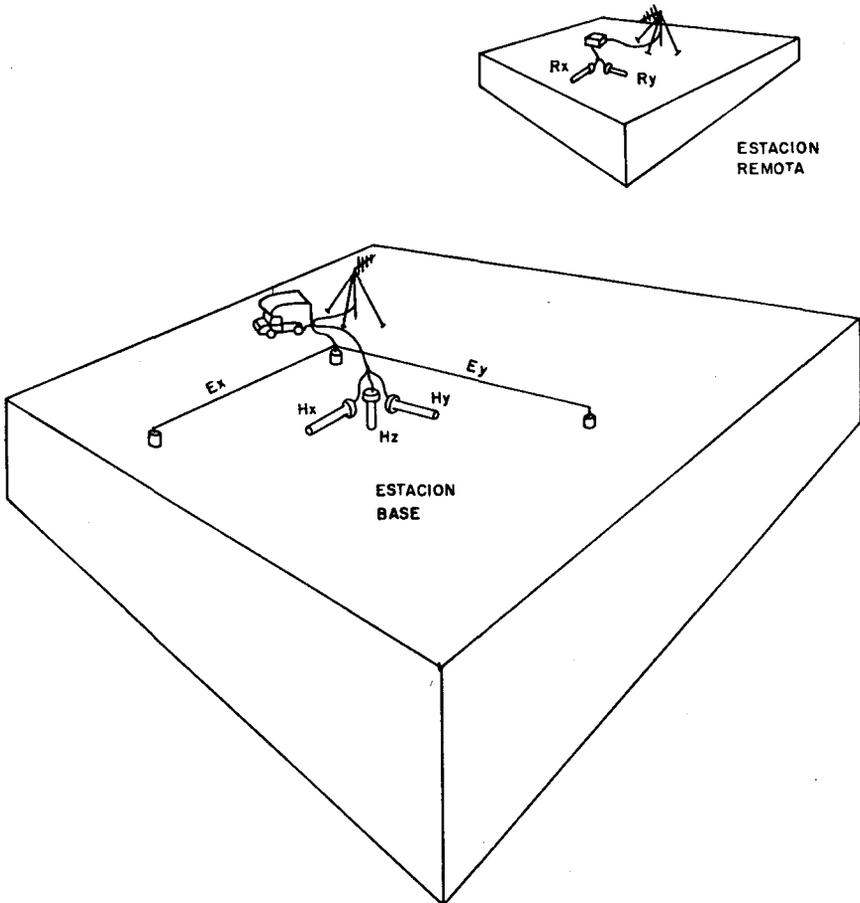


FIGURA 1. DISTRIBUCIÓN DEL EQUIPO EN EL CAMPO.

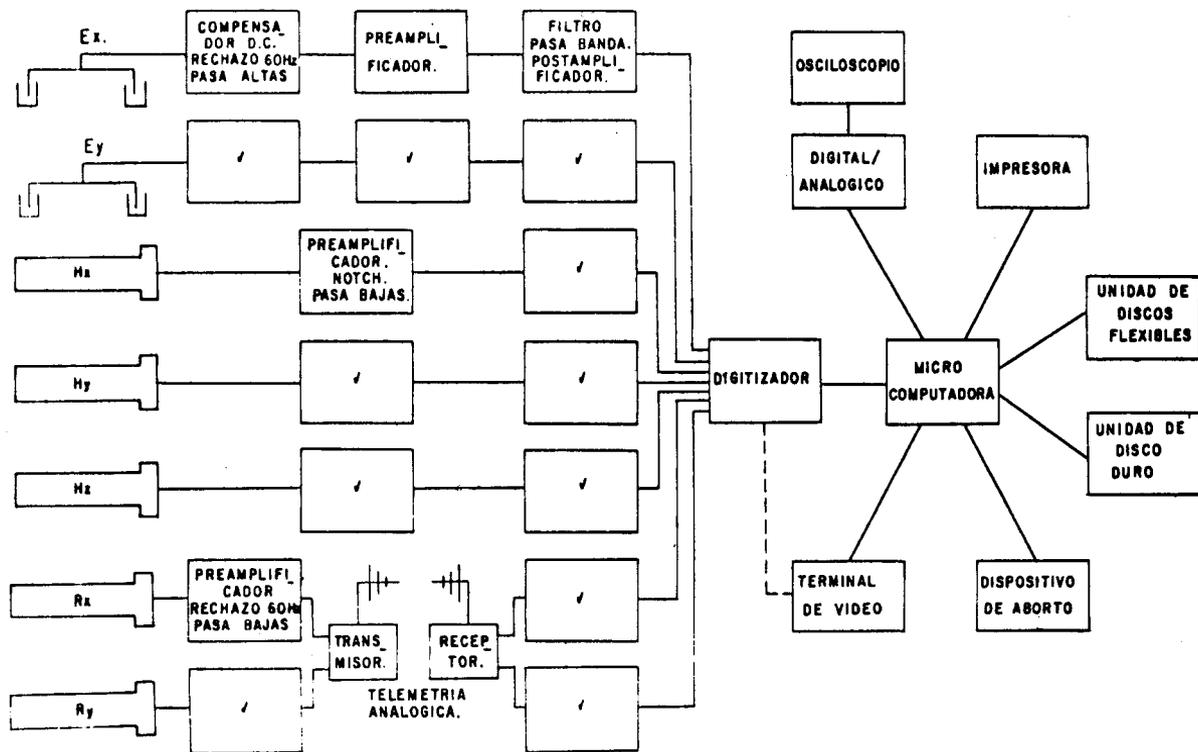


FIGURA 2. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS MAGNETOTELURICOS.

El espectro del campo electromagnético natural contiene una amplia gama de frecuencias. La banda de frecuencias comúnmente utilizada en MT es de 10^{-3} a 10^2 Hz. En este sistema, y con el fin de optimizar tanto el alcance dinámico de los instrumentos como el periodo de muestreo, se registran cuatro bandas, a saber:

Banda 1	.001 - .03 Hz.	0.2 muestras/seg.
Banda 2	.01 - .4 Hz.	2 muestras/seg.
Banda 3	.1 - 4 Hz.	20 muestras/seg.
Banda 4	1 - 40 Hz.	200 muestras/seg.

Debido a la lentitud de muestreo de la banda 1, no es conveniente procesarla en tiempo real sino que es preferible digitalizarla y grabarla en cinta magnética para ser procesada posteriormente. Esta grabación se lleva a cabo mediante un subsistema de adquisición de datos, independiente del sistema de procesamiento de tiempo real.

Detectores

Los campos eléctricos (E_x , E_y) se miden usando electrodos nopolarizables de cobre-sulfato de cobre, colocados en las extremidades de un par de dipolos colocados en forma de L, con un electrodo común en el vértice.

Los campos magnéticos (H_x , H_y , H_z) se miden usando tres detectores, colocados en forma ortogonal. Estos detectores construidos por Geotronics Co., consisten en una bobina de inducción, aislada con poliuretano, dentro de un cilindro de acero inoxidable. La sensibilidad de los detectores de campo magnético horizontal en la banda de 1 a 100 Hz es aproximadamente de $13.7 \mu V/\gamma$ Hz, mientras que la del sensor del campo magnético vertical es de $4 \mu V/\gamma$ Hz.

Los detectores se conectan al preamplificador, colocado en el vehículo, por medio de un cable blindado de 200 m de longitud.

Tratamiento de Las Señales

a) Canales eléctricos

Las señales medidas por los dipolos eléctricos son compensadas para anular el efecto del potencial espontáneo presente, y filtradas a través de un rechazador de banda angosta a 60 Hz., para eliminar en esta frecuencia el ruido producido por motores o líneas de energía eléctrica. También se cuenta con un filtro de paso alto con corte a 1000 seg. de periodo, que puede conectarse opcionalmente y que tiene por objeto eliminar la gran amplitud del espectro electromagnético a muy bajas frecuencias.

Como siguiente paso (fig. 2), las señales son preamplificadas usando un amplificador diferencial de bajo ruido Burr-Brown (modelo 3620) con rechazo a voltaje en modo común, que proporciona ganancias de 1 a 1000.

La siguiente etapa consiste en seleccionar la banda de registro y postamplificar las señales, lo cual se lleva a cabo con los filtros variables ITHACO 4210. En ellos se puede seleccionar independientemente la frecuencia de corte de los filtros de paso alto y de paso bajo. Estas secciones están en cascada formando un filtro pasa-banda. Cada sección es un filtro Butterworth de cuatro polos, con una pendiente de atenuación de 24 db/octava. El amplificador del filtro proporciona ganancias de 0 a 40 db en pasos de 10 db.

Finalmente la señal entra al digitizador para ser procesada en tiempo real. Esta etapa será descrita posteriormente.

b) Canales Magnéticos

Las salidas de los detectores de campo magnético se conectan al preamplificador Geotronics (modelo MTH-4). Este consiste en un amplificador diferencial de bajo ruido con tres pasos de ganancia, con valores nominales de 1900, 19000 y 190000. Para una frecuencia de 7 Hz., las sensibilidades del sistema detector - preamplificador, para cada ganancia, son de 0.187, 1.87 y 18.7 V/ γ para los detectores de campo magnético horizontal, y .054, .54 y 5.4 V/ γ para el del campo magnético vertical.

El preamplificador cuenta con dos filtros que pueden seleccionarse opcionalmente: un pasa-bajas de cuatro polos cuatro ceros con frecuencia de corte en 25 Hz., que incluye rechazos de banda angosta a 60 y 120 Hz.; y un filtro rechazador de banda angosta de 4 polos 4 ceros centrado a 60 Hz.

Después de pasar por el preamplificador, las señales entran a los filtros ITHACO-4210 ya descritos, que seleccionan la banda de registro y postamplifican la señal, para más tarde entrar al digitalizador y a la microcomputadora.

c) Canales Remotos

Generalmente los canales remotos (Rx, Ry) son magnéticos, aunque también pueden usarse dipolos eléctricos. Los dos canales medidos son preamplificados, modulados en frecuencia con un oscilador controlado por voltaje, multicanalizados y enviados con un radio-transmisor en F.M. de 0.5 watts de potencia a una frecuencia central de 160.25 MHz.

En la estación base la señal es captada mediante un radioreceptor con una sensibilidad del orden de 50 m V., y entra a unos discriminadores de FM, que restituyen

yen las señales. Después de esto, las señales pasan por los filtros selectores de banda y postamplificadores (ITHACO-4210), para más tarde ser digitalizados y procesados en tiempo real.

El sistema de telemetría tiene un alcance aproximado de 80 Km. con despliegue visual, y acepta una gama de frecuencias de 0 a 50 Hz. con amplitud máxima de 5 V.

Digitalización

La digitalización de las señales está controlada por el microprocesador INTEL-8085, el cual ejecuta una rutina de digitalización y transmisión de datos que controla la conversión Analógico-Digital (A/D) e interrumpe a la microcomputadora LSI-11 para transmitirle las señales muestreadas.

El convertidor A/D acepta actualmente hasta 8 canales y opera con variaciones entre -10 y 10 V., con 12 bits de resolución.

La rutina de digitalización y transmisión de datos ha sido introducida en circuito empleando una memoria programable (EPROM) y está diseñada de tal manera que toma una muestra de cada uno de los siete canales, guarda las muestras en memoria, interrumpe a la LSI-11 y le transfiere las siete muestras. Esto lo hace en lapsos determinados por el período de muestreo. El número de canales, el periodo de muestreo y el comando para iniciar la ejecución de la rutina, se transmiten al INTEL-8085 usando la terminal de video.

La microcomputadora está construida alrededor del procesador LSI-11/2 fabricado por Digital Equipment Co. La tarea de la microcomputadora es recibir los datos muestreados; mostrar los datos recibidos, usando un convertidor Digital/Analógico y un osciloscopio de ocho canales; atender las interrupciones de un dispositivo de aborto, que detiene la recepción de los datos; y efectuar el procesamiento de los datos, grabando los resultados en memoria de almacenamiento (discos flexibles o de cartucho), imprimiéndolos en papel, o mostrándolos en la terminal de video. La figura 3 muestra la configuración de la microcomputadora.

El diseño y construcción del digitalizador, la configuración de la microcomputadora y sus periféricos, y el desarrollo de toda la programación del sistema, fueron llevados a cabo en el C.I.C.E.S.E.

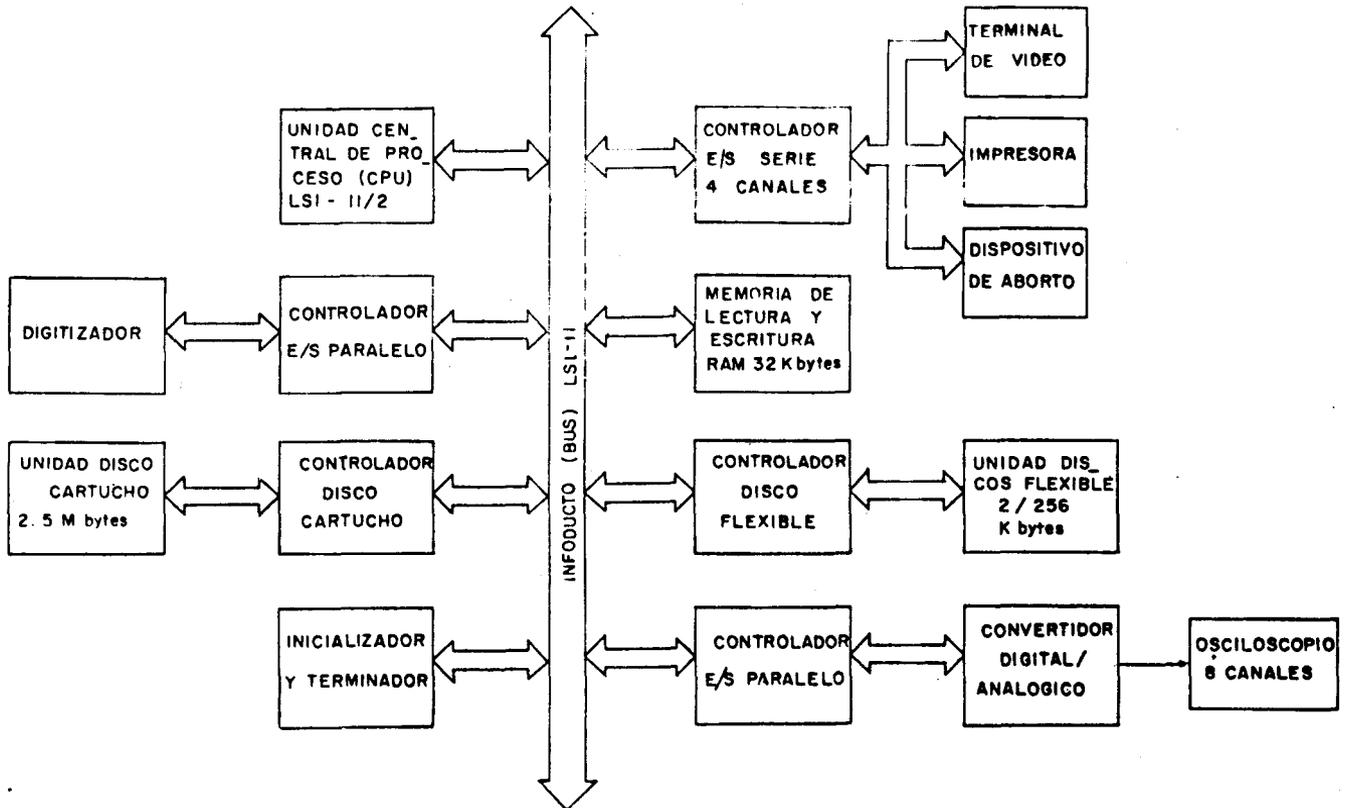


FIGURA 3 CONFIGURACIÓN DE LA MICROCOMPUTADORA LSI-11

Subsistema autónomo de adquisición de datos

Además de procesar las señales en tiempo real, es posible digitalizarlas y grabarlas en *cassette* mediante un subsistema autónomo de adquisición de datos.

Aunque el objetivo principal de este subsistema es el de grabar las señales de la banda 1 para su posterior procesamiento, constituye además un sistema de apoyo para grabar señales de las bandas 2 y 3 en caso de fallar el procesamiento en tiempo real.

Este subsistema fue diseñado y construido con capacidad para digitalizar hasta diez canales analógicos con 12 bits de resolución. Usa como medio de almacenamiento una grabadora digital de *cassettes* ADPI, y es totalmente compatible con el microprocesador LSI-11.

Está desarrollado alrededor de un microprocesador INTEL-8085, puede muestrear hasta 50 muestras/seg y tiene una capacidad de almacenamiento de 0.5 Mbytes.

El microprocesador INTEL-8085 se encarga de controlar la digitalización de los canales de entrada y transfiere los datos a la grabadora digital, verificando errores de grabación.

El sistema puede leer los datos almacenados en *cassette* y transferirlos a la microcomputadora LSI-11, para su procesamiento.

PROGRAMACION

Procesamiento en tiempo real

El procesamiento en tiempo real de las señales se lleva a cabo en dos etapas. La primera de ellas consiste en la recepción de los datos transmitidos por el digitalizador y en la estimación de las potencias promedio de los siete canales. Esto ha sido implementado mediante un programa de adquisición de datos. La segunda etapa es realizada por un segundo programa, el cual calcula los parámetros geofísicos de interés en MT: resistividades, fases, asimetría, ángulos de rotación, operador de inclinación (tipper), etcétera, con sus correspondientes límites de confianza.

a) Adquisición de Datos

El programa de adquisición de datos efectúa dos tareas de manera prácticamente simultánea. La tarea prioritaria es la recepción de los datos, los cuales son enviados

por el digitalizador en paquetes de siete muestras (una por canal), cada Δt segundos, siendo Δt el periodo de muestreo. El tiempo transcurrido entre recibir un paquete de muestras y el siguiente, es utilizado por la microcomputadora para efectuar la segunda tarea, que consiste en la estimación de las potencias promedio.

El programa lleva a cabo un proceso interactivo, esto es, el operador del sistema, por medio de comandos ordena la ejecución de funciones específicas. Para entender el funcionamiento del programa se describirá en primer lugar el proceso aplicado a las señales para obtener la estimación de las potencias promedio, para más tarde tratar la recepción de los datos y la lógica general del programa al interactuar con el operador.

El programa debe calcular potencias de la forma $\langle \overline{F_i F_j^*} \rangle$ ($i=x, y$ $j=x, y$), donde F_k representa la transformada de Fourier de uno de los campos medidos, la barra indica el promedio en ventanas angostas de frecuencia y los paréntesis angulares dan el valor esperado o promedio en un conjunto de realizaciones.

Se colectan 1024 muestras de cada canal ($E_x(t), E_y(t), \dots, R_y(t)$) y se calculan sus transformadas de Fourier ($E_x(w), E_y(w), \dots, R_y(w)$), usando un algoritmo de transformada rápida de Fourier (Day, 1975).

Una vez que las señales están en el dominio de la frecuencia, se calculan las potencias $|E_x|^2, E_x E_y^*, \dots, R_x R_y^*, |R_y|^2$, (7 autopotencias y 21 potencias cruzadas). Estos espectros son suavizados haciendo un promedio pesado en frecuencia, que consiste en tomar promedios entre armónicos, en ventanas angostas de frecuencia, cuyo ancho de banda crece con la frecuencia, manteniéndose constante el factor Q

$$Q = \frac{\text{frecuencia central}}{\text{ancho de banda}}$$

Se toman 16 ventanas con $Q = 3$ a lo largo de cada espectro, con frecuencias centrales igualmente espaciadas en escala logarítmica. El resultado de esto son las potencias promedio $|\overline{E_x}|^2, \overline{E_x E_y^*}, \dots, \overline{R_x R_y^*}, |\overline{R_y}|^2$, las cuales se almacenan en una área específica de memoria. Este proceso se efectúa repetidas veces para varios segmentos de 1024 puntos por canal, obteniéndose cada vez un juego de potencias promedio que se suman a las anteriores. Cuando se tiene un número suficiente de segmentos (usualmente $N=20$), se obtiene el promedio en el conjunto de realizaciones dado por

$$\langle \overline{F_i F_j^*} \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\overline{F_i F_j^*})_n$$

Las potencias promedio quedan grabadas en un archivo junto con el periodo de muestreo y el número de segmentos. El programa corrige por las ganancias de los

postamplificadores y normaliza los datos de manera tal que las unidades de todas las potencias promedio sean V^2/Hz .

Para llevar a cabo eficientemente el procesamiento antes descrito, el programa utiliza dos áreas de memoria, que intercambia sucesivamente, de suerte que, mientras en una almacena los datos que está recibiendo, en la otra calcula las transformadas de Fourier de los datos previamente recibidos. Estos dos procesos competitivos (prácticamente simultáneos) se han desarrollado usando la capacidad del procesador LSI-11 para atender interrupciones de periféricos.

El programa principal es el de estimación de las potencias promedio, pero tiene prioridad la recepción de datos, de tal manera que la ejecución del programa principal es interrumpida constantemente (cada Δt seg) por el digitalizador, transfiriéndose el control al manejador de interrupciones del digitalizador. Una vez que esta rutina se ejecuta, el control regresa al punto donde el programa fue interrumpido y continúa la ejecución.

La tarea del manejador de interrupciones es recoger las muestras del puerto de Entrada/Salida, almacenándolas convenientemente en memoria, y por otro lado enviarlas a un convertidor Digital/Analógico para mostrarlas en un osciloscopio. Cuando se completa un segmento (1024 muestras por canal), la rutina intercambia las áreas de memoria y continúa almacenando datos.

La rutina de transformada de Fourier toma dos seg. para transformar 1024 puntos, de manera que los siete canales son transformados en 14 seg aproximadamente.

Como se mencionó anteriormente, el programa es un proceso interactivo que se comunica con el operador vía la terminal de video. El programa acepta comandos que realizan distintas funciones, y trabaja usando una serie de banderas (variables con sólo dos valores), que le permiten conocer el estado del proceso en cualquier momento y tomar decisiones al respecto.

Las funciones de los distintos comandos son: 1) lectura a través de la terminal de video de las ganancias de los postamplificadores; 2) inicio y suspensión de la recepción de datos; 3) aborto del segmento de datos que se está colectando; 4) aborto tanto del segmento que se está colectando como del que se está procesando con la transformada de Fourier; 5) grabación en disco de las potencias promedio; y 6) inicialización de las áreas de memoria utilizadas para datos y potencias promedio.

Debido al carácter aleatorio de la fuente del campo electromagnético natural, es muy frecuente que los campos medidos contengan ruido o sean afectados por fenómenos transitorios causados por tormentas eléctricas. Asimismo, la alta sensibilidad

de los detectores, los hace vulnerables a saturación producida por la llegada repentina de señales de gran amplitud y a ruido ambiental, como objetos metálicos o personas en movimiento, etcétera. Este es uno de los problemas principales del método, y una de las razones que justifican el procesamiento en el campo.

Para resolver este problema, el sistema está dispuesto de tal manera, que el operador puede observar en el osciloscopio los datos que están siendo almacenados en la microcomputadora y decidir, en un momento dado, cuáles segmentos son buenos y cuáles deben eliminarse. Para tal efecto está diseñado el dispositivo de aborto, el cual permite al operador detener el muestreo en cualquier momento. Cuando se oprime el botón de este dispositivo, se genera una interrupción de máxima prioridad y el control del programa se transfiere a una subrutina de servicio. Esta rutina detiene el muestreo desactivando las interrupciones del digitalizador, y espera un comando de la terminal. Dependiendo del comando dado, la rutina toma la decisión apropiada, que puede ser: a) terminar el muestreo y grabar las potencias promedio en disco; b) eliminar el segmento que se está colectando; o c) eliminar también el segmento que se está procesando.

Debido a que la recepción de datos, el manejo de las interrupciones y la lógica general del programa requieren el empleo de términos al nivel de bits, el programa está escrito en lenguaje de ensamblador. Esto además incrementa la velocidad de ejecución.

b) Cálculo de Parámetros Geofísicos

Cuando la adquisición de datos ha concluido, se está en condiciones de iniciar la segunda etapa del procesamiento. Esta se lleva a cabo mediante un programa que lee las potencias promedio resultantes de la adquisición de datos, corrige por las funciones de transferencia del sistema, calcula el tensor de impedancia y efectúa todo el proceso necesario para calcular parámetros geofísicos de interés y sus límites de confianza.

El programa puede leer varios archivos con potencias promedio, tomados en la misma banda de frecuencia, y promediarlos. Una vez que se han leído las potencias promedio, se procede a corregirlas por las funciones de transferencia de cada canal, para lo cual el programa lee de la terminal la información de los filtros y ganancias usadas.

Los canales eléctricos se corrigen por la ganancia de los preamplificadores Burr-Brown, cuya respuesta es plana y de fase cero en la banda de frecuencias de interés. Si se está procesando la banda 4, se corrigen además por la función de transferencia del filtro rechazador de 60 Hz. Los canales magnéticos se corrigen por la función

de transferencia del detector magnético y del filtro seleccionado en el preamplificador Geotronics. Esta función de transferencia fue medida por Fabriol *et al.* (1981). Los canales remotos se corrigen apropiadamente según sean eléctricos o magnéticos. No se corrige por distorsiones debidas a la telemetría ya que éstas afectan igualmente a ambos canales y sólo importa el comportamiento relativo entre ellos. Las potencias se calibran de manera que las unidades de E y H sean mV/Km y γ , respectivamente.

Todos los canales se corrigen además por el desfaseamiento natural del digitalizador. Este desfaseamiento se debe al tiempo de retraso $\Delta t/7$ transcurrido entre la digitalización de un canal y el siguiente.

El sistema de coordenadas que se usa en el programa es derecho con el eje "x" apuntando al Norte magnético, el eje "y" al Oeste y el eje "z" hacia arriba.

Después de efectuar las correcciones antes mencionadas se calculan: 1) Relaciones de potencia de señal/ruido para cada canal, 2) Tensor de impedancia, 3) Asimetría y ángulo de rotación del tensor, 4) Resistividad aparente y fase de la impedancia, 5) Magnitud y fase del operador de inclinación, 6) Límites de confianza para todos los parámetros calculados.

Este programa, así como las subrutinas que emplea, está escrito en Fortran IV. Para un tratamiento detallado de esta parte del procesamiento, puede consultarse Gamble (1978) y Gamble *et al.* (1979a, 1979b).

PRUEBAS DEL SISTEMA

Prueba del programa de adquisición de datos

Para probar el programa de adquisición de datos, se introdujo una señal analógica sinusoidal de frecuencia conocida, en varios canales del digitalizador. Se comprobó, en primer lugar, que los canales eran digitalizados en el orden correcto y que las series de tiempo se almacenaban adecuadamente en las áreas de memoria. En segundo lugar, se comprobó que el algoritmo de transformada rápida de Fourier funcionaba bien, al obtener espectros con picos en la frecuencia de la señal de entrada. Finalmente se pudo constatar que las autopotencias y potencias cruzadas estaban correctamente calculadas, ya que al tener la misma señal, por ejemplo, en el canal 1 y 2, la potencia cruzada entre ellos debía ser idéntica, tanto a la autopotencia del canal 1 como a la autopotencia del canal 2. La aparición de partes imaginarias diferentes de cero en esta potencia cruzada se debe a errores de redondeo y a la diferencia de fase entre las dos señales, causada por el retardo del digitalizador. Una vez hecha la

corrección por este retardo, las partes imaginarias resultaron ser tres o cuatro órdenes de magnitud más pequeñas que las partes reales, aunque todavía diferentes de cero. Esta diferencia se puede atribuir exclusivamente a errores de redondeo.

Prueba del programa de cálculo de parámetros MT usando datos sintéticos

Este programa fue probado usando datos generados a partir de un modelo teórico. Para ello se usó el algoritmo desarrollado por O'Brien y Morrison (1967), el cual calcula la respuesta de un modelo de capas anisotrópicas horizontales, sobre un basamento isotrópico y homogéneo. El algoritmo usa las condiciones de frontera en las interfases del modelo, para calcular de manera recursiva los campos en la superficie, en función de los campos que se propagan en el basamento homogéneo. El programa requiere como entrada los campos magnéticos en la superficie y los parámetros que definen al modelo (resistividades, espesores, orientación de los ejes de anisotropía, etcétera), y entrega como resultados los campos eléctricos en la superficie, el tensor de impedancia y los parámetros de polarización de los campos (amplitud de los ejes de la elipse de anisotropía, elipticidad, etcétera). Todos los cálculos se llevan a cabo para una frecuencia dada.

Las componentes del campo magnético horizontal se simularon generando para cada banda dos series aleatorias de tiempo, de 1024 puntos cada una. Se calculó la transformada de Fourier de ambas componentes y se usó el algoritmo para cada uno de los 512 armónicos, obteniéndose los correspondientes componentes armónicos del campo eléctrico en la superficie.

Una vez hecho esto, se agregó 30% de ruido aleatorio a todos los campos. Se simularon 50 segmentos de datos agregando cada vez ruido diferente a los campos calculados por el modelo. Se calcularon autopotencias y potencias cruzadas para cada armónico de cada segmento, y se promediaron tanto en ventanas de frecuencia con Q constante como entre todos los segmentos, obteniéndose una salida similar a la del programa de adquisición de datos. Esta constituyó la entrada del programa de cálculo de parámetros MT. Este procedimiento se aplicó para las bandas 2, 3 y 4 que son las usadas en el sistema, sin embargo el algoritmo puede aplicarse para cualquier otra banda de frecuencias, requiriendo únicamente el periodo de muestreo adecuado.

Se hicieron pruebas con modelos diferentes. Aquí se presentan los resultados para el modelo mostrado en la figura 4, constituido por una capa anisotrópica de resistividades de 10 y 100 Ω -m en direcciones perpendiculares entre sí, con espesor de 1 km, sobre un basamento homogéneo de 1000 Ω -m y espesor teóricamente infinito. Los ejes de anisotropía forman un ángulo de -30 grados con el sistema coordinado de medición.

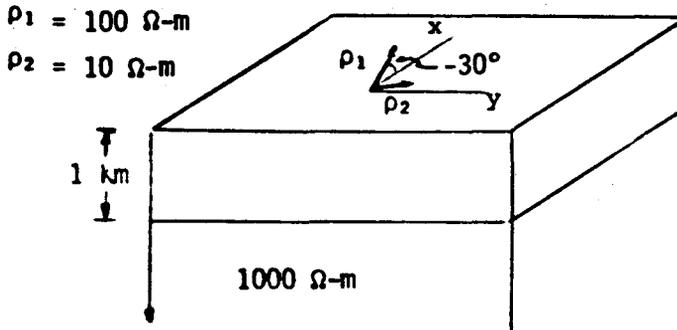


FIGURA 4. MODELO UTILIZADO PARA GENERAR DATOS SINTÉTICOS. LOS EJES DE ANISOTROPÍA FORMAN UN ANGULO DE -30° CON EL SISTEMA DE MEDICIÓN.

La figura 5 muestra la variación con la frecuencia de las resistividades aparentes y de las fases asociadas con los elementos antidiagonales del tensor. Con línea continua se muestran las curvas calculadas a partir del modelo (teóricas) y con símbolos los resultados del programa de cálculo de parámetros MT. Para las frecuencias más bajas de cada banda se obtuvieron valores que presentan algo de dispersión. Hay que recordar que debido a que el promedio para las frecuencias más bajas de cada banda involucra un número menor de armónicos (ya que Q es constante), la estadística es menos confiable. Por supuesto esto ocurrirá también con datos reales, por lo que las bandas de registro se diseñaron de tal manera que exista un traslape entre una y otra, como puede apreciarse en la misma figura 5.

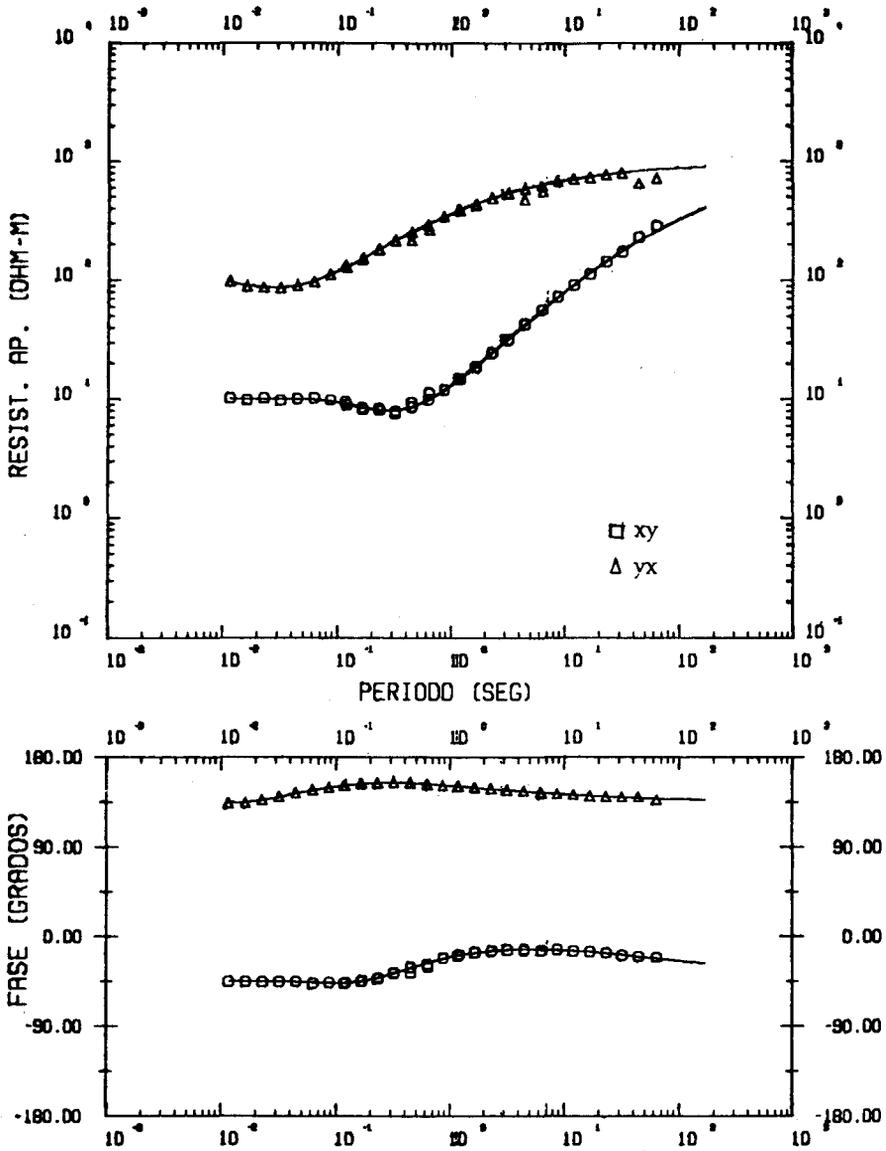


FIGURA 5. RESISTIVIDADES APARENTES Y FASES. MODELO SINTÉTICO.

Prueba del sistema con datos de campo

Sólo como un ejemplo se presenta un sondeo realizado cerca de la ciudad de Culiacán, Sinaloa, en un estudio de la zona geotérmica de La Presita (Martínez *et al.*, 1982, González, 1982). Los resultados se presentan en las figuras (6) a (10).

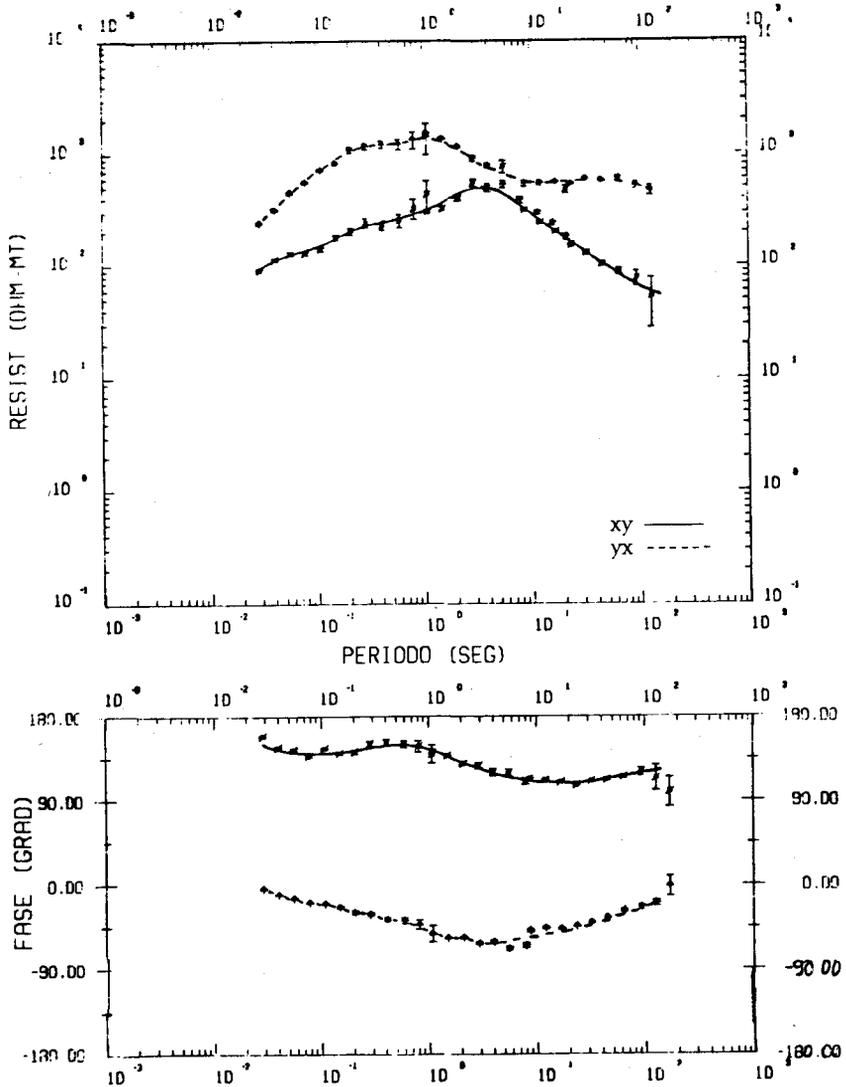


FIGURA 6. RESISTIVIDADES APARENTES Y FASES. DATOS DE CAMPO.

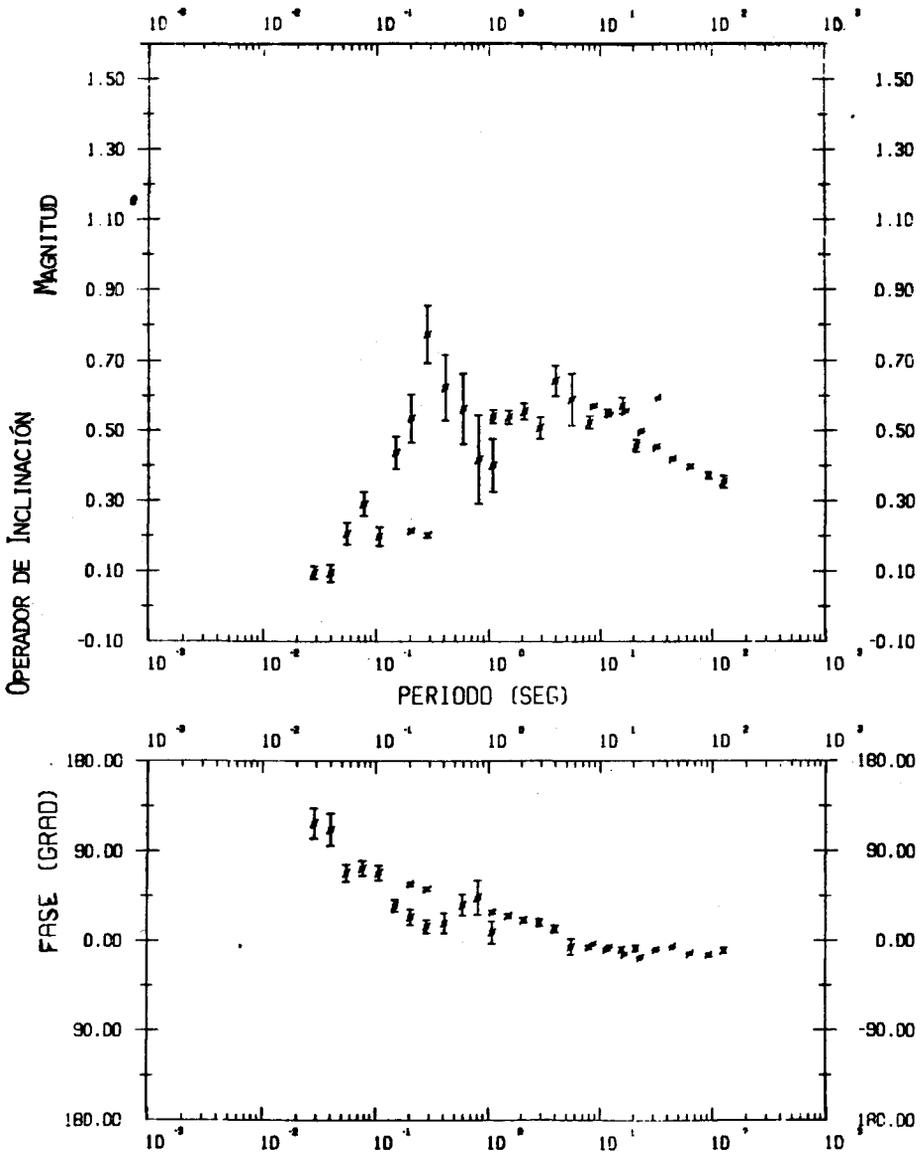


FIGURA 7. MAGNITUD Y BASE DEL OPERADOR DE INCLINACIÓN. DATOS DE CAMPO.

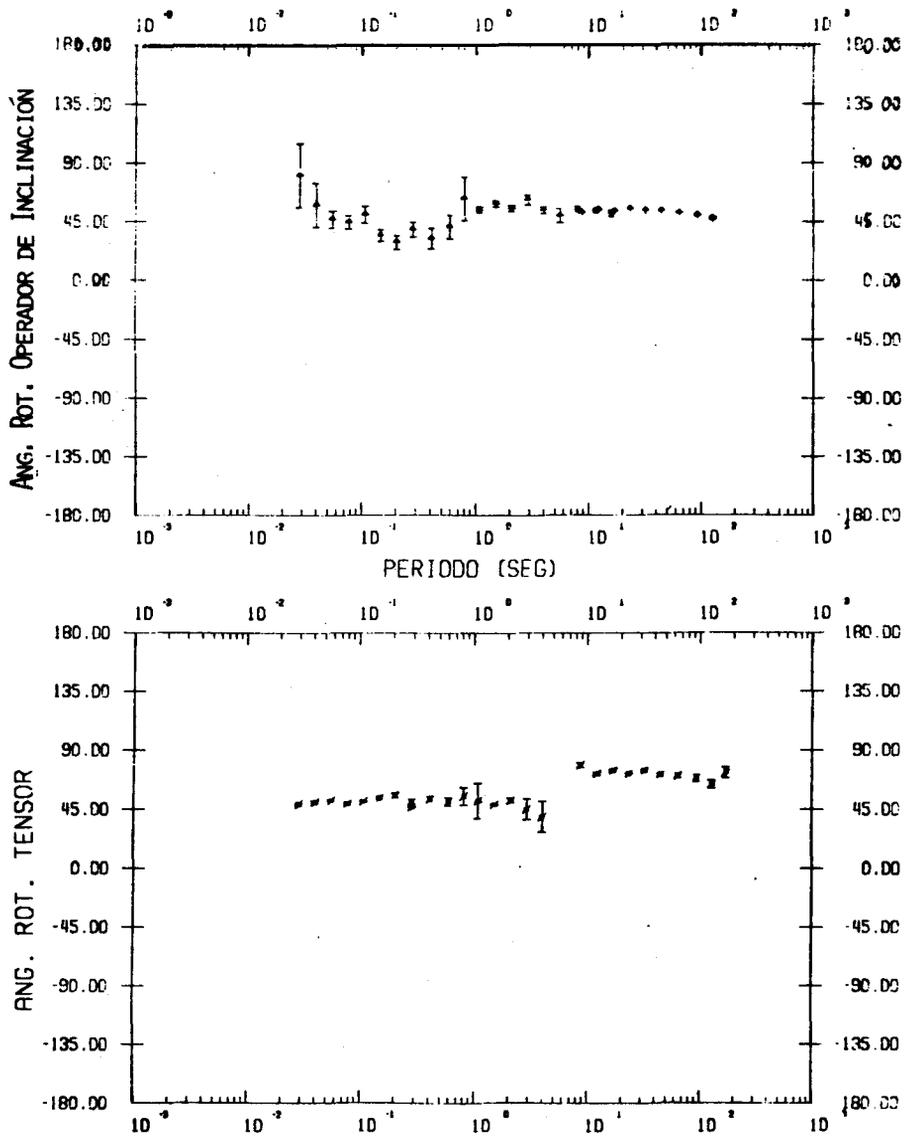


FIGURA 8. ANGULOS DE ROTACIÓN DEL OPERADOR DE INCLINACIÓN Y DEL TENSOR DE IMPEDANCIA. DATOS DE CAMPO.

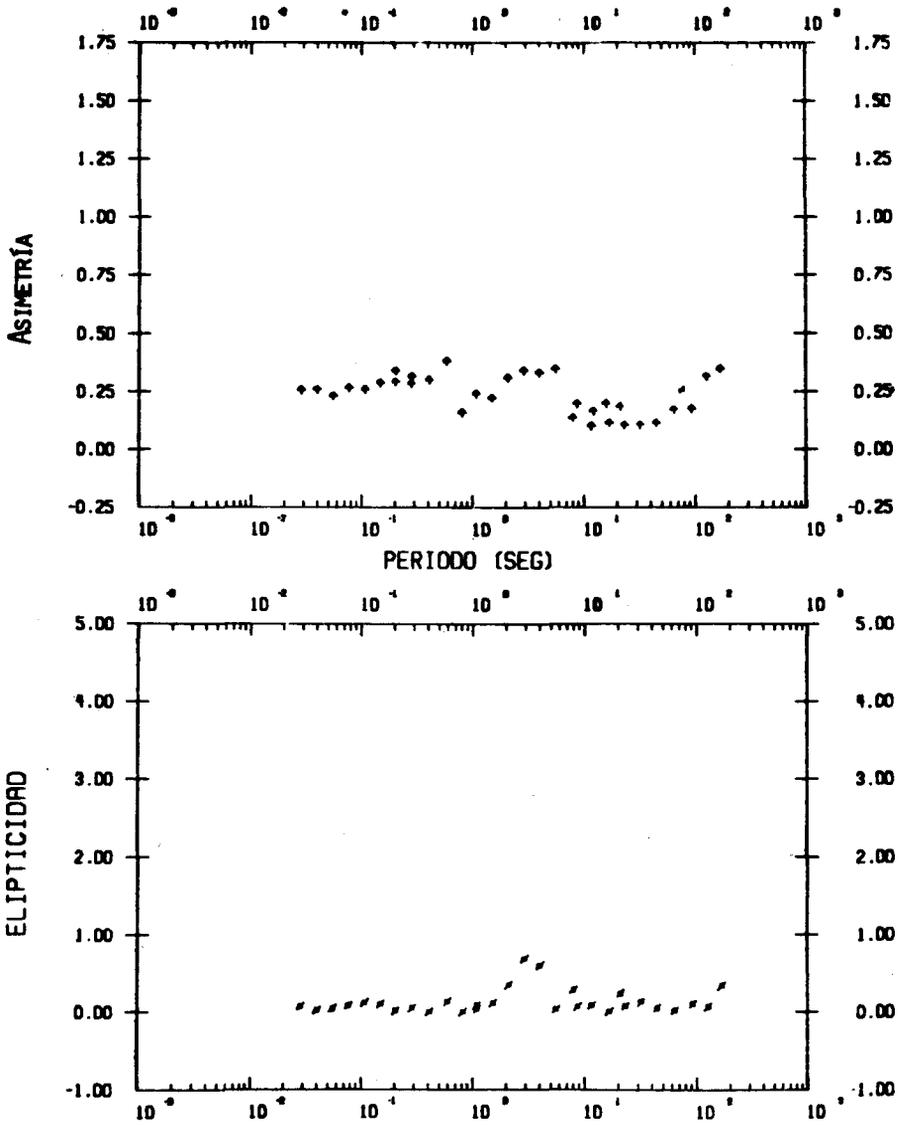


FIGURA 9. ASIMETRÍA Y ELIPTICIDAD. DATOS DE CAMPO.

Como puede verse (Fig. 10) el sondeo es de buena calidad, con coherencia arriba de 0.7 (Vozoff, 1972). El operador de inclinación tiene coherencias buenas solamente para periodos mayores de 10 seg.

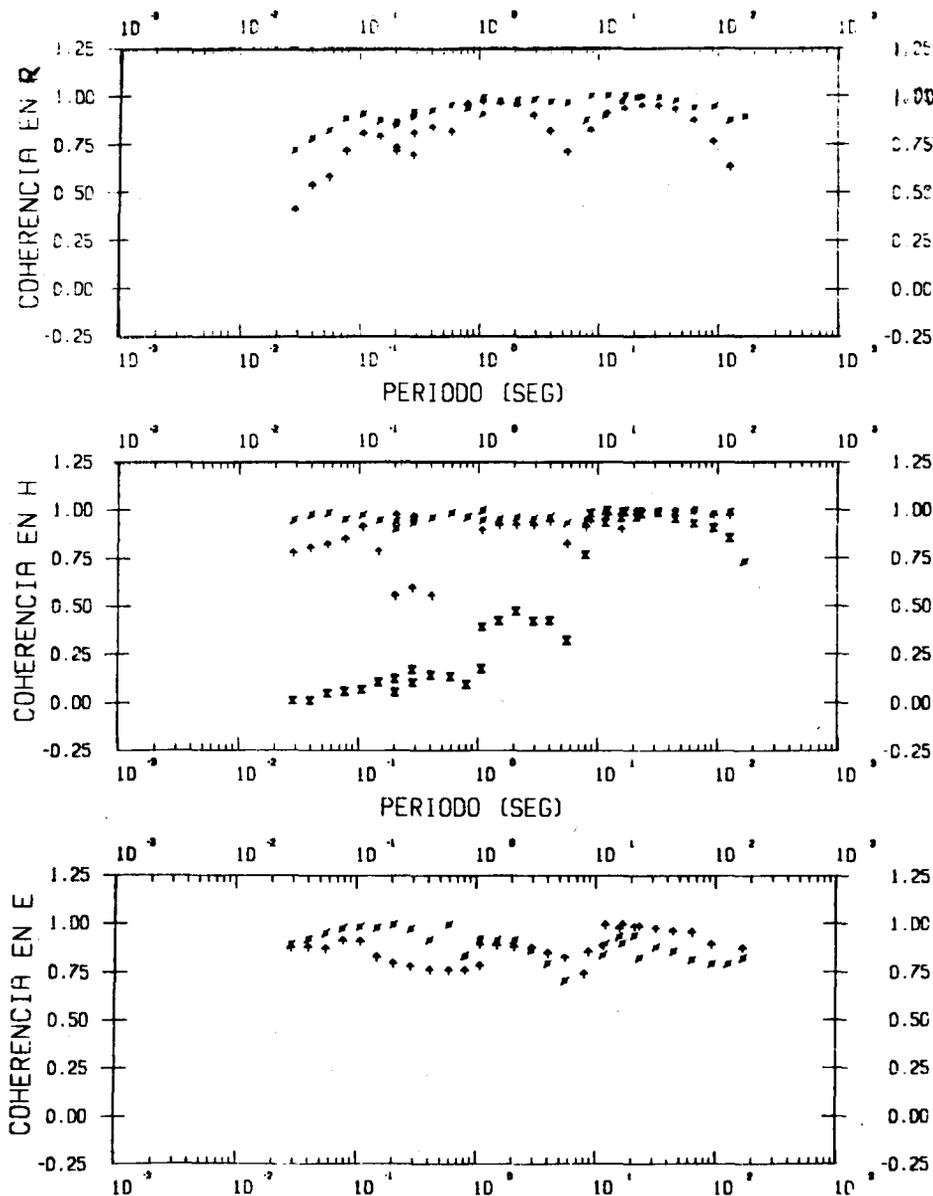


FIGURA 10. COHERENCIAS ENTRE CAMPOS MEDIDOS Y CALCULADOS PARA R, H Y E. DATOS DE CAMPO.

Las curvas de resistividad aparente y de fase (figura 6) están bien definidas. La magnitud del operador de inclinación (figura 7) alcanza valores hasta de 0.6 para periodos entre 0.2 y 20 segundos. El ángulo de rotación del operador de inclinación (figura 8) se mantiene estable en un valor alrededor de 50 grados.

El ángulo de rotación del tensor tiene un valor de 45 grados para periodos menores de 6 segundos y de 75 grados para periodos mayores, presentando un salto de 30 grados asociado al punto donde las curvas de resistividad aparente se aproximan. La asimetría (figura 9) es menor de 0.3 en casi todo el sondeo indicando poco efecto tridimensional. La asignación de modos se hizo revisando el comportamiento de los diagramas polares Z_{xy} a varios periodos (no mostrados). En ellos se observa para periodos cortos una elipse deformada con eje principal paralelo a la dirección del operador de inclinación, ésta se convierte en casi un círculo para un periodo de 6 segundos, para volver a elipse deformada con la misma orientación para periodos más largos. Esto indica sólo un acercamiento de curvas de resistividad aparente y no un cruce. Otro hecho que no apoya el cruce es que las fases que deberían intercambiarse en caso de cruce, no obedecerían el principio de fase mínima.

CONCLUSIONES

El desarrollo del sistema de adquisición y procesamiento de datos magnetoteléuricos representó, para el grupo de geofísica de exploración del CICESE, un importante esfuerzo que ha dado mayor solidez a nuestro grupo de investigación contribuyendo a la creación de una infraestructura técnica de alto nivel.

El sistema ha sido diseñado con el objetivo de evaluar la potencialidad de un método geofísico y no con el de crear un prototipo competitivo con los sistemas de venta en el mercado. En consecuencia, su realización se llevó a cabo usando componentes adquiridas en el mercado, como el procesador de la microcomputadora, o construidas en casa, como el sistema de digitalización. Esto a pesar de que reduce su costo, hace más difícil su mantenimiento.

La programación se desarrolló en el CICESE, y aunque se usaron las ideas de T. Gamble, su diseño es exclusivo para este sistema, especialmente en lo relacionado con la adquisición y manejo de datos. Los resultados de las pruebas con datos sintéticos muestran que la programación del sistema funciona adecuadamente.

Los trabajos de campo efectuados, de los cuales el sondeo descrito es un ejemplo, muestran sin lugar a dudas que el sistema completo funciona satisfactoriamente.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo económico recibido del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). Igualmente queremos agradecer las críticas constructivas de T. Gamble, H. F. Morrison, E. Mozley y K. Vozoff.

Se agradece sobremanera la participación e ideas aportadas por los Ings. V. Izquierdo, A. Colín y P. Ortiz, del grupo de electrónica de Geofísica de Exploración del CICESE.

BIBLIOGRAFIA

- CAGNIARD, L., 1953. Basic Theory of the Magneto-Telluric Method of Geophysical Prospecting. *Geophysics*, 18, 605-635.
- DAY, R., 1975. Fast Fourier Transform Routine. DECUS No. 11-179. DECUS Program Library. Digital Equipment Co. Maynard, Massachusetts.
- FABRIOL, H. y A. GONZALEZ, I., 1981. Calibración del sistema de adquisición y procesamiento de datos magnetotéluricos. Informe Técnico GEO81-01. CICESE.
- GAMBLE, T. D., 1978. Remote Reference Magnetotellurics with Squids. Ph. D. Thesis LBL-8062. University of California at Berkeley.
- GAMBLE, T. D., W. M. GOBAU and J. CLARKE, 1979. Magnetotelluric with a Remote Reference. *Geophysics*, 44, 53-68.
- GAMBLE, T. D., W. M. GOBAU, and J. CLARKE, 1979a. Error Analysis for Remote Reference Magnetotellurics. *Geophysics*, 44, 959-968.
- GONZALEZ, I., A., 1982. Levantamiento magnetotélurico en la zona geotérmica de La Presita, Sin., Tesis de Maestría, CICESE.
- HERMANCE, J. F., 1973. Processing of magnetotelluric data, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 7, 349-364.
- MADDEN, T. R. and P. NELSON, 1969. A defense of Cagniard Magneto-telluric Method. Geophysics Lab. M. I. T., Project NR-371-401 rep.
- MARTINEZ, G., M., H. FABRIOL, J. M. ROMO y A. GONZALEZ I. Levantamiento magnetotélurico en Culiacán, Sin. (en preparación).
- O'BRIEN, D. P. and H. F. MORRISON, 1967. Electromagnetic Fields in an N-Layer anisotropic half-space. *Geophysics*, 32, 668-677.
- SIMS, W. E. and F. X. BOSTICK, Jr., 1969. Methods of Magnetotelluric Analysis E. G. R. L. Tech. Rep. No. 58. U. of Texas at Austin.
- SIMS, W. E., F. X. BOSTICK, Jr., and H. W. SMITH, 1971. The estimation of Magnetotelluric impedance Tensor Elements from Measured Data. *Geophysics*, 36, 938-948.

- SWIFT, C. M., Jr., 1967. A Magnetotelluric Investigation of an Electrical Conductivity Anomaly in the Southeastern United States. Ph. D. Thesis M. I. T.
- VOZOFF, K., 1972. The Magnetotelluric Method in the Exploration of Sedimentary Basins. *Geophysics*, 19, 281-289.
- WORD, D. R., H. W. SMITH and F. X. BOSTICK, Jr., 1970. An Investigation on the Magnetotelluric Tensor Impedance Method. E. G. R. L. Tech. Rep. No. 82. U. of Texas at Austin.