

MEDIDA DE LA RESONANCIA MAGNETICA  
DE ELECTRONES DEL RUBI

Tesis de Grado previa la obtención del Título de  
Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

PABLO PEÑAFIEL MAESTRE  
Escuela Politécnica Nacional  
Facultad de Ingeniería Eléctrica  
Quito, Noviembre de 1982

Certifico que la presente  
Tesis de Grado ha sido elaborada  
da en su totalidad por el Sr.  
Pablo Peñafiel M.

*Bruce Hoeneisen*

Dr. Bruce Hoeneisen F.

Director de Tesis

## AGRADECIMIENTO

Expreso mi profundo agradecimiento al Dr. Bruce Hoeneisen por su constante y acertada dirección de la tesis y al Ing. Mario Cevallos por su apoyo incondicional. Agradezco también al Dr. Kanti Hore por la donación del rubí sintético; al Prof. Mike Fleet por la orientación de las muestras de rubí; al Sr. Miguel León por la construcción de la cavidad resonante; al Ing. Tomás Espinosa por el difractograma del rubí; al Dr. Néstor Flor por el aparato de rayos X; al Dr. Hugo Freire por la provisión de muestras químicas; a los Sres. Fernando Flores y Edwin González por su colaboración en la edición del texto; y, a todas las demás personas que de una u otra manera han hecho posible la realización de este trabajo.

# C O N T E N I D O

	Pag.
CAPITULO I	
INTRODUCCION .....	1
CAPITULO II	
DISEÑO DE LA CAVIDAD RESONANTE .....	3
CAPITULO III	
DESCRIPCION DEL EXPERIMENTO .....	22
CAPITULO IV	
EL CORINDON	
4.1 Análisis del cristal .....	30
4.2 Estructura cristalina .....	35
4.3 Teoría de la simetría .....	45
4.4 Orientación de los ejes cristalográficos	53
CAPITULO V	
CALIBRACION DEL ELECTROIMAN .....	59
CAPITULO VI	
MEDIDAS DE RESONANCIA MAGNETICA DEL RUBI	
6.1 Convención de códigos para numeración de las muestras .....	64

	Pag.
6.2 Descripción del proceso de acoplamiento	65
6.3 Calibración del electroimán con las resonancias de una muestra de sulfato de manganeso .....	66
6.4 Datos medidos: cuadros y gráficos ....	68
6.5 Determinación del signo de la relación giromagnética de las resonancias de las muestras .....	93

## CAPITULO VII

### OTRAS MEDIDAS DE RESONANCIA MAGNETICA

## CAPITULO VIII

CONCLUSIONES .....	98
--------------------	----

## APENDICE 1

### RESONANCIAS MAGNETICAS TEORICAS DEL RUBI

## ANEXO 1

### RESONANCIA MAGNETICA DE ELECTRONES

## ANEXO 2

### RESONANCIA MAGNETICA DE ELECTRONES EN RUBI

## ANEXO 3

### PROGRAMAS DE SOPORTE

## C A P I T U L O I

INTRODUCCION

Durante 1981 y comienzos de 1982 el Dr. Bruce Hoeneisen y el Ing. Mario Cevallos construyeron un electroimán y una cavidad resonante y desarrollaron la tecnología necesaria para medir resonancias magnéticas de electrones (anexo 1). En ese trabajo se observaron cuatro resonancias en una muestra de rubí. Se decidió entonces estudiar las resonancias magnéticas de electrones en rubí en forma sistemática, siendo éste el propósito del presente trabajo de tesis. Los estudios que se presentan son complementarios y posteriores a los del anexo 1, por esta razón se sugiere al lector familiarizarse con dicho anexo.

La cavidad resonante desarrollada por el Dr. Hoeneisen y el Ing. Mario Cevallos permite medir el signo de las resonancias y opera a una sola frecuencia (9 GHz) y en campos magnéticos de hasta 0.32 Tesla. Como complemento a esta cavidad se construyó una segunda cavidad resonante que, aunque no permite determinar el signo de las resonancias, tiene frecuencia ajustable en todo el rango de la Banda X de microondas (8.2 - 12.2 GHz) permitiendo además

efectuar medidas en campos magnéticos de hasta 0.63 Tesla (debido al menor entrehierro requerido en comparación con la cavidad #1).

En la presente tesis se detallan los resultados experimentales obtenidos con ambas cavidades en 5 muestras de rubí (2 rubíes naturales y 3 rubíes sintéticos). Se complementa este trabajo con medidas de otras muestras distintas del rubí con el objeto de establecer alguna comparación adicional entre las mediciones en las dos cavidades.

Para entender los resultados experimentales es necesario estudiar la estructura cristalográfica del rubí, orientar las muestras y estudiar la simetría cristalina alrededor de las impurezas de  $\text{Cr}^{+++}$  que sustituyen a iones a aluminio  $\text{Al}^{+++}$  en la estructura cristalina del corindón.

La teoría correspondiente a las resonancias medidas se indica en el anexo 2 (y no forma parte de esta tesis). En el apéndice 1 se indican los resultados de los cálculos de las resonancias correspondientes a varias orientaciones cristalinas.

## C A P I T U L O    I I

DISEÑO DE LA CAVIDAD RESONANTE

El trabajo realizado en esta Tesis está orientado a detectar la resonancia magnética de electrones de varias muestras de rubí en el rango de 8.2 a 12.2 GHz. Por esta razón se hizo necesario el diseño y construcción de una cavidad resonante en la que se puedan alojar las muestras, con la particularidad de que la frecuencia de resonancia de la misma debía ser variable dentro del rango especificado. La limitación del rango de frecuencia se debe a que los aparatos disponibles en el Laboratorio de Microondas están diseñados para operar en la Banda X.

Una cavidad resonante electromagnética es una región dieléctrica rodeada por paredes conductoras<sup>(2)</sup>. Existen cavidades resonantes construidas con diversas geometrías, pero la que tiene forma de paralelepípedo rectangular es la de más fácil análisis. Las ecuaciones 2.1, 2.2 y 2.3 son las expresiones matemáticas de las componentes rectangulares de los campos electromagnéticos en el dominio del tiempo para el modo  $TE_{10p}$ , referidos a la cavidad resonante indicada en la Fig. 2.1.<sup>(3)</sup>



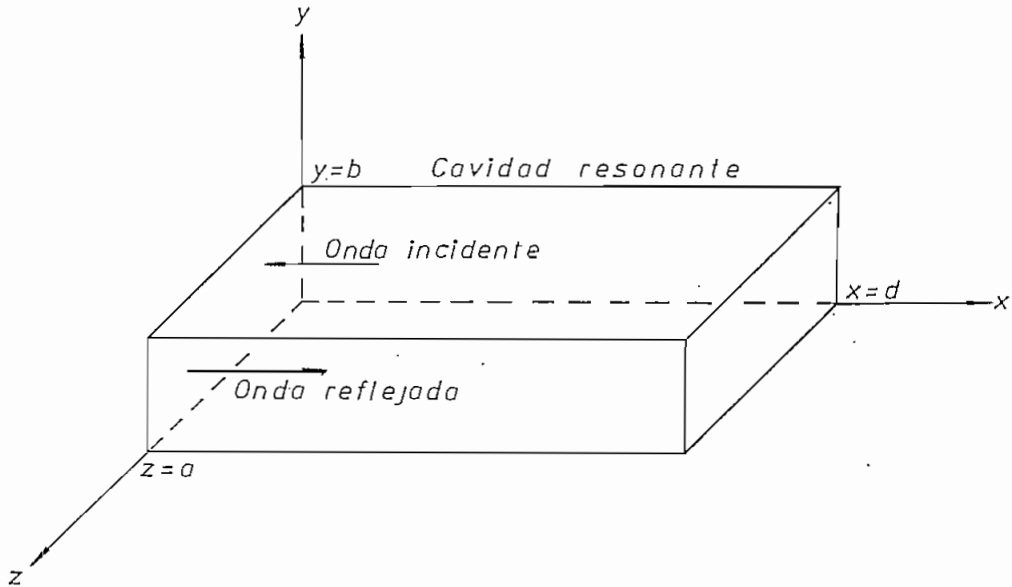


Figura 2.1.- Cavidad resonante electromagnética en el sistema de coordenadas rectangulares.

$$E_y = \frac{2wua}{\pi} H_0 \sin \frac{p\pi}{d} x \sin \frac{\pi}{a} z \cos wt \dots 2.1$$

$$H_x = 2H_0 \sin \frac{p\pi}{d} x \cos \frac{\pi}{a} z \sin wt \dots 2.2$$

$$H_z = \frac{2pa}{d} H_0 \cos \frac{p\pi}{d} x \sin \frac{\pi}{a} z \sin wt \dots 2.3$$

La ecuación 2.4 establece la condición de resonancia de la cavidad rectangular de la Fig. 2.1:

$$d = p \frac{\lambda_g}{2} \quad p = 1, 2, 3, \dots \dots 2.4$$

donde  $\lambda_g$  es la longitud de onda de los campos electromagnéticos en la cavidad resonante.

La frecuencia angular de resonancia de la cavidad viene dada por la ecuación 2.5:

$$\omega_{10p} = c \sqrt{\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{d}\right)^2} \quad \dots \quad 2.5$$

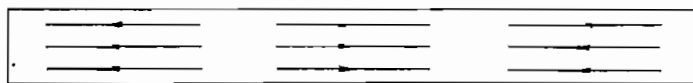
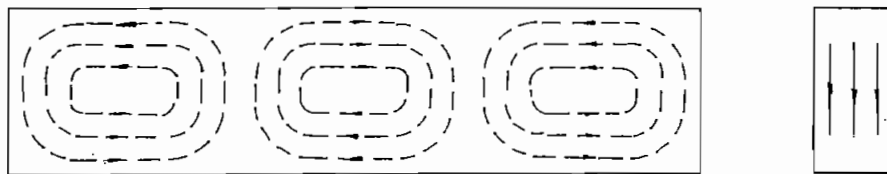
donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío.

De las ecuaciones 2.1 y 2.4 se deduce que el campo eléctrico es máximo en  $t = 0$  para las distancias  $x$  que cumplen con la condición 2.6:

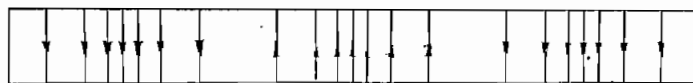
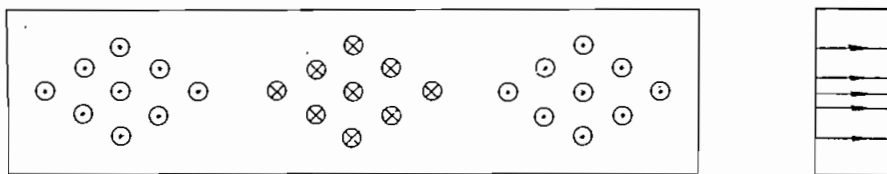
$$x = l \frac{\lambda_g}{4} \quad l = 1, 3, \dots, (2p-1) \quad 2.6$$

Por lo tanto, si se excita a la cavidad por acoplamiento vía campos eléctricos tipo dipolo eléctrico, la antena de acoplamiento debe estar colocada a la distancia  $x$  dada por la ecuación 2.6. Si  $l$  es siempre igual a la unidad, la distancia  $x$  es un cuarto de la longitud de onda  $\lambda_g$ . Las configuraciones de los campos eléctrico y magnético del modo  $TE_{103}$  para  $t = 0$  y  $t = T/4$  (siendo  $T$  el período de la onda electromagnética) se ilustran en la Fig. 2.2.

La cavidad resonante es parte de un conjunto de aparatos con los que se detecta la resonancia magnética de



a)  $\vec{H}$  en  $t = 0$



b)  $\vec{E}_y$  en  $t = \frac{T}{4}$

Figura 2.2.- Configuraciones de los campos H y E en una cavidad rectangular. Modo  $TE_{103}$ .

electrones, y trabaja sometida al campo magnético de un electroimán diseñado y construido por el Dr. Bruce Hoeneisen y el Ing. Mario Cevallos para efectos de investigaciones orientadas en ese sentido. El campo magnético máximo en el entrehierro del electroimán, a la altura a la cual se encuentra la muestra, es de 0.32 Tesla; demasiado bajo como para detectar todas las resonancias magnéticas del rubí en la Banda X. Para superar este inconveniente se construyó una pequeña prolongación del polo del electroimán.

Se decidió usar secciones de guía de onda de Banda X, disponibles en el Laboratorio de Microondas, para construir la cavidad resonante según el esquema de la Fig. 2.3.

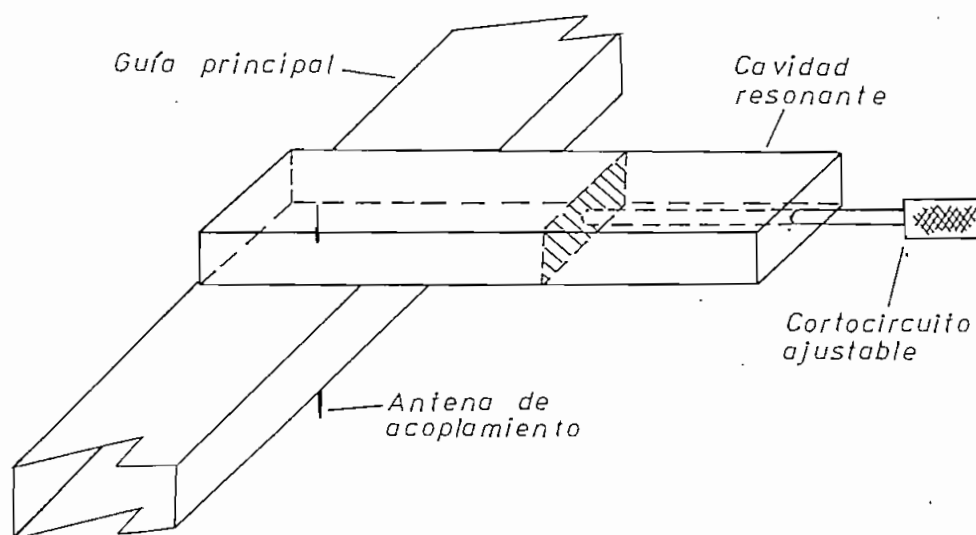


Figura 2.3.- Esquema de la cavidad resonante.

Las dimensiones transversales de las guías de onda son estandarizadas; para el caso de la Banda X están indicadas en la Fig. 2.4.

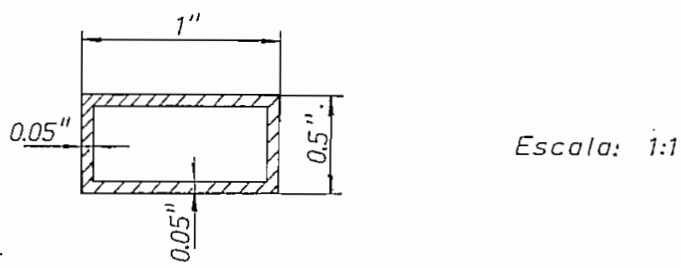


Figura 2.4.- Dimensiones transversales estándar de una guía de onda para banda X.

Para aprovechar al máximo el campo magnético del electroimán se construyó una prolongación de 2.5 cm. del polo inferior, con lo que se logró un entrehierro de 0.5 pulgadas para el cual el campo máximo a la altura de la muestra es de 0.62 Tesla.

Las muestras de rubí van colocadas en la cavidad resonante de tal manera que el campo magnético en las mismas sea máximo. Esto se ilustra en la Fig. 2.5 para el modo  $TE_{103}$  en el tiempo  $t = 0$ . Siendo  $d$  la longitud de la cavidad, la condición de resonancia está dada por la ecuación 2.4, y la distancia  $x$  a la que se debe colocar la muestra, por la ecuación 2.7, para asegurar que el campo magnético transversal en éstas sea máximo.

$$x = q \frac{\lambda_g}{2} \quad q = 0, 1, 2, \dots, p \dots \quad 2.7$$

donde  $\lambda_g$  es la longitud de onda en la cavidad.

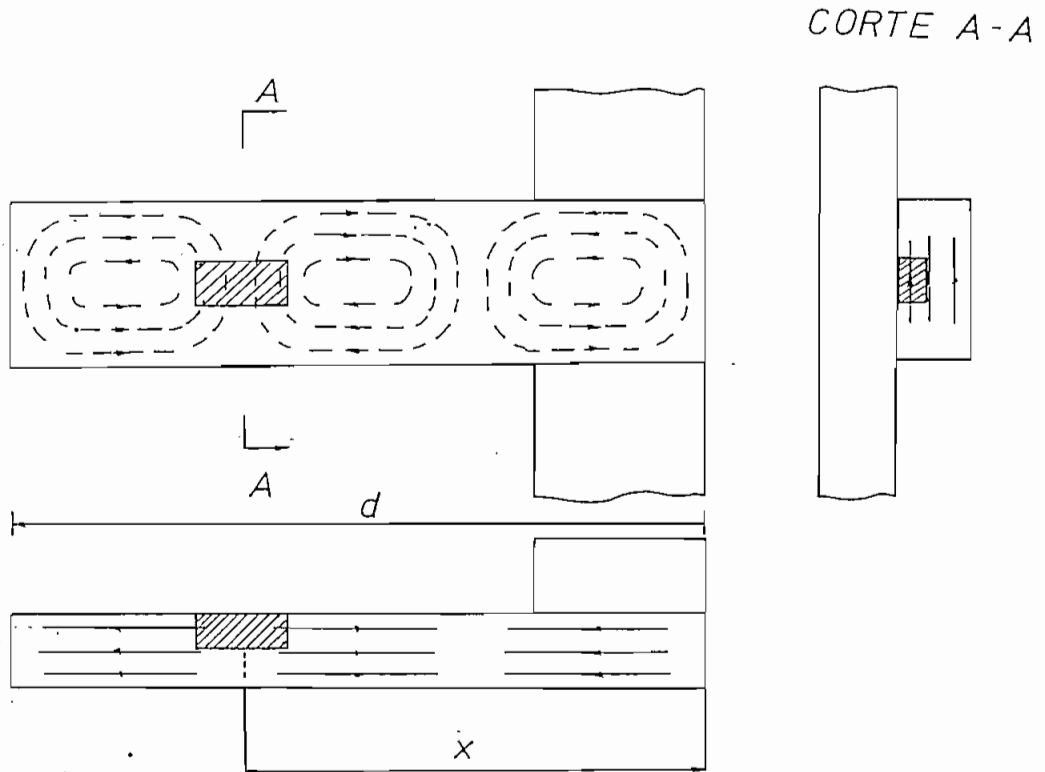


Figura 2.5.- Campo magnético en la muestra en el tiempo

$t = 0$  para el modo  $TE_{103}$

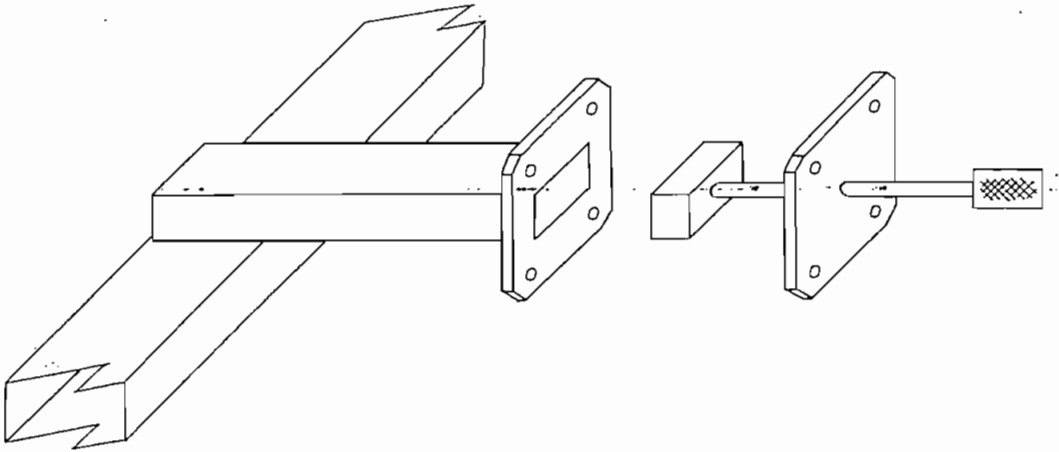
La longitud de onda en la cavidad ( $\lambda_g$ ), la longitud de onda en el vacío ( $\lambda_0$ ), y la longitud de onda de la frecuencia de corte en el vacío ( $\lambda_c$ ), están relacionadas por la ecuación 2.8.

$$\frac{1}{\lambda_g^2} = \frac{1}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2}$$

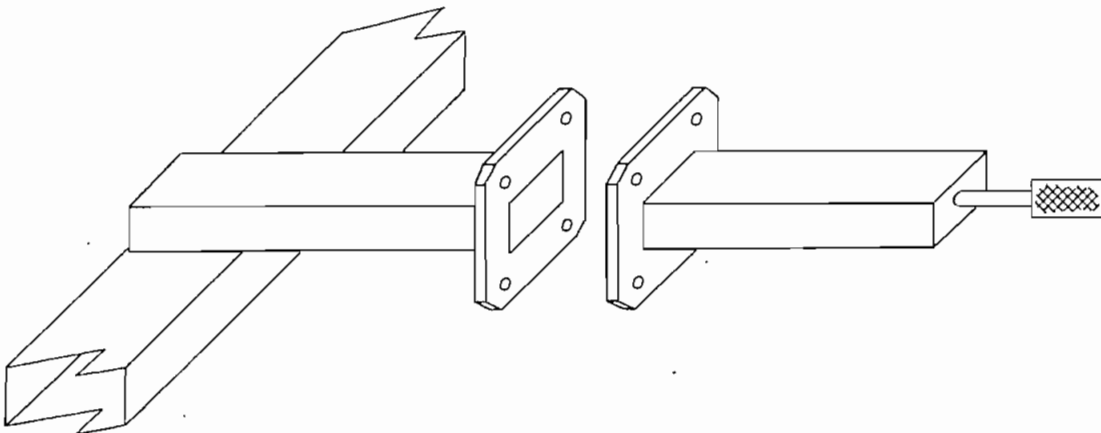
donde  $\lambda_c$  es 1.8 pulgadas para una guía de onda

de Banda X.

Para introducir la muestra dentro de la cavidad es necesario tener acceso a la misma. Esto se puede hacer con alguna de las posibilidades indicadas en la Fig. 2.6.



- a) La cavidad resonante es una guía de onda y un cortocircuito sin cuerpo.



- b) La cavidad resonante es una guía de onda y un cortocircuito con cuerpo.

Figura 2.6.- Para introducir la muestra se a bre la unión guía-cortocircuito.

La posibilidad b) es la más ventajosa pues la longitud de la guía no necesita ser muy grande como en el caso a), permitiendo además varios modos  $TE_{10p}$  de oscilación de la cavidad que dependen únicamente de la longitud del cortocircuito ajustable.

La cavidad resonante está colocada en el electroimán según se indica en la Fig. 2.7. Se aprecia que el movimiento relativo de la cavidad en el entrehierro con respecto al electroimán está limitado por el ancho del polo y por la guía principal.

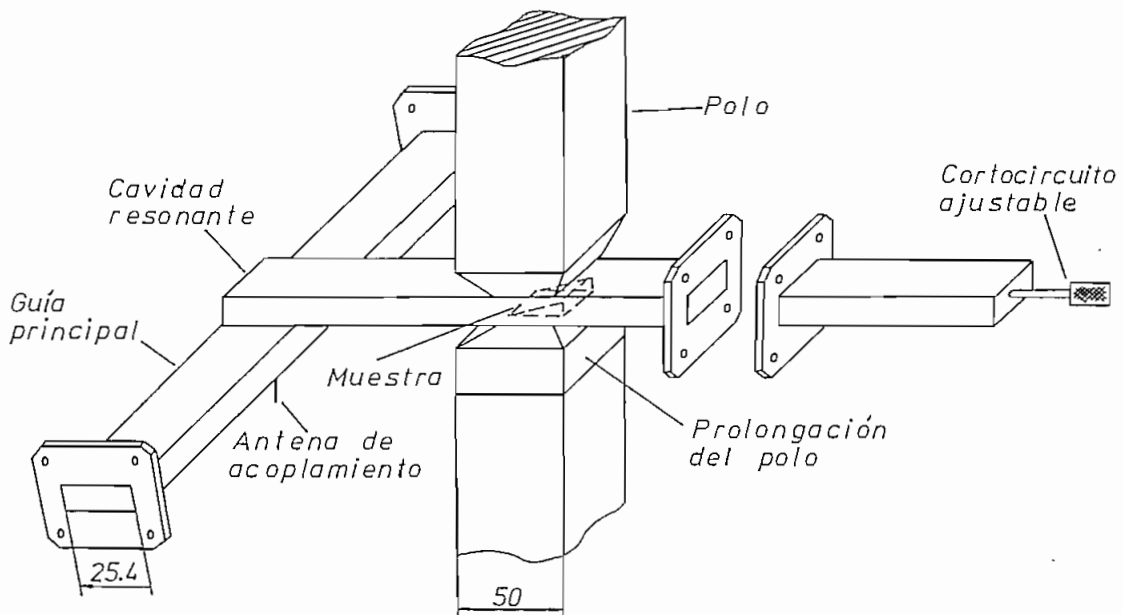


Figura 2.7.- Cavidad resonante en el electroimán.

Supongamos un procedimiento en el cual hacemos oscilar a la cavidad a una frecuencia  $f_1$  con longitud de onda  $\lambda_{g1}$ , encontrándose la muestra sometida al campo magné



tico del electroimán; entonces se cumple:

$$x_1 = q \frac{\lambda_{g1}}{2} \quad q = 0, 1, 2, \dots p \dots 2.9$$

donde  $x_1$  es la distancia  $x$  de la Fig. 2.5.

Si se aumenta la frecuencia, la longitud de onda disminuye y la distancia  $x_1$  también. Pero a una frecuencia determinada se logra:

$$q \frac{\lambda_{g1}}{2} = (q+1) \frac{\lambda_{g2}}{2}; \quad q = 0, 1, 2, \dots p \dots 2.10$$

A esta frecuencia la muestra se puede colocar en dos posiciones: 1) a la distancia  $x_1$  dada por la ecuación 2.9; y, 2) a la distancia  $x_2$  dada por la ecuación 2.11.

$$x_2 = q \frac{\lambda_{g2}}{2} \quad q = 0, 1, 1, \dots p \dots 2.11$$

Reemplazando  $\lambda_{g2}$  de 2.10 en 2.11 se obtiene:

$$x_2 = \frac{q^2}{2(q+1)} \lambda_{g1} \quad q = 0, 1, 2, \dots p \dots 2.12$$

Pero esta distancia  $x_2$  debe superar siempre la distancia impuesta por los anchos de la guía de onda principal y del polo del electroimán, es decir:

$$51 \text{ mm} \leq x_2 \quad \dots 2.13$$

En el caso crítico, la frecuencia  $f_1$  es la menor frecuencia de trabajo del rango especificado, es decir, 8.2 GHz. Entonces, de las ecuaciones 2.12 y 2.13 se obtiene:

$$51 \text{ mm} = \frac{q^2}{2(q+1)} \lambda_{g8.2\text{GHz}} \quad \dots \quad 2.14$$

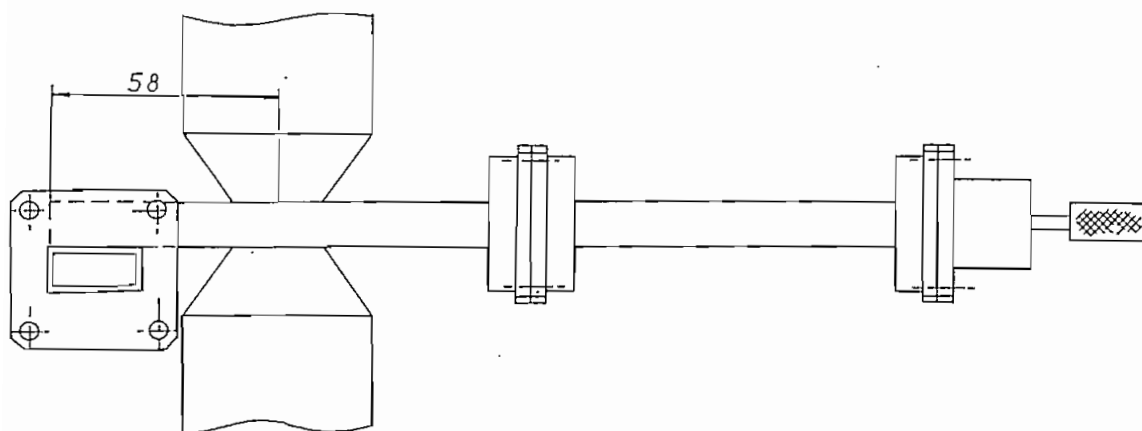
la longitud de onda a 8.2 GHz ( $\lambda_{g8.2 \text{ GHz}}$ ) es de 61 mm (ecuación 2.8), por lo tanto, la ecuación 2.14 se cumple para  $q = 3$ . La distancia  $x$  (Fig. 2.5) no puede ser mayor que  $d$ , pues lo contrario significa colocar la muestra fuera de la cavidad resonante; de esto se deduce que  $p$  en la ecuación 2.4 debe ser mayor o igual a 3. Tomando  $p = 3$  se obtiene la mínima longitud de la cavidad sin considerar el cortocircuito ajustable:

$$d = 3 \frac{\lambda_{g8.2\text{GHz}}}{2} + 25 \text{ mm}$$

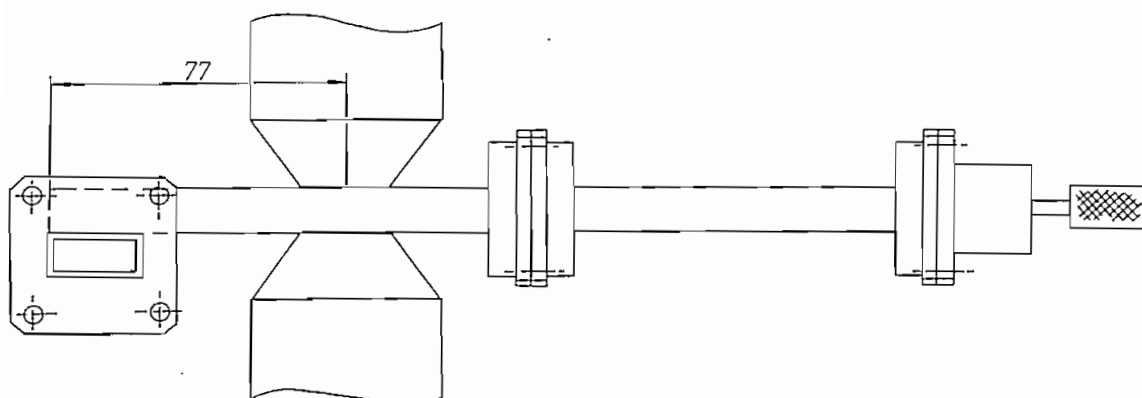
$$d = 117 \text{ mm}$$

La longitud de la cavidad resonante sin el cortocircuito ajustable es de 125 mm superando así la especificación mínima indicada anteriormente. En la Fig. 2.8 se observa la colocación de la cavidad en el entrehierro del electroimán para tres frecuencias de trabajo (8.2 GHz, 10.2 GHz y 12.2 GHz).

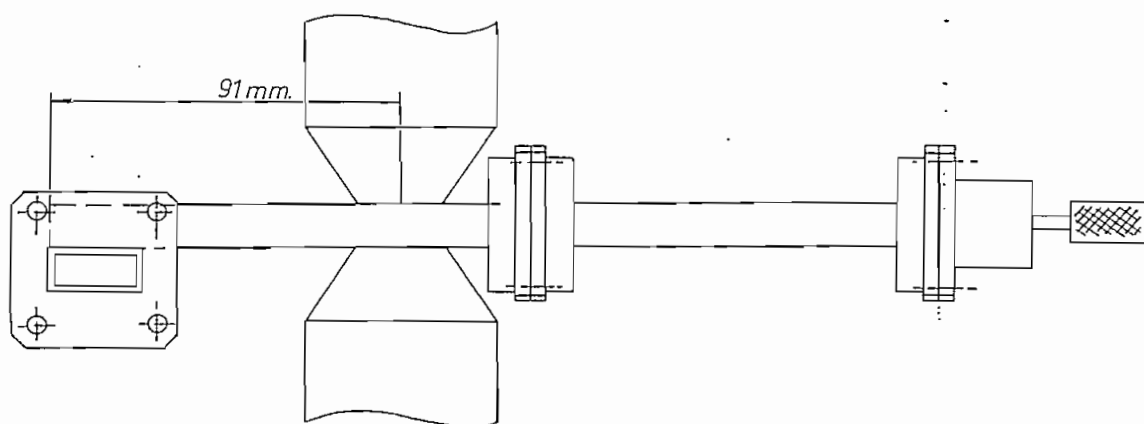
En la Fig. 2.9 se ilustra la utilidad de la cavidad resonante en todo el rango de frecuencia de trabajo.



a) Frecuencia = 12.2 GHz. ( $q = 4$ )



b) Frecuencia = 10.2 GHz. ( $q = 4$ )



c) Frecuencia = 8.2 GHz. ( $q = 3$ )

Figura 2.8.- Posición de la cavidad en el electroimán para 3 frecuencias.

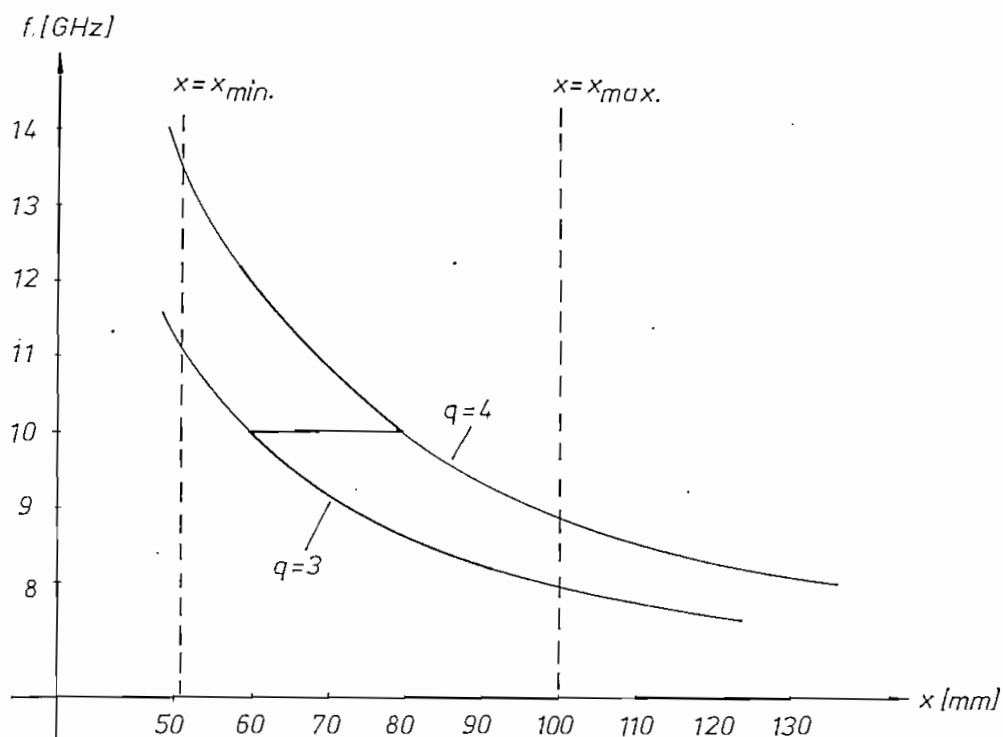


Figura 2.9.- Posición de la cavidad para el rango de frecuencia de trabajo. (línea gruesa)

El eje horizontal es la distancia entre el extremo de la cavidad resonante permanentemente cerrado y la muestra colocada en el centro del polo del electroimán; se destacan las distancias  $x_{min}$  y  $x_{max}$  que dependen de las limitaciones introducidas por el ancho del polo del electroimán, por la guía principal y por el flanche de unión de la cavidad con el cortocircuito ajustable:

$$x_{min} = 26 \text{ mm (guía principal)} + 25 \text{ mm (polo)}$$

$$x_{min} = 51 \text{ mm}$$

$$x_{\max} = 125 \text{ mm (cavidad)} - 25 \text{ mm (polo)}$$

$$x_{\max} = 100 \text{ mm}$$

El eje vertical es la frecuencia de trabajo. La relación entre los ejes horizontal y vertical está dada por la ecuación 2.15:

$$x = \frac{q}{2} \left[ \left( \frac{f}{c} \right)^2 - \left( \frac{1}{\lambda_c} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} = q \frac{\lambda_g}{2} \quad \dots \quad 2.15$$

La longitud total de la cavidad resonante, según lo ilustrado en la Fig. 2.6 b), no puede ser menor que la longitud de la cavidad sin el cortocircuito ajustable, por esta razón:

$$125 \text{ mm} \leq p \frac{\lambda_g}{2} \quad \dots \quad 2.16$$

Para la menor frecuencia de trabajo (8.2 GHz.) la ecuación 2.16 se cumple con  $p \geq 5$ . La longitud del cortocircuito ajustable permitió que la cavidad resuene con los modos  $TE_{105}$  y  $TE_{106}$ .

La excitación de la cavidad se realiza a través de un orificio practicado en la parte inferior de la misma para tomar energía de la guía principal por medio de una antena de acoplamiento (Fig. 2.10). La longitud de esta antena (10 mm) fue determinada posteriormente a la construcción de la cavidad, escogiendo aquella que logró sub-

acoplarla difiriendo muy poco del acoplamiento crítico. El factor de calidad cargado (con antena de acoplamiento de 10 mm y la muestra dentro de la cavidad) es de aproximadamente 2 500.

Para posicionar la antena se escogió un valor promedio de frecuencia de trabajo (8.2 - 12.2 GHz), es decir, 10.2 GHz. Con la ecuación 2.6 se determina que una antena de acoplamiento tipo dipolo eléctrico, para una frecuencia de trabajo de 10.2 GHz, debe estar colocada a 9.6 mm del extremo de la cavidad permanentemente cerrado.

Los flanches están contruidos con las dimensiones estándar de tal manera que el conjunto cavidad - guía pueda ser ensamblado al resto del sistema. La guía principal, la cavidad resonante y los flanches están soldados con metal amarillo para garantizar la solidez del conjunto sin deformar las piezas durante el proceso.

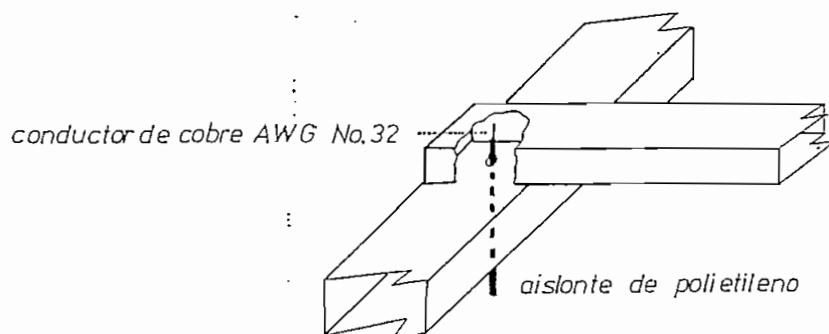


Figura 2.10.- Detalle de la antena de acoplamiento.

Tomando en cuenta todos los criterios indicados, se elaboraron los diagramas de las Fig. 2.11, 2.12 y 2.13 para la construcción de la cavidad. Una vez construida fue necesario limpiar las impurezas y óxidos con una solución de ácido nítrico al 5 % y posteriormente platear las paredes internas humedeciéndolas previamente con agua y frotándolas con nitrato amónico de plata. El objeto de este procedimiento es el de lograr aumentar el factor de calidad que depende en forma inversamente proporcional de la energía perdida en las paredes.

El costo de la cavidad es de seis mil sucres.

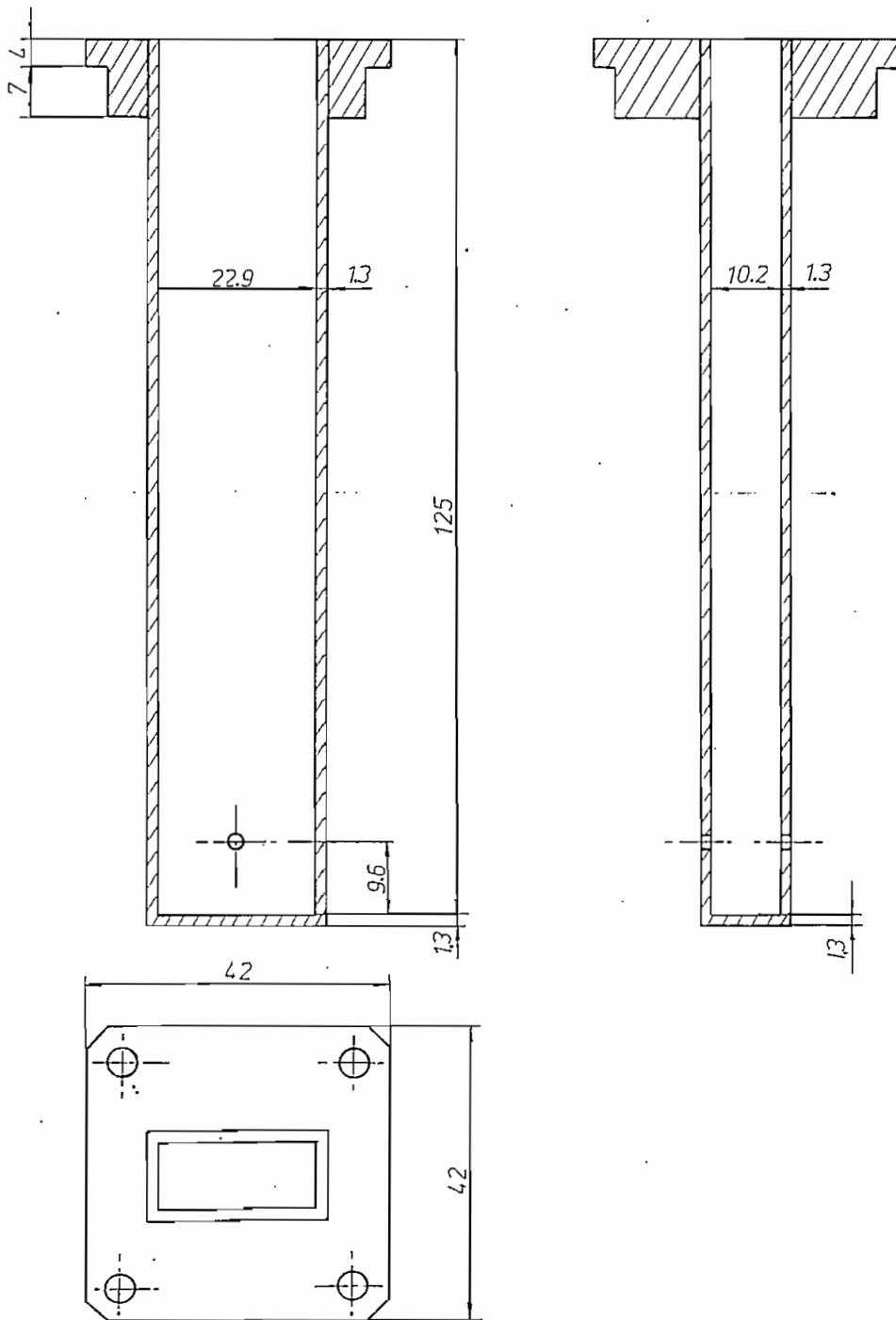


Figura 2.11.- Cavidad resonante.



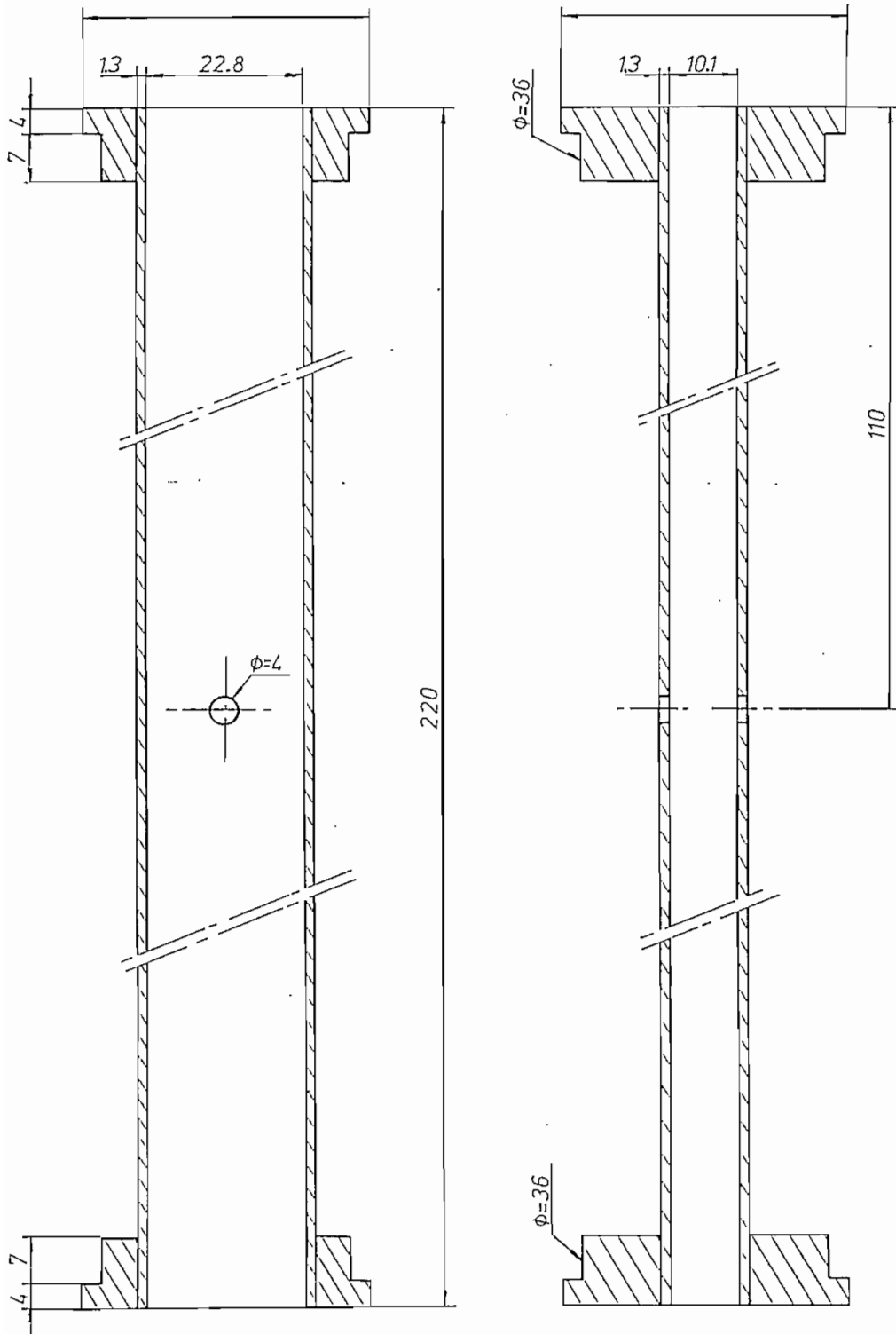


Figura 2.12.- Guía de onda principal.

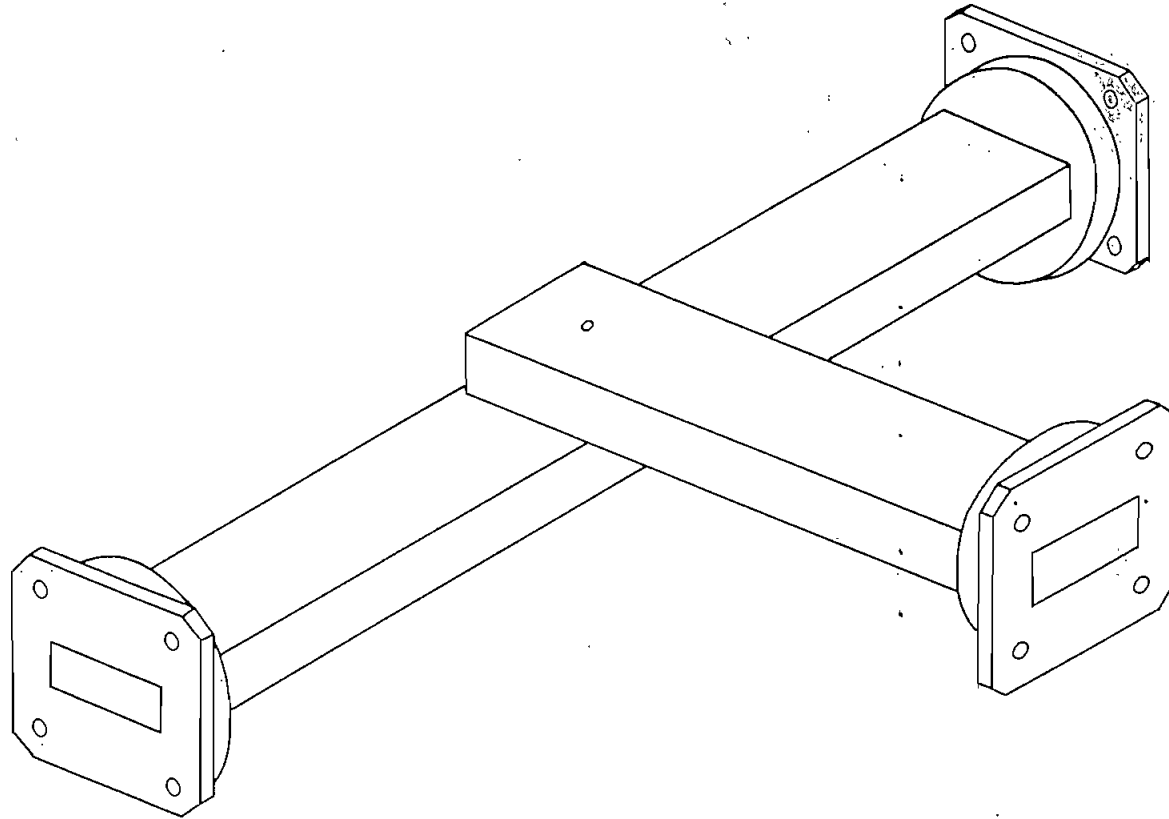


Figura 2.13.- Perspectiva de la cavidad y la guía principal.

## C A P I T U L O    I I I

DESCRIPCION DEL EXPERIMENTO

En el Anexo 1 se incluye una copia del artículo "Resonancia magnética de electrones" elaborado por el Dr. Bruce Hoeneisen y el Ing. Mario Cevallos<sup>(1)</sup>. Este artículo resume la teoría y la tecnología desarrolladas para la medición de resonancias como las detectadas en esta Tesis; solamente resta mencionar algunos aspectos de interés.

Se debe recalcar que la cavidad cilíndrica con la que se obtuvieron los resultados del artículo es complementaria con la que se construyó para el desarrollo de este experimento y las diferencias se transcriben<sup>(1)</sup> en el siguiente cuadro:

	Cavidad #1 (artículo)	Cavidad #2 (tesis)
Frecuencia	9 GHz	8.2 - 12.2 GHz
Determinación del signo de $\delta$	si	no
Entrehierro	42 mm	14 mm
Induc. magnét.	0.02-0.33 Tesla	0.02-0.63 Tesla

La configuración para la medida de resonancias magnéticas con la cavidad #2 es básicamente la misma que se presenta en el artículo <sup>(1)</sup>, con los cambios que se visualizan en las Fig. 3.1 y 3.2 conjuntamente con el circuito de la Fig. 3.3.

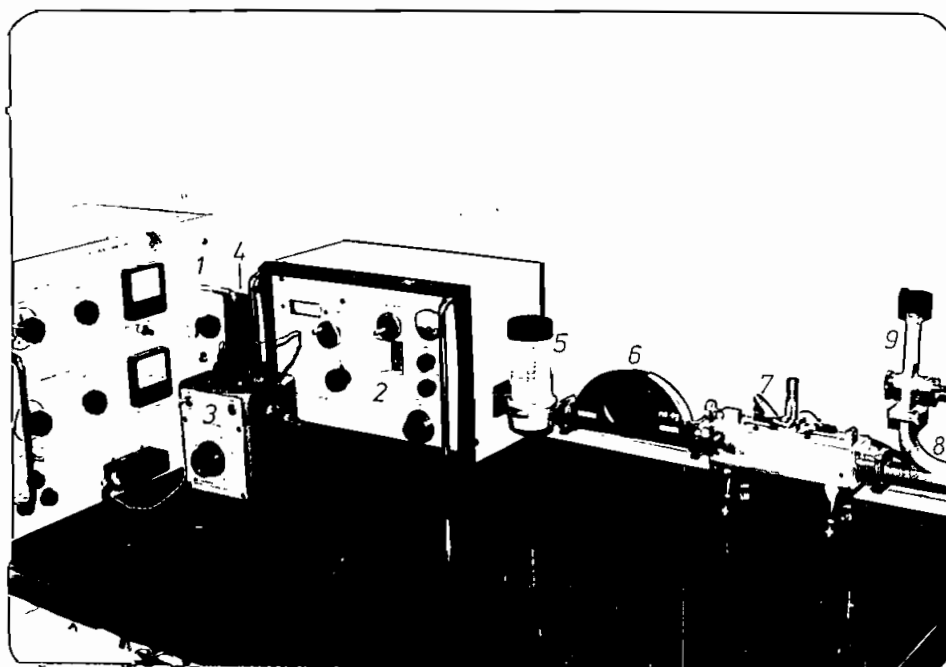


Figura 3.1.- Equipo para medir resonancia magnética de electrones.

- |                           |  |
|---------------------------|--|
| 1.- Fuente de Klystron    | 2.- Klystron                               |
| 3.- Variac                | 4.- Transformador para barrido de Klystron |
| 5.- Frecuencímetro        | 6.- Atenuador variable                     |
| 7.- Guía de onda ranurada | 8.- Acoplador direccional                  |
| 9.- Diodo detector        |  |

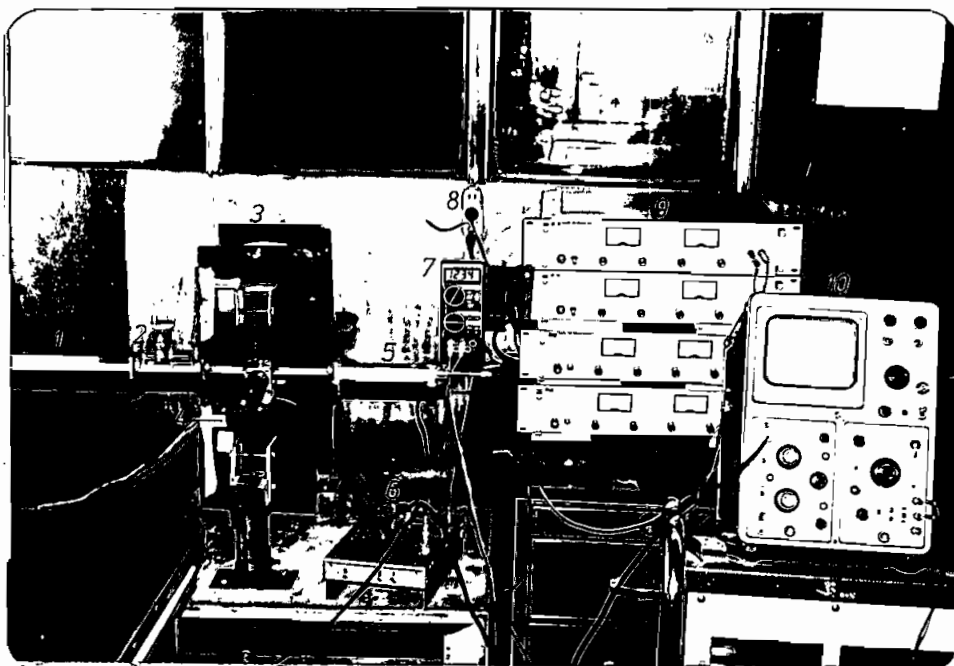


Figura 3.2.- Equipo para medir resonancia  
magnética de electrones.

- |                             |                           |
|-----------------------------|---------------------------|
| 1.- Acoplador direccional   | 2.- Tornillo sintonizable |
| 3.- Electroimán             | 4.- Cavidad resonante     |
| 5.- Cortocircuito ajustable | 6.- Amplificador          |
| 7.- Amperímetro             | 8.- Conexión para fuentes |
| 9.- Fuentes de poder        | 10.- Osciloscopio         |

El Klystron provee energía de microonda al sistema. Esta energía es la correspondiente a un modo de operación determinado y se puede observar en el osciloscopio con el circuito indicado a continuación.

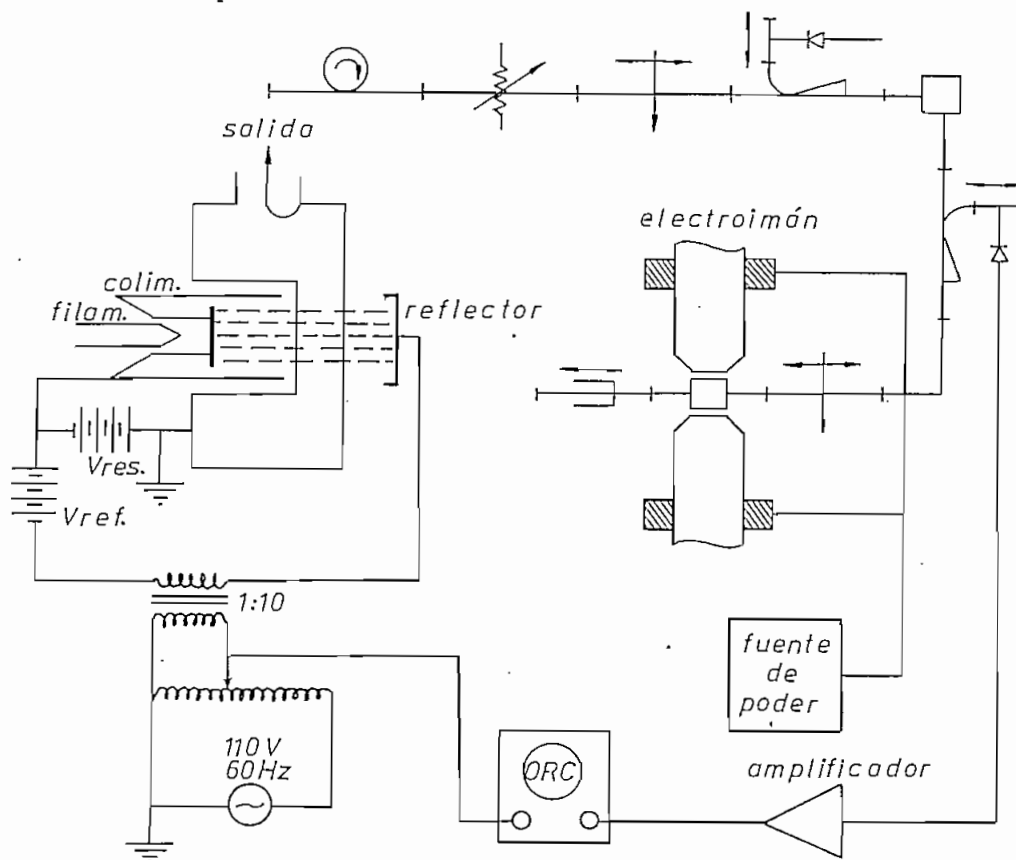


Figura 3.3.- Circuito para detección de resonancia magnética de electrones.

La señal resultante en la pantalla del osciloscopio es la que se indica en la Fig. 3.4.

En el circuito de la Fig. 3.3 se puede detectar la señal de microonda en varios puntos, de esta forma es posible conocer el comportamiento del mismo. La frecuencia de resonancia de la cavidad se alcanza con cuatro elementos sintonizables que son: la antena de acoplamiento; el tornillo sintonizable; y, dos cortocircuitos ajustables en la cavidad y en la guía principal respectivamente.

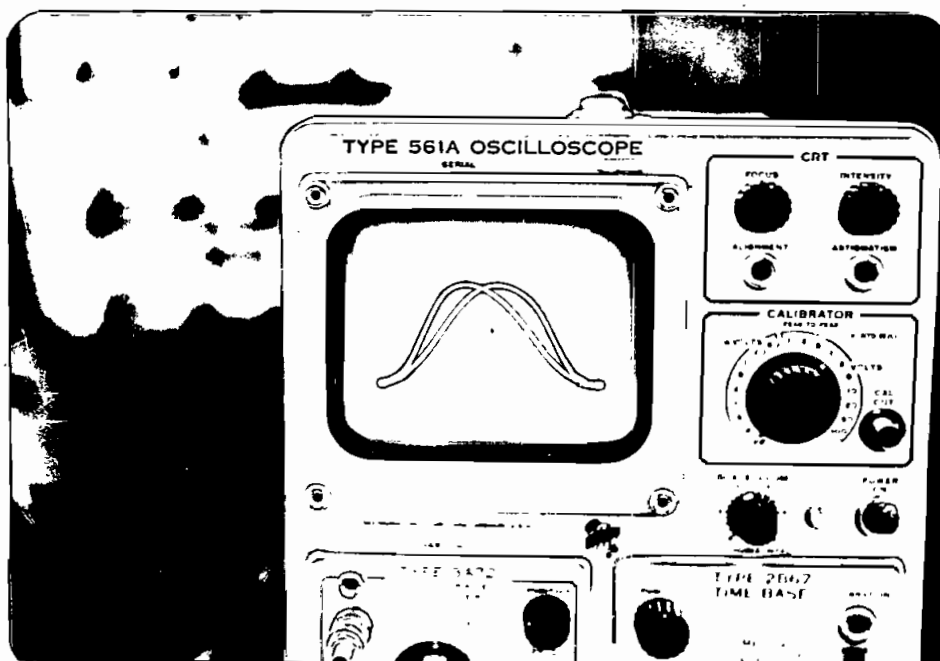


Figura 3.4.- Modo de oscilación del Klystron.

Cuando la cavidad entra en sintonía, la curva de absorción de esta se superpone al modo de oscilación del Klystron y se obtiene la Fig. 3.5. La existencia de la doble curva es efecto del transformador elevador de voltaje que trabaja con la frecuencia de línea; este efecto puede desaparecer usando un oscilador en lugar del variac para cambiar la frecuencia de barrido. En caso de no disponer de un oscilador, se puede disminuir la amplitud del barrido que depende del variac, hasta obtener una señal similar a la de la Fig. 3.6.

El fenómeno de resonancia en la mayoría de las

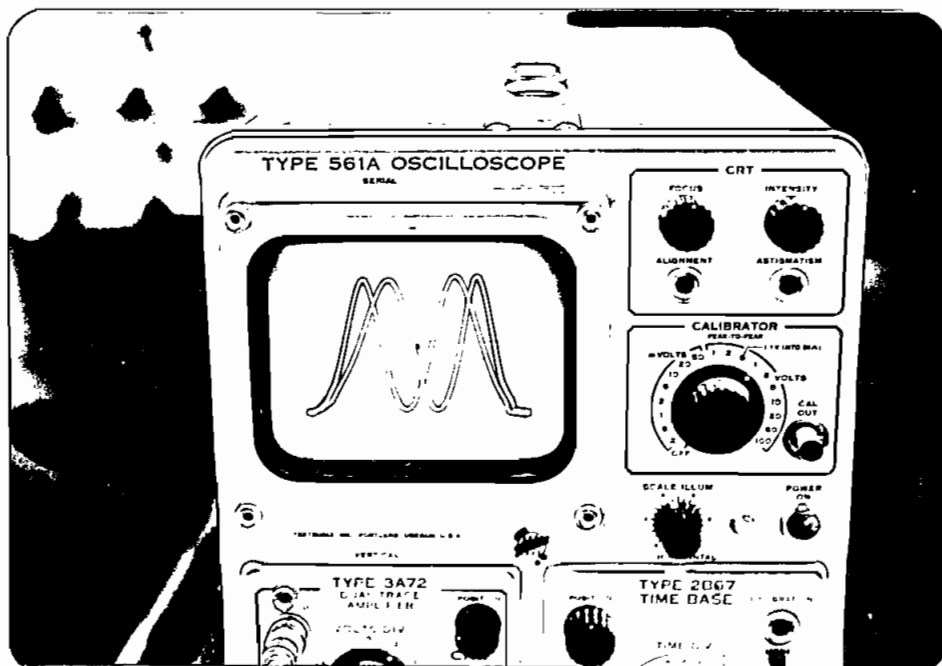


Figura 3.5.- Superposición de la curva de absorción al modo de oscilación del Klystron.

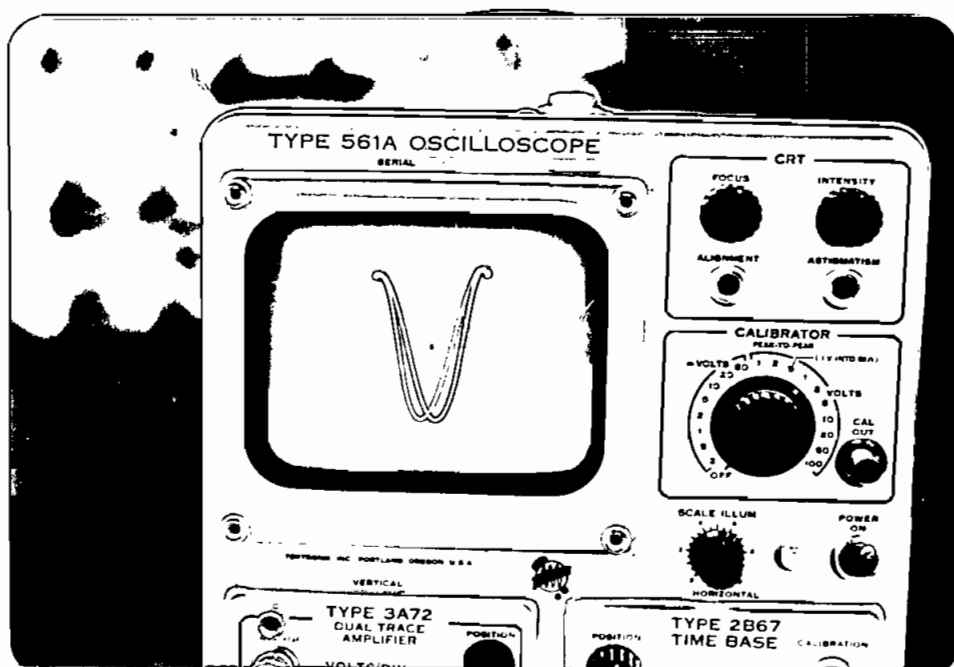


Figura 3.6.- Se disminuye el barrido horizontal de la Fig. 3.5



muestras es demasiado débil como para percibirlo con la resolución del osciloscopio Tektronix 561A, pero amplificando previamente la señal de la Fig. 3.6 se obtiene una resolución mucho mayor y en la pantalla se observa el pico de la curva de absorción como lo indica la Fig. 3.7; para esta señal los desplazamientos  $\Delta x$  de la curva de absorción al lograrse la resonancia son detectables.

Finalmente, manteniendo fija la frecuencia, se varía el campo magnético perpendicular a la muestra incrementando el voltaje en los terminales de bobina del elec-troimán y se registran los valores de frecuencia de micro-onda e intensidad de corriente en el bobinado para la presencia de cada resonancia magnética en la muestra.

Se debe notar que utilizando el método anteriormente descrito, no es posible asignar una intensidad relativa al fenómeno sino únicamente detectarlo, porque la sensibilidad del aparato depende de muchos parámetros.

Los puntos experimentales revelarán patrones de resonancia para cada una de las muestras, las mismas que están estrechamente relacionadas con su estructura cristalina y orientación dentro del campo magnético del electro-imán.

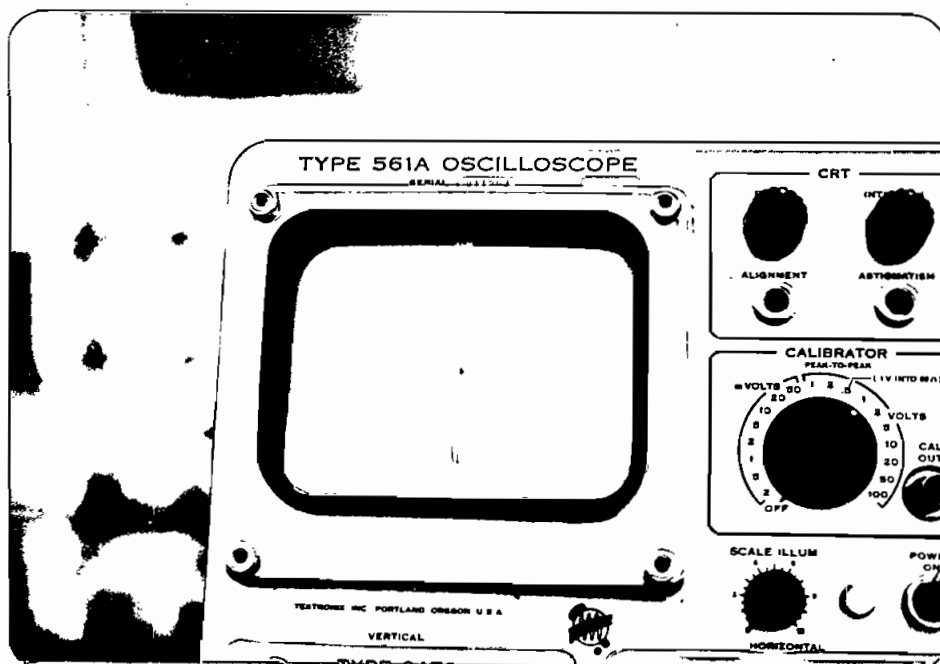


Figura 3.7.- Pico de la curva de absorción de la cavidad resonante, superpuesta a la curva del modo de oscilación del Klystron y ampliada para lograr mayor resolución en la detección de resonancia magnética de electrones.

## C A P I T U L O   I V

EL CORINDON

## 4.1 ANALISIS DEL CRISTAL

Las muestras medidas en el experimento son dos rubíes naturales y tres sintéticos. La estructura cristalográfica de las muestras se determinó mediante difracción de Bragg de rayos X monocromáticos con longitud de onda igual a  $1.5405 \text{ \AA}$  que corresponde a la radiación  $K\alpha_1$  del Cobre (también existe radiación  $K\beta_1$  y  $K\alpha_2$  pero son de poca intensidad y se las desprecia). El difractograma de la Fig. 4.1 corresponde a polvo de rubí sintético colocado sobre una placa portaobjetos por sedimentación y fue obtenido en el equipo de rayos X de la Facultad de Geología Minas y Petróleos de la E.P.N.

Comparando el difractograma obtenido con los patrones existentes, se conoció que a la sustancia cristalina del rubí utilizado en este experimento le corresponde la fórmula química  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ . Además, se verificó la estructura  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  de todas las muestras mediante difracción de

Bragg de rayos X monocromáticos con el método del cristal giratorio<sup>(4)</sup> (gentiliza del Prof. Mike Fleet de la Universidad de Western Ontario).

Al difractograma de la Fig. 4.1 está asociada la tabla de difracción 4.1<sup>(5)</sup> donde: hkl son los índices de Miller de los planos en los que se produce la difracción, I es una intensidad relativa al efecto de la difracción más pronunciada,  $d(\text{Å})$  es la distancia entre los planos de difracción, y  $2\theta$  es el doble del ángulo de Bragg.

hkl	I	$d(\text{Å})$	$2\theta$ (en grados)
012	75	3.479	24.51
104	90	2.552	33.42
110	40	2.379	35.85
006	1	2.165	39.39
113	100	2.085	40.90
202	2	1.164	43.42
024	45	1.740	49.01
116	80	1.601	53.27
211	4	1.546	55.16
122	6	1.514	56.33
018	8	1.510	56.48
124	30	1.404	66.60
030	50	1.374	68.26

TABLA 4.1.- Difracción del rubí

La Tabla 4.2 resume el resultado de un análisis químico del rubí realizado en 1948. Se observa que en el rubí sintético la concentración de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  es mayor que en el rubí natural.

	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Cr}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	MgO	$\text{V}_2\text{O}_5$	CuO	CdO
1.	0.137	98.8	0.945	0.0147	0.02265	0.0320	0.00237	0.0168
2.	0.542	97.5	1.81	0.0252	0.0328	0.0582	0.0016	0.0351
3.	0.464	97.3	2.58	0.0409	0.0625	nil	0.00308	0.0112

1. Rubí natural, color claro.
2. Rubí natural, color oscuro.
3. Rubí sintético, color oscuro.

nil Indica no existencia:  $\text{TiO}_2$ , MnO y NiO.

Las tres variedades de rubí contienen  $\text{MoO}_3$  en menos del 0.0117.

Todas las cifras indican porcentaje.

Tabla 4.2.- Análisis del rubí. (Alexander - 1948)

El rubí es una variedad de Corindón que tiene impurezas de Cromo. En la naturaleza existen algunas variedades de Corindón con coloración propia de piedras preciosas; el rojo se llama rubí y el azul safiro, aunque también se utiliza el nombre de safiro acompañado de un prefijo para designar un Corindón de otro color (safiro amarillo) (6).

## 4.2 ESTRUCTURA CRISTALINA

De la bibliografía existente se logró recuperar los siguientes datos del  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ : (6-8-9)

Peso molecular: 101.96 gr/Mol.

Índice de refracción: 1.768 (1.759 a 1.763)

Densidad:  $3.965 \text{ gr/cm}^3 - 4.022 \text{ gr/cm}^3$

Temperatura de fusión: ~~2045~~  $2045 \text{ }^\circ\text{C}$

Temperatura de ebullición:  $2980 \text{ }^\circ\text{C}$

Dureza: 9 (por definición)

Coloración: incoloro, azul, amarillo, violeta, verde, rosado y rojo.

Sistema cristalino: Hexagonal R (Simetría romboédrica para distinguir de la verdaderamente hexagonal)

Número de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  por celda unitaria: 6

$$a_0 = 4.7591 \pm 0.0004 \text{ \AA}$$

$$c_0 = 12.9894 \pm 0.0030 \text{ \AA}$$

Volumen de la celda unitaria:  $(254.78 \pm 0.07) \cdot 10^{-24} \text{ cm}^3$

Notaciones del grupo espacial:

Internacional ....  $R\bar{3}c$

Maugin ....  $R\bar{3}2c$

Schoenflies ....  $D_{3d}^6$

Estos datos nos permiten entender la estructura

cristalina como se indica en la Fig. 4.2. Esta estructura tiene el nombre de hexagonal compacta y se caracteriza por que los puntos de la red están distribuidos en capas, como se indica en la Fig. 4.3 a) y b). Los iones  $O^{--}$  están localizados en los puntos de la red, mientras que los iones  $Al^{+++}$  se distribuyen en planos intermedios a las capas A y B según las configuraciones de la Fig. 4.3 c).

En la Tabla 4.3 se indica la ubicación de los iones  $O^{--}$  y  $Al^{+++}$  referida al eje  $c$  de la celda unitaria.

Cota	Tipo de capa	No. $O^{--}$	No. $Al^{+++}$	Frac. ocup.
0	A	3/2	0	1
c/12	$C_1$	0	2	2/3
c/6	B	3	0	1
3c/12	$C_2$	0	2	2/3
c/3	A	3	0	1
5c/12	$C_3$	0	2	2/3
c/2	B	3	0	1
7c/12	$C_1$	0	2	2/3
2c/3	A	3	0	1
3c/4	$C_2$	0	2	2/3
5c/6	B	3	0	1
11c/12	$C_3$	0	2	2/3
c	A	3/2	0	1
TOTAL		18	12	

Tabla 4.3.- Ubicación de iones en la celda unitaria.

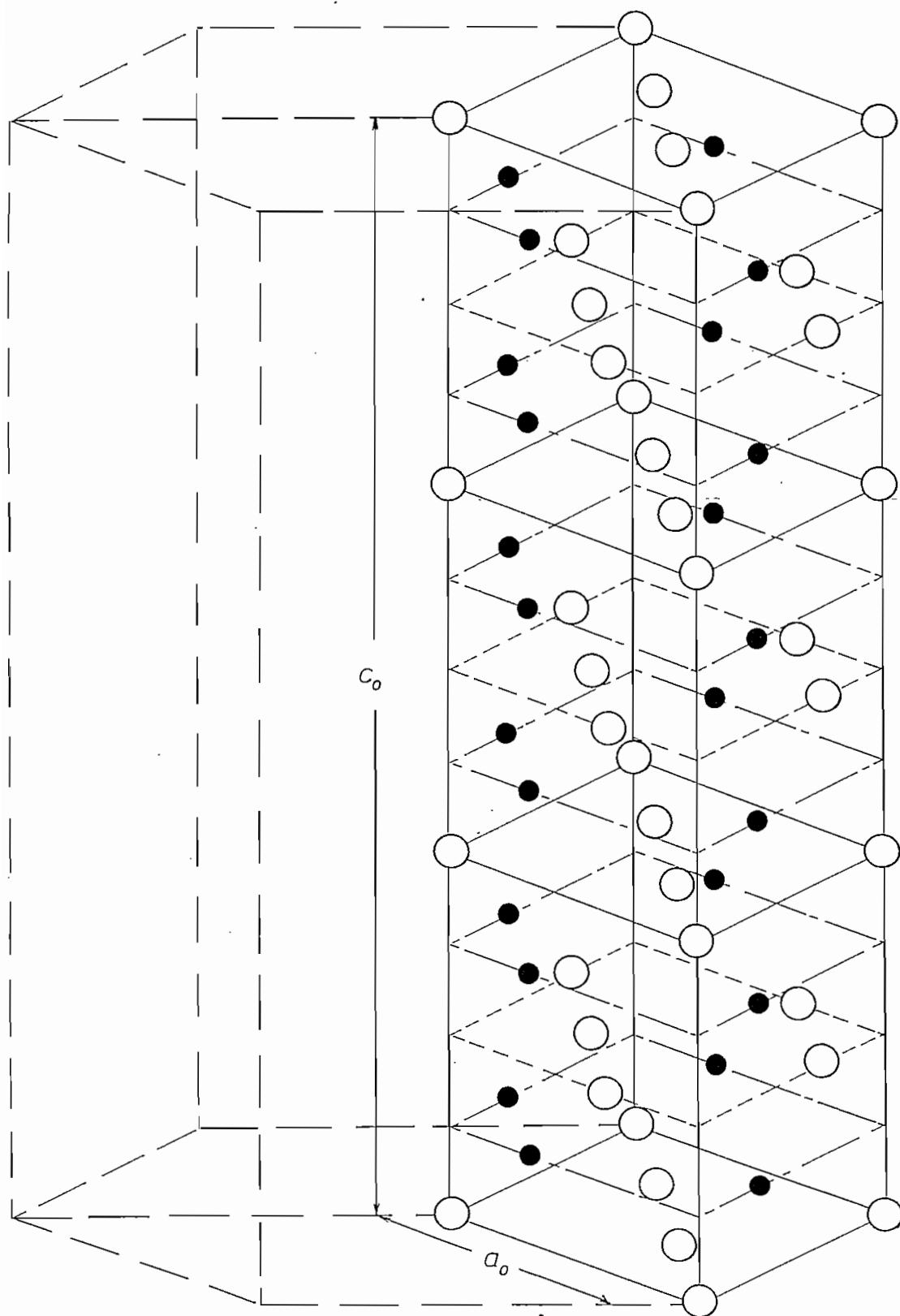


Figura 4.2.- Celda unitaria: en blanco ....  $O^{2-}$   
 en negro ....  $Al^{3+}$



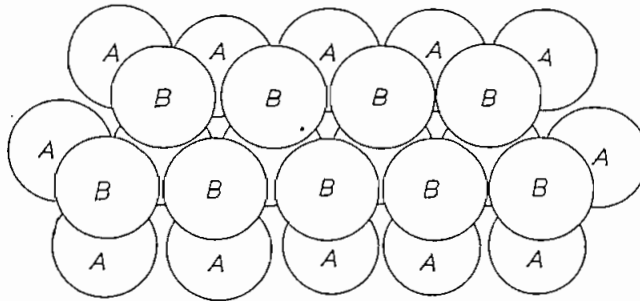


Figura 4.3 a).- Estructura hexagonal compacta.

Vista superior.

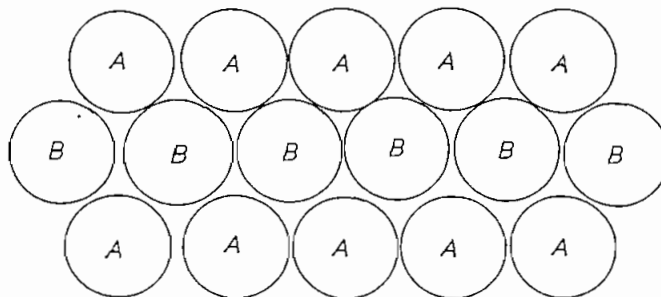


Figura 4.3 b).- Estructura hexagonal compacta.

Vista lateral.

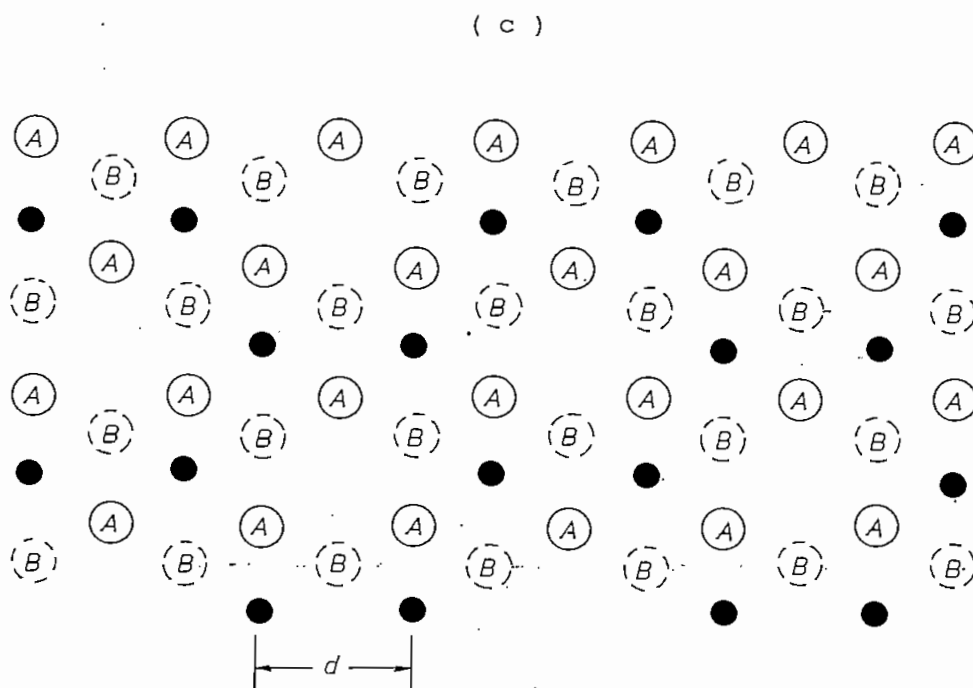


Figura 4.3 c).- Ubicación de iones  $Al^{+++}$   
en la capa  $C_1$ . (en negro)

Las alternativas para la distribución de iones  $Al^{+++}$  en las capas  $C_2$  y  $C_3$  son las siguientes:

a) La capa  $C_2$  tiene la configuración de la capa  $C_1$  pero desplazada en una distancia  $d$  y la capa  $C_3$  tiene la misma configuración que la capa  $C_2$  pero desplazada en una distancia  $2d$  con respecto a  $C_1$ .

b)  $C_1 = C_2$  y  $C_3$ , con lo que la simetría aumenta de  $c_3$  a  $D_3$

Algunos de los datos bibliográficos del  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pueden ser comprobados realizando los cálculos que se indican a continuación.

- a) Peso Molecular: El  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> está constituido por dos iones Al<sup>+++</sup> y tres O<sup>--</sup>. Los pesos moleculares de estos iones son los siguientes:

$$\text{Peso Mol del Al}^{+++} = 26.9815 \text{ gr/Mol}$$

$$\text{Peso Mol del O}^{--} = 15.9994 \text{ gr/Mol}$$

Por lo tanto, el peso molecular del  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> es 101.96 gr/Mol.

- b) Volumen de la celda unitaria: En la Fig. 4.4 se esquematiza la relación existente entre la celda unitaria considerada en este cálculo y la celda hexagonal. Designando con V al volumen de la celda unitaria se tiene:

$$V = a_0^2 c_0 \cos(30^\circ)$$

$$V = 254.78 \times 10^{-24} \text{ cm}^3$$

- c) Volumen Molar: La celda unitaria está constituida por seis moléculas, por lo tanto, el volumen molar se obtiene dividiendo V para seis y multiplicando ese valor por el Número de Avogadro ( $6.02217 \times 10^{23}$  moléc./Mol)

$$V_{\text{molar}} = \frac{V}{6} \text{ No. de Avogadro}$$

$$V_{\text{molar}} = 25.572 \text{ cm}^3$$

d) Densidad: Es la razón entre el peso mol y el volumen molar:

$$\rho_{\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3} = \frac{\text{peso mol}}{V_{\text{molar}}}$$

$$\rho_{\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3} = 3.9872 \text{ gr/cm}^3$$

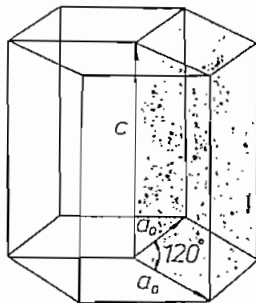


Figura 4.4.- Relación entre celda unitaria y celda hexagonal.

e) Volumen ocupado por un oxígeno: Suponiendo que la celda unitaria contiene únicamente oxígenos, se puede asignar un cubo de volumen específico a cada oxígeno. Este volumen se designa por  $V_c$  y es igual a  $1/18$  del volumen de la celda unitaria porque esta contiene 18 oxígenos, entonces:

$$V_c = \frac{V}{18}$$

$$V_c = 14.154 \times 10^{-24} \text{ cm}^3$$

Los cálculos que se realizan a continuación justifican el modelo deducido para representar la celda unitaria del  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ .

- a) Distancia media entre dos oxígenos: Esta distancia media es la arista del cubo que se supuso estar ocupado por un oxígeno en el cálculo anterior; entonces, siendo  $d$  la distancia media entre dos oxígenos se tiene:

$$d = \sqrt[3]{V_c}$$

$$d = 2.42 \text{ \AA}$$

- b) Distancia  $x$  entre dos oxígenos: La estructura cristalina del  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  es aproximadamente hexagonal compacta. En una estructura de este tipo se tiene una disposición de átomos en el plano basal (001) como la indicada en la Fig. 4.5;  $x$  se refiere a la distancia entre dos oxígenos de este plano.

$$x = \frac{a_o}{2 \cos(30^\circ)}$$

$$x = 2.7477 \text{ \AA}$$

- c) Distancia  $y'$  entre dos oxígenos: La estructura hexago-

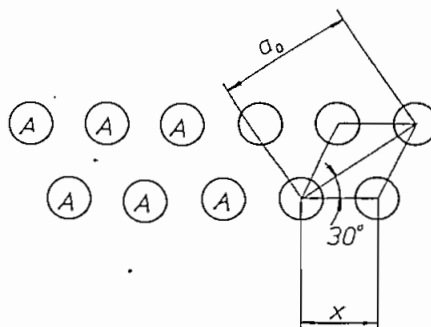


Figura 4.5.- Cálculo de la distancia  $x$ .

nal compacta tiene capas de átomos A y B como las indicadas en la Fig. 4.6. Las capas se superponen con la secuencia ABABA.... mencionada anteriormente.

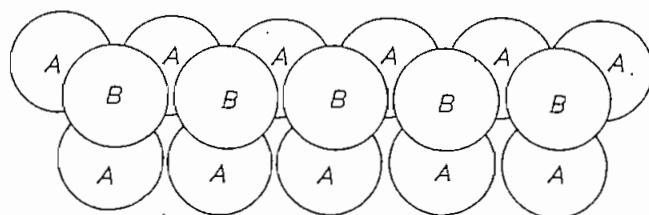


Figura 4.6  
Capas A y B

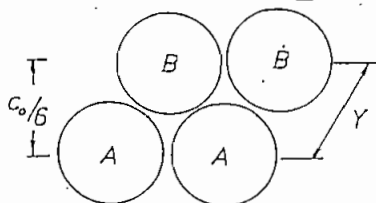


Figura 4.7.- Cálculo de la distancia  $y$

En un plano perpendicular al de la Fig. 4.6 ( (100) o (110) ) se observa la distribución de átomos de la Fig. 4.7 donde 'y' se define como la distancia entre dos oxígenos adyacentes de capas consecutivas en este plano, entonces:

$$y = \sqrt{\left(\frac{c_0}{6}\right)^2 + \left(\frac{a_0}{3}\right)^2}$$

$$y = 2.6839 \text{ \AA}$$

Las distancias  $x$  e  $y$  deben ser comparables con el doble del radio iónico del oxígeno. El radio iónico del oxígeno es de  $1.32 \text{ \AA}$  a  $1.40 \text{ \AA}$ , por lo tanto, el doble del radio iónico es de  $2.64 \text{ \AA}$  a  $2.8 \text{ \AA}$ , y las distancias  $x$  e  $y$  están comprendidas en ese rango.

- d) Distancia disponible para el ión  $\text{Al}^{+++}$ : Entre dos capas sucesivas de iones  $\text{O}^{--}$  va una capa de iones  $\text{Al}^{+++}$ ; el espacio que queda disponible para los iones  $\text{Al}^{+++}$  se ilustra en la Fig. 4.8.

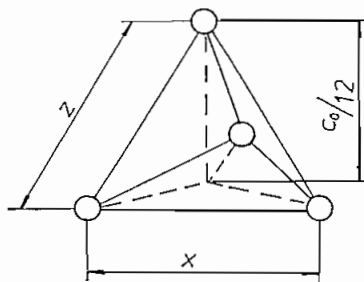


Figura 4.8.- Cálculo de la distancia  $z$ .

En esta figura,  $z$  es la distancia entre el centro de un ión  $\text{O}^{--}$  (A) y el centro del ión  $\text{Al}^{+++}$  (C), entonces:

$$z = \sqrt{\left(\frac{2}{3} x \text{ sen } 60^\circ\right)^2 + \left(\frac{c_0}{12}\right)^2}$$

$$z = 1.9205 \text{ \AA}$$

Suponiendo que el radio iónico del  $\text{O}^{--}$  ( $r_{\text{O}^{--}}$ ) es  $\frac{1}{2}$  del

promedio de las distancias  $x$  e  $y$ , se tiene:

$$r_{O^{--}} = \frac{x + y}{4}$$

$$r_{O^{--}} = 1.3579 \text{ \AA}$$

Entonces se puede calcular el espacio disponible para un ión aluminio:

$$r_{Al^{+++}} = z - r_{O^{--}}$$

$$r_{Al^{+++}} = 0.5626 \text{ \AA}$$

Esta distancia es comparable con el radio iónico del  $Al^{+++}$  que es  $0.51 \text{ \AA}$ . Pero si un ión  $Cr^{+++}$  reemplaza al ión  $Al^{+++}$ , sufre una deformación, pues su radio iónico es  $0.63 \text{ \AA}$ . Aun cuando se considere el menor radio iónico del  $O^{--}$  ( $1.32 \text{ \AA}$ ) en los cálculos en lugar del radio iónico promedio, el ión  $Cr^{+++}$  se encuentra deformado porque la distancia  $r_{Al^{+++}}$  disponible sería  $0.6 \text{ \AA}$ .

#### 4.3 TEORIA DE LA SIMETRIA

Los datos bibliográficos sobre la estructura de los cristales incluyen términos propios de la teoría de la



simetría cuyos fundamentos se indican a continuación<sup>(7)</sup>.

La simetría de un cuerpo está dada por un conjunto de transformaciones que lo llevan a coincidir consigo mismo. Las operaciones de simetría pueden ser puntuales o de traslación.

Una operación de traslación está definida por el siguiente vector:

$$\vec{T} = n_1 \vec{a} + n_2 \vec{b} + n_3 \vec{c} \quad n_1, n_2, n_3 \text{ son enteros}$$

donde el vector  $\vec{T}$  une dos puntos de la red.

Una operación de simetría puntual puede ser una rotación alrededor de un eje (eje de simetría) o una reflexión en un plano. Estas se llaman operaciones puntuales porque al menos un punto se mantiene inmóvil.

Las rotaciones admitidas en una red cristalina son de orden 1 (giro de  $360^\circ$ ), 2 (giro de  $180^\circ$ ), 3 (giro de  $120^\circ$ ), 4 (giro de  $90^\circ$ ) y 6 (giro de  $60^\circ$ ). Debido a que no todas las rotaciones están permitidas en las redes cristalinas, se definen catorce tipos de redes en tres dimensiones (aumentando las restricciones de los parámetros se pueden definir 32 tipos de redes cristalinas).

La teoría de la simetría incluye notaciones espe

ciales para la representación de rotaciones. A continuación se resumen algunas de estas notaciones:

- a) La operación que realiza una rotación de  $2\pi/n$  alrededor de un eje dado se representa por  $C_n$ .
- b) El número de veces que se repite la operación  $C_n$  se representa por  $p$  en la notación  $C_n^p$ . Si  $n$  es múltiplo de  $p$ :  $C_n^p = C_{n/p}$ .
- c) La transformación idéntica se designa por  $E$ .
- d) La operación de reflexión en un plano se designa por la letra  $\sigma$ . Esto significa que  $\sigma^2 = E$ .
- e) Se dice que una red tiene un eje  $n$ -ario de giro reflejado si coincide consigo mismo luego de un giro de  $2\pi/n$  alrededor del eje, seguido de una reflexión en un plano perpendicular al eje de giro. Una transformación de este tipo se designa por la letra  $S$  con subíndice  $n$ :  $S_n$ .
- f) Un eje de giro reflejado binario es una inversión y se representa por la letra  $I$ . ( $I = S_2$ )

El conjunto de todas las rotaciones y traslaciones de un cuerpo lo clasifican dentro de un grupo de simetría determinado para el cual se han definido tales trans-

formaciones. En un grupo de simetría que contiene un número finito de transformaciones diferentes, se dice que cada una de tales transformaciones es un elemento del grupo.

Los grupos de simetría tienen las siguientes propiedades:

- a) Todo grupo contiene al elemento unidad (E).
- b) El resultado de dos transformaciones sucesivas (o más) de un grupo, da como resultado un elemento del mismo grupo.
- c) Las transformaciones cumplen con la ley asociativa.
- d) Para todo elemento A de un grupo existe siempre un único elemento  $A^{-1}$ , llamado el elemento inverso de A, tal que  $AA^{-1} = E$ .
- e) El elemento inverso de un producto es el producto de los inversos.

A continuación se exponen algunos conceptos adicionales de la teoría de grupos:

- a) Existe un grupo especial formado por elementos que conmutan entre sí que tiene el nombre de grupo Abelianiano. Los grupos cíclicos son un caso particular de grupo Abelianiano y cumplen con la siguiente ecuación:

$$A, A^2, A^3 \dots A^n = E \quad n \text{ es entero}$$

- b) Si es posible separar un conjunto H de elementos que forman un grupo de otro grupo G, el grupo H se llama subgrupo de G.
- c) Si n es el menor número para el cual se cumple  $A^n = E$ , entonces n se llama orden del elemento A, y el conjunto formado por los elementos  $A, A^2, A^3 \dots A^n = E$  se llama período de A.
- d) Se llama orden del grupo al número total de elementos del grupo.
- e) Dos elementos A y B se llaman conjugados si cumplen con la siguiente igualdad:

$$A = C_i B C_i^{-1}$$

siendo C un elemento del mismo grupo.

Las transformaciones de un cuerpo que tienen que ver con operaciones de simetría puntuales caracterizan los grupos puntuales. Los grupos puntuales posibles son los siguientes:

- a) Grupo  $C_n$ : Posee un eje de simetría de orden n.

- b) Grupo  $S_{2n}$ : Tiene un eje de giro reflejado de orden par.
- c) Grupo  $C_{nh}$ : Tiene un eje de simetría n-ario y un plano de simetría perpendicular a él.
- d) Grupo  $C_{nv}$ : Tiene un eje de simetría n-ario y un plano de simetría que pasa por él.
- e) Grupo  $D_n$ : Tiene un eje de simetría de orden n y un eje binario perpendicular al primero.
- f) Grupo  $D_{nh}$ : Tiene un eje de simetría de orden n, un eje binario perpendicular al anterior y un plano de simetría perpendicular al primero y que contiene al segundo.
- g) Grupo  $D_{nd}$ : Tiene un eje de simetría n-ario, un eje binario perpendicular al anterior y n-1 planos que bisecan a los ejes horizontales generados por el eje binario.
- h) Grupo T: Tiene los ejes de simetría del tetraedro.
- i) Grupo  $T_d$ : Se obtiene añadiendo a los ejes de simetría del tetraedro planos de simetría que pasan por un eje binario y dos ternarios.

- j) Grupo  $T_h$ : Se obtiene añadiendo un centro de simetría a los ejes de simetría del tetraedro.
- k) Grupo  $O$ : Tiene el sistema de ejes de la simetría del cubo.
- l) Grupo  $O_h$ : Se obtiene añadiendo un centro de simetría al sistema de ejes de la simetría del cubo.

Existen varias simbologías gráficas para representar las operaciones de cada uno de los grupos puntuales. En la Fig. 4.9 se ilustra la representación de los grupos  $D_{3d}$ ,  $D_3$  y  $C_3$  con dos tipos de notación gráfica<sup>(7-8)</sup>.

En este punto, suponiendo algunas aproximaciones, es posible analizar las simetrías de un ión  $Cr^{+++}$  que sustituye a un ión  $Al^{+++}$ :

- a) Primera aproximación: Grupo  $O$ .- Sería exacta si  $x = 2.7477 \text{ \AA}$  fuese igual a  $y = 2.6839 \text{ \AA}$  (la diferencia es del 2.3% ) y si no hubieran iones  $Al^{+++}$ .
- b) Segunda aproximación:  $\bar{3}m = D_{3d}$  .- Sería exacta si no hubieran iones  $Al^{+++}$  que rompen esta simetría.
- c) Tercera aproximación:  $3 = C_3$  .- Es exacta.

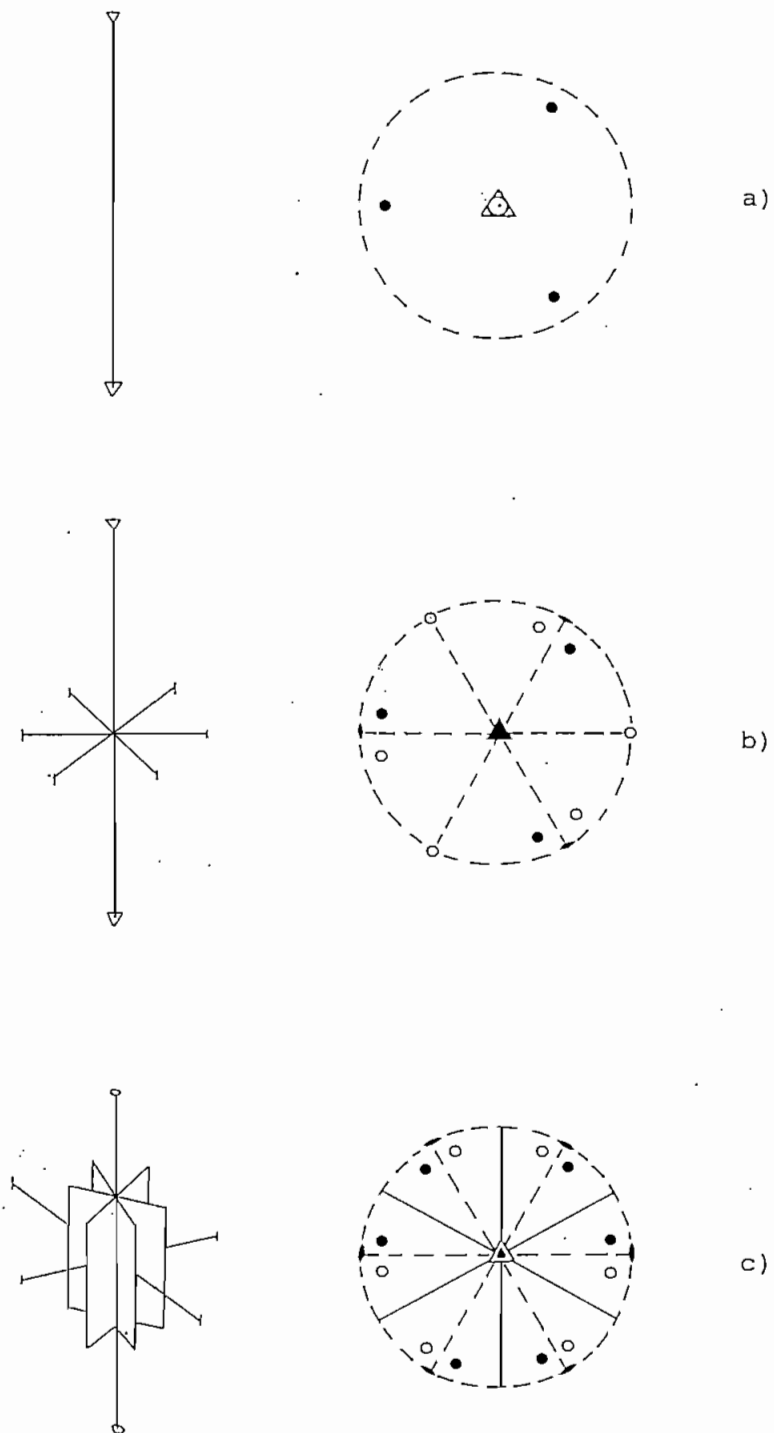


Figura 4.9.- a) Simetría  $C_3$   
 b) Simetría  $D_3$   
 c) Simetría  $D_{3d}$

## 4.4 ORIENTACION DE LOS EJES CRISTALOGRAFICOS

La tecnología aplicada en la orientación del cristal es totalmente improvisada porque no se contó con el soporte de equipo adecuado para el efecto. Sin embargo, se lograron resultados bastante satisfactorios pero no definitivos.

Para orientar el cristal se utilizó el equipo de rayos X de la Facultad de Ingeniería Química de la E.P.N. y una cámara de Debye Scherrer. El esquema de la Fig. 4.10 ilustra la posición del cristal en la cámara y la difracción de rayos que inciden finalmente en la película.

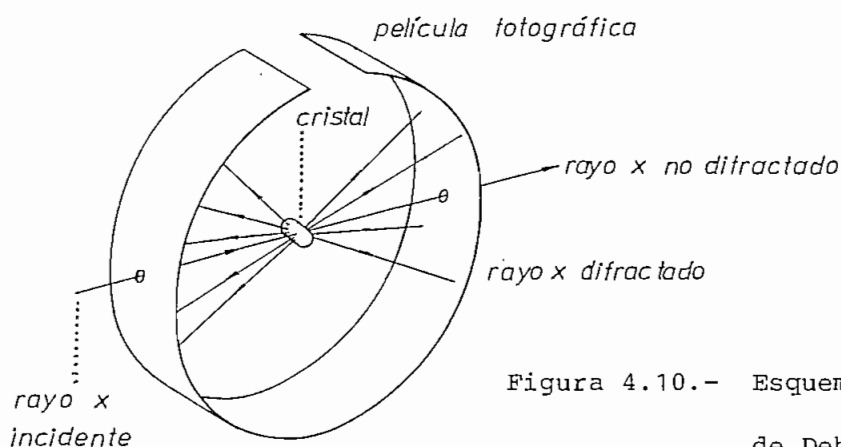


Figura 4.10.- Esquema de la cámara de Debye Scherrer.

La inclinación de los planos cristalográficos se puede encontrar por la ley de Bragg. Suponiendo que el rayo incide sobre los planos cristalográficos como se indica en la Fig. 4.11, para que exista interferencia constructiva se debe cumplir que la diferencia en la trayectoria sea



igual a un número entero de longitudes de onda, por lo tanto:

$$2 d \operatorname{sen} \theta = n \lambda \quad \dots \quad \lambda \text{ longitud de onda}$$

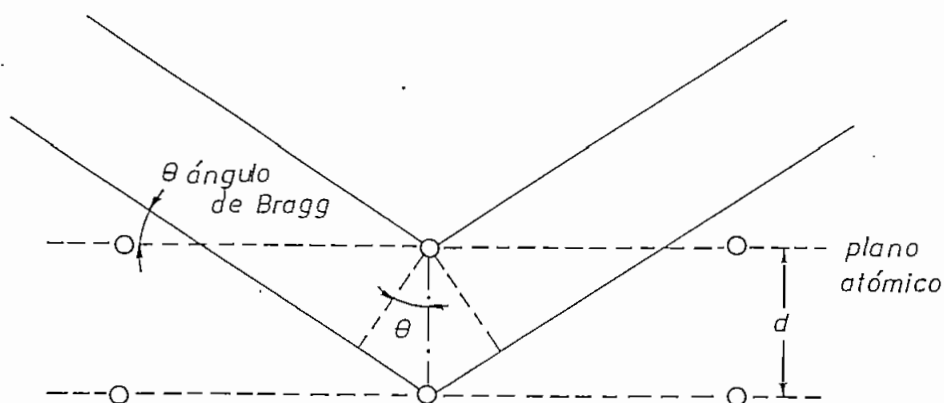


Figura 4.11.- Ley de difracción de Bragg

Si  $l_1$  es la longitud de película entre el rayo difractado y el orificio por el que se introduce el colimador, tomando en cuenta que la longitud  $l_0$  entre dos colimadores corresponde a  $180^\circ$ , el ángulo  $\alpha$  entre los puntos mencionados será: (Fig. 4.12):

$$\alpha = \frac{180^\circ}{l_0} l_1$$

La cámara de Debye Scherrer tiene un dispositivo que permite girar el cristal en un eje perpendicular a la trayectoria del rayo incidente. Si se desea desplazar un punto desde la distancia  $l_1$  (Fig. 4.12) del rayo incidente a la distancia  $l_2$ , se debe girar el cristal un ángulo  $\gamma$ , siendo  $\gamma$ :

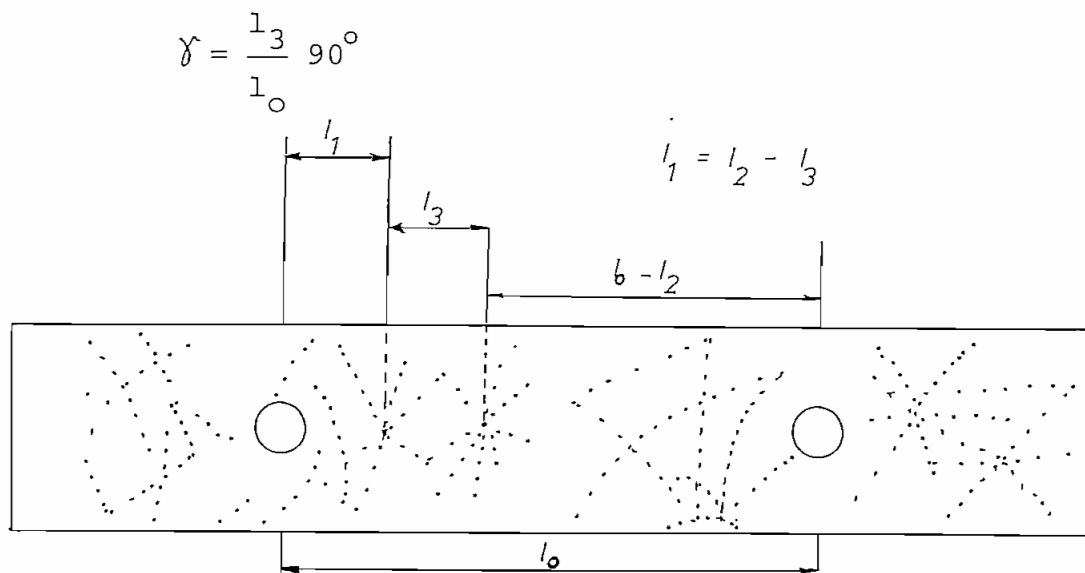


Figura 4.12.- Procedimiento para centrar puntos en una radiografía del cristal.

Para orientar el cristal se colocó una muestra de rubí en la cámara de Debye Scherrer y se obtuvo la fotografía de la Fig. 4.13; en ésta se puede observar algunos puntos que no guardan simetría. Realizando giros sucesivos para centrar los puntos de mayor intensidad en los colimadores, luego de varios intentos, se logró la fotografía que se indica en la Fig. 4.14; esta fotografía revela la simetría  $C_4$ .

Dentro de la estructura hexagonal compacta se puede distinguir un octaedro deformado que puede presentar simetría  $C_4$  para un rayo X incidente como el que se indica en la Fig. 4.15. En este octaedro el eje  $c$  del cristal se encuentra a  $\gamma$  grados del rayo X. El valor del ángulo se calcula a continuación tomando como referencia la Fig. 4.15.

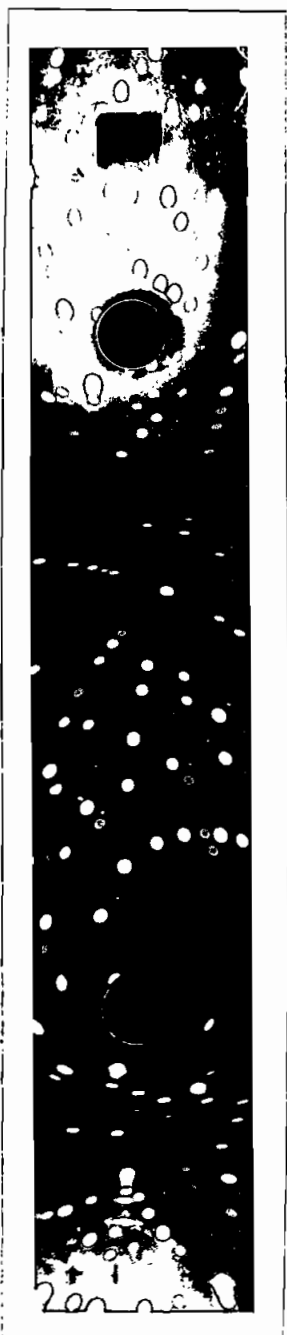


Figura 4.13.- Radiografía del cristal. No se aprecia ninguna simetría.

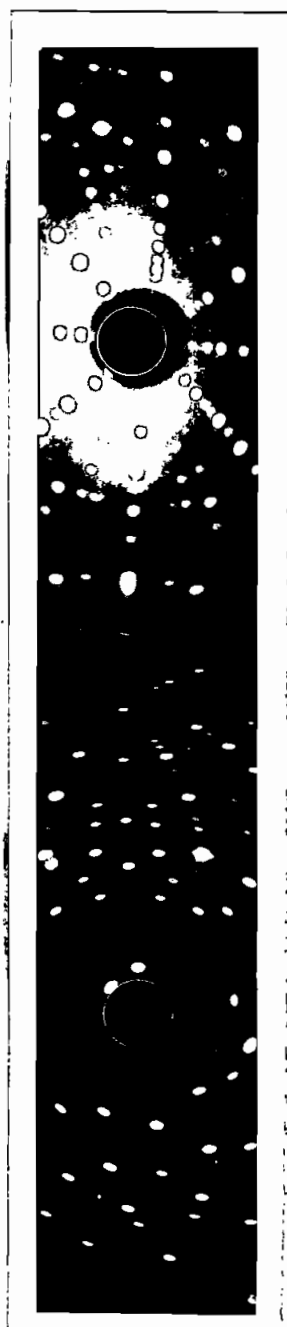


Figura 4.14.- Radiografía del cristal. Se aprecia la simetría  $C_4$ .

$$\gamma = \text{áng} \cos \left( \frac{\frac{1}{3} x \text{ sen } 60^\circ}{\frac{y}{2}} \right)$$

donde  $x = 2.7477 \text{ \AA}$

$y = 2.6839 \text{ \AA}$

entonces,

$$\gamma = 53.77^\circ$$

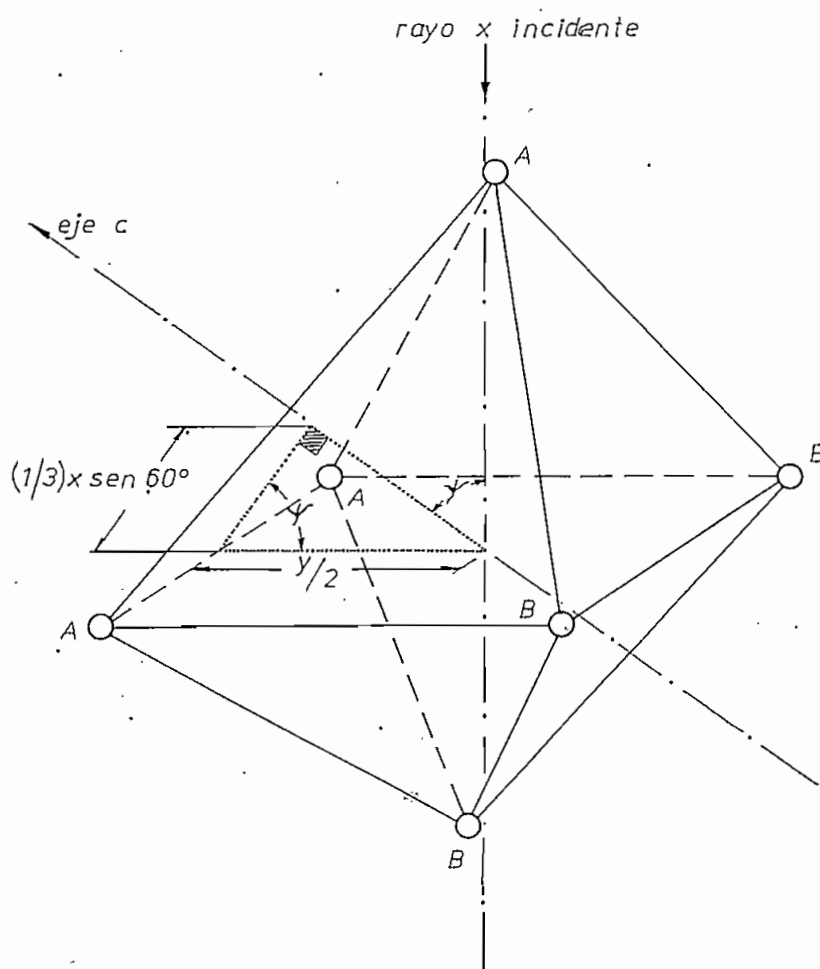


Figura 4.15.- Orientación del cristal en base  
a la fotografía de la Fig. 4.14

Luego de este desarrollo no se puede decir que el cristal está orientado, pues existe un lugar geométrico resultante de un giro de  $\gamma$  grados con respecto al rayo X incidente; y solamente uno de sus puntos coincide con el eje c. Con un eje de giro adecuado se podría barrer este ángulo hasta lograr la simetría total, pero con los elementos disponibles esto no fue posible y las muestras de rubí se cortaron a  $0^\circ$  (muestra 204),  $30^\circ$  (muestra 205),  $60^\circ$  (muestra 206), y  $90^\circ$  (muestra 207) con respecto al plano perpendicular al rayo X de la fotografía de la Fig. 4.14; se desconoce el otro ángulo de giro. Estas 4 muestras de rubí y dos rubíes naturales adicionales se utilizaron para realizar la experimentación de resonancia magnética (de la muestra 205 solamente existen medidas semidetalladas).

Los cristales fueron orientados luego de la experimentación (gentiliza del Prof. Mike Fleet de la Universidad de Western Ontario) y la documentación de estas orientaciones se incluye en los gráficos de las medidas experimentales (Cap. VI).

## C A P I T U L O V

CALIBRACION DEL ELECTROIMAN

Entre los datos experimentales se incluyen los valores de campo magnético perpendicular a la muestra para los que se presenta el fenómeno de resonancia magnética a una frecuencia de microonda determinada. El campo magnético se mide en forma indirecta utilizando una curva de calibración que establece la correspondencia entre la intensidad de corriente que circula por el bobinado del electroimán y el campo magnético en el entrehierro del mismo a la altura de la muestra.

Los puntos experimentales para obtener la curva de calibración fueron medidos con un fluxómetro (Singer Metrics Division Model FM - Sensitive Research Instrument Corporation) en las dos escalas de mayor sensibilidad. Se tomaron tres grupos de medidas en fechas distintas y se calculó el promedio de las que correspondían a un mismo valor de intensidad para disminuir el volumen de datos, quedando los valores definitivos que fueron procesados para calcular una curva de regresión adecuada.

En la Fig. 5.1 se aprecian las curvas de calibración obtenidas con dos polinomios de regresión de quinto grado para las dos escalas de mayor sensibilidad. Se puede observar un cambio drástico entre las mediciones para los rangos correspondientes, pero no se tiene elementos de juicio como para conocer cual de las dos es la más correcta. Por esta razón se hace necesario calcular un solo polinomio de regresión para las dos escalas, obteniéndose la curva de calibración de la Fig. 5.2. Los coeficientes de este polinomio se utilizaron para hacer el cambio de escala de Amperios a Tesla con un ajuste para valores menores a 0.024 (A). En la Fig. 5.3 se puede observar una ampliación de la curva de calibración con el intervalo cercano al origen para el cual no se garantizan los valores del polinomio de regresión.

El procedimiento seguido no se justifica desde el punto de vista práctico porque es mayor la incertidumbre en la medición que la corrección realizada por la curva de regresión. Sin embargo, la intención de este desarrollo fue la de implementar en el computador Tektronix 4051 de la Facultad de Ingeniería Eléctrica, un programa que pueda ser utilizado en caso de que la tecnología de medición fuere mejorada.

FIG 5.1 CURVAS DE CALIBRACION PARA DOS ESCALAS DEL FLUXOMETRO

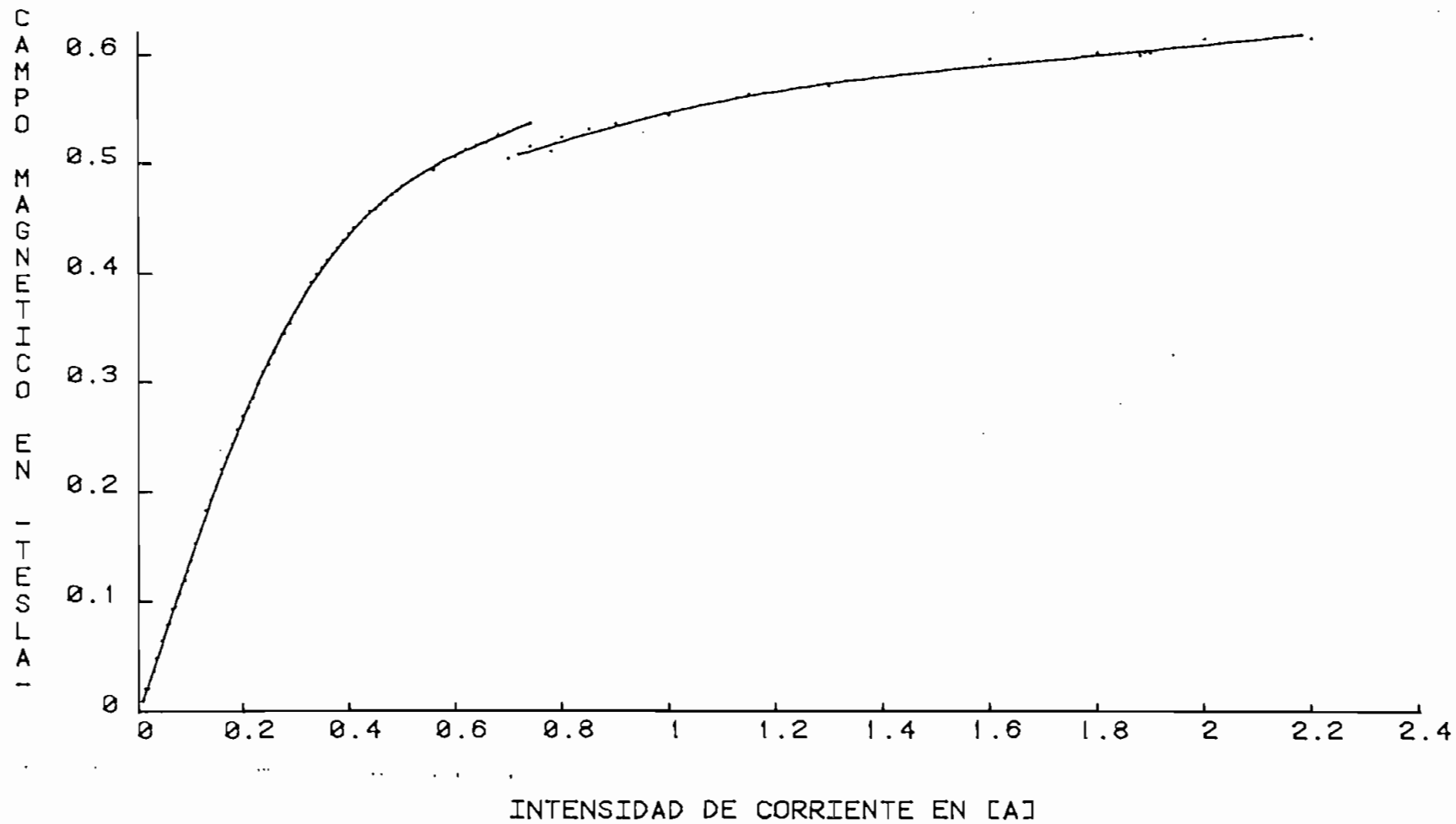




FIG 5.2 CURVA DE CALIBRACION DEL ELECTROIMAN

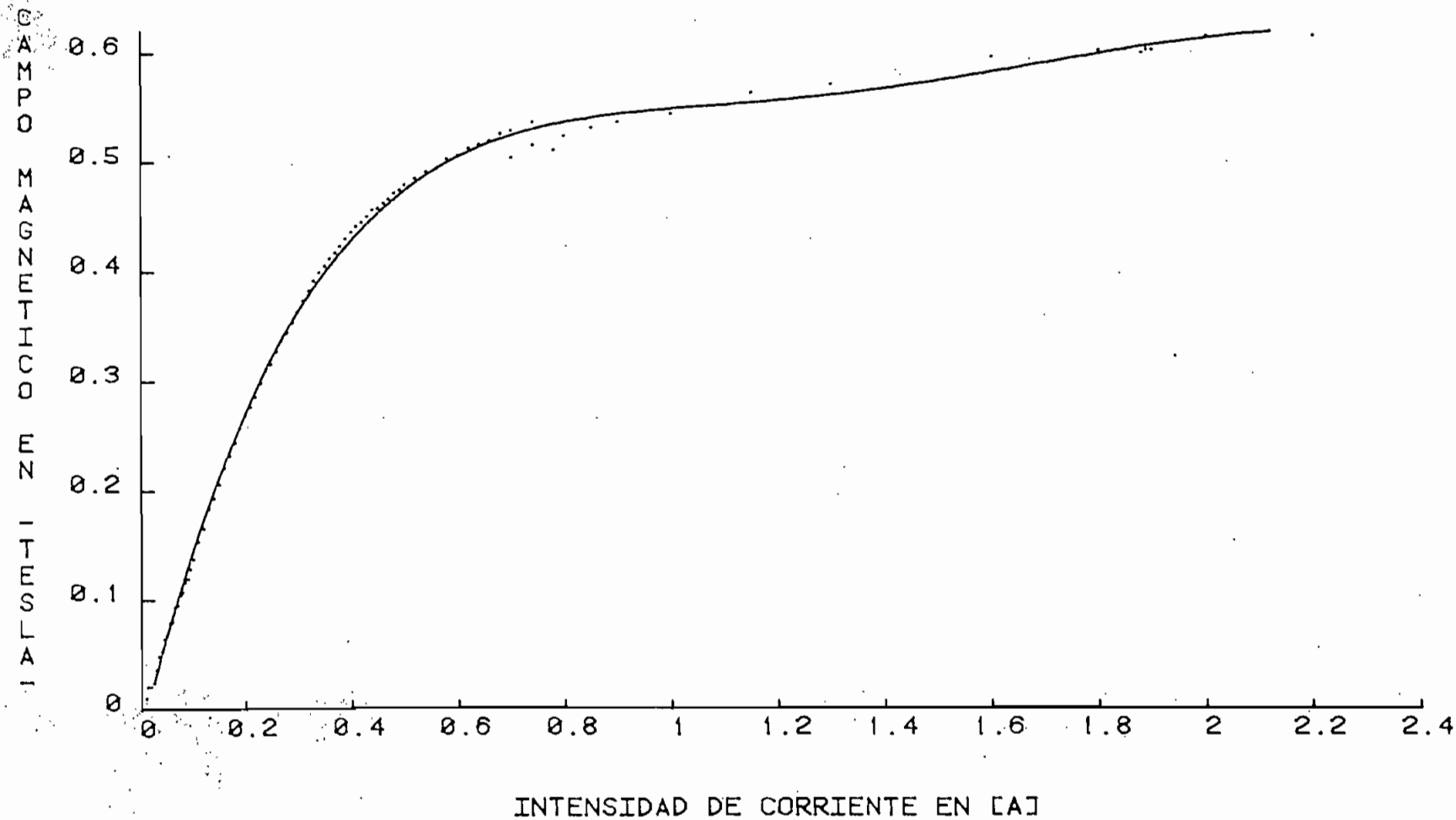
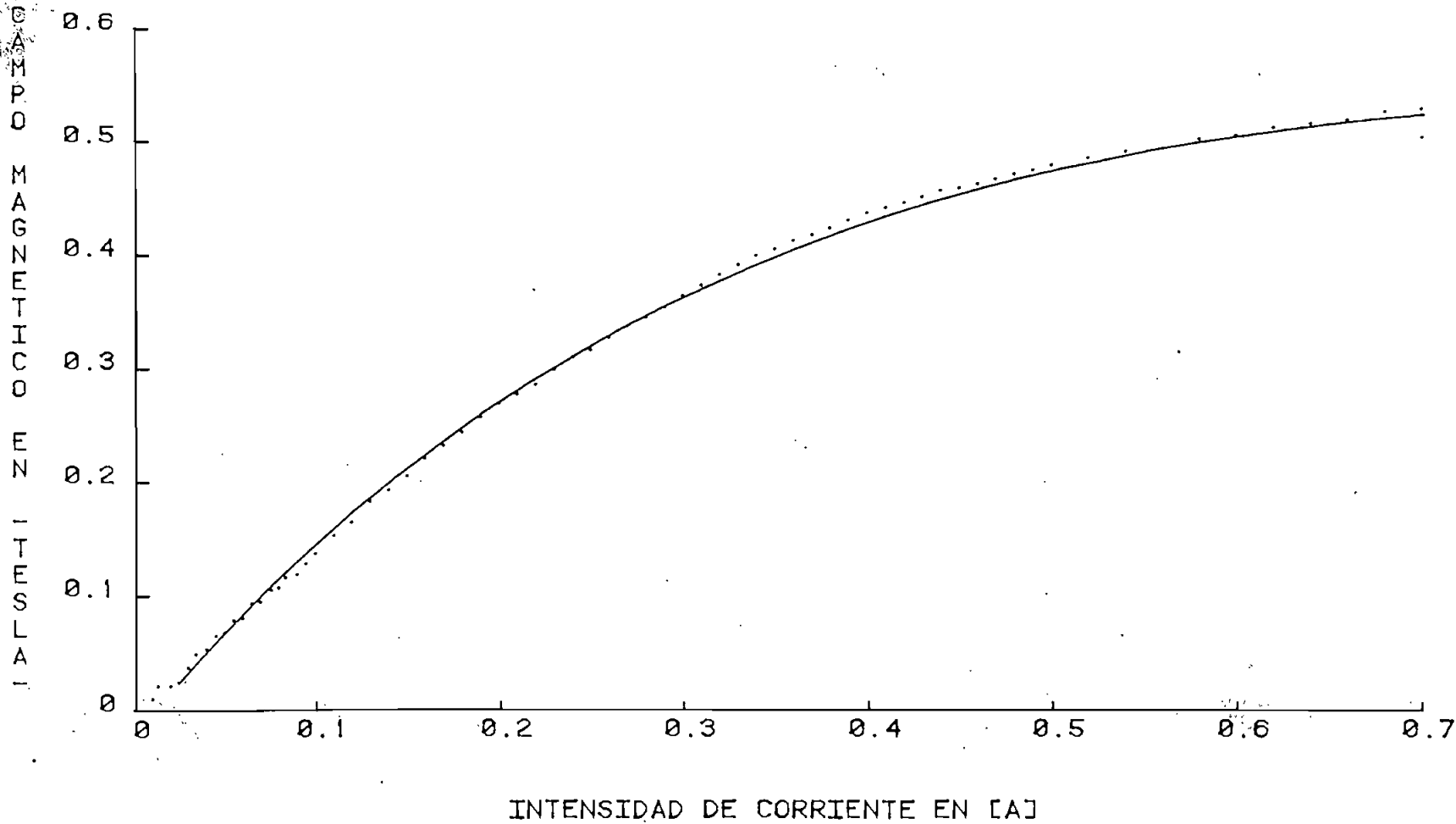


FIG 5.3 CURVA DE CALIBRACION (DETALLE)



## C A P I T U L O   V I

MEDIDAS DE RESONANCIA MAGNETICA DEL RUBI

## 6.1 CONVENCION DE CODIGOS PARA NUMERACION DE LAS MUESTRAS

Las muestras que corresponden a esta experimentación están numeradas de la siguiente manera:

201	....	rubí natural (Ing. M. Cevallos)
202	....	rubí natural (Dr. B. Hoeneisen)
203	....	rubí sintético
204	....	rubí sintético
205	....	rubí sintético
206	....	rubí sintético
207	....	rubí sintético

(Todas las muestras de rubí sintético son piezas cortadas de un rubí donado por el Dr. Kanti Hore)

En los capítulos anteriores se habla únicamente de cinco muestras: 2 naturales; y, tres sintéticas. Esto se debe a que dos de las muestras: la 203 y la 205, no

cuentan con información detallada de datos experimentales; sin embargo, ambas muestras fueron utilizadas en la experimentación: la 203, para orientar los ejes cristalográficos; y, la 205, para detectar algunas resonancias magnéticas que se indican más adelante.

Los números correspondientes a estas muestras empiezan en 201 para evitar confusión con aquellos que fueron utilizados en las muestras analizadas en el anexo 1.

## 6.2 DESCRIPCION DEL PROCESO DE ACOPLAMIENTO

En la primera medición se usó una antena de acoplamiento tipo dipolo eléctrico de 16 mm de longitud. Con esta antena se detectaron tres resonancias de la muestra 201 a 9735 MHz. Posteriormente, variando el acoplamiento, se detectaron resonancias a 9772 MHz y a 9760 MHz.

Para lograr mayor estabilidad en la señal del osciloscopio con el objeto de evitar la detección de resonancias falsas, se alimentó el Klystron desde un regulador de voltaje.

Las resonancias de la muestra 202 son apreciablemente menos intensas que las de la muestra 201, y para captarlas se hizo necesario reducir la longitud de la antena

de 16 mm a 14 mm, con lo que se pudo observar dos resonancias a 9811 MHz.

Finalmente, reduciendo la longitud de la antena de 14 mm a 10 mm, se logró un factor de calidad de 2 500 con la cavidad apenas subacoplada. Se trabajó con esta antena para las mediciones de todas las muestras.

### 6.3 CALIBRACION DEL ELECTROIMAN CON LAS RESONANCIAS DE UNA MUESTRA DE SULFATO DE MANGANESO

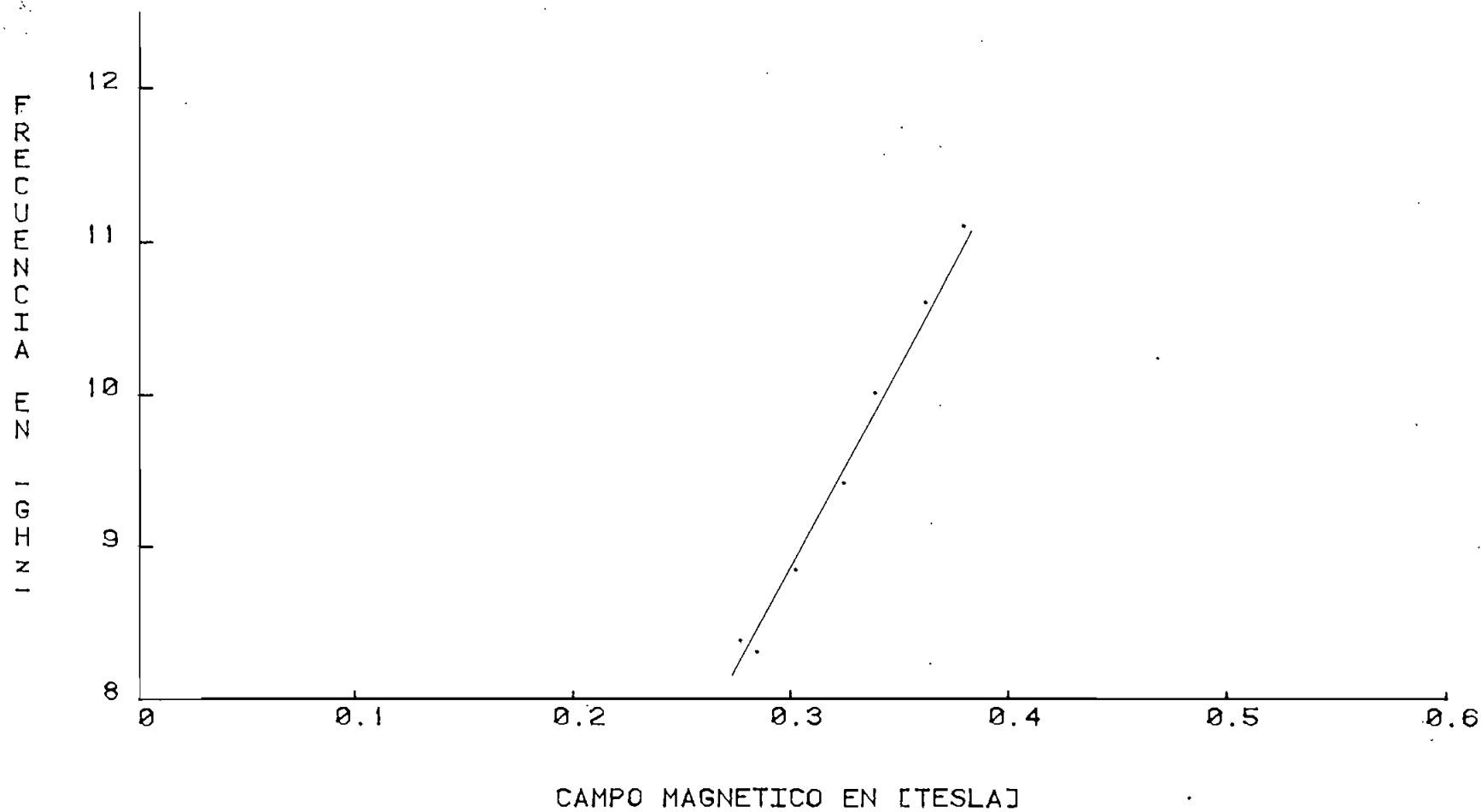
En la Fig. 6.1 se indican los puntos experimentales de resonancia magnética de una muestra de Sulfato de Manganese ( $\text{SO}_4\text{Mn}$ ). Tomando como 2 el valor teórico<sup>(1)</sup> del factor de Landé para el  $\text{SO}_4\text{Mn}$ , se puede establecer una comparación con los datos experimentales para estimar el margen de error en la calibración del electroimán.

La ecuación 6.1 indica la dependencia entre la variación de la frecuencia y la variación del campo magnético:

$$\Delta f_{\text{GHz}} = \frac{g e}{4 \pi \cdot 10^9} \Delta B_{\text{Tesla}} \quad \dots \quad 6.1$$

donde: g es el factor de Landé  
e carga del electrón

FIG 6.1 RESONANCIAS DEL SULFATO DE MANGANESO



Medidas realizadas el 24 de Marzo de 1982

$m$	masa del electrón
$\Delta B_{\text{Tesla}}$	incremento de campo magnético
$\Delta f_{\text{GHz}}$	incremento de frecuencia

El valor  $\Delta f_{\text{GHz}}/\Delta B_{\text{Tesla}}$  obtenido con una regresión lineal de los datos experimentales es: 28.093; por lo tanto, despejando  $g$  en la ecuación 6.1, y sustituyendo este valor experimental se obtiene:

$$g = 2.007$$

esto significa que existe un error de 0.36% con respecto al valor asumido para  $g^{(1)}$  y que puede considerarse originado en la calibración del electroimán y en la falta de resolución en las medidas.

#### 6.4 DATOS MEDIDOS: CUADROS Y GRAFICOS

En el anexo 3 se encuentra un programa desarrollado en el computador Tektronix 4051 de la Facultad de Ingeniería Eléctrica para el tratamiento de datos experimentales. El programa se llama "Resonancia", y entre sus opciones tiene las de ingreso, grafización e impresión de resultados experimentales.

En la Tabla 6.1 se indica el nombre de los archi

vos en los que se han almacenado los datos de todas las muestras.

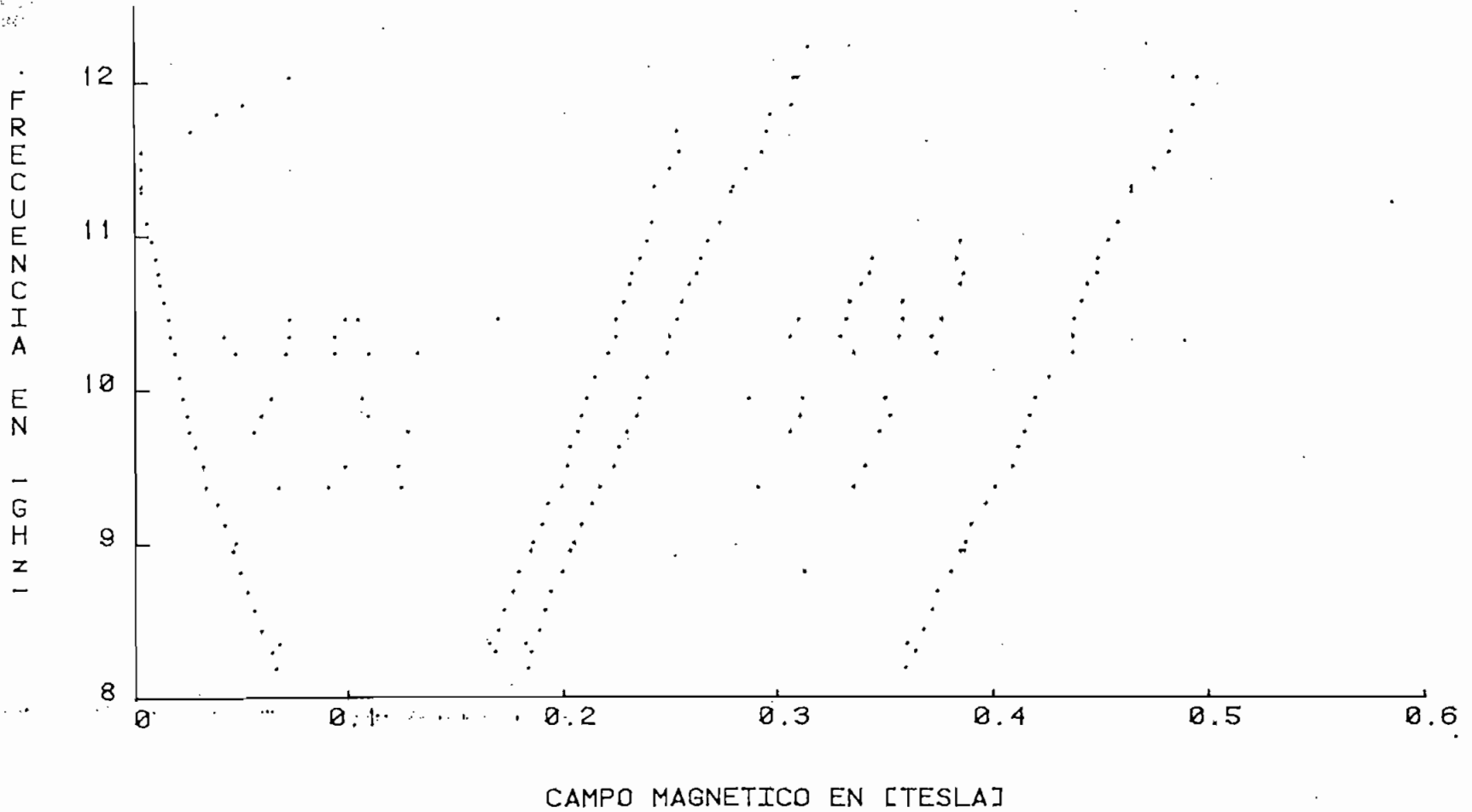
Muestra No.	Tipo de datos	Nombre del archivo
201	detallados	M201/R1
201	semidetallados	M201/R2
202	detallados	M202/R1
204	detallados	M204/R1
204	semidetallados	M204/R2
204	aislados	M204/R3
205	semidetallados	M205/R2
205	aislados	M205/R3
206	detallados	M206/R1
206	semidetallados	M206/R2
206	aislados	M206/R3
207	detallados	M207/R1
207	semidetallados	M207/R2
207	aislados	M207/R3

Tabla 6.1.- Nombres de los archivos de datos  
experimentales

Los valores experimentales de las resonancias de cada una de las muestras se resumen en los gráficos y cuadros que se encuentran a continuación. Utilizando los programas implementados se pueden reproducir los gráficos en escalas que permitan estudiar los detalles.



FIG 6.2 MEDIDAS DETALLADAS DE LA MUESTRA 201



Medidas realizadas el 27 de Marzo de 1982

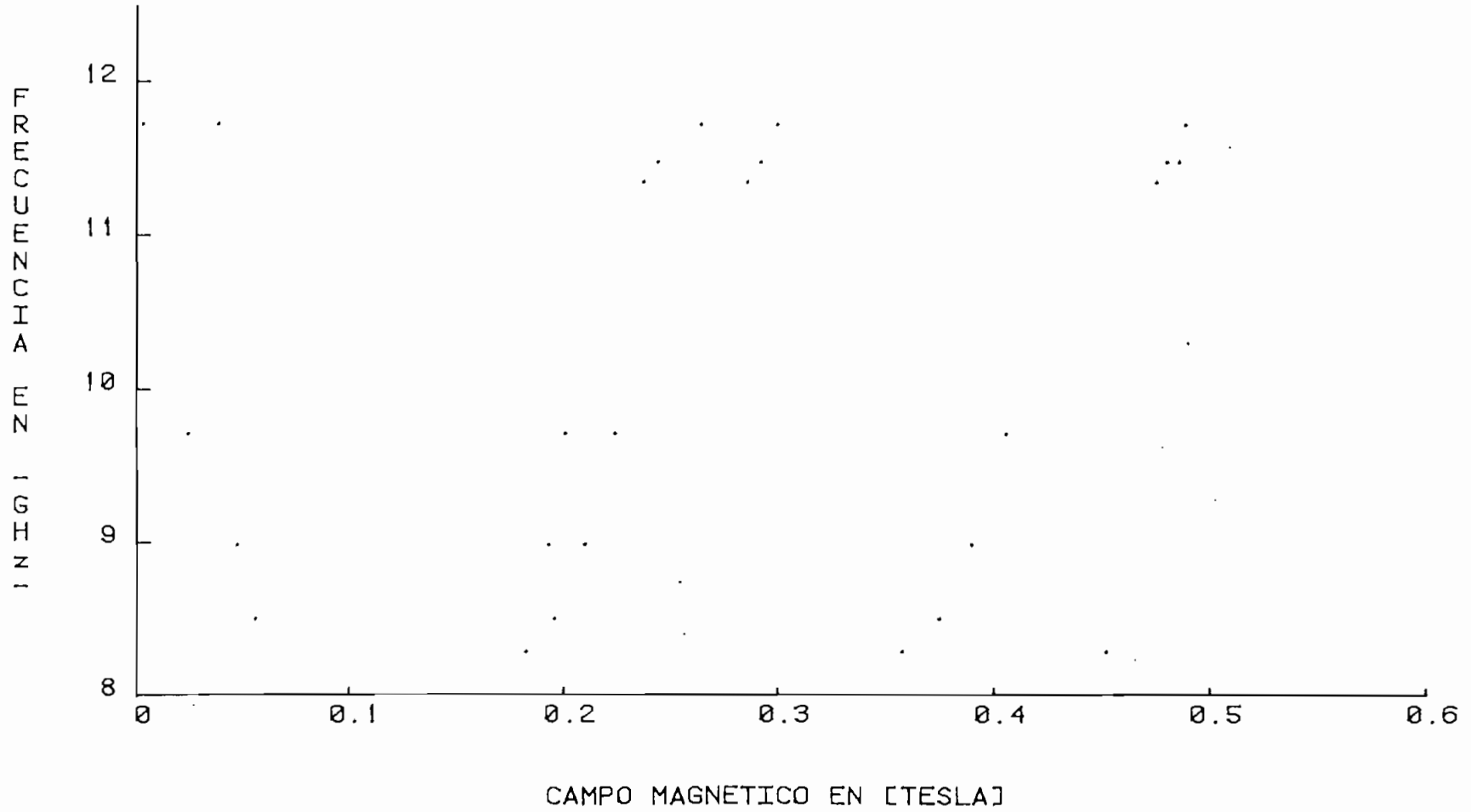
Se desconoce el ángulo entre la dirección del campo magnético externo y el eje c.

DATOS EXPERIMENTALES DE LA MUESTRA 201/R1  
 FRECUENCIA F(GHz) Y CAMPO MAGNETICO B' (TEBLA)

B'	F	B'	F	B'	F
0.480	11.6800	0.373	10.4510	0.026	9.6220
0.292	11.6800	0.355	10.4510	0.406	9.5000
0.250	11.6800	0.329	10.4510	0.221	9.5000
0.024	11.6800	0.307	10.4510	0.199	9.5000
0.294	11.7950	0.250	10.4510	0.121	9.5000
0.036	11.7950	0.222	10.4510	0.096	9.5000
0.304	11.8550	0.102	10.4510	0.029	9.5000
0.048	11.8550	0.013	10.4510	0.338	9.5000
0.490	11.8550	0.070	10.4510	0.398	9.3640
0.070	12.0350	0.096	10.4510	0.333	9.3640
0.305	12.0350	0.167	10.4510	0.298	9.3640
0.481	12.0350	0.435	10.3420	0.214	9.3640
0.070	12.0350	0.369	10.3420	0.197	9.3640
0.307	12.0350	0.354	10.3420	0.122	9.3640
0.492	12.0350	0.326	10.3420	0.088	9.3640
0.312	12.2340	0.303	10.3420	0.060	9.3640
0.479	11.5420	0.247	10.3420	0.031	9.3640
0.290	11.5420	0.222	10.3420	0.394	9.2540
0.251	11.5420	0.091	10.3420	0.211	9.2540
0.000	11.5420	0.070	10.3420	0.190	9.2540
0.472	11.4330	0.040	10.3420	0.036	9.2540
0.283	11.4330	0.014	10.3420	0.387	9.1180
0.247	11.4330	0.435	10.2290	0.206	9.1180
0.000	11.4330	0.371	10.2290	0.187	9.1180
0.462	11.3160	0.333	10.2290	0.040	9.1180
0.277	11.3160	0.246	10.2290	0.384	9.0040
0.240	11.3160	0.218	10.2290	0.202	9.0040
0.000	11.3160	0.130	10.2290	0.183	9.0040
0.462	11.2830	0.107	10.2290	0.045	9.0040
0.275	11.2830	0.068	10.2290	0.384	8.9500
0.000	11.2830	0.045	10.2290	0.201	8.9500
0.456	11.0830	0.016	10.2290	0.043	8.9500
0.270	11.0830	0.091	10.2290	0.182	8.9500
0.239	11.0830	0.423	10.0720	0.382	8.9500
0.003	11.0830	0.236	10.0720	0.201	8.9500
0.451	10.9630	0.212	10.0720	0.182	8.9500
0.382	10.9630	0.018	10.0720	0.043	8.9500
0.265	10.9630	0.417	9.9390	0.378	8.8130
0.236	10.9630	0.347	9.9390	0.197	8.8130
0.005	10.9630	0.302	9.9390	0.177	8.8130
0.446	10.8500	0.284	9.9390	0.047	8.8130
0.261	10.8500	0.233	9.9390	0.310	8.8130
0.233	10.8500	0.208	9.9390	0.371	8.6900
0.007	10.8500	0.104	9.9390	0.191	8.6900
0.341	10.8500	0.062	9.9390	0.174	8.6900
0.381	10.8500	0.020	9.9390	0.050	8.6900
0.446	10.7530	0.414	9.8220	0.369	8.5730
0.340	10.7530	0.350	9.8220	0.189	8.5730
0.259	10.7530	0.308	9.8220	0.170	8.5730
0.229	10.7530	0.232	9.8220	0.053	8.5730

FIG 6.3 MEDIDAS SEMIDETALLADAS DE LA MUESTRA 201

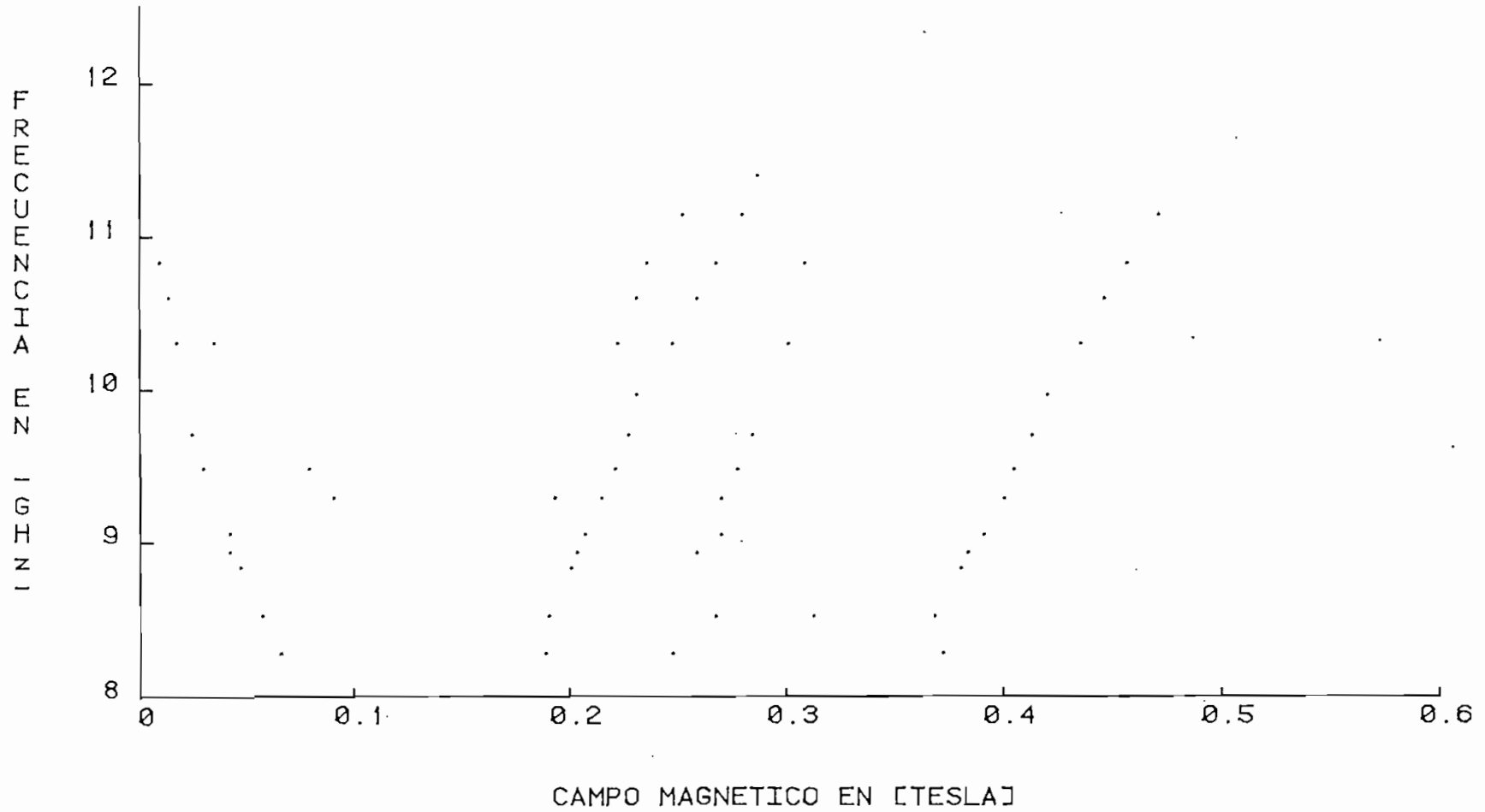
---



Medidas realizadas el 20 de Marzo de 1982

Se desconoce el ángulo entre la dirección del campo magnético y el eje c.

FIG 6.4 MEDIDAS DETALLADAS DE LA MUESTRA 202



Medidas realizadas el 24 de Marzo de 1982

Angulo aproximado entre la dirección del campo magnético y el eje c: 50°

DAJOS EXPERIMENTALES DE LA MUESTRA 202/R1

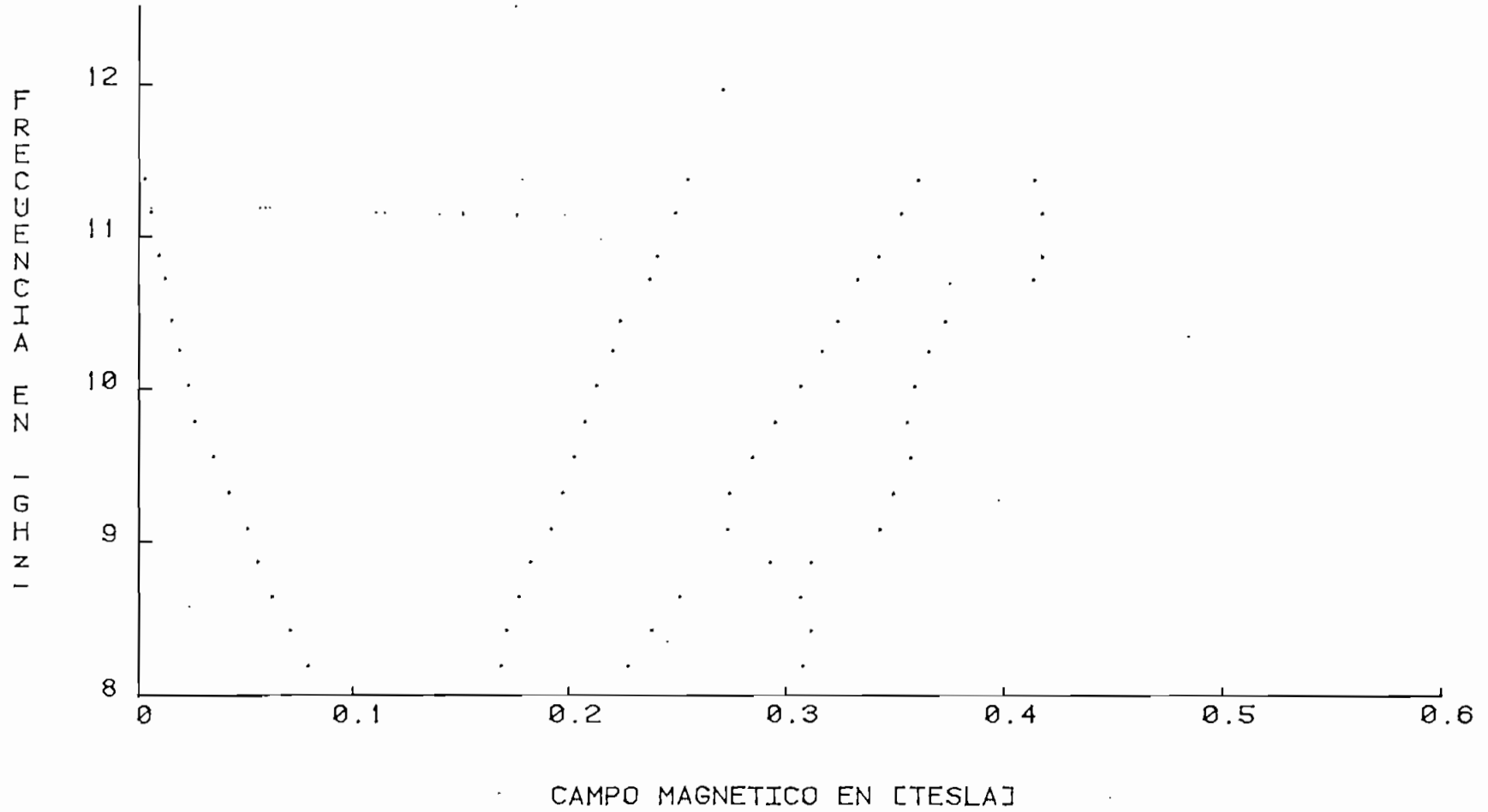
FRECUENCIA F (GHz) Y CAMPO MAGNETICO B' (TESLA)

---

B'	F	B'	F	B'	F
0.370	8.2770	0.212	9.2920	0.015	10.3050
0.244	8.2770	0.190	9.2920	0.033	10.3050
0.184	8.2770	0.088	9.2920	0.244	10.3050
0.063	8.2770	0.381	8.9370	0.219	10.3050
0.366	8.5260	0.201	8.9370	0.298	10.3050
0.187	8.5260	0.040	8.9370	0.433	10.3050
0.055	8.5260	0.256	8.9370	0.444	10.6030
0.265	8.5260	0.403	9.4810	0.256	10.6030
0.310	8.5260	0.274	9.4810	0.011	10.6030
0.378	8.8340	0.218	9.4810	0.228	10.6030
0.198	8.8340	0.077	9.4810	0.454	10.8310
0.045	8.8340	0.027	9.4810	0.306	10.8310
0.388	9.0530	0.411	9.7080	0.265	10.8310
0.267	9.0530	0.224	9.7080	0.233	10.8310
0.204	9.0530	0.022	9.7080	0.007	10.8310
0.040	9.0530	0.282	9.7080	0.469	11.1470
0.398	9.2920	0.418	9.9720	0.277	11.1470
0.267	9.2920	0.228	9.9720	0.249	11.1470
0.284	11.4080				

---

FIG 6.5 MEDIDAS DETALLADAS DE LA MUESTRA 204



Medidas realizadas el 27 de Marzo de 1982

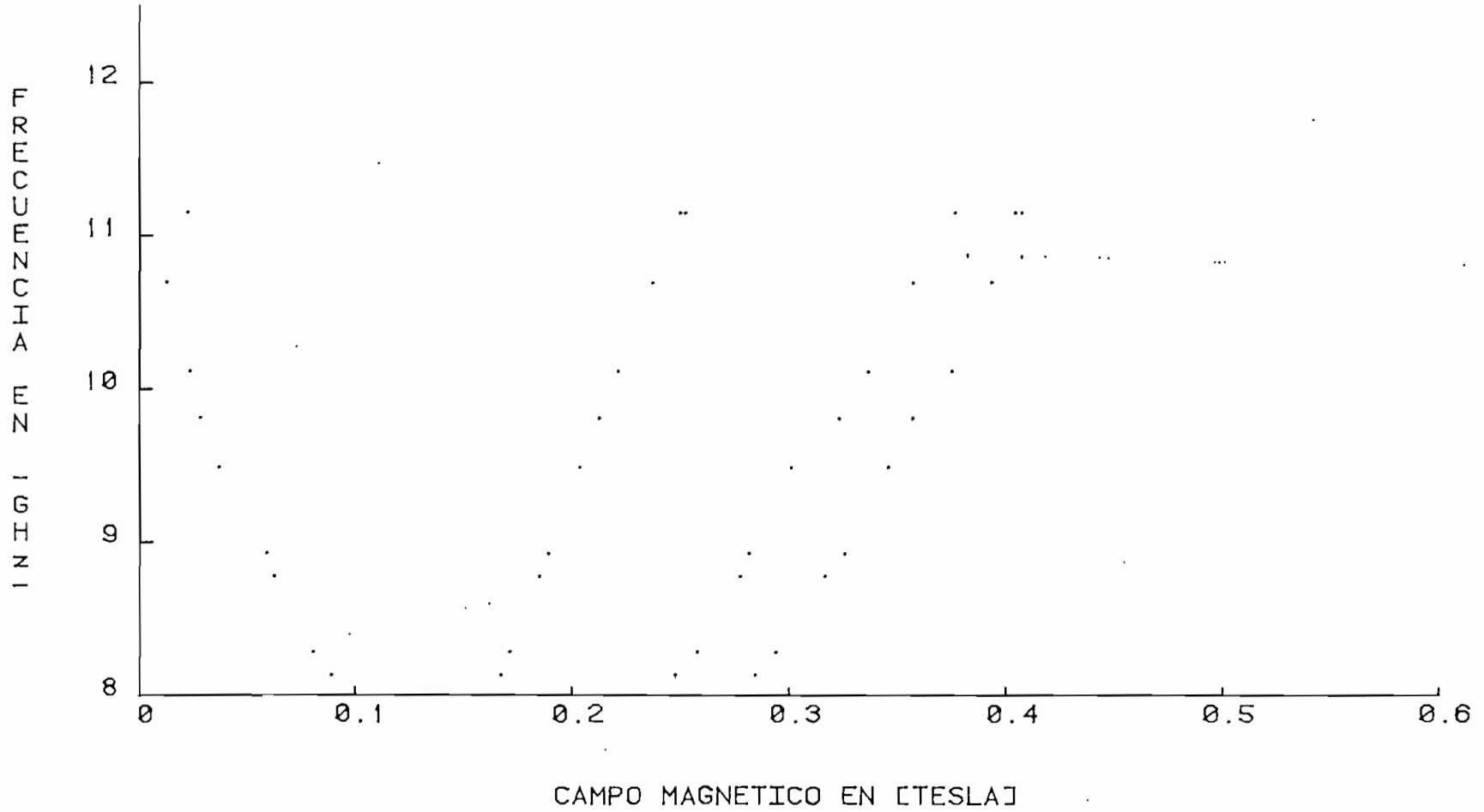
Angulo aproximado entre la dirección del campo magnético y el eje c:  $40^\circ$

DATOS EXPERIMENTALES DE LA MUESTRA 204/R1  
 FRECUENCIA F (GHz) Y CAMPO MAGNETICO B (TESLA)

B	F	B	F	B	F
0.305	8.1900	0.346	9.3160	0.370	10.4490
0.224	8.1900	0.271	9.3160	0.321	10.4490
0.166	8.1900	0.194	9.3160	0.221	10.4490
0.077	8.1900	0.040	9.3160	0.013	10.4490
0.309	8.4260	0.355	9.5550	0.411	10.7210
0.235	8.4260	0.282	9.5550	0.330	10.7210
0.169	8.4260	0.199	9.5550	0.234	10.7210
0.068	8.4260	0.033	9.5550	0.010	10.7210
0.304	8.6450	0.353	9.7860	0.415	10.8750
0.248	8.6450	0.292	9.7860	0.340	10.8750
0.174	8.6450	0.204	9.7860	0.237	10.8750
0.060	8.6450	0.024	9.7860	0.007	10.8750
0.309	8.8670	0.356	10.0190	0.415	11.1600
0.179	8.8670	0.304	10.0190	0.350	11.1600
0.053	8.8670	0.209	10.0190	0.246	11.1600
0.290	8.8670	0.021	10.0190	0.003	11.1600
0.340	9.0840	0.363	10.2520	0.411	11.3760
0.189	9.0840	0.314	10.2520	0.358	11.3760
0.270	9.0840	0.217	10.2520	0.251	11.3760
0.048	9.0840	0.017	10.2520	0.000	11.3760
0.268	11.9700				

FIG 6.6 MEDIDAS DETALLADAS (CONT) - MUESTRA 204

---

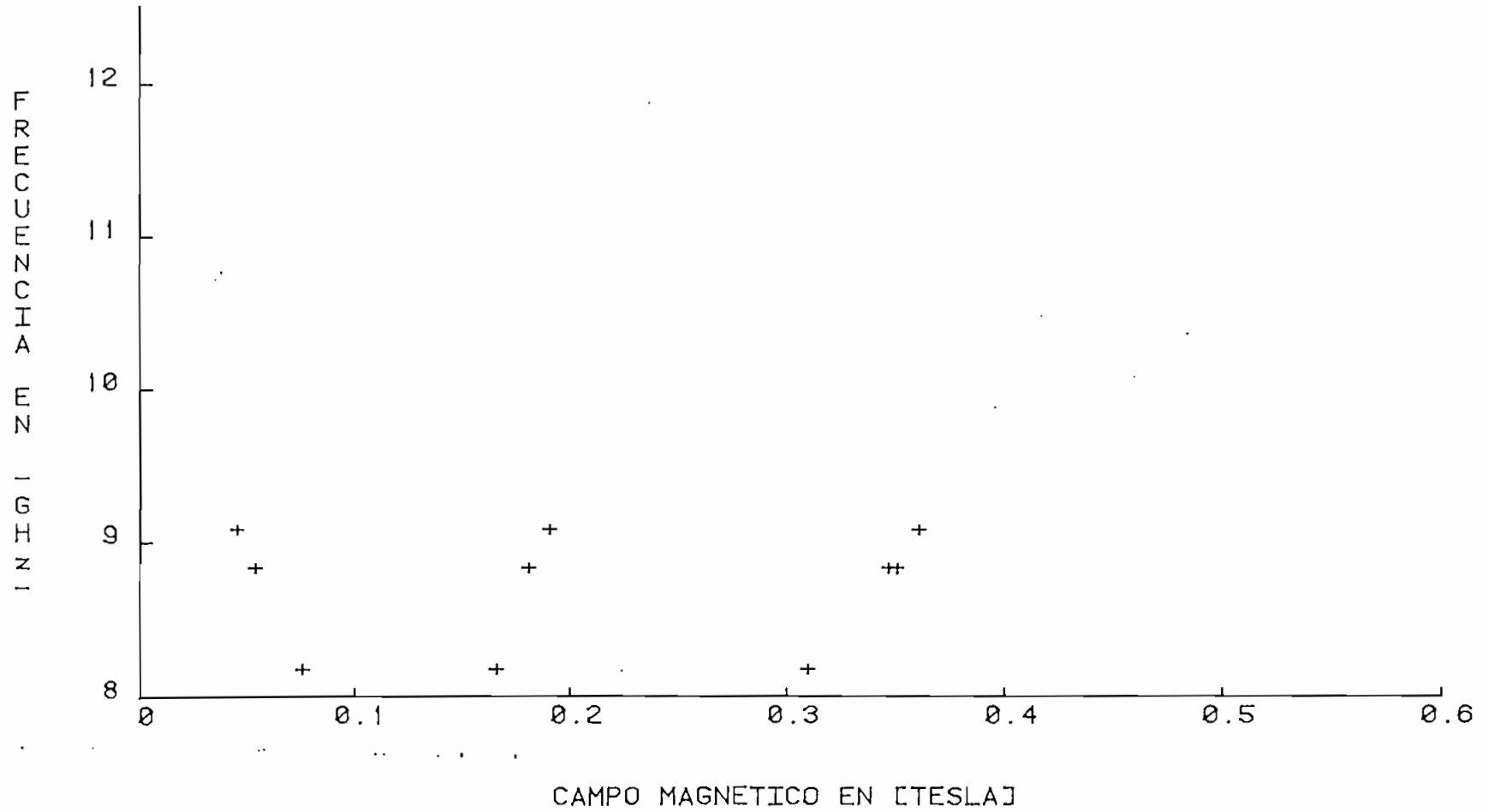


Medidas realizadas el 16 de Marzo de 1982

Angulo aproximado entre la dirección del campo magnético y el eje c: 40°



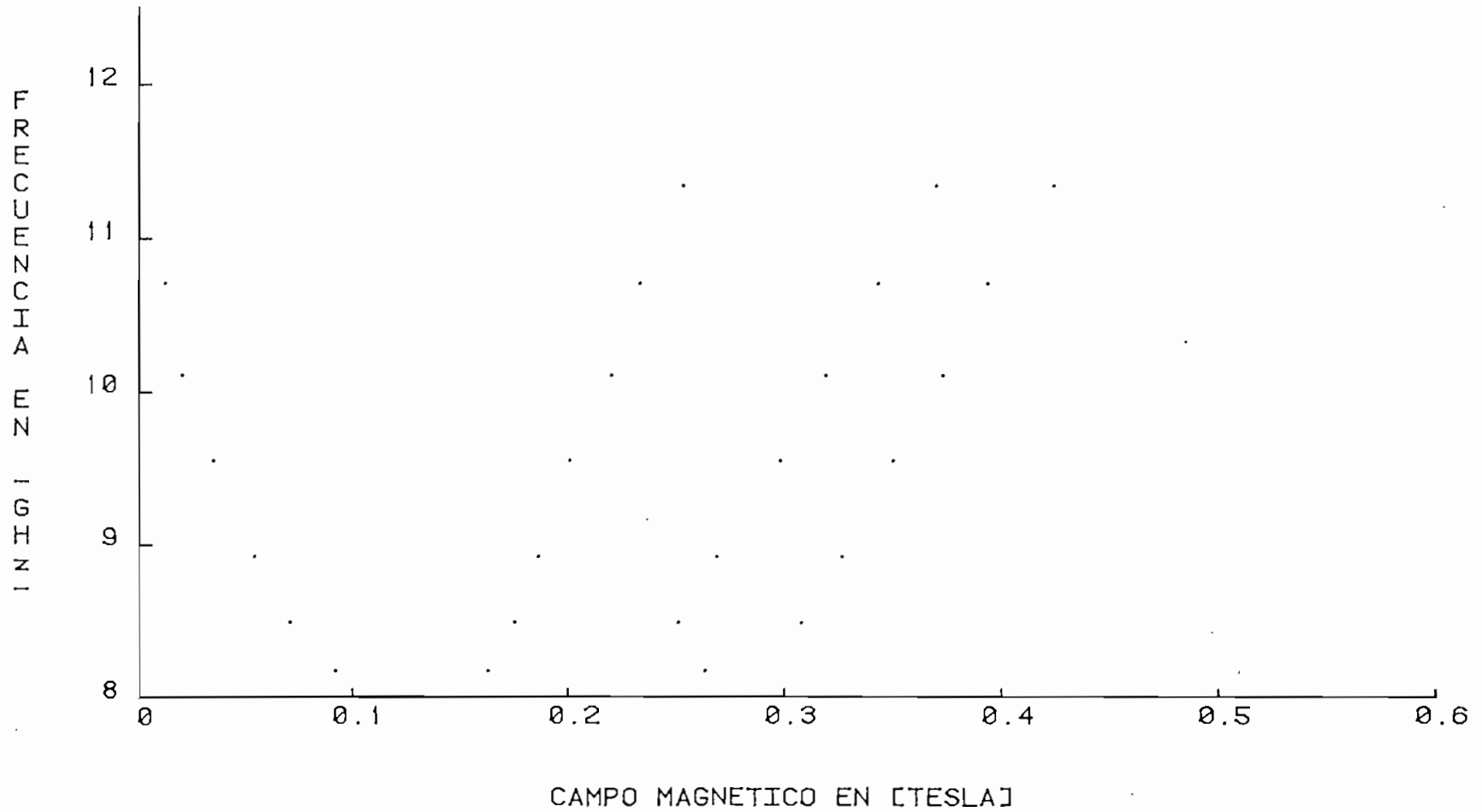
FIG 6.7 MEDIDAS AISLADAS DE LA MUESTRA 204



Medidas realizadas el 19 de Marzo de 1982

Angulo aproximado entre la dirección del campo magnético y el eje c:  $40^\circ$

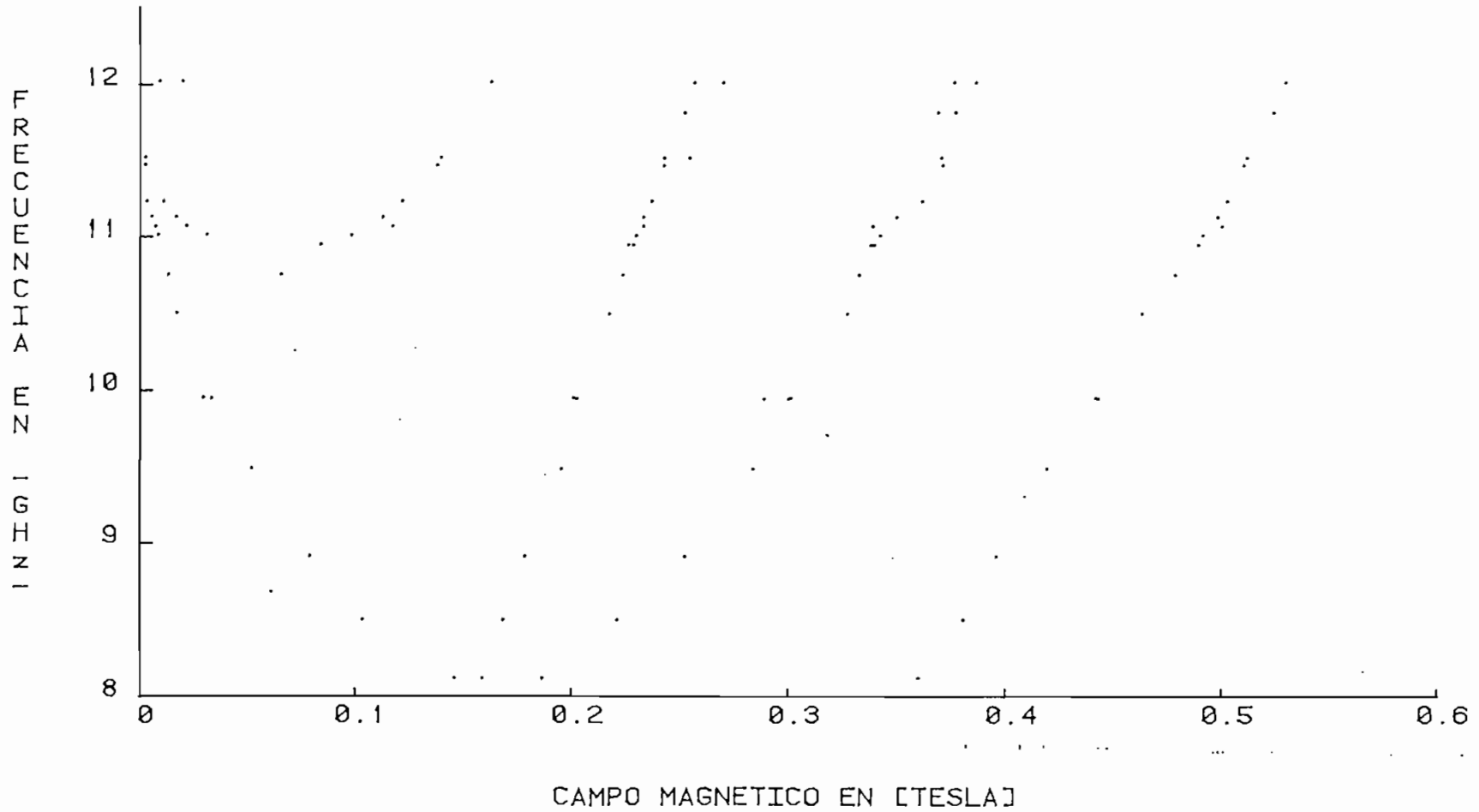
FIG 6.8 MEDIDAS SEMIDETALLADAS DE LA MUESTRA 205



Medidas realizadas el 18 de Marzo de 1982

Angulo aproximado entre la dirección del campo magnético y el eje c: 20°

FIG 6.9 MEDIDAS DETALLADAS DE LA MUESTRA 206



Medidas realizadas los días 24 y 26 de Marzo de 1982

Angulo aproximado entre la dirección del campo magnético y el eje c:  $50^\circ$

DATOS EXPERIMENTALES DE LA HUESTRA 206/R1  
 FRECUENCIA F (GHz) Y CAMPO MAGNETICO B' (TESLA)

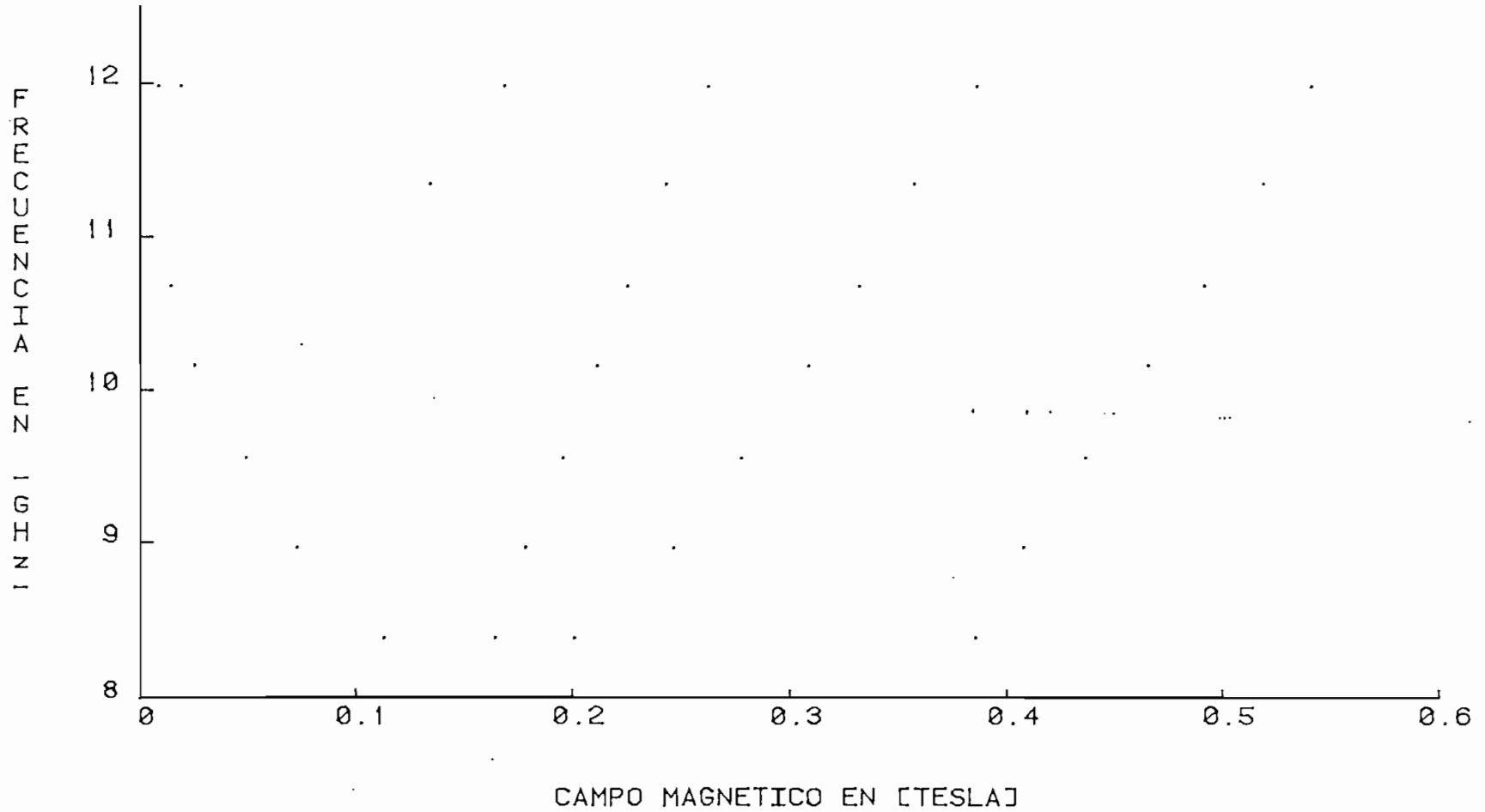
B' F  
 0.357 8.1180  
 0.183 8.1180  
 0.156 8.1180  
 0.143 8.1180  
 0.393 8.9160  
 0.249 8.9160  
 0.175 8.9160  
 0.077 8.9160  
 0.440 9.9500  
 0.297 9.9500  
 0.286 9.9500  
 0.199 9.9500  
 0.031 9.9500  
 0.439 9.9520  
 0.298 9.9520  
 0.198 9.9520  
 0.027 9.9520  
 0.477 10.7550  
 0.330 10.7550  
 0.221 10.7550  
 0.063 10.7550  
 0.011 10.7550  
 0.487 10.9500  
 0.335 10.9500  
 0.223 10.9500  
 0.337 10.9500  
 0.225 10.9500  
 0.082 10.9500  
 0.522 11.8240

B' F  
 0.366 11.8240  
 0.375 11.8240  
 0.249 11.8240  
 0.528 12.0180  
 0.374 12.0180  
 0.384 12.0180  
 0.267 12.0180  
 0.254 12.0180  
 0.160 12.0180  
 0.007 12.0180  
 0.018 12.0180  
 0.510 11.5190  
 0.368 11.5190  
 0.251 11.5190  
 0.240 11.5190  
 0.137 11.5190  
 0.000 11.5190  
 0.000 11.4740  
 0.136 11.4740  
 0.240 11.4740  
 0.362 11.4740  
 0.508 11.4740  
 0.003 11.1340  
 0.015 11.1340  
 0.110 11.1340  
 0.230 11.1340  
 0.317 11.1340  
 0.492 11.1340  
 0.005 11.0110

B' F  
 0.029 11.0110  
 0.096 11.0110  
 0.227 11.0110  
 0.340 11.0110  
 0.489 11.0110  
 0.001 11.2360  
 0.009 11.2360  
 0.119 11.2360  
 0.234 11.2360  
 0.359 11.2360  
 0.500 11.2360  
 0.015 10.4990  
 0.214 10.4990  
 0.325 10.4990  
 0.461 10.4990  
 0.050 9.4900  
 0.193 9.4900  
 0.281 9.4900  
 0.417 9.4900  
 0.101 8.5011  
 0.166 8.5011  
 0.218 8.5011  
 0.378 8.5011  
 0.005 11.0720  
 0.020 11.0720  
 0.115 11.0720  
 0.498 11.0720  
 0.230 11.0720  
 0.334 11.0720

FIG 6.10 MEDIDAS SEMIDETALLADAS DE LA MUESTRA 206

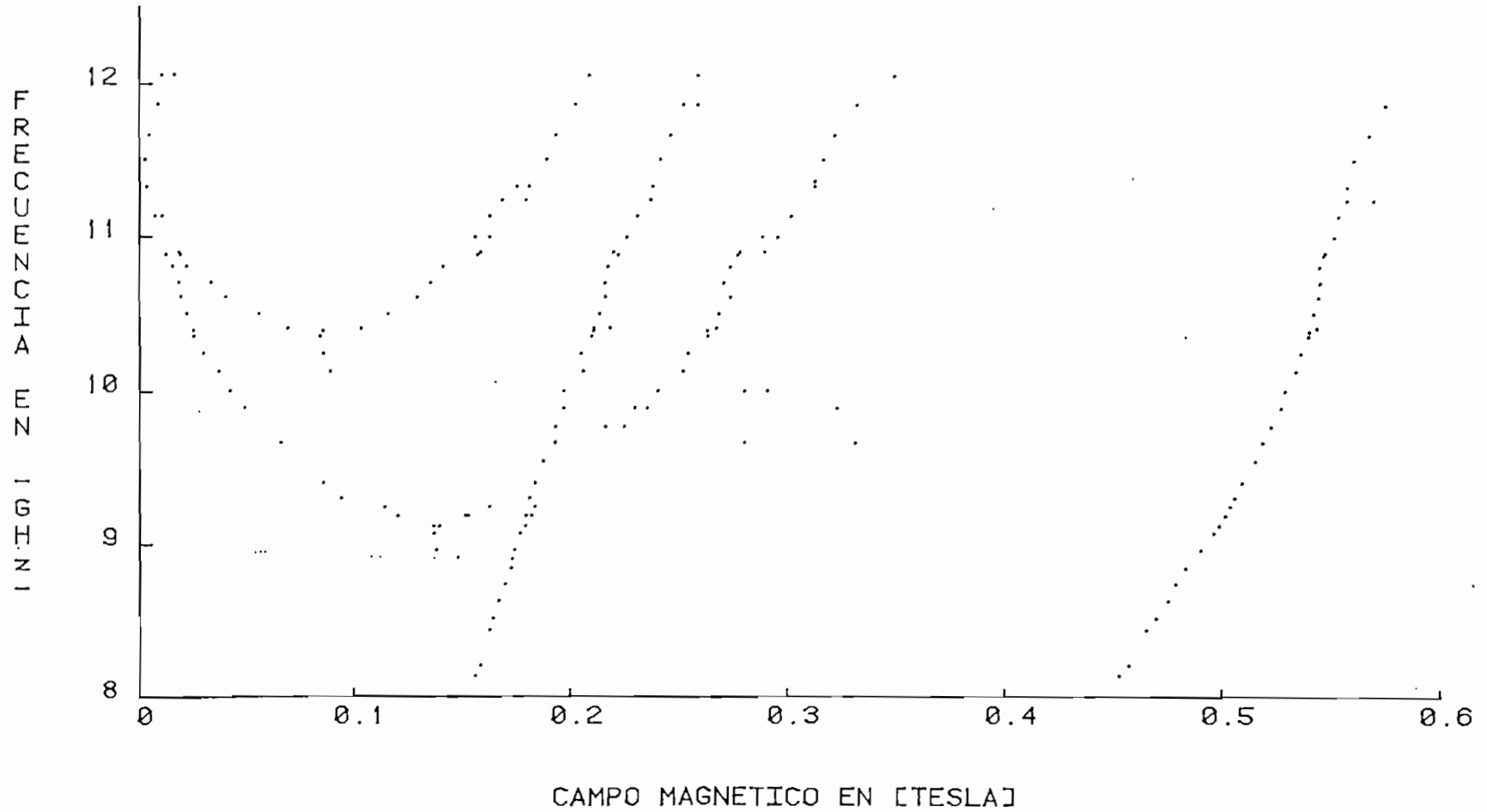
---



Medidas realizadas el 19 de Marzo de 1982

Angulo aproximado entre la dirección del campo magnético y el eje c: 50°

FIG 6.11 MEDIDAS DETALLADAS DE LA MUESTRA 207



Medidas realizadas los días 22 y 23 de Marzo de 1982

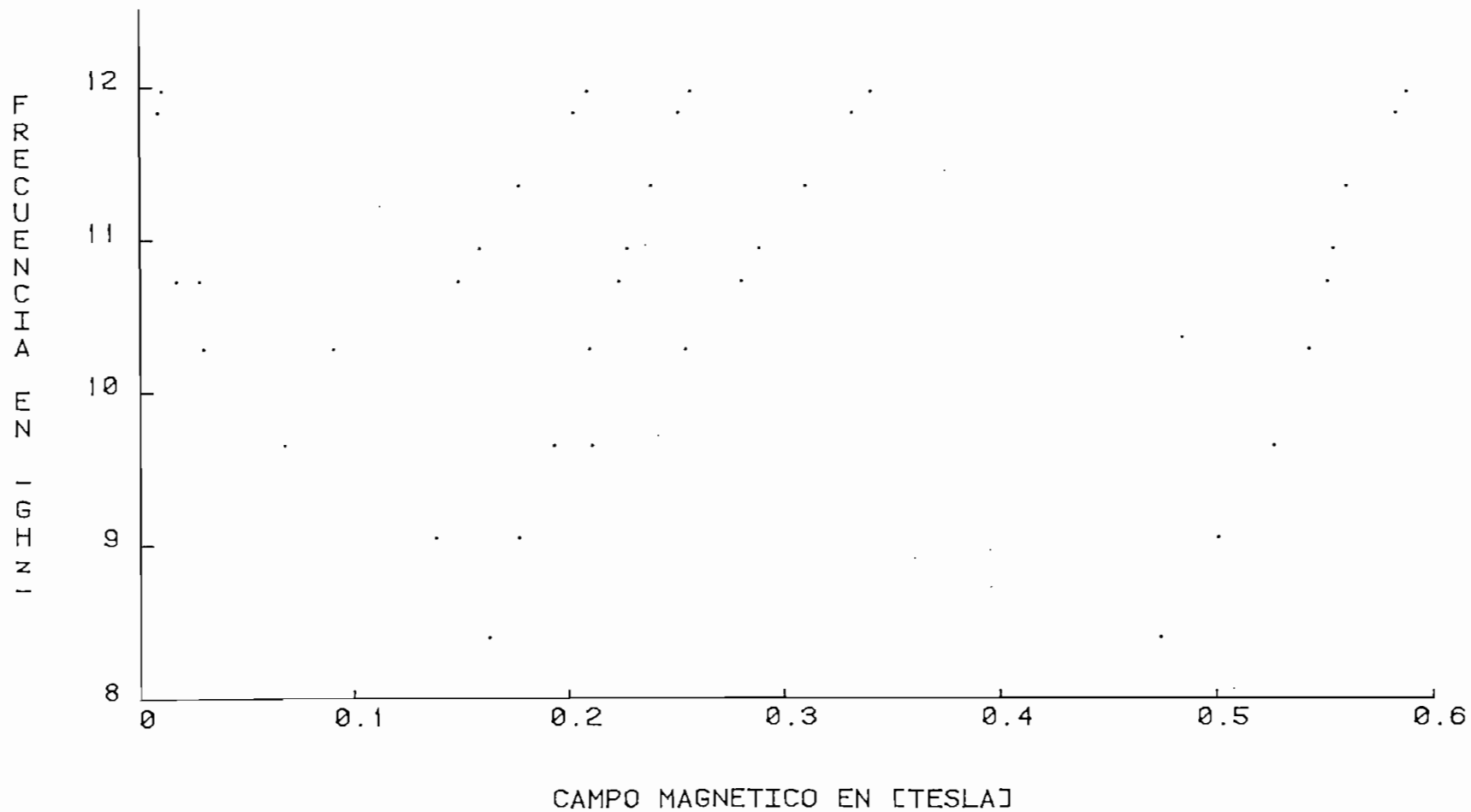
Angulo aproximado entre la dirección del campo magnético y el eje c:  $60^\circ$

DATOS EXPERIMENTALES DE LA MUESTRA 207/R1  
 FRECUENCIA F (GHz) Y CAMPO MAGNETICO B' (TESLA)

B'	F	B'	F	B'	F
0.450	8.1350	0.086	10.1290	0.544	10.8960
0.153	8.1350	0.203	10.1290	0.275	10.8960
0.156	8.2050	0.249	10.1290	0.287	10.8960
0.454	8.2050	0.533	10.2450	0.217	10.8960
0.462	8.4420	0.251	10.2450	0.156	10.8960
0.160	8.4420	0.202	10.2450	0.016	10.8960
0.467	8.5170	0.083	10.2450	0.550	11.1320
0.162	8.5170	0.027	10.2450	0.299	11.1320
0.472	8.6320	0.537	10.3560	0.228	11.1320
0.164	8.6320	0.260	10.3560	0.160	11.1320
0.167	8.7410	0.207	10.3560	0.008	11.1320
0.476	8.7410	0.082	10.3560	0.005	11.1320
0.480	8.8470	0.023	10.3560	0.548	10.9950
0.170	8.8470	0.112	9.2500	0.293	10.9950
0.488	8.9690	0.160	9.2500	0.286	10.9950
0.171	8.9690	0.181	9.2500	0.223	10.9950
0.136	8.9690	0.501	9.2500	0.153	10.9950
0.494	9.0790	0.137	9.1230	0.160	10.9950
0.174	9.0790	0.177	9.1230	0.566	11.2360
0.134	9.0790	0.496	9.1240	0.554	11.2360
0.499	9.1950	0.134	9.1240	0.310	11.3600
0.177	9.1950	0.177	9.1240	0.234	11.2360
0.149	9.1950	0.537	10.3860	0.177	11.2360
0.150	9.1950	0.260	10.3860	0.166	11.2360
0.179	9.1950	0.208	10.3860	0.554	11.3260
0.118	9.1950	0.083	10.3860	0.310	11.3260
0.503	9.3100	0.023	10.3860	0.235	11.3260
0.178	9.3100	0.541	10.6050	0.178	11.3260
0.091	9.3100	0.271	10.6050	0.173	11.3260
0.507	9.4050	0.213	10.6050	0.001	11.3260
0.181	9.4050	0.127	10.6050	0.557	11.4970
0.083	9.4050	0.038	10.6050	0.314	11.4970
0.513	9.5500	0.017	10.6050	0.239	11.4970
0.185	9.5500	0.539	10.4980	0.186	11.4970
0.516	9.6670	0.266	10.4980	0.000	11.4970
0.328	9.6670	0.211	10.4980	0.571	11.8600
0.278	9.6670	0.113	10.4980	0.329	11.8600
0.063	9.6670	0.053	10.4980	0.256	11.8600
0.190	9.6670	0.020	10.4980	0.249	11.8600
0.520	9.7710	0.542	10.6980	0.199	11.8600
0.222	9.7710	0.268	10.6980	0.006	11.8600
0.213	9.7710	0.213	10.6980	0.346	12.0510
0.190	9.7710	0.133	10.6980	0.256	12.0510
0.524	9.8950	0.031	10.8980	0.206	12.0510
0.194	9.8950	0.016	10.8980	0.008	12.0510
0.233	9.8950	0.542	10.8980	0.014	12.0510
0.047	9.8950	0.271	10.8980	0.564	11.6560
0.227	9.8950	0.214	10.8980	0.319	11.6560
0.520	9.8950	0.139	10.8980	0.243	11.6560
0.526	10.0050	0.020	10.8980	0.190	11.6560

FIG 6.12 MEDIDAS SEMIDETALLADAS DE LA MUESTRA 207

---



Medidas realizadas el 19 de Marzo de 1982

Angulo aproximado entre la dirección del campo magnético y el eje c:  $60^\circ$



DATOS EXPERIMENTALES DE LA MUESTRA 207/R2  
 FRECUENCIA F(GHz) Y CAMPO MAGNETICO B' (TESLA)

---

B'	F	B'	F	B'	F
0.557	11.3500	0.015	10.7200	0.174	9.0420
0.307	11.3500	0.026	10.7200	0.136	9.0420
0.235	11.3500	0.540	10.2790	0.472	8.3950
0.174	11.3500	0.251	10.2790	0.160	8.3950
0.551	10.9380	0.207	10.2790	0.585	11.9710
0.286	10.9380	0.088	10.2790	0.337	11.9710
0.224	10.9380	0.027	10.2790	0.254	11.9710
0.156	10.9380	0.524	9.6480	0.206	11.9710
0.549	10.7200	0.208	9.6480	0.008	11.9710
0.278	10.7200	0.190	9.6480	0.580	11.8260
0.221	10.7200	0.065	9.6480	0.328	11.8260
0.146	10.7200	0.498	9.0420	0.248	11.8260
0.199	11.8260	0.006	0.0059		

---

## 6.5 DETERMINACION DEL SIGNO DE LA RELACION GIRO- MAGNETICA DE LAS RESONANCIAS DE LAS MUESTRAS

La cavidad #2 desarrollada en esta tesis no puede determinar el signo de la relación giromagnética de las resonancias de las muestras, por esta razón se hizo necesario encontrar estos signos midiendo cada una de las muestras en la cavidad #1. Los resultados de estas mediciones se resumen en la Tabla 6.1.

Código de la muestra	Frecuencia (GHz)	Campo Magnético (Tesla)	signo de $\gamma$
202	8934	0.05	+
202	8934	0.09	+
202	8934	0.19	-
202	8934	0.27	-
204	8926	0.07	+
204	8926	0.17	-
204	8926	0.32	-
205	8924	0.06	+
205	8924	0.19	-
205	8924	0.25	-
206	8931	0.06	?
206	8931	0.18	-

Código de la muestra	Frecuencia (GHz)	Campo Magnético (Tesla)	signo de $\gamma$
206	8931	0.31	?
207	8745	0.13	-
207	8745	0.16	-

Tabla 6.1.- Signo de la relación giromagnética de las resonancias de las muestras.

La información del signo obtenida para una sola frecuencia es importante pero no suficiente como para definir la forma de las curvas experimentales en varias frecuencias. Sin embargo, los desarrollos teóricos del anexo 2 (que se encuentran en curso) se complementarán con estas mediciones para comparar cuantitativamente teoría y práctica.

NOTA: La muestra 201 no pudo ser medida porque su falta de simetría impidió superponer los modos de oscilación de la cavidad #1.

## C A P I T U L O   V I I

OTRAS MEDIDAS DE RESONANCIA MAGNETICA

El tema de esta Tesis se circunscribe a las reso-  
nancias magnéticas en rubí; sin embargo, para establecer  
alguna comparación con las medidas realizadas en la cavi-  
dad #1<sup>(1)</sup>, se tomaron datos de otras muestras, las mismas  
que se presentan en la Tabla 7.1.

Muestra	fo	Bo	$\Delta$ Bo
Rodomita (#18)	8935	0.303	0.178
Sulfato de Mangane- so molido y calcinado (#31)	8919	0.305	0.050
Sulfato de Mangane- so molido y sin cal- cinar (#30)	8919	0.295	0.036
Cromita (#15b)	8921	0.297	--
Silicio en polvo en capsulado en parafi- na (#27b)	8926	0.302	--

Muestra	$f_0$	$B_0$	$\Delta B_0$
Ferrita B63310-A7002 (#23a)	8926	0.0004	?
		0.119	--
		0.530	--
Ferrita B65541-K0250 (#26)	8920	0.058	--
		0.172	0.129

Tabla 7.1.- Otras medidas de resonancia magnética

NOTA:  $f_0$  ... frecuencia de resonancia en GHz.

$B_0$  ... Campo magnético medido en Tesla a la frecuencia de resonancia.

$\Delta B_0$  ... Variación de campo magnético para una variación  $\pm (x_{\text{máx}} / 2)$  en el pico de la curva de absorción de la cavidad.

Se intentó detectar resonancias de las muestras que se indican a continuación, sin obtener ningún resultado: Rutilo (#12); Sulfato amónico ferroso (#36); permanganato de Potasio (#34); Cobaltita (#13b); Manganita (#19 y #19b);  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; Oxido de Titanio.

Se puede apreciar que los datos experimentales de las dos cavidades coinciden dentro de un margen de error

## C A P I T U L O   V I I I

CONCLUSIONES

Los resultados del desarrollo de esta tesis se resumen a continuación:

- a) Se ha construido una cavidad que permite medir resonancias magnéticas de electrones en el rango de 8.2 a 12.2 GHz en campos magnéticos de 0.02 a 0.63 Tesla.
- b) Se ha medido en detalle las resonancias magnéticas de electrones de dos rubíes naturales y tres rubíes sintéticos de distintas orientaciones.
- c) Se ha estudiado la estructura cristalográfica del rubí.
- d) Se ha medido la orientación de las muestras mediante difracción de Bragg de rayos X.
- e) Se ha verificado la estructura  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de las muestras mediante rayos X.

f) Se ha medido el signo de la relación giromagnética de las resonancias de las muestras de rubí a 9 GHz.

Estos resultados experimentales permiten estudiar la configuración electrónica de los iones  $\text{Cr}^{+++}$  en rubí y la simetría del campo cristalino que ven estos iones. Se encuentra en curso un trabajo que finalmente permitirá comparar cuantitativamente teoría y experimento (anexo 2).

En conclusión, las medidas realizadas de resonancia magnética de electrones demuestran la bondad de esta técnica para estudiar en detalle problemas de física del estado sólido y químicos.

## A P E N D I C E 1

RESONANCIAS MAGNETICAS TEORICAS DEL RUBI

En este apéndice se indican algunos resultados de la interpretación teórica del anexo 2. Los valores propios de la matriz  $H = H_0 + H_1$  (energías de los cuatro estados cuánticos correspondientes a  $J=3/2$ ) se encuentran con el programa CALCULO del anexo 3 para cualquier valor de los ángulos de giro ( $\alpha$ ) y ( $\beta$ ) definidos en el anexo 2.

El ángulo  $\alpha$  varía entre  $0^\circ$  y  $60^\circ$  y el ángulo  $\beta$  entre  $0^\circ$  y  $180^\circ$  antes de que los valores de las energías de los cuatro estados cuánticos se repitan debido a la simetría del cristal.

Las Fig. 1 - 7 tienen por objeto ilustrar el efecto de un pequeño cambio a la orientación de las muestras con respecto a la inducción magnética aplicada, que se manifiesta en las curvas teóricas de resonancia. Las Fig 8 - 24 son patrones para orientar muestras de rubí en forma teórica; esta idea se ilustra en la Fig 25 en la que se superponen datos experimentales y teóricos notándo-



FIG 1 CURVAS TEORICAS DE RESONANCIA PARA ALFA=0 Y BETA=40

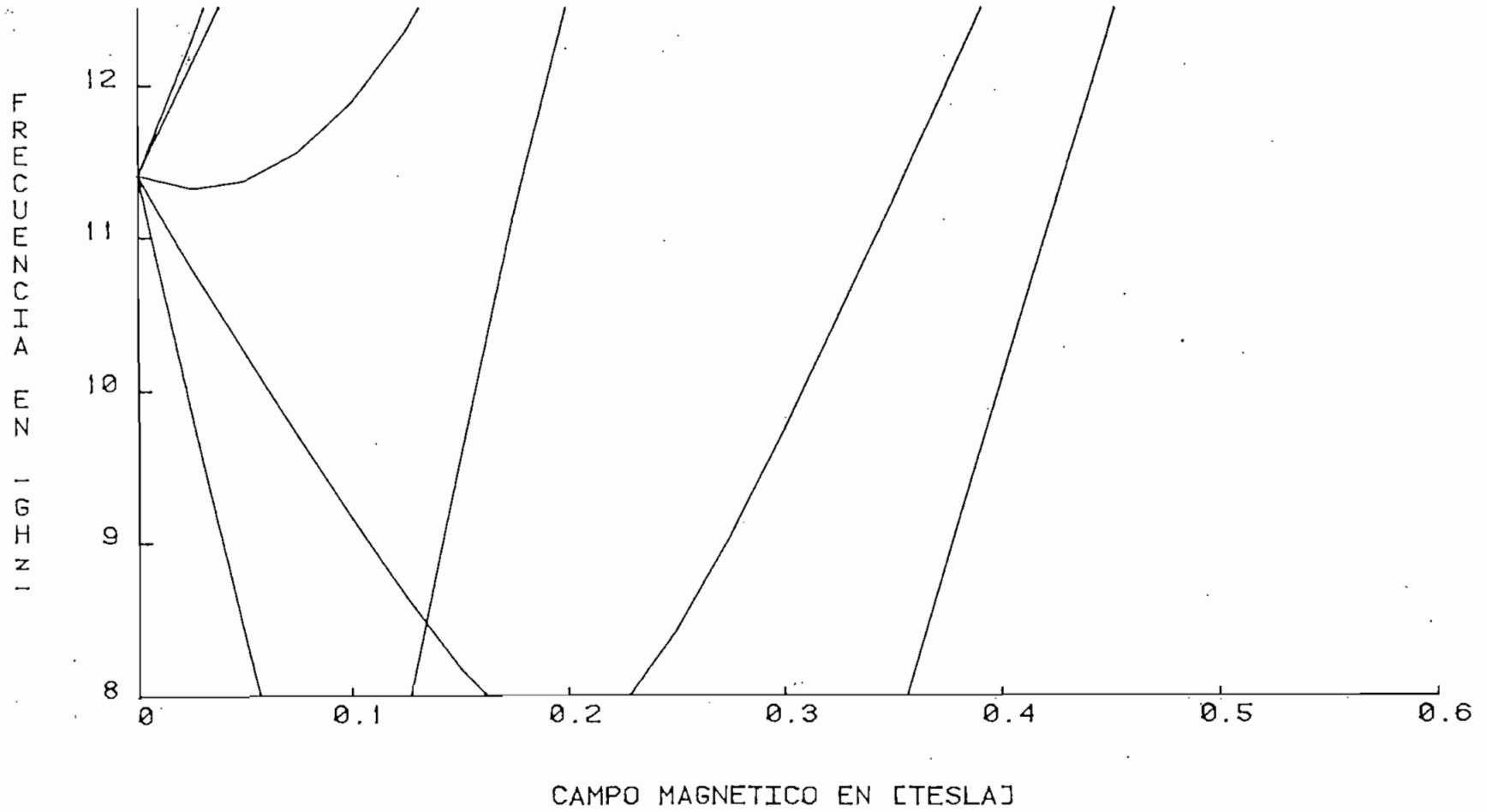


FIG 2 CURVAS TEÓRICAS DE RESONANCIA PARA ALFA=0 Y BETA=42

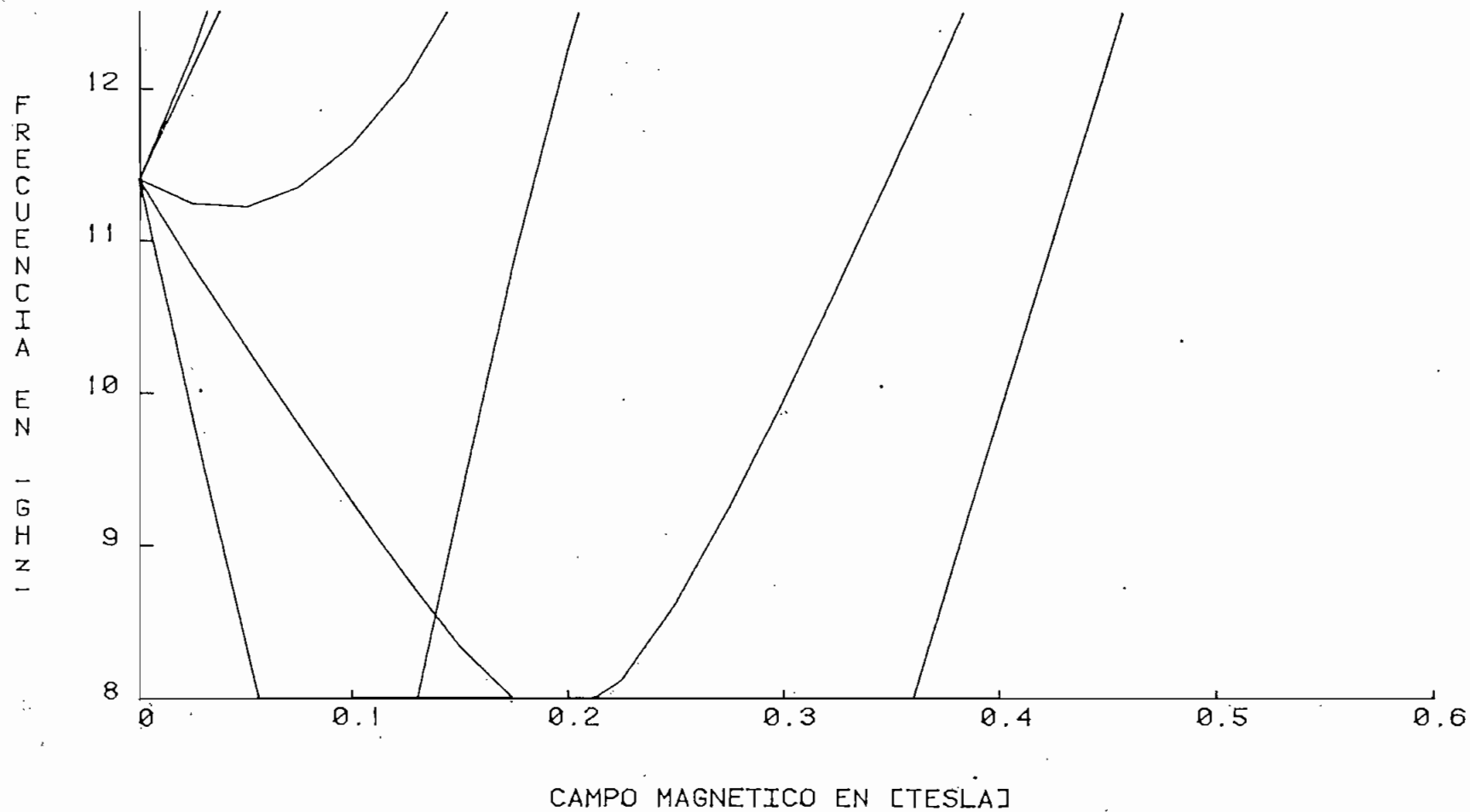


FIG 3 CURVAS TEORICAS DE RESONANCIA PARA ALFA=0 Y BETA=44

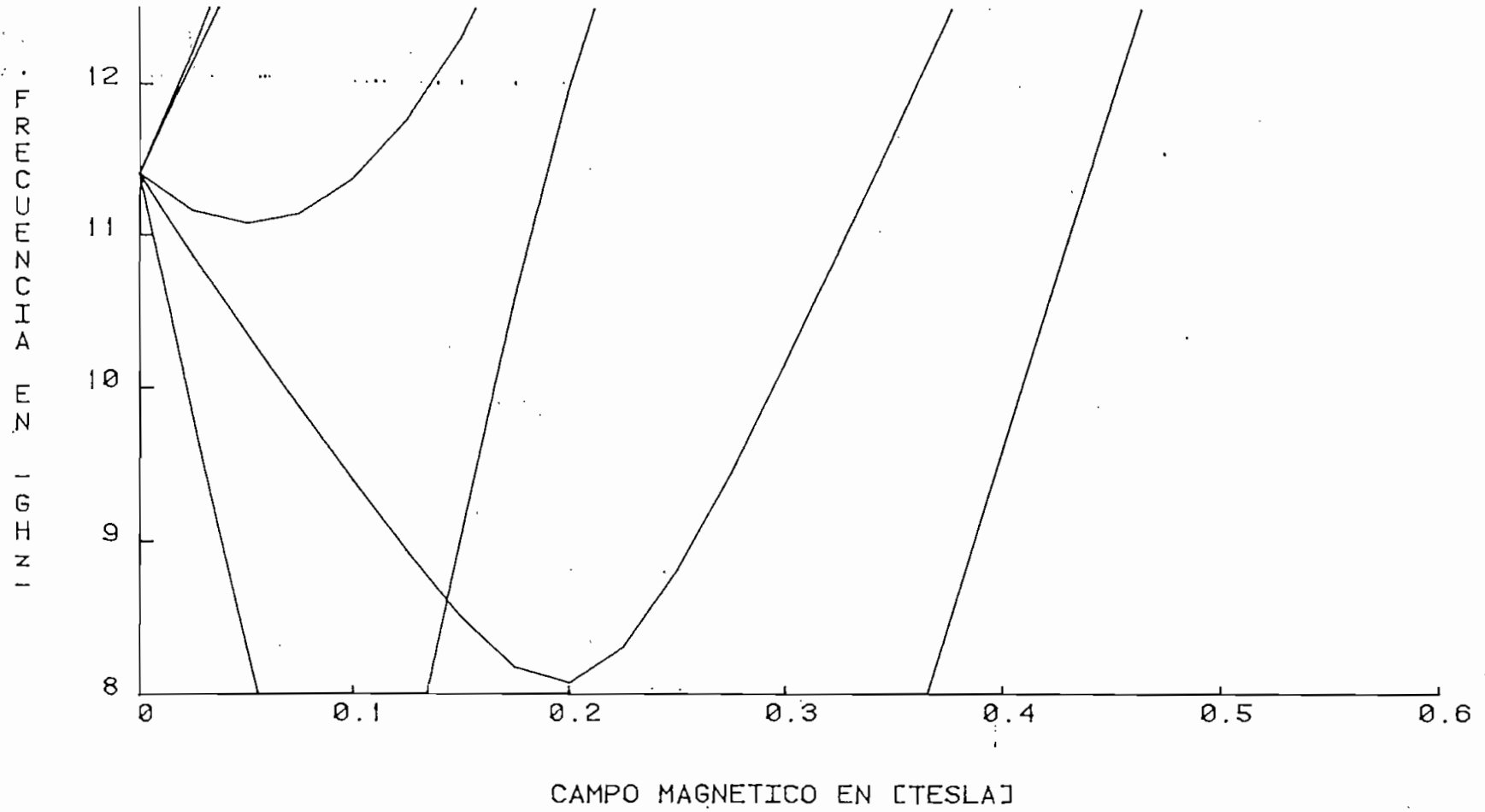


FIG 4 CURVAS TEORICAS DE RESONANCIA PARA ALFA=0 Y BETA=46

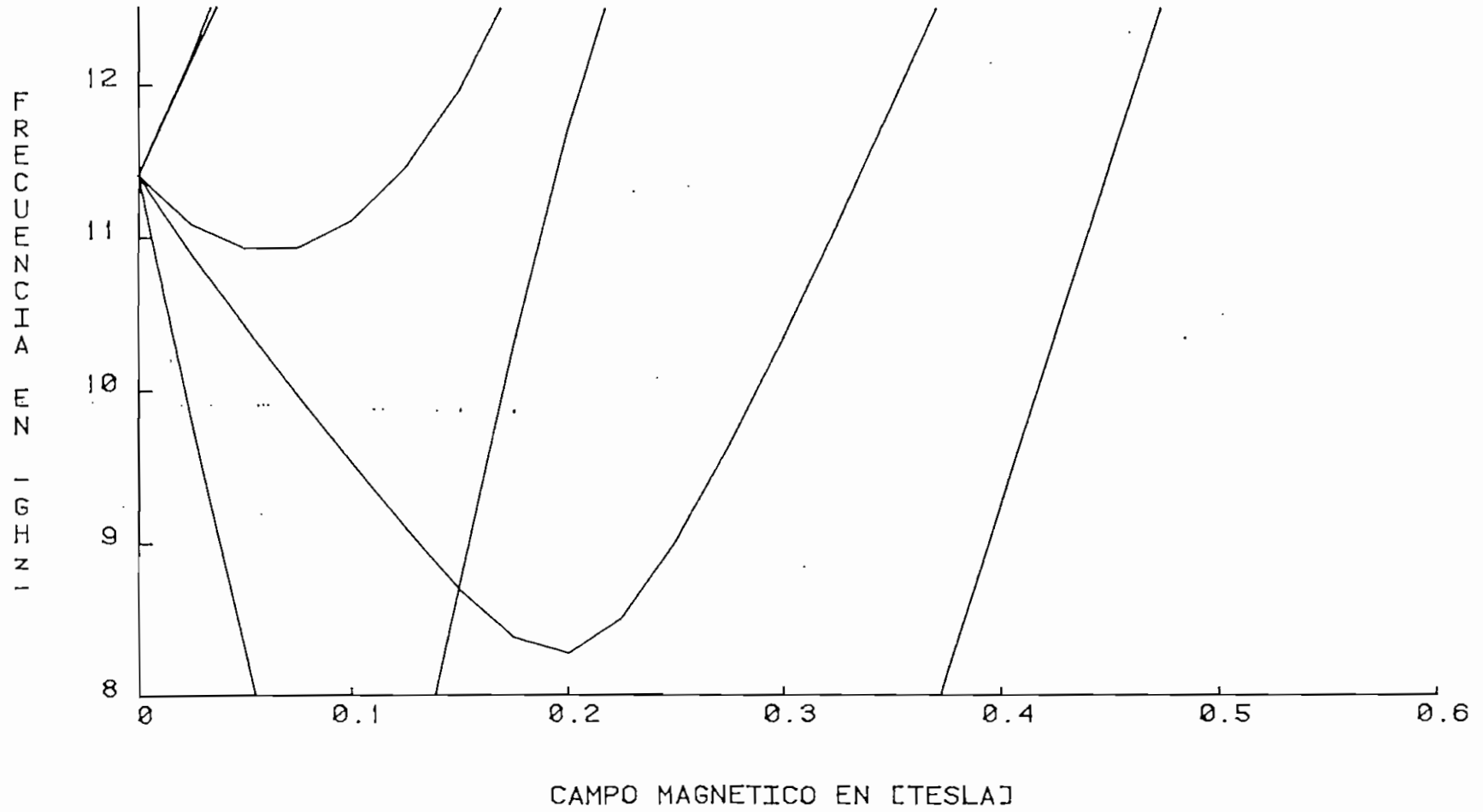


FIG 5 CURVAS TEORICAS DE RESONANCIA PARA ALFA=10 Y BETA=40

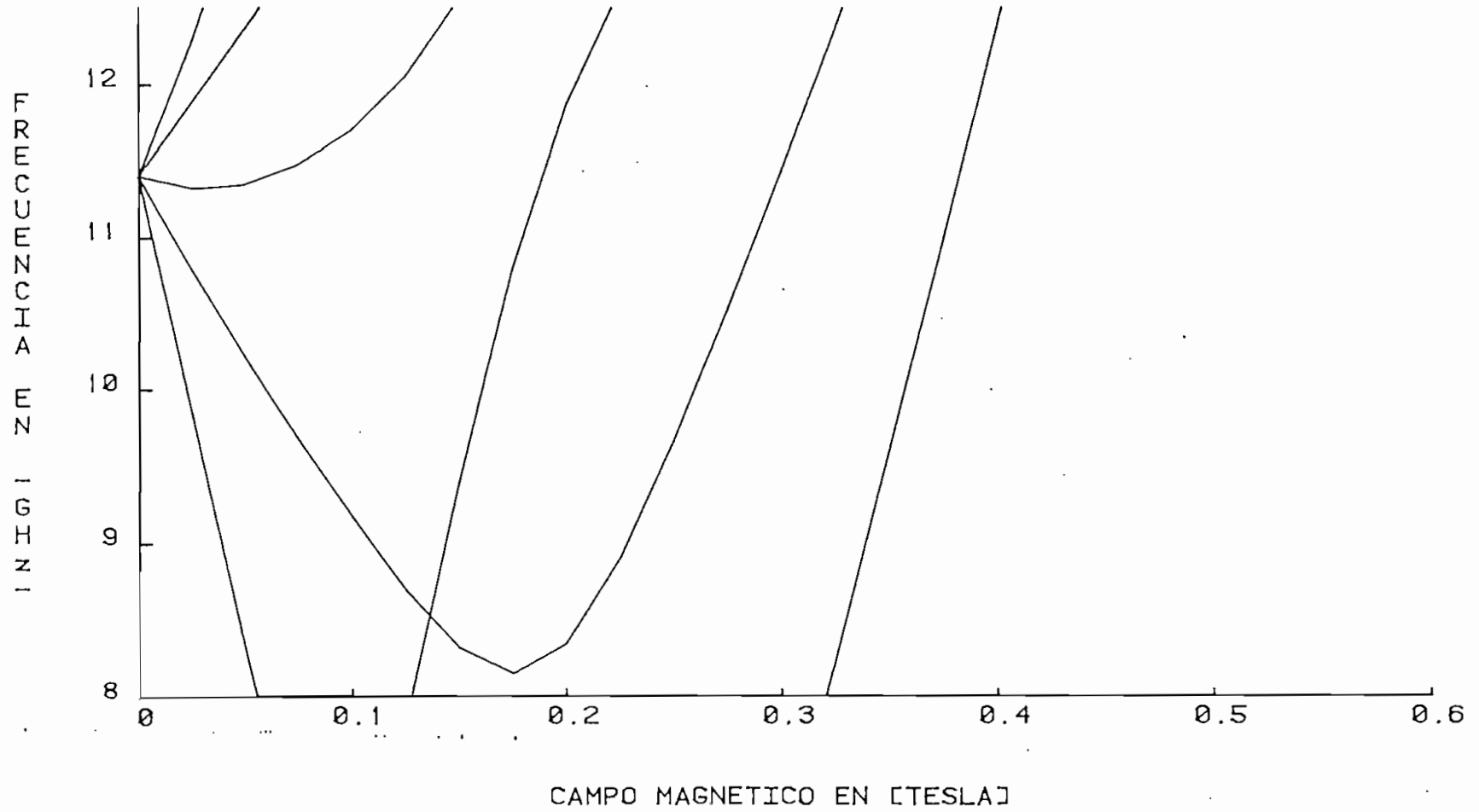


FIG 6 CURVAS TEORICAS DE RESONANCIA PARA ALFA =20 Y BETA =40

---

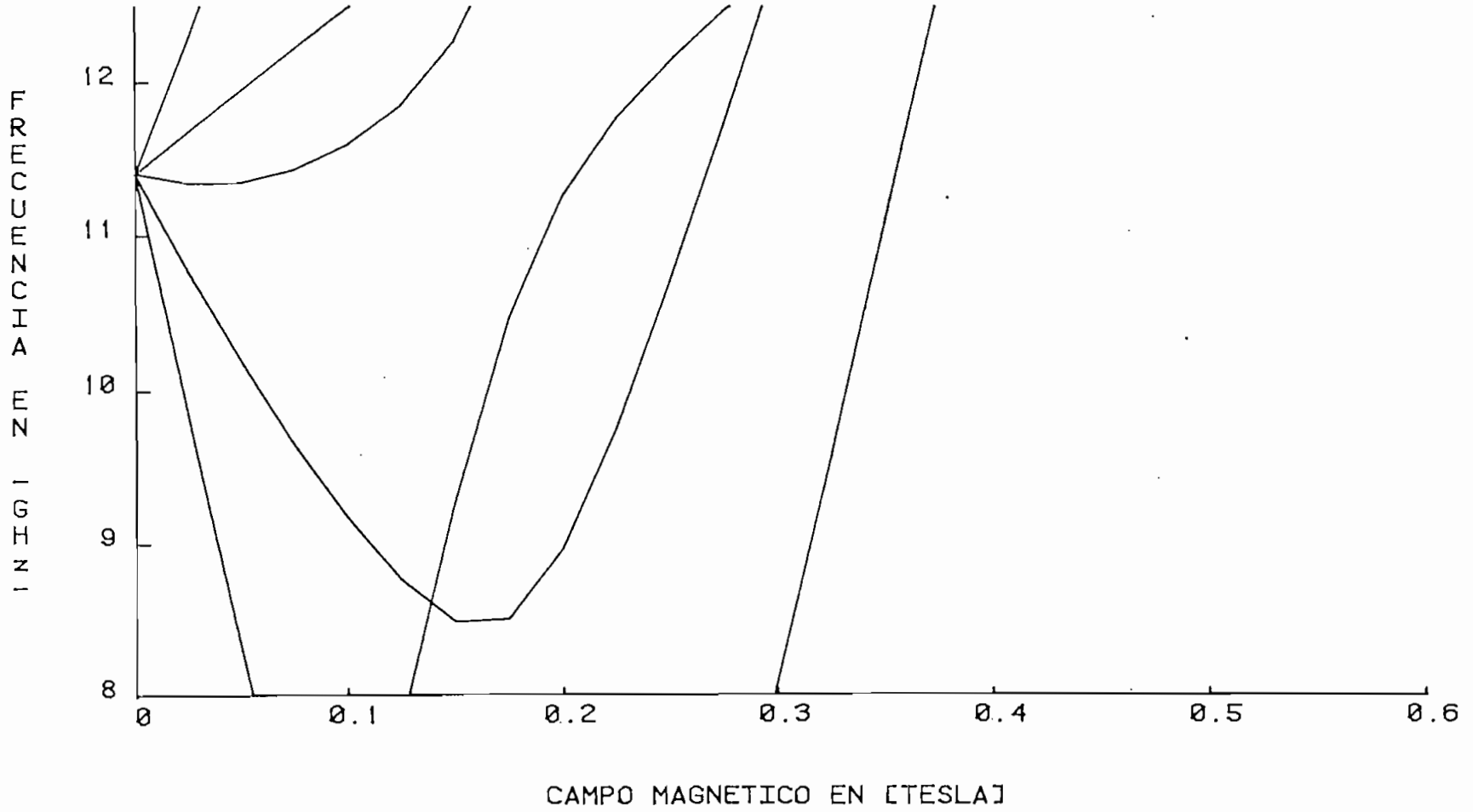


FIG 7 CURVAS TEORICAS DE RESONANCIA PARA ALFA=30 Y BETA=40

---

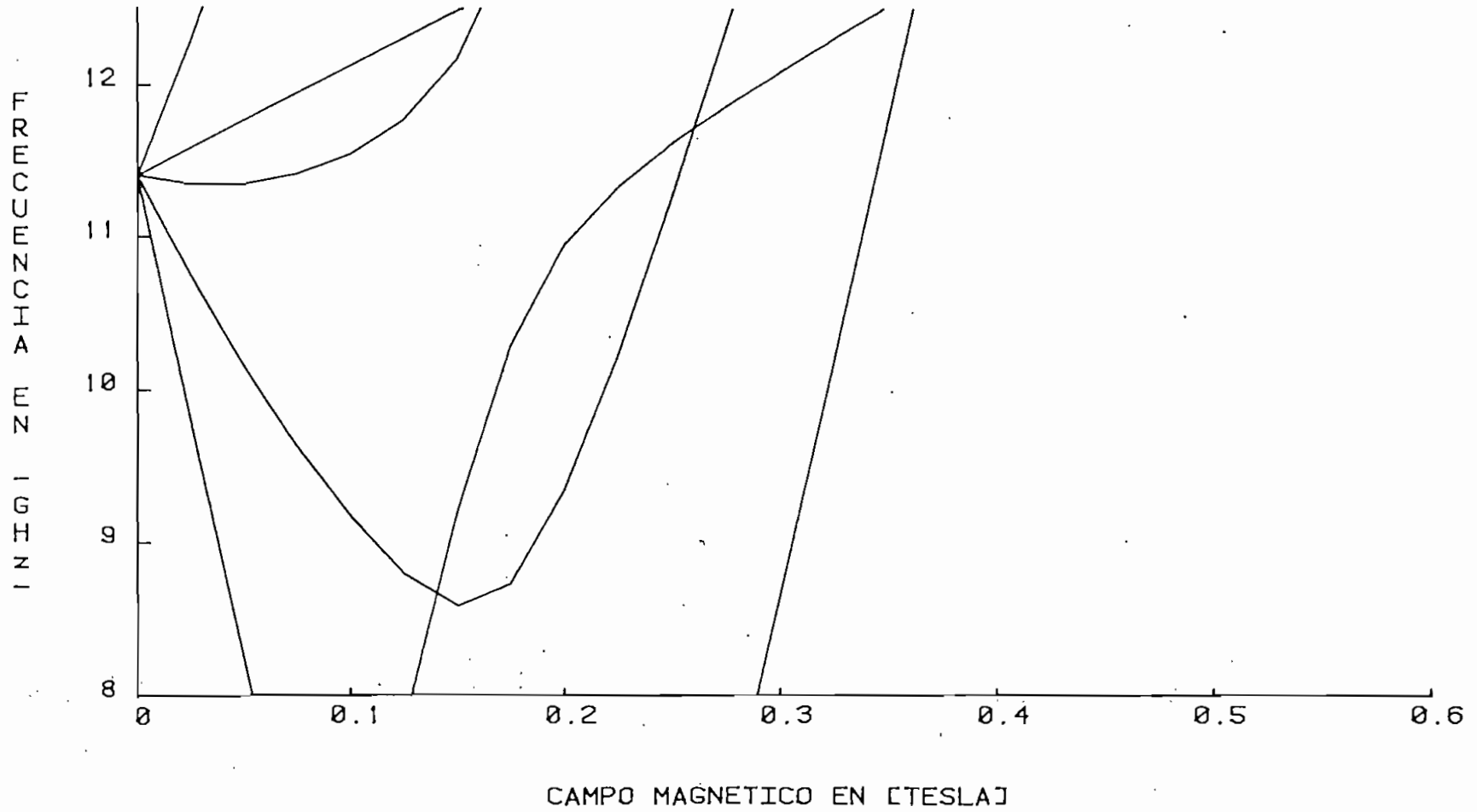


FIG 8 ALFA=0 BETA=0

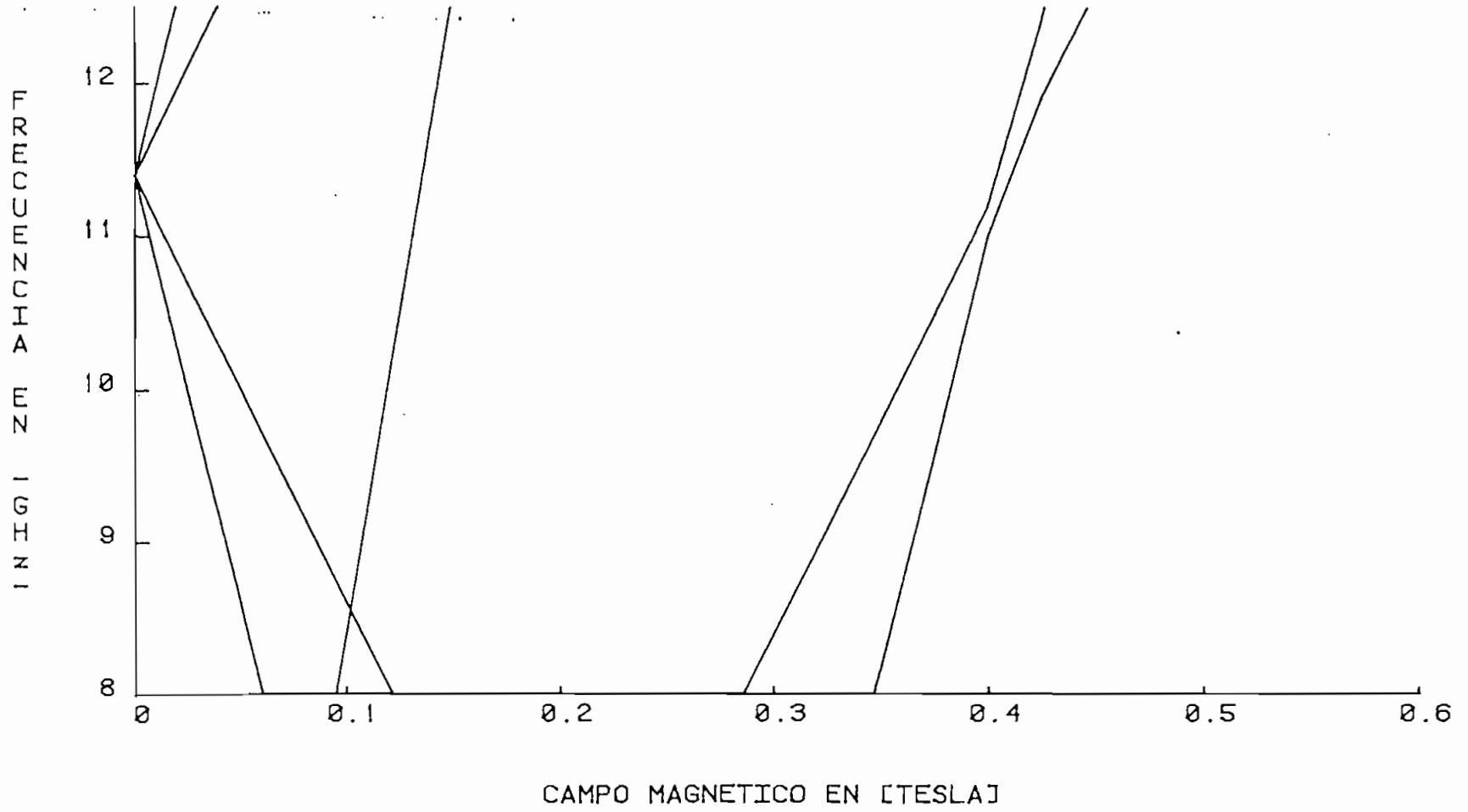




FIG 9 ALFA=10 BETA=0

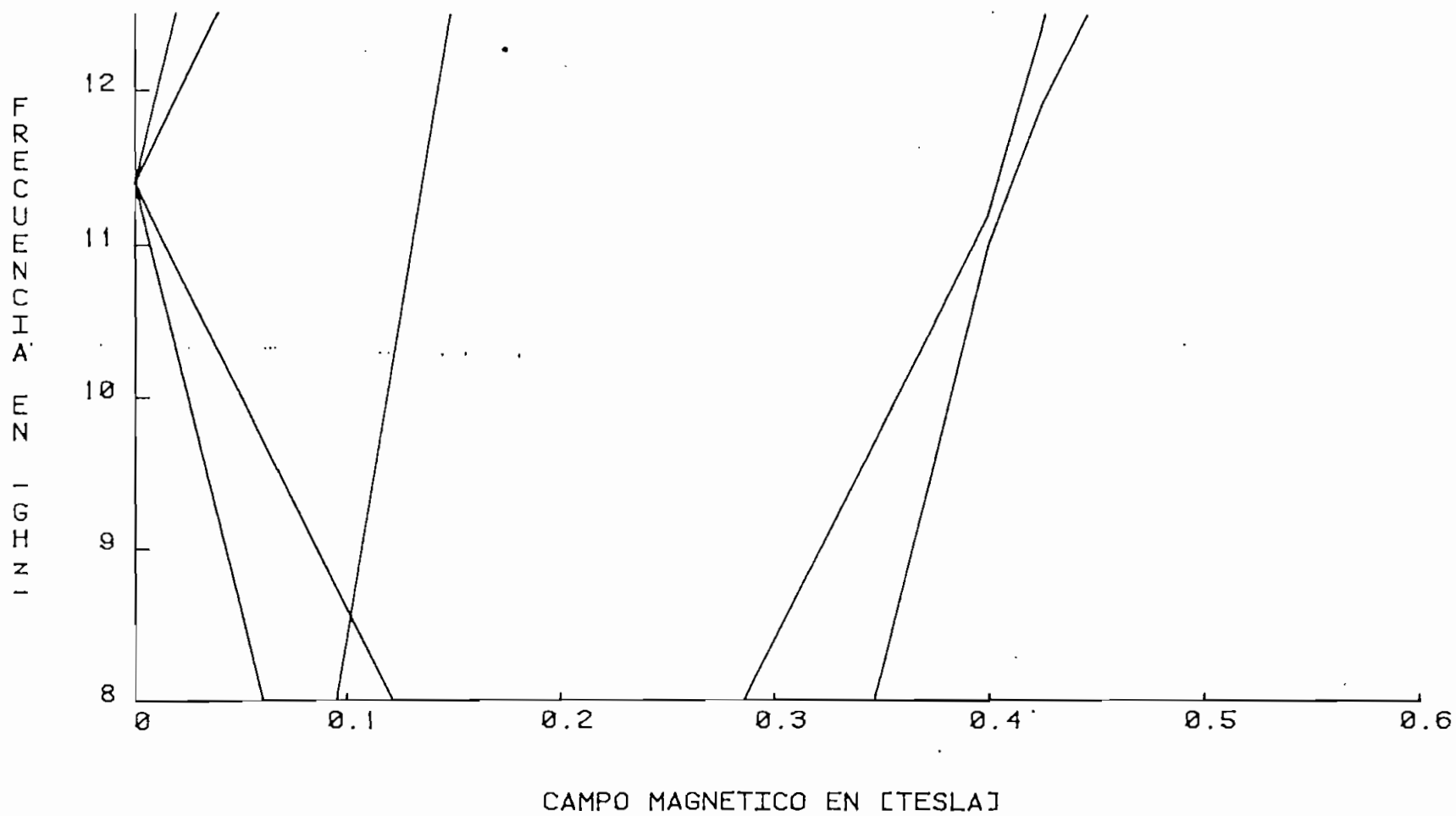


FIG 10 ALFA=0 BETA=20

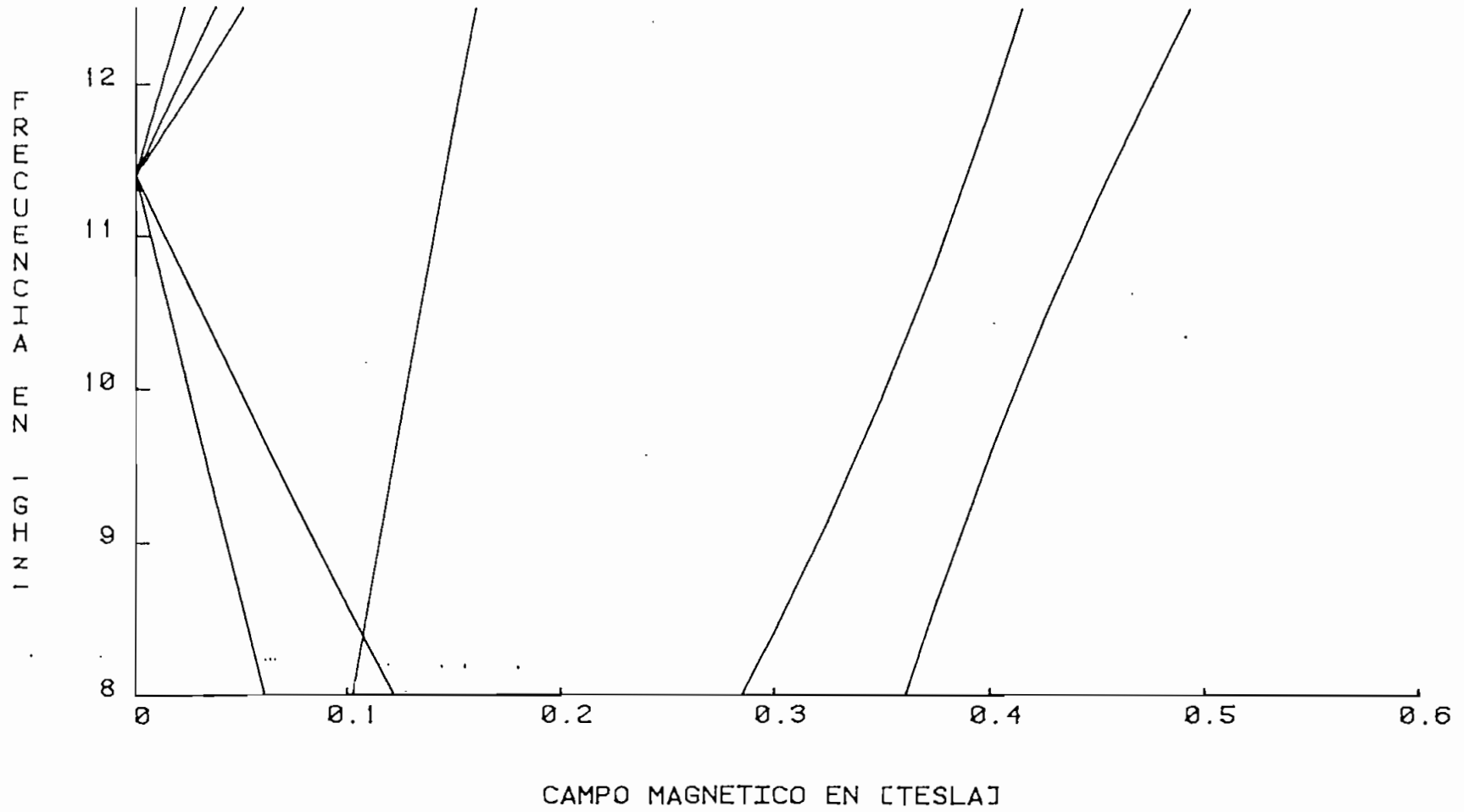


FIG 11 ALFA=10 BETA=20

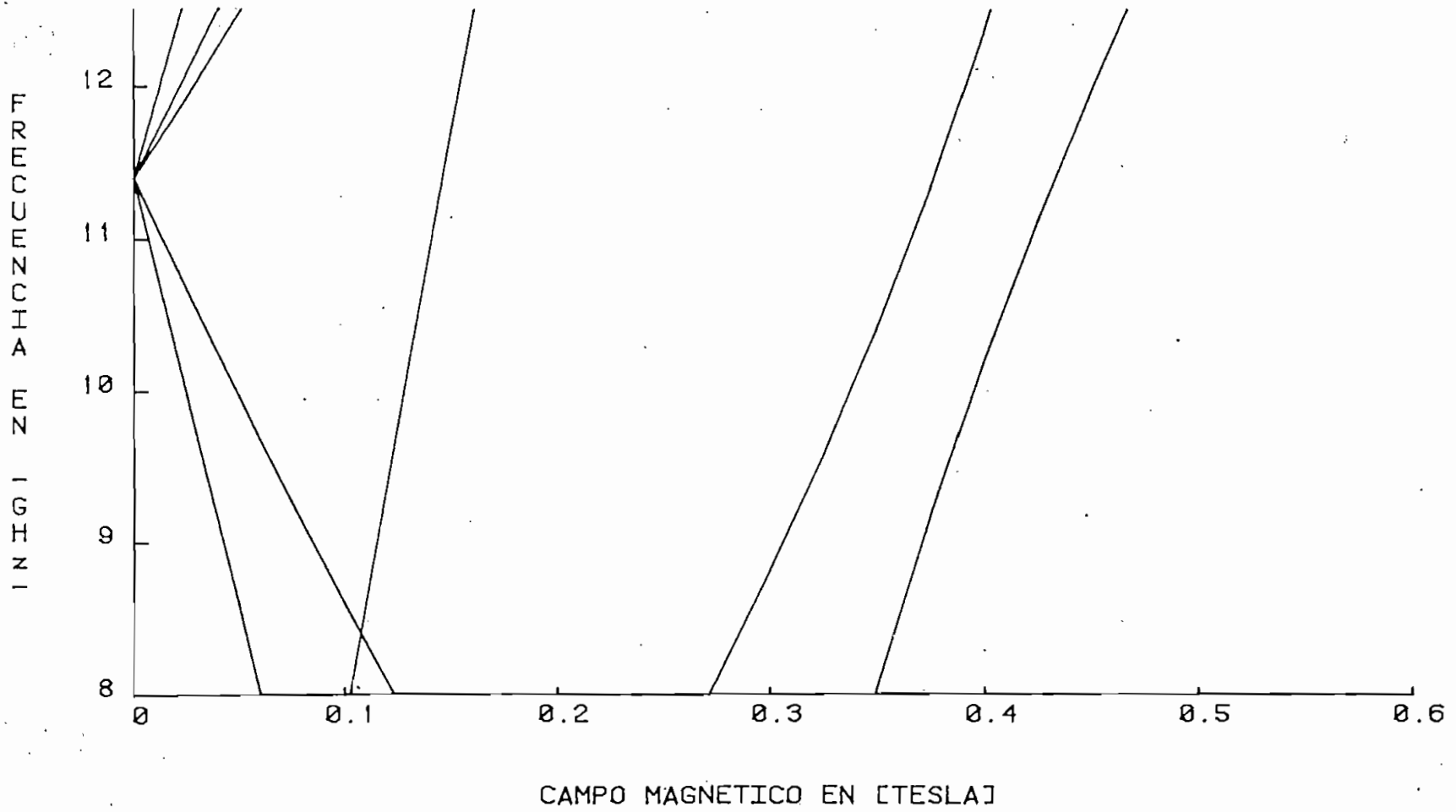


FIG 12 ALFA=0 BETA=40

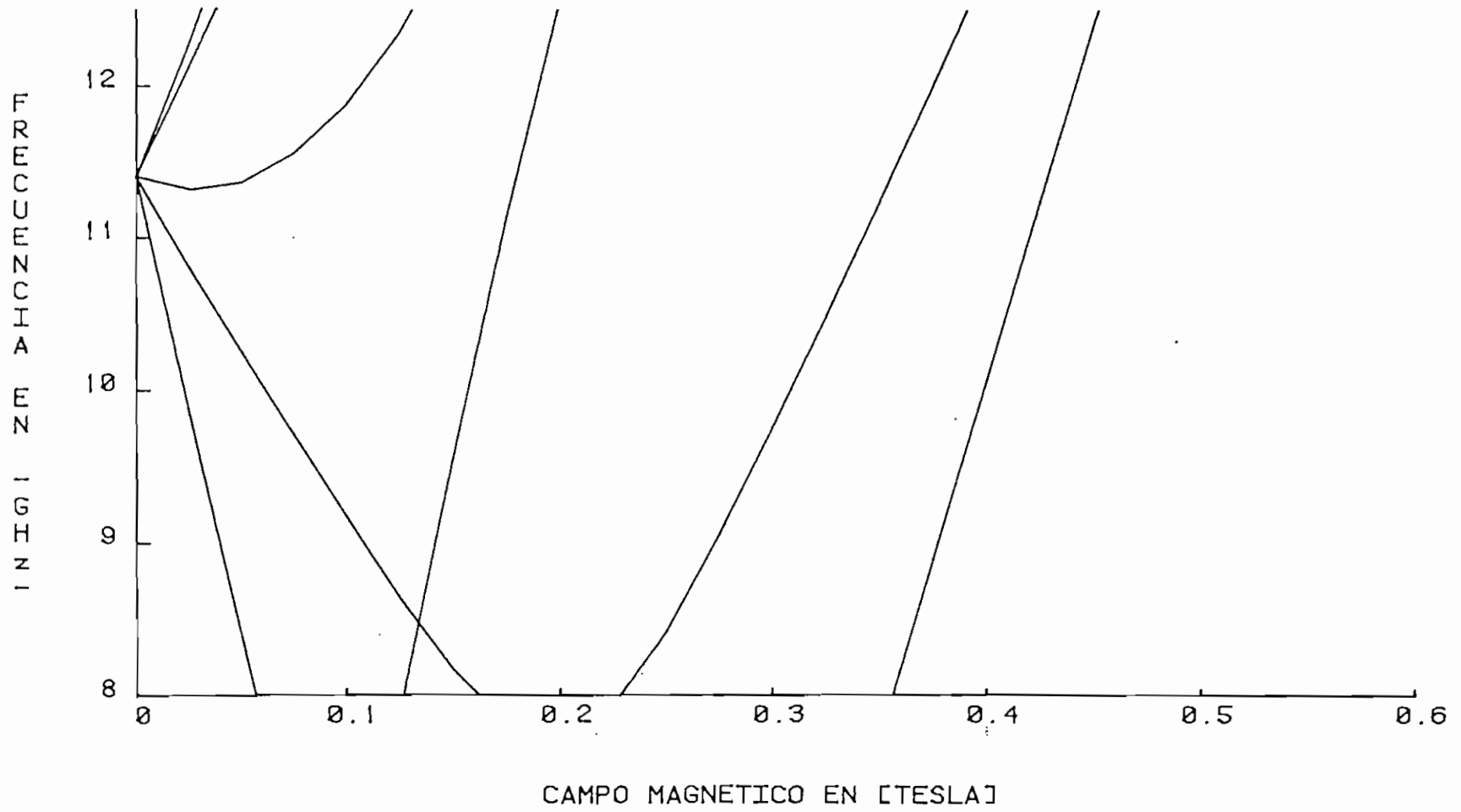


FIG 13 ALFA=10 BETA=40

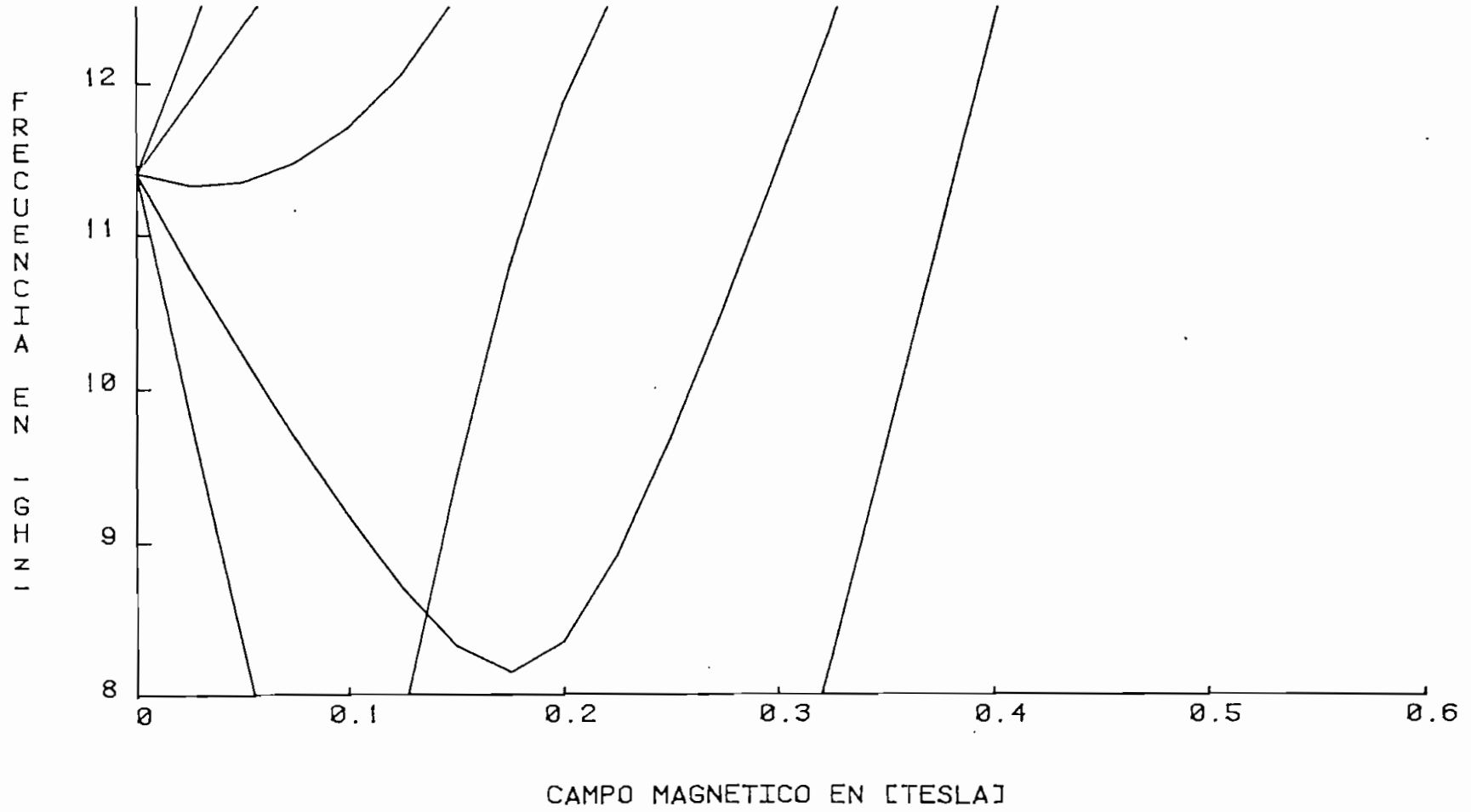


FIG 14 ALFA=0 BETA=60

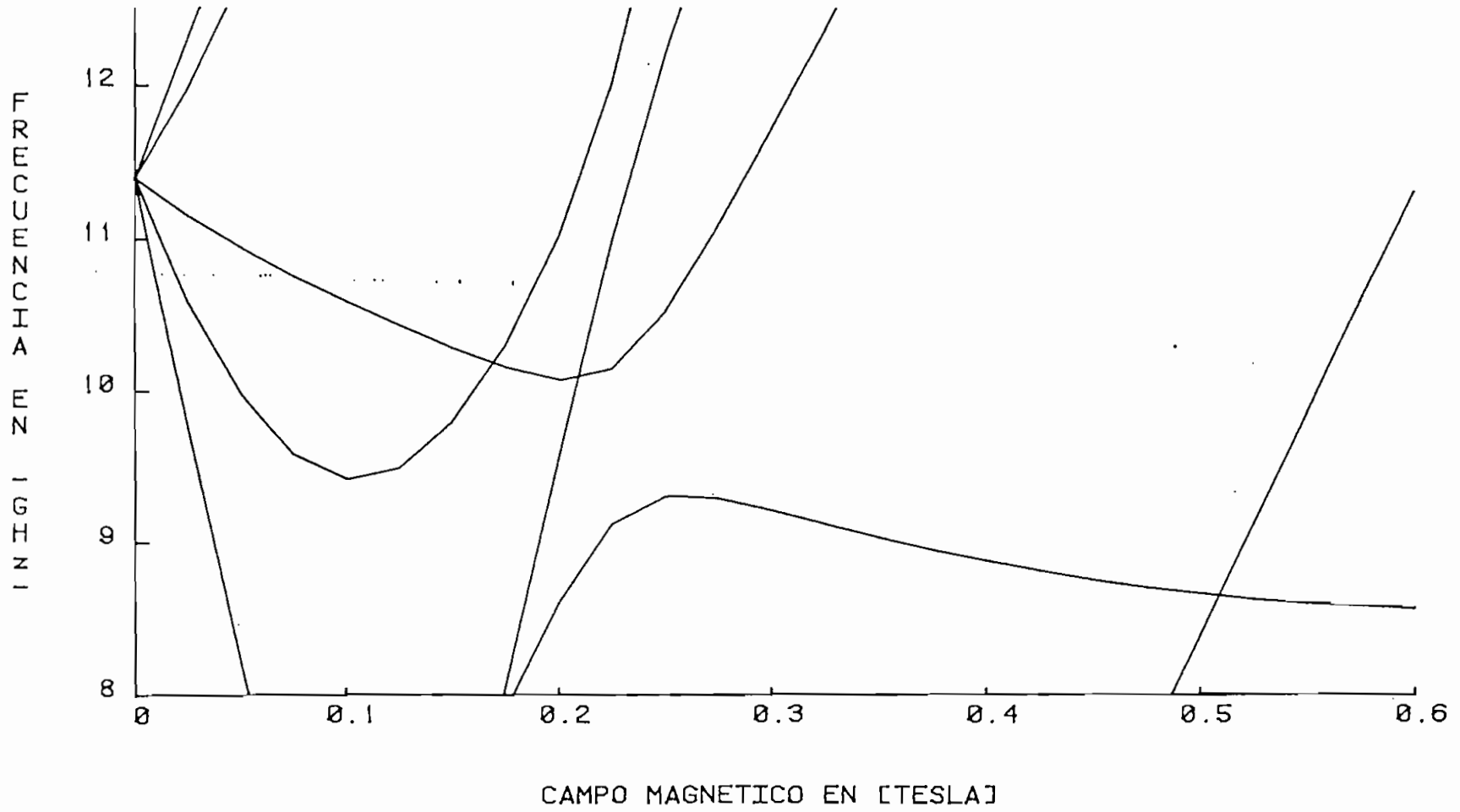


FIG 15 ALFA=10 BETA=60

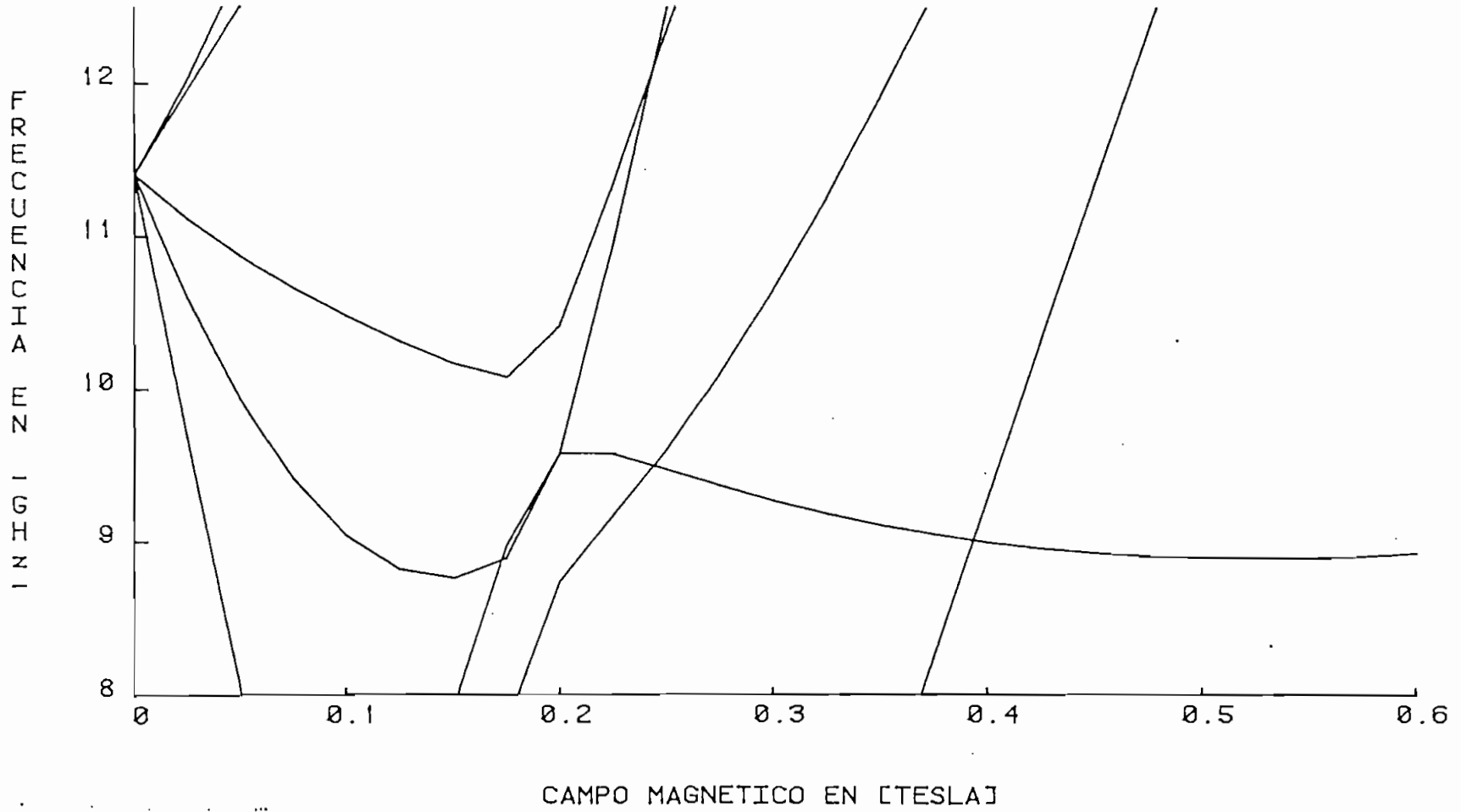


FIG 16 ALFA=0 BETA=80

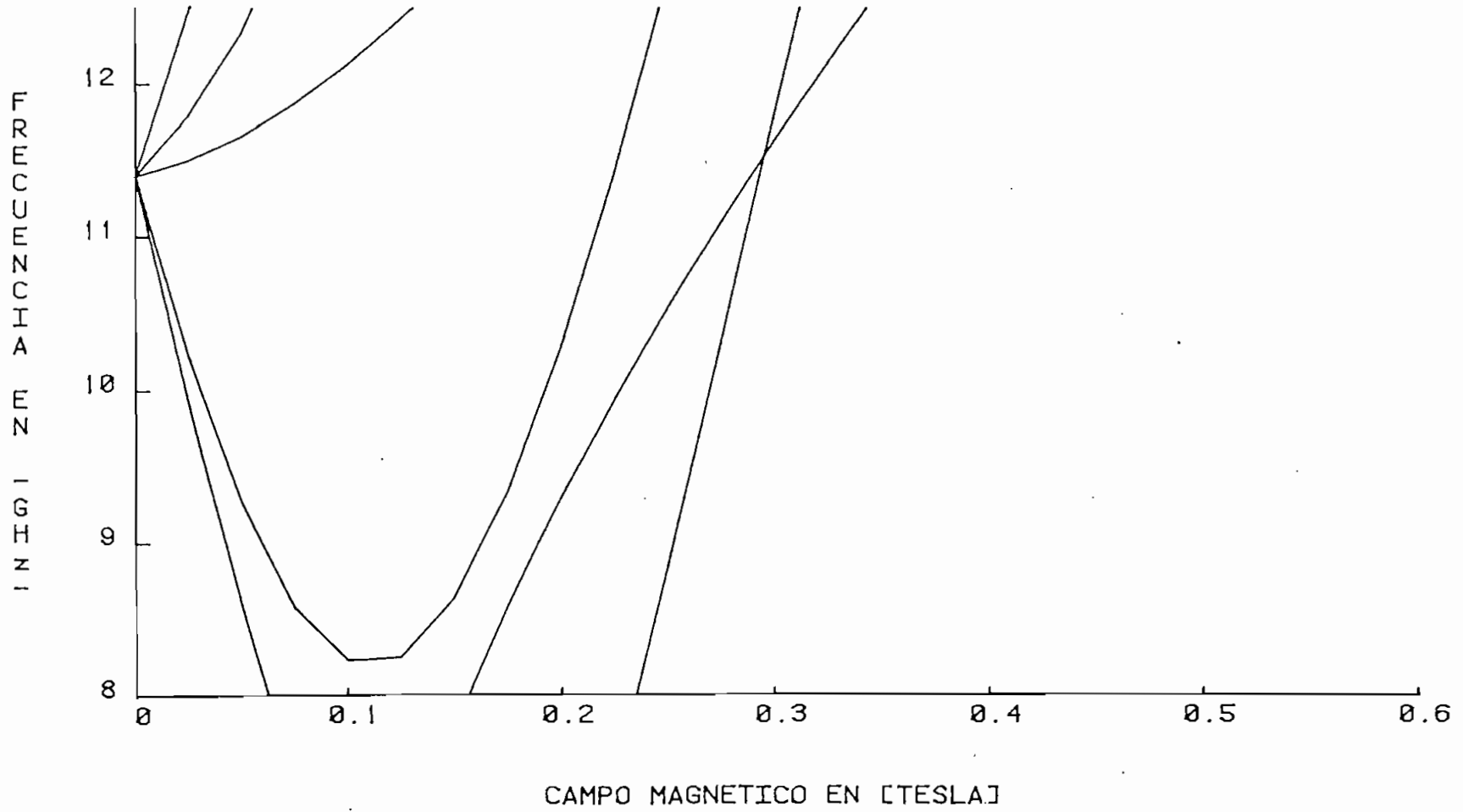




FIG 17 ALFA=10 BETA=80

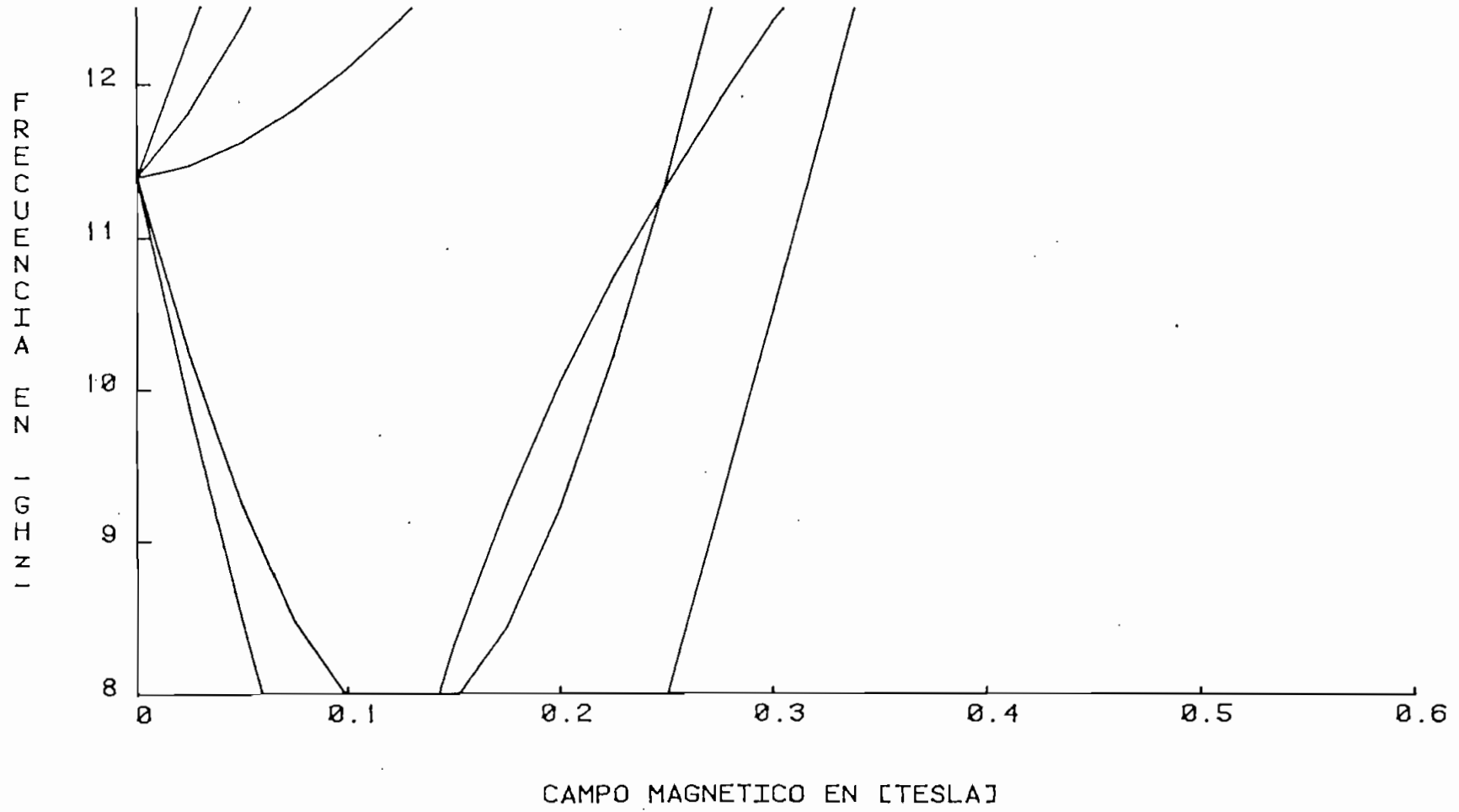


FIG 18 ALFA=0 BETA=100

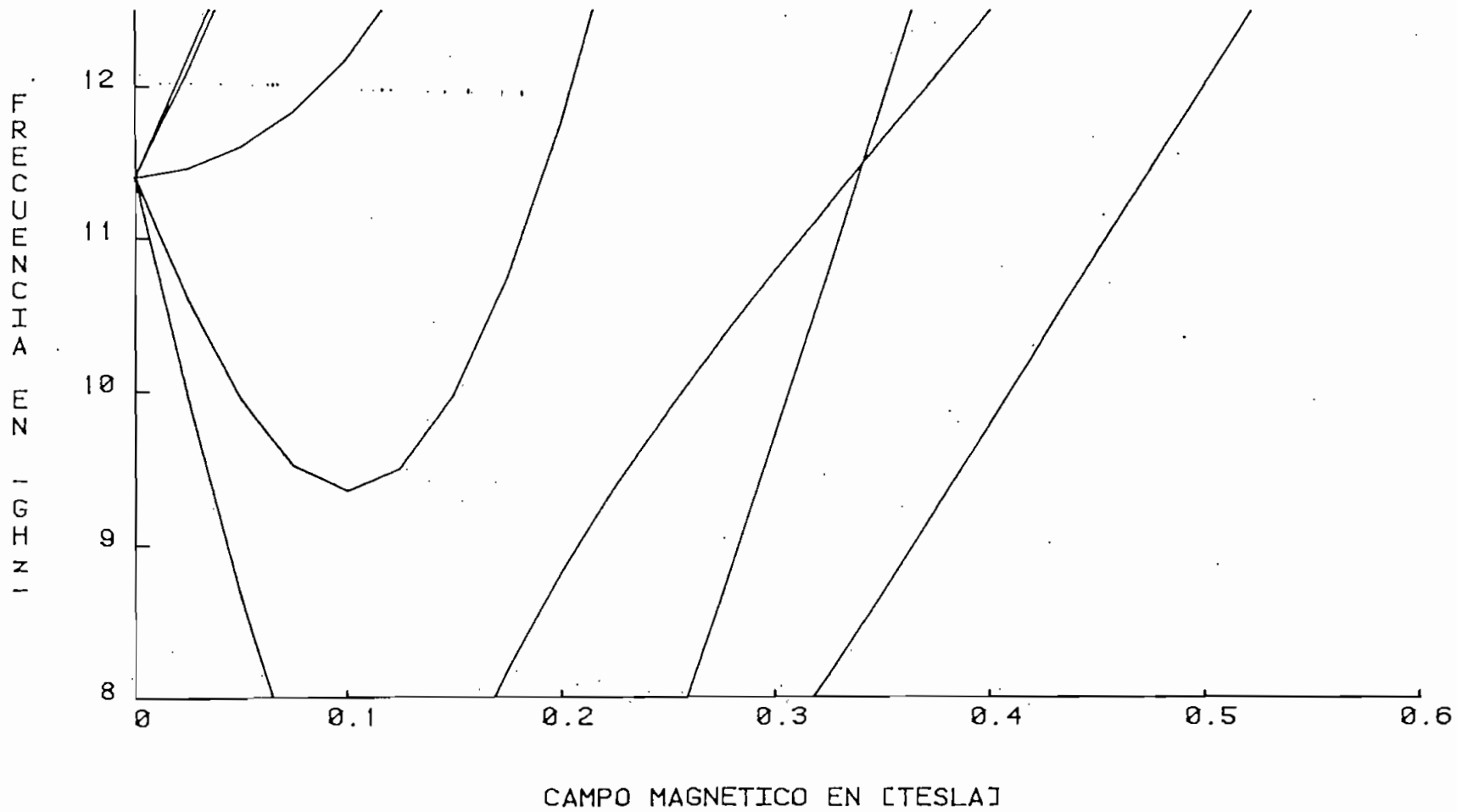


FIG 19 ALFA=10 BETA=100

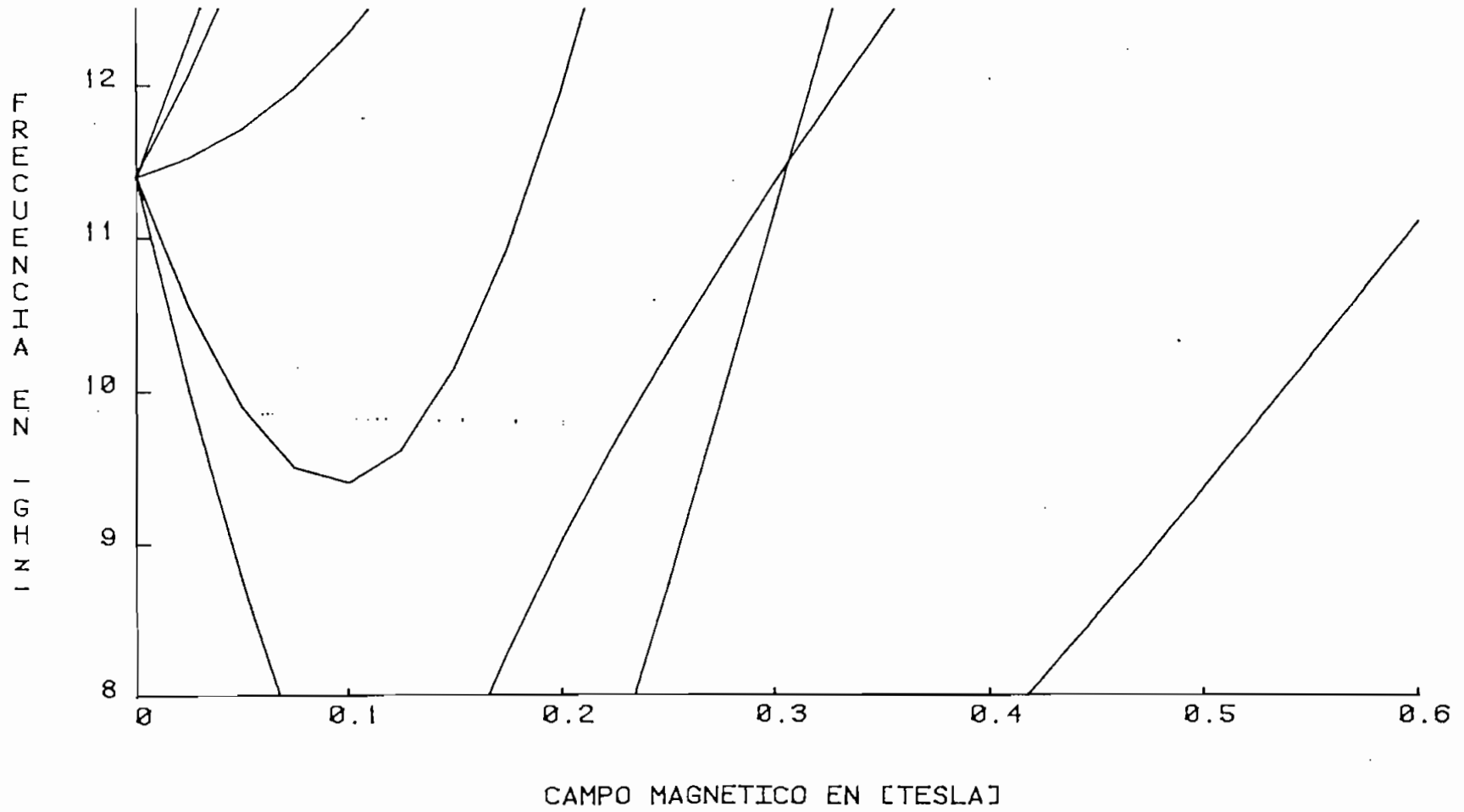


FIG 20 ALFA=0 BETA=120

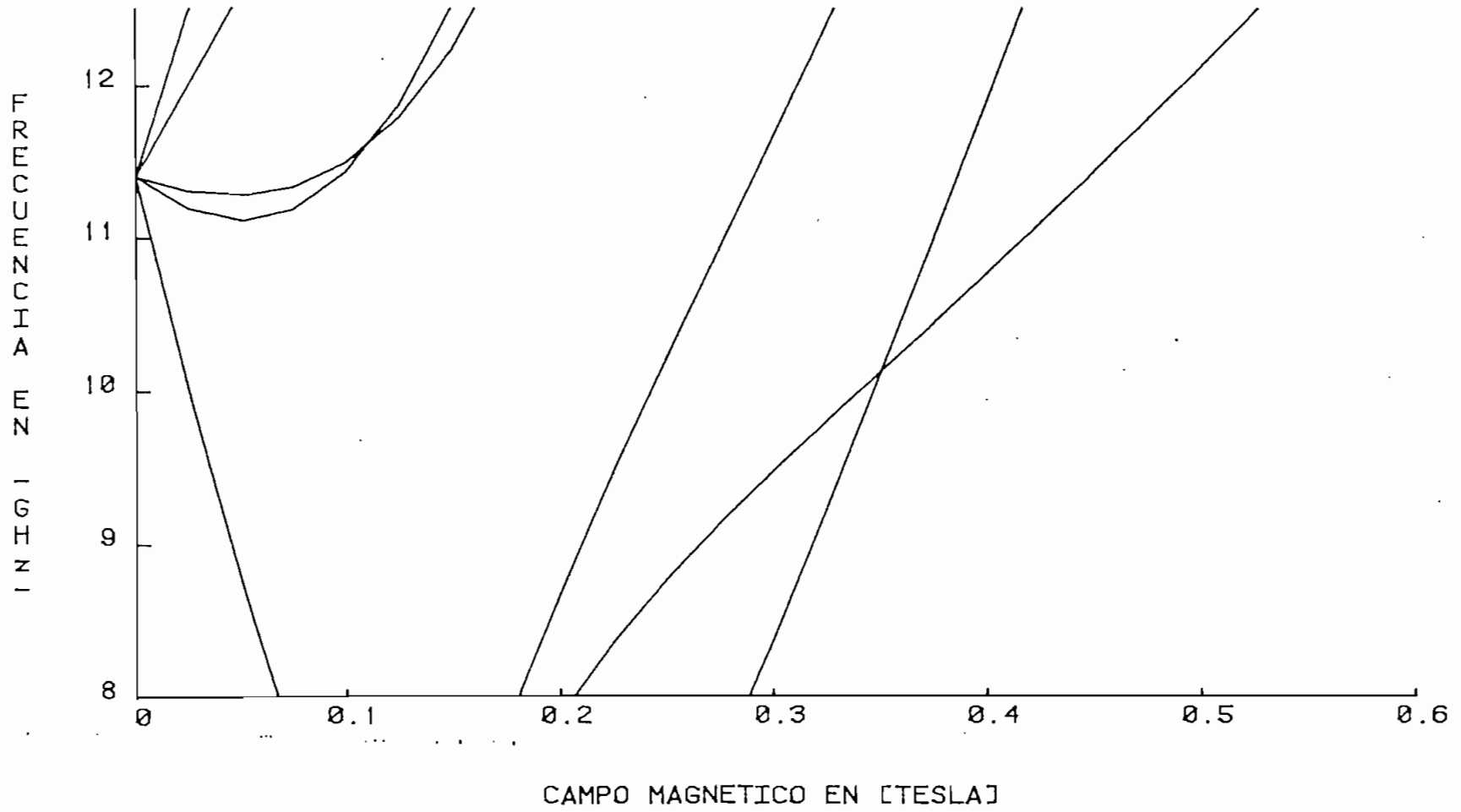


FIG 21 ALFA=10 BETA=120

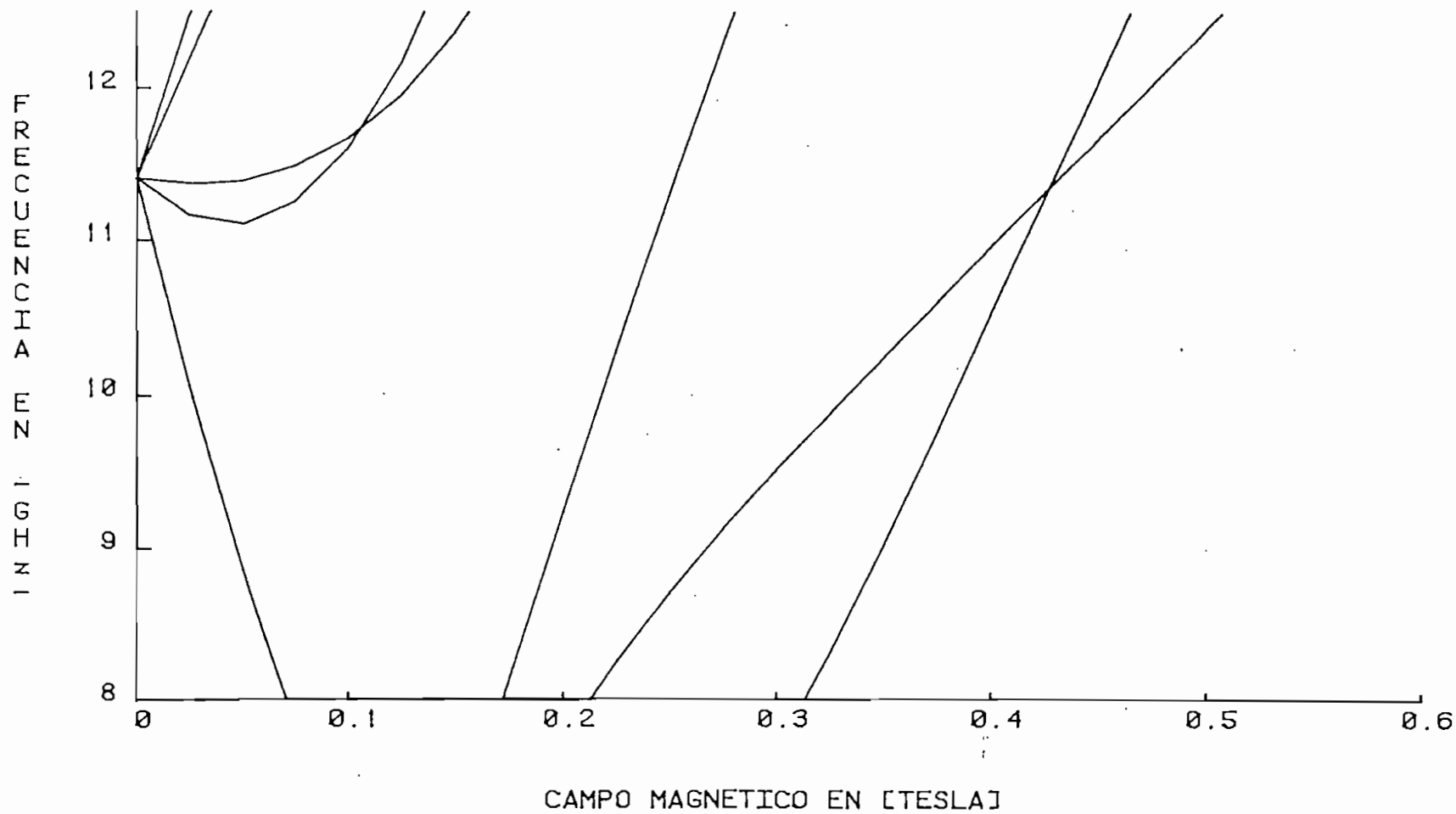


FIG 22 ALFA=0 BETA=140

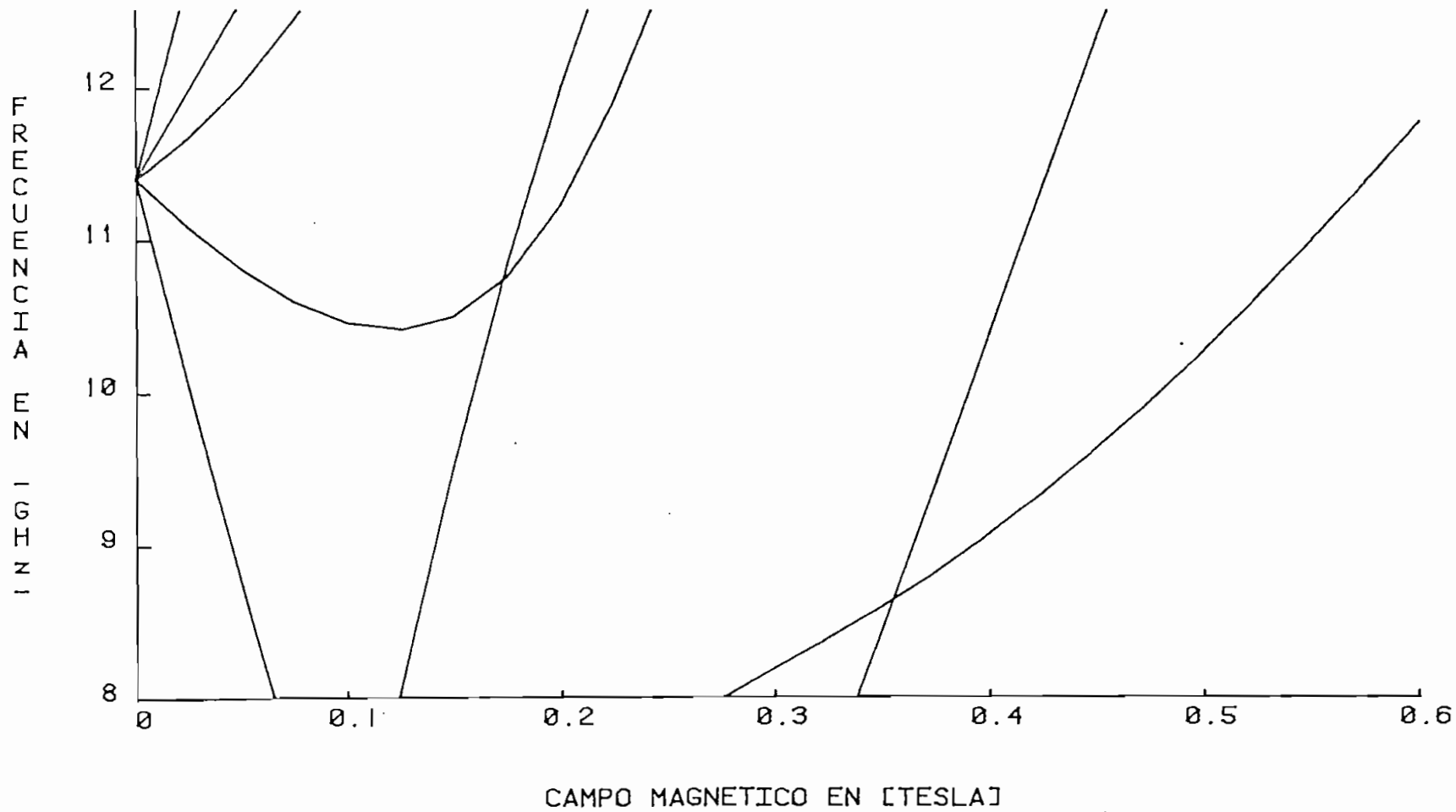


FIG 23 ALFA=10 BETA=140

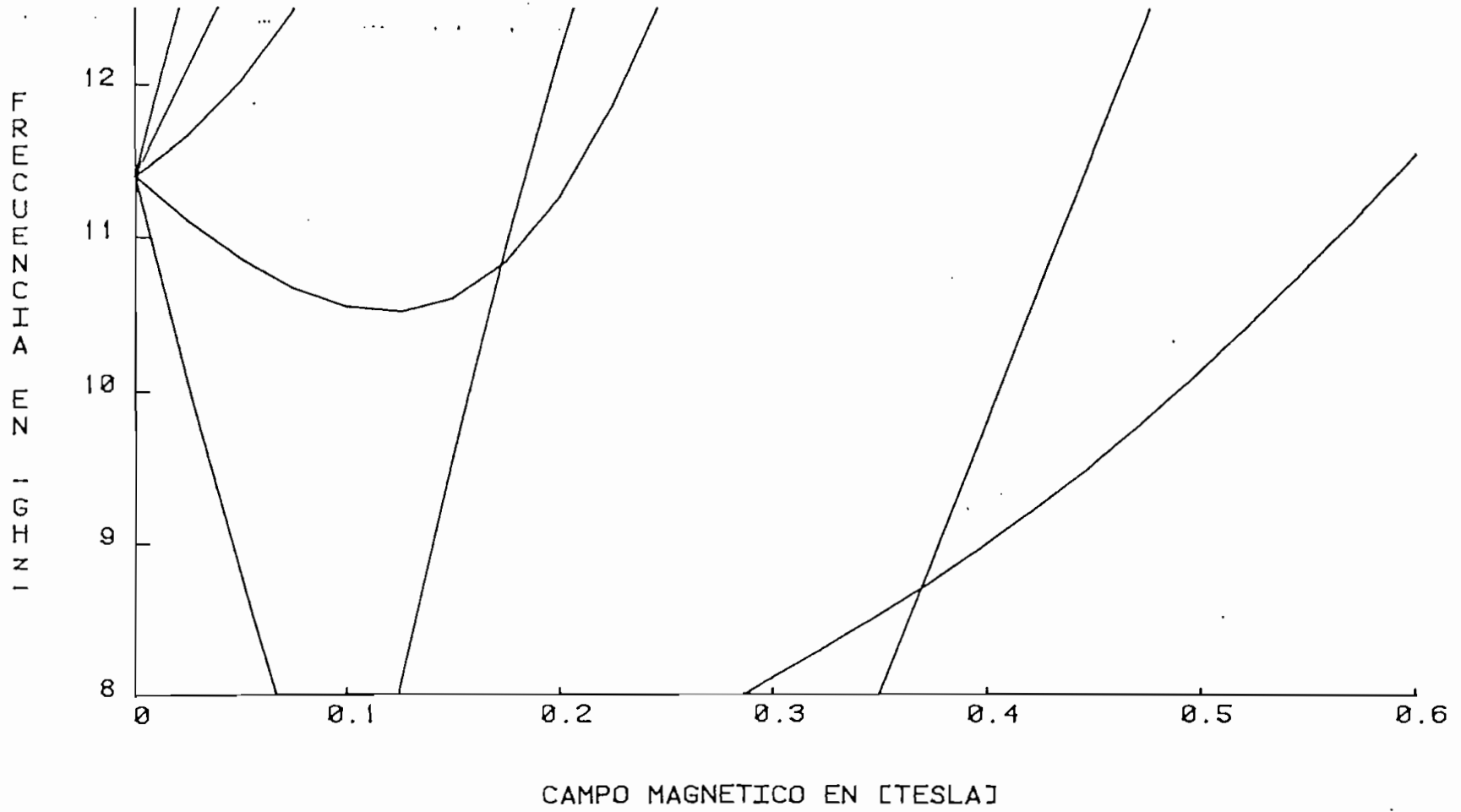


FIG 25 ALFA=10 BETA=160

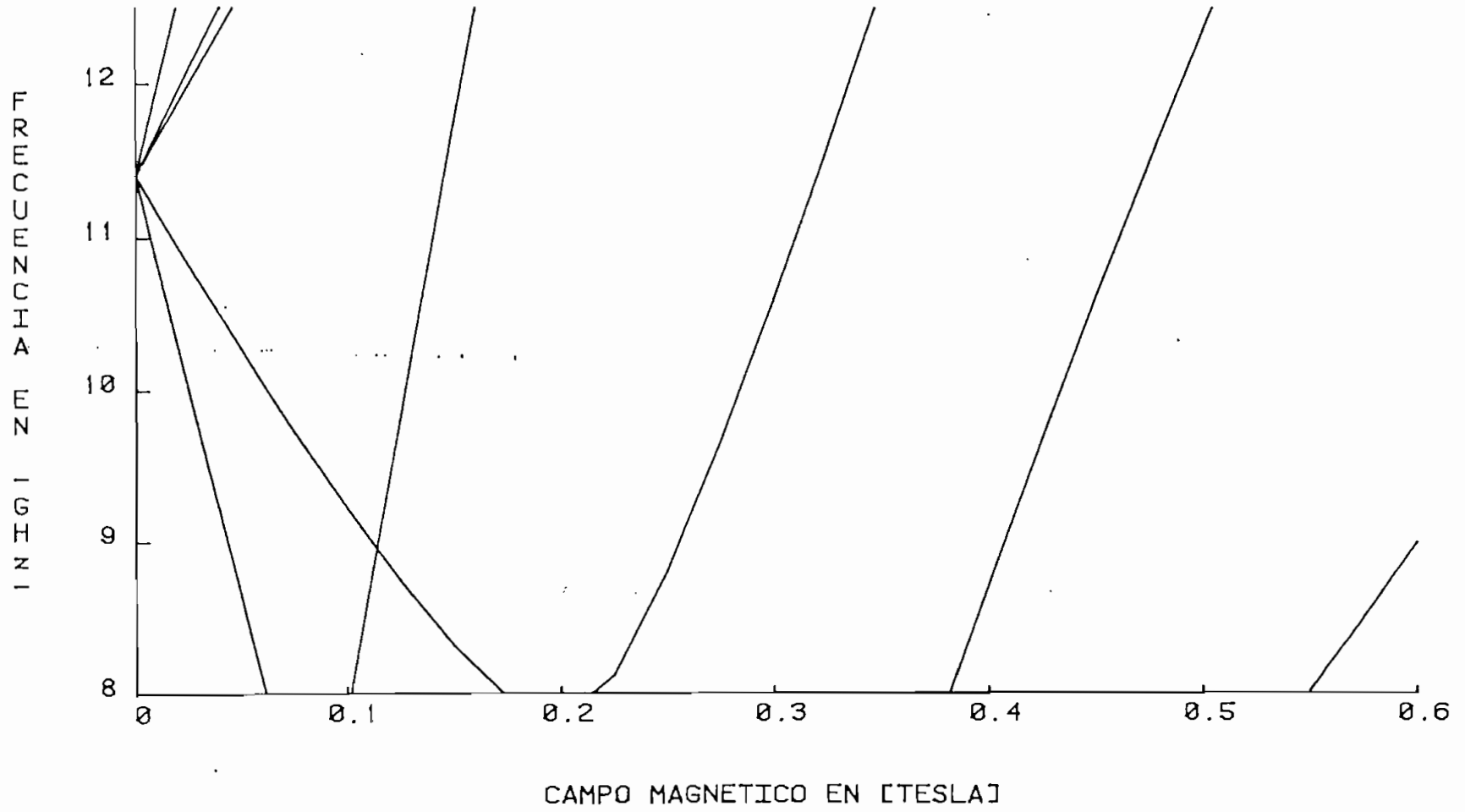




FIG 24 ALFA=0 BETA=160

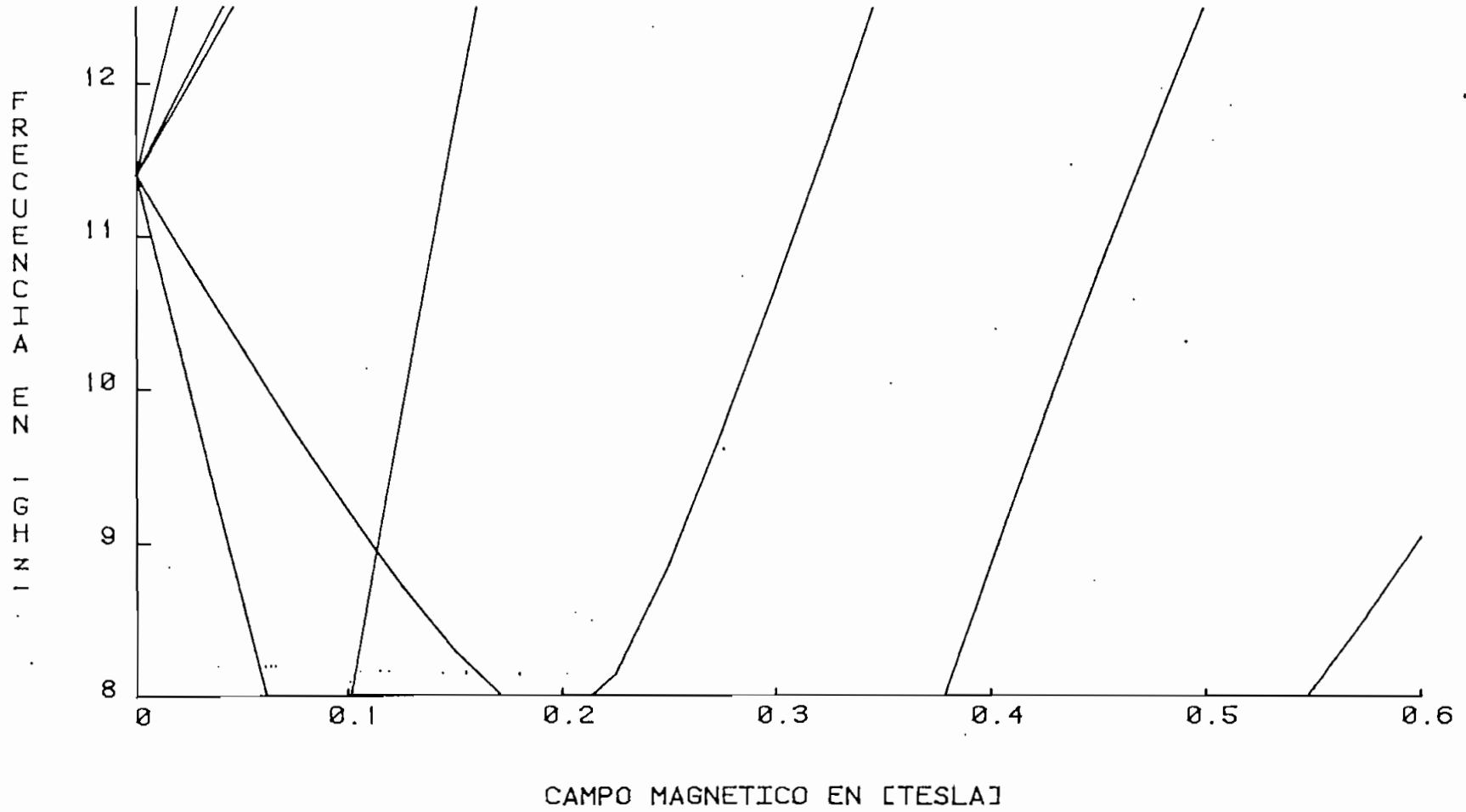
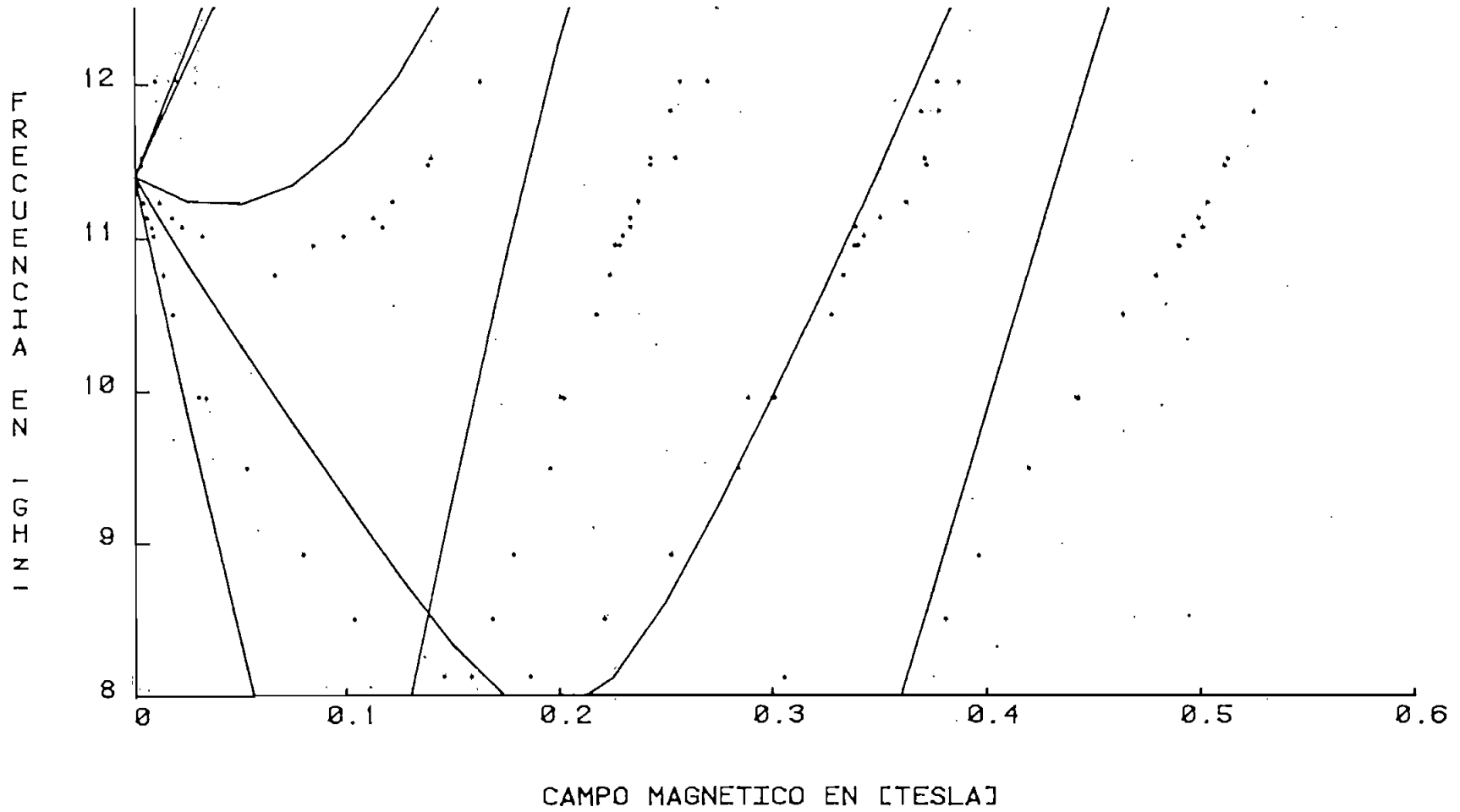


FIG 26 MUESTRA 206 Y CURVAS TEORICAS PARA ALFA=0 Y BETA=42

---



A N E X O 1

RESONANCIA MAGNETICA DE ELECTRONES

Se reproduce el artículo "Resonancia Magnética de Electrones" publicado por el Dr. Bruce Hoeneisen y el Ing. Mario Cevallos en los Anales de las Jornadas de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de Mayo de 1982.

RESUMEN

Se describen los equipos construidos y la tecnología desarrollada para efectuar medidas de resonancia magnética de electrones. Una particularidad de la cavidad de microondas construida es que tiene dos modos de oscilación a la misma frecuencia, lo que permite medir el signo de las resonancias. En particular se midió el signo de la relación giromagnética del electrón.

1.- INTRODUCCION

A mediados de 1981 decidimos iniciar investigación en el área de la resonancia magnética de electrones. El primer paso fue el diseño y construcción de un electroimán, de una cavidad resonante de microondas y de un amplificador detector. Enseguida se montó el experimento con equipos de microondas existentes en la Escuela Politécnica Nacional. Luego fue necesario establecer la tecnología: se optimizó la cavidad resonante plateándola y haciendo ajustables los acoplamientos; se optimizaron los acoplamientos; se hizo un avellanado a los polos del electroimán para reducir la dispersión de las líneas de inducción magnética; se optimizó el método de detección electrónico; se transformó el generador de microondas disponible en un generador de barrido; y se desarrolló la tecnología de la preparación de las muestras. De esta forma se pudo detectar cambios en la potencia de microondas perdida en la muestra  $10^4$  veces menor que la potencia perdida en la cavidad. Además se pudo determinar el signo de las resonancias gracias a que la cavidad tiene dos modos de oscilación que producen un campo rotatorio.

Se midieron un total de 82 muestras de los tipos más variados: impurezas paramagnéticas en piedras preciosas, sales paramagnéticas, minerales, ferritas, químicos orgánicos y radicales obtenidos por radiación de neutrones.

En este artículo detallamos las características de los equipos construidos y la tecnología establecida con el fin de que otros grupos de investigación hagan uso de estas instalaciones. Además señalamos el primer resultado de este trabajo: la determinación experimental del signo de la relación giromagnética del electrón.

2.- TEORIA

Se sitúa una muestra en una inducción magnética constante  $B_0$  y en una inducción magnética o campo eléctrico variable de frecuencia angular  $\omega$ . A ciertos valores

$\omega = \omega_0(B_0)$  se observa absorción de potencia y dispersión en la muestra. A este grupo de fenómenos se les llama resonancia magnética. Distinguimos los siguientes tipos de resonancia magnética (1):

- a) Resonancia magnética nuclear.
- b) Resonancia cuadrupolar nuclear.
- c) Resonancia de spin de electrones.
- d) Resonancia ferromagnética.
- e) Resonancia anti-ferromagnética.
- f) Resonancia ferrimagnética.
- g) Resonancia por efecto Zeeman (estructura fina).
- h) Resonancia ciclotrónica de electrones libres en metales.
- i) Resonancia ciclotrónica de electrones y huecos en semiconductores.
- j) Resonancia ciclotrónica de iones en gases a baja presión.
- k) Resonancia de intercambio en ferritas.

En la tabla 1 se indican frecuencias e inducciones magnéticas típicas a las cuales se observan cada una de estas resonancias (1).

---

a	Entre 0,03 y 50 MHz a 1T (10.000 Gauss)
b'	Menor que $\approx 100$ MHz y relativamente independiente de $B_0$ .
c	Entre 0,2 y 0,4T a 9 GHz.
d	Aproximadamente 0,3T a 9 GHz.
e	Entre 200 y 2000 GHz e independiente de $B_0$ .
f	Aproximadamente 0,3T a 9 GHz.
g	B entre 0 y más de 2T a 9 GHz.
h*	Entre 0,1 y 1T a 27 GHz.
i*	Entre 0,04 y 1T a 24 GHz.
j	Del orden de 7 MHz a 0,9T.
k	Frecuencia (?) independiente de $B_0$ .

---

Tabla 1. Frecuencias e inducciones magnéticas típicas a las cuales se observa cada tipo de resonancia magnética (ver texto).

\* Estas resonancias requieren bajas temperaturas para ser observadas.

En la Tabla 2 se indican las propiedades de la cavidad construída y de una cavidad que está en construcción, y las inducciones magnéticas obtenibles en cada caso con el electroimán construído. Estudiando estas Tablas se concluye que en el equipo construído es posible en principio observar resonancia de spin de electrones, resonancia ferromagnética y ferrimagnética, y resonancia por efecto Zeeman (estructura fina).

	Cavidad #1 (construída)	Cavidad #2 (en construcción*)
Frecuencia:	9 GHz fija	82 a 124 GHz ajustable
Determinación del signo de la resonancia	Si	No
Entrehierro	42 mm	14 mm
Inducción magnética	0,02 a 0,33T ajustable	0,02 a 0,8T ajustable
Temperatura	ambiente	ambiente

Tabla 2. Las dos cavidades resonantes se complementan entre sí.

\* La cavidad en construcción es parte de la tesis de Pablo Peñafiel.

Hasta el momento hemos observado resonancia de spin de electrones y resonancia por efecto Zeeman (estructura fina). Describimos brevemente la física de estas resonancias:

### Resonancia de spin de electrones.

Consideremos una partícula elemental de masa  $m$ , carga eléctrica  $e$ , momento angular  $\vec{L}$  y dipolo magnético  $\vec{\mu}$ . Se define la relación giromagnética  $\gamma$  y el factor  $g$  de Landé de la partícula de la siguiente forma:

$$\vec{\mu} = \gamma \vec{L},$$

$$\gamma = g e / 2m.$$

En una inducción magnética constante  $\vec{B}_0$  el dipolo magnético y el momento angular preceden en torno de  $\vec{B}_0$  con velocidad angular

$$\vec{\omega}_0 = -\gamma \vec{B}_0.$$

Para el electrón libre se tiene  $g = +2,0023$  y  $e < 0$  de manera que  $\gamma < 0$  y  $\vec{\mu}$  tiene el sentido contrario de  $\vec{L}$ . Por lo tanto el electrón libre tiene una frecuencia de precesión de 9 GHz en una inducción magnética de 0,32T (3200 Gauss).

En el experimento aquí descrito no se utilizan electrones libres, sino electrones no "apareados" de iones paramagnéticos.

Por ejemplo el sulfato de manganeso ( $MnSO_4$ ) es una sal iónica. El ión  $Mn^{++}$  tiene 23 electrones; 18 de ellos están "apareados" y no contribuyen al momento angular ni al dipolo magnético del ión (2 están en la capa  $n = 1$ , 8 están en la capa  $n = 2$ , 2 tienen  $n = 3$  y  $l = 0$ , y 6 tienen  $n = 3$  y  $l = 1$ ). Los 5 electrones restantes tienen  $n = 3$  y  $l = 2$  y no están "apareados". Según las reglas de Hund estos 5 electrones tienen sus "spin" alineados y no tienen momento angular orbital neto. (Los químicos resumen todo esto indicando que el ión  $Mn^{++}$  tiene una configuración electrónica  $n l^5 = 3d^5$ , y un nivel básico, o sea de menor energía,  $2S+1 L_J = 6 S_{5/2}$ ).

En resumen los 5 electrones no "apareados" dan al ión  $Mn^{++}$  un momento angular total y un dipolo magnético total 5 veces los de un electrón. Por lo tanto el ión  $Mn^{++}$  exhibe resonancia de spin de electrones con la misma relación giromagnética que un electrón libre.

Para observar esta resonancia se aplica a la muestra una inducción magnética constante  $B_0 = B_0 \hat{e}_z$  y una inducción magnética rotativa perpendicular a  $\vec{B}_0$  de magnitud constante  $B_1$  y que gira en el sentido de la precesión con velocidad angular  $\omega$ :

$$\vec{B} = B_0 \hat{e}_z + B_1 (\hat{e}_x \cos \omega t + \hat{e}_y \sin \omega t).$$

La densidad de dipolo magnético  $\vec{M}$  de la muestra satisface las ecuaciones diferenciales de Bloch que definen los tiempos de relajación longitudinal  $T_1$  y transversal  $T_2$ :

$$dM_z/dt = \gamma |\vec{M} \times \vec{B}|_z + (M_0 - M_z)/T_1$$

$$dM_x/dt = \gamma |\vec{M} \times \vec{B}|_x - M_x/T_2$$

$$dM_y/dt = \gamma |\vec{M} \times \vec{B}|_y - M_y/T_2.$$

Si  $B_1 = 0$  se tiene  $M_z = M_0$  y  $M_x = M_y = 0$  en régimen permanente. Para  $B_1$  suficientemente pequeño ( $B_1 \ll 1/\sqrt{\gamma^2 T_1 T_2}$ )

la potencia media perdida en la muestra debido a la resonancia por unidad de volumen en régimen permanente es (1)

$$P = \frac{\gamma M_0 T_2 \omega}{1 + (\omega_0 - \omega)^2 T_2^2} B_1^2.$$

Note que la potencia perdida en la muestra es máxima en  $\omega = \omega_0 = -\gamma B_0$  y se reduce a la mitad de su valor máximo en  $\omega = \omega_0 \pm 1/T_2$ . Para  $B_1$  arbitrario se tiene

$$P = \frac{\gamma M_0 T_2 \omega_0}{1 + \gamma^2 T_1 T_2 B_1^2} B_1^2$$

en resonancia ( $\omega = \omega_0$ ), de manera que la potencia perdida en la muestra se satura a

$$B_1 > 1/\sqrt{\gamma^2 T_1 T_2}.$$

En nuestro experimento es posible medir  $\gamma$  (incluyendo su signo) y  $T_2$ . No disponemos de suficiente potencia de microondas para saturar la muestra y medir  $T_1$ . No se puede medir comparando la amplitud de la resonancia de la muestra con la de una sustancia de prueba. La estructura hiperfina de la resonancia determina el spin del núcleo del ión paramagnético.

Resonancia por efecto Zeeman (estructura fina)

Vamos a describir un hermoso ejemplo. Consideremos un cristal de rubí. Este cristal es  $Al_2O_3$ , con una pequeña fracción de iones  $Al^{+++}$  sustituidos (?) por iones  $Cr^{+++}$ . Estas impurezas de cromo, que son paramagnéticas, dan el color rojo al rubí. El ión  $Cr^{+++}$  tiene 21 electrones. 18 de ellos están "apareados" tal como en el caso del ión  $Mn^{++}$ . Los 3 electrones restantes tienen  $n = 3$  y  $l = 2$  y, de acuerdo a las reglas de Hund, tienen un estado de menor energía con los "spin" alineados ( $S = 3/2$ ), momento angular orbital  $L = 3$  y momento angular total  $J = |L - S| = 3/2$ . (He mos expresado los momentos angulares en unidades de  $\hbar$ ). Por lo tanto el ión  $Cr^{+++}$  tiene una configuración electrónica  $3d^3$  y un nivel básico  $^4F_{3/2}$ .

El ión  $Cr^{+++}$  en el estado básico puede tener  $2J + 1 = 4$  orientaciones respecto de la inducción magnética aplicada  $B_0 = B_0 \hat{e}_z$ . Las componentes  $+z$  del momento angular total son  $M = 3/2, 1/2, -1/2$  y  $-3/2$  respectivamente. La energía de estos estados cuánticos del ión  $Cr^{+++}$  en rubí dependen de la inducción magnética aplicada, debido al efecto Zeeman; como se indica en la figura 1(2).

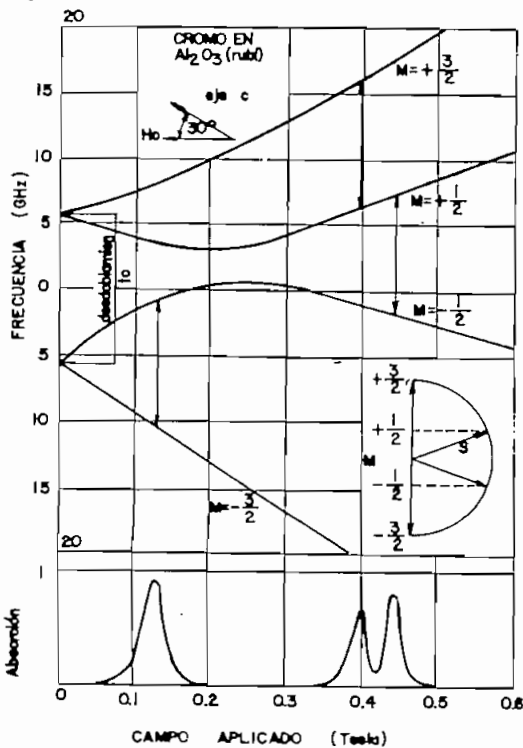


Figura 1. Energía del ión  $Cr^{+++}$  en rubí en función de la inducción magnética aplicada para cada una de las 4 posibles orientaciones del ión. Las flechas indican transiciones con  $\Delta M = +1$  y energía  $hf_0$  con  $f_0 = 9,375GHz$ . Tomando de la referencia (2).

El ión  $Cr^{+++}$  puede efectuar transiciones entre niveles con  $\Delta M = \pm 1$  ya que los fotones absorbidos o emitidos tienen componente  $-z$  del momento angular igual a  $\pm \hbar$ . La resonancia ocurre a valores de  $B_0$  a los cuales los estados con  $\Delta M = \pm 1$  tengan una separación de energía  $\hbar \omega_0$  como se indica en la figura 1.

Analicemos la resonancia a 0,13T. Los iones  $Cr^{+++}$  en el estado menos energético y más poblado  $M = -3/2$  absorben fotones de energía  $\hbar \omega_0$  y "saltan" al estado  $M = -3/2 + 1 = -1/2$ . En esta transición aumentan su componente  $z$  del momento angular total en  $\hbar$ , de manera que absorbieron fotones que giran en el sentido  $+z$ . Por lo tanto, esta resonancia ocurre cuando el campo rotatorio gira en el sentido de  $B_0$  (lo que corresponde a  $\gamma$  negativo).

3.- EXPERIMENTO

El montaje experimental para la determinación de la resonancia magnética de electrones se muestra en la Figura 2; en la Tabla N° 3 se indican los equipos utilizados.

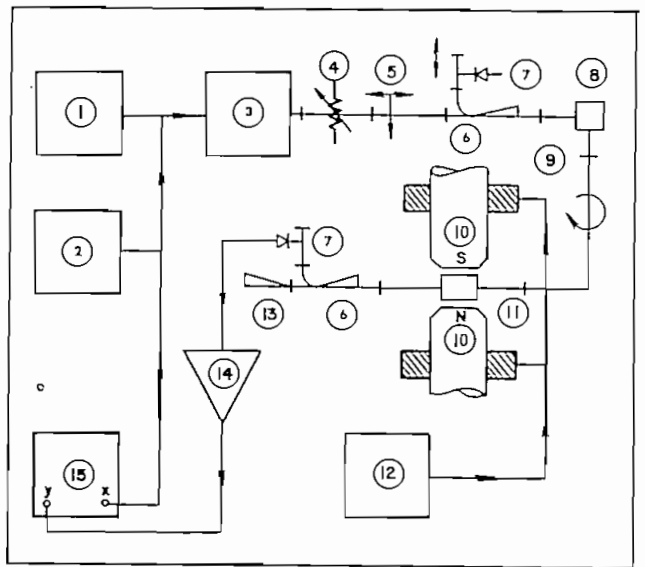


Figura 2. Montaje experimental para mediciones de resonancia magnética de electrones.

Procedimiento Experimental.-

Como se indicó, para determinar la resonancia magnética de electrones se requiere el concurso de un campo magnético de frecuencia en el rango de las microondas ( $10^9$  Hz) y de un campo magnético continuo  $B_0$ . El campo alterno se obtiene de un oscilador de microondas a Klystron (3)\*, acoplado a una cavidad resonante cilíndrica (11) excitada con dos modos de oscilación a la misma frecuencia y en cuadratura en el espacio y el tiempo.

\* Los números indicados de esta manera corresponden a los equipos detallados en la Fig. 2.

TABLA N° 3

Detalle del equipamiento experimental para resonancia magnética de electrones.

INDICATIVO	EQUIPO	MARCA	MODELO	OBSERVACIONES
1	Fuente para Klystron	Sivers Lab	SL 5405 B	
2	Oscilador de audio	Krohn Hite	440 A	
3	Oscilador a Klystron	Sivers Lab	SL 5600 C	
4	Atenuador ajustable 0 - 35 db	Sivers Lab	SL 5830/2	
5	Guía ranurada	Sivers Lab	SL 5341/1 D	
6	Acoplador direccional	Hewlett Packard	HP X752A	Se requieren 2
7	Detector sintonizable	Hewlett Packard	HP X485 B	Se requieren 2
8	Union rotatoria	Sivers Lab	SL 7843	
9	Giro de guía 90°	Philips	PP 4035 X	
10	Electroimán			Construcción Nacional
11	Cavidad resonante			Construcción Nacional
12	Fuente de poder	Hewlett Packard	HP 6443E	Se requieren 4
13	Carga acoplada	Sivers Lab	SL 5056/2	
14	Amplificador detector			Construcción Nacional
15	Osciloscopio	Tektronix	561 A	

Con excepción de los equipos señalados con los números 10, 11 y 14 que fueron diseñados y construidos específicamente para este experimento el resto de los equipos pertenecen al Laboratorio de Microondas de la Facultad de Ingeniería Eléctrica.

De esta forma se consigue un campo magnético de microondas rotatorio, que a más de posibilitar la determinación de la resonancia magnética permite determinar el signo de la relación giromagnética del electrón (signo de  $\gamma$ ).

La cavidad, en cuyo interior se colocan las muestras a analizarse, se introduce en el entrehierro del electroimán (10) de manera que el campo magnético continuo  $B_0$  esté en dirección perpendicular al plano de rotación del campo alterno.

Para la experimentación se podrían optar por dos procedimientos. Uno sintonizando la fuente de microondas a la frecuencia de resonancia de la cavidad y detectando el incremento de pérdidas en la cavidad cuando la muestra está en resonancia; el otro, utilizando un generador de barrido centrado para la frecuencia de la cavidad y de terminando las variaciones de la curva de resonancia de la cavidad. Dadas las características de estabilidad de frecuencia del Klystron a disposición, el primer procedimiento no es aplicable. Para el segundo en cambio fue necesario transformar el generador de microondas disponible en un generador de barrido aprovechando las características de oscilación del Klystron. Para esto se incluyó en serie con la fuente de reflector una señal alterna en el rango

de 10 a 1000 Hz (2). De esta manera se logró operar al Klystron en el modo principal con un barrido de alrededor de 12 MHz a cada lado de la frecuencia de la cavidad. La señal de salida del generador de barrido, cuya amplitud puede regularse con un atenuador variable (4), se acopla a la cavidad. Mediante un acoplador direccional (6) con un detector a diodo (7) conectado al ramal auxiliar de onda directa se obtiene una señal proporcional a la absorción de la cavidad.

Esta señal, que reproduce la curva de resonancia de la cavidad, se amplifica (14) y se visualiza en el osciloscopio (15) sincronizándolo a la frecuencia de barrido del Klystron.

Una vez obtenida la curva de resonancia se varía la inducción magnética del electroimán  $B_0$  para obtener la resonancia magnética de la muestra. Esta resonancia ocasiona un incremento de pérdidas dentro de la cavidad debido a que la muestra, al entrar en resonancia, absorbe energía del campo electromagnético de microondas. Este incremento de pérdidas se manifiesta en la curva de resonancia de la cavidad por un ensanchamiento de la curva (reducción del factor de calidad) y por una reducción de su amplitud ( $\Delta x$ ); estas dos variaciones nos proveen la información para determinar cu

litativa y cuantitativamente la naturaleza de la resonancia en la muestra de experimentación. En la Figura 3, se indican cualitativamente las formas de onda que se obtienen en las diferentes fases de la experimentación.

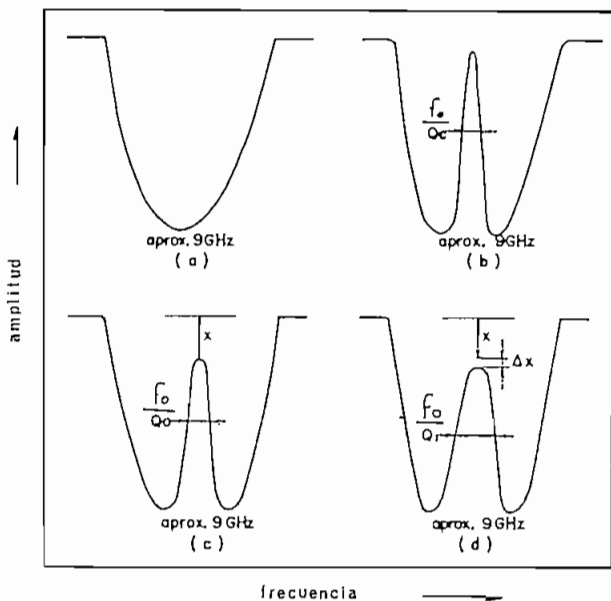


Figura 3. Curvas cualitativas obtenidas en las diferentes fases de la experimentación.

- (a) Modo de oscilación del Klystron  $f_0 \approx 9$  GHz,  $\Delta f \approx 12$  MHz.
- (b) Curva de resonancia de la cavidad sin muestra.
- (c) Curva de resonancia de la cavidad con muestra sin aplicación del campo continuo.
- (d) Curva de resonancia de la cavidad con la muestra en resonancia.

Para la evaluación cuantitativa de la resonancia magnética se requiere determinar en forma precisa la variación  $\Delta x$  (Fig. 3d) en función del campo magnético continuo  $B_0$ . La variación máxima de  $\Delta x$  en resonancia es del orden del 1% de la amplitud total de la curva. Por consiguiente es necesario implementar un sistema de detección que nos permita reproducir esta variación en una escala ampliada.

Los detalles de este sistema y de otros componentes que se diseñaron para el experimento de indican en las secciones siguientes:

#### Cavidad Resonante.-

Dadas las características del experimento la cavidad resonante debe satisfacer ciertos requerimientos especiales respecto a factor de calidad, orientación y dependencia geométrica del campo magnético de microondas en el interior de la misma. Dentro de estos requerimientos resaltamos los siguientes: El factor de calidad debe ser del orden de 5000 o más, el campo magnético debe ser máximo en el sitio de la mues-

tra, ser rotatorio en el plano de la muestra y con una orientación tal que permita introducir el campo continuo  $B_0$  perpendicular al plano de rotación.

Además de estos requisitos para el campo de microondas la cavidad debe presentar ciertas características físicas y geométricas que faciliten su acoplamiento a la fuente de microondas y el trabajo en su interior para la introducción, posicionamiento y cambio de muestras.

De las varias posibilidades para cavidades, tanto rectangulares como cilíndricas, se determinó que la que mejor satisface los requerimientos es una cavidad cilíndrica operando en el modo  $TE_{111}$ , si bien esta cavidad no tiene el campo magnético rotatorio, este requisito se satisface si se acoplan a la cavidad dos modos de oscilación excitados en cuadratura, o sea con un defasamiento de  $90^\circ$ . Para esto se excita la cavidad mediante dos puntas de prueba separadas en  $3/4 \lambda_g$ . Estas puntas de prueba a la vez deben permitir variar el acoplamiento de energía de la fuente de microondas a la cavidad y un ajuste de sintonía de manera que los dos modos de oscilación estén a la misma frecuencia.

Para estos ajustes las puntas de prueba están constituidas por dos pequeñas antenas localizadas en un orificio común entre las paredes de la cavidad y la guía principal, con una orientación paralela al campo eléctrico. Los ajustes de acoplamiento y sintonía se logran variando la penetración de estas antenas en la cavidad.

En la figura 4 se muestra en forma esquemática el detalle de la cavidad, la distribución de los campos internos y el sentido de giro del campo rotatorio.

Para el acoplamiento de los dos modos en cuadratura se utilizó un codo en el plano E en la guía rectangular, el mismo que fue diseñado para este propósito particular, para efectos de conseguir el espaciado apropiado entre los acoplamientos ( $3/4 \lambda_g$ ) a la frecuencia de 9 GHz. Las dimensiones del codo determinan el radio de la cavidad y por consiguiente la altura requerida para obtener la resonancia a la frecuencia seleccionada (9 GHz).

Para el trabajo en el interior, la cavidad está provista de una tapa roscada en el plano superior. Para localizar las muestras siempre en el mismo sitio se hizo una pequeña muesca de 5 mm de diámetro por 1 mm de profundidad en el plano inferior. Una vez terminada la cavidad se la pulió con lija de agua muy fina y se la plateó con sal amoniacal de plata. El factor de calidad logrado que se logró obtener está entre 5000 y 6000. Conviene indicar que todas las piezas fueron construidas en bronce, puesto que no pueden existir piezas de material magnético.

En la Tabla N° 4 se indican las frecuencias de oscilación de otros modos (indeseables) que pueden excitarse dentro de la cavidad. Como se observa la separación de frecuencia de estos modos es suficientemente amplia pa-

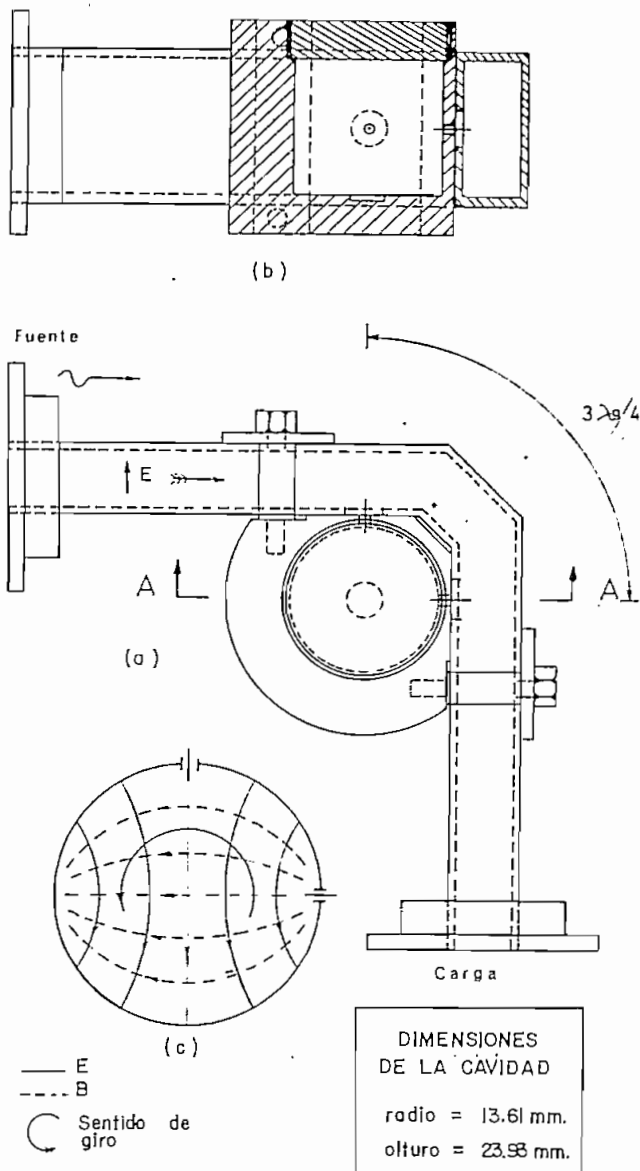


ra garantizarnos la operación unicamente en los dos modos  $TE_{111}$  a la frecuencia de 9 GHz.

TABLA N<sup>o</sup> 4

Posibles modos cercanos en la cavidad resonante

CORTE A-A



MODO	FRECUENCIA DE RESONANCIA GHz	SEPARACION RESPECTO AL MODO $TE_{111}$	OBSERVACIONES
$TE_{111}$	8,994	--	modo deseado
$TE_{211}$	12,4	3,4 GHz	modo indeseado
$TM_{010}$	8,43	596 MHz	modo indeseado
$TM_{011}$	10,5	1,5 GHz	modo indeseado
$TM_{110}$	13,4	4,4 GHz	modo indeseado

inducción magnética  $B_0$  requerida para conseguir las resonancias en las muestras son los factores determinantes. Estos valores son 42 mm para el entrehierro y una inducción magnética de por lo menos 0,32 Tesla. Estos valores conjuntamente con la disponibilidad de fuentes de continua para la excitación del electroimán determinaron el calibre del alambre y el número de vueltas.

En vista de que no se dispone de mayor información sobre la dispersión del campo para un entrehierro de la magnitud requerida se sobre dimensionó el número de vueltas para asegurar que la inducción magnética efectiva en el sitio de la muestra, supere el valor pre-establecido (0,32 Tesla).

Para efectos de acoplar el electroimán a diferentes fuentes de excitación se lo construyó con varias bobinas independientes. De esta forma es posible realizar combinaciones serie-paralelo, dependiendo del tipo de fuente. Esta construcción además nos permite utilizar una de estas bobinas para modular (barrer) el campo magnético con una señal alterna de baja frecuencia (1 a 5 Hz), para determinar directamente las curvas de resonancia de las muestras.

Las bobinas tienen acceso desde una tira de terminales en la que se colocaron chisperos para cada bobina a fin de proteger el instrumental y al operador de descargas que pueden ocurrir si por cualquier razón se desconecta subitamente la alimentación.

En la construcción de las bobinas se utilizó alambre calibre 22 que permite trabajar en forma continua con una corriente de 0,5A en cada bobina y con corrientes de hasta 1,5 A durante períodos cortos.

El número total de espiras calculado es de 37.440, lo que requirió de 120 libras de alambre. En cuanto al núcleo, se lo construyó con láminas de transformador de acero con 4% de silicio. El peso requerido es aproximadamente 100 libras. La estructura

Figura 4. Cavidad resonante y codo de acoplamiento.

- (a) Vista superior
- (b) Corte
- (c) Distribución de los campos internos y sentido de giro del campo rotatorio.

#### Electroimán.-

Las dimensiones de la cavidad y su frecuencia de resonancia nos permiten determinar los parámetros principales para el diseño del electroimán, entre estos la longitud del entrehierro que debe ser ligeramente superior a la altura de la cavidad para facilitar la introducción de la misma y la

para el soporte del electroimán se construyó con láminas y perfiles de aluminio con el objeto de evitar trayectorias de fuga para el campo magnético.

Originalmente se construyeron los polos en forma de prisma rectangular, pero se determinó que existía un excesivo flujo de fuga por las aristas de los polos. Esto llevó a realizar un avellanado a 45° en todas las aristas consiguiéndose de esta manera redu-

cir el flujo de fuga.

En la Figura 5 se muestra en forma esquemática el electroimán con la distribución de las bobinas y la identificación de sus terminales en la tira de conexiones, así como la curva de calibración B vs I para la posición en que estará la muestra a analizarse.

En la Tabla N° 5 se indican los detalles y características del electroimán.

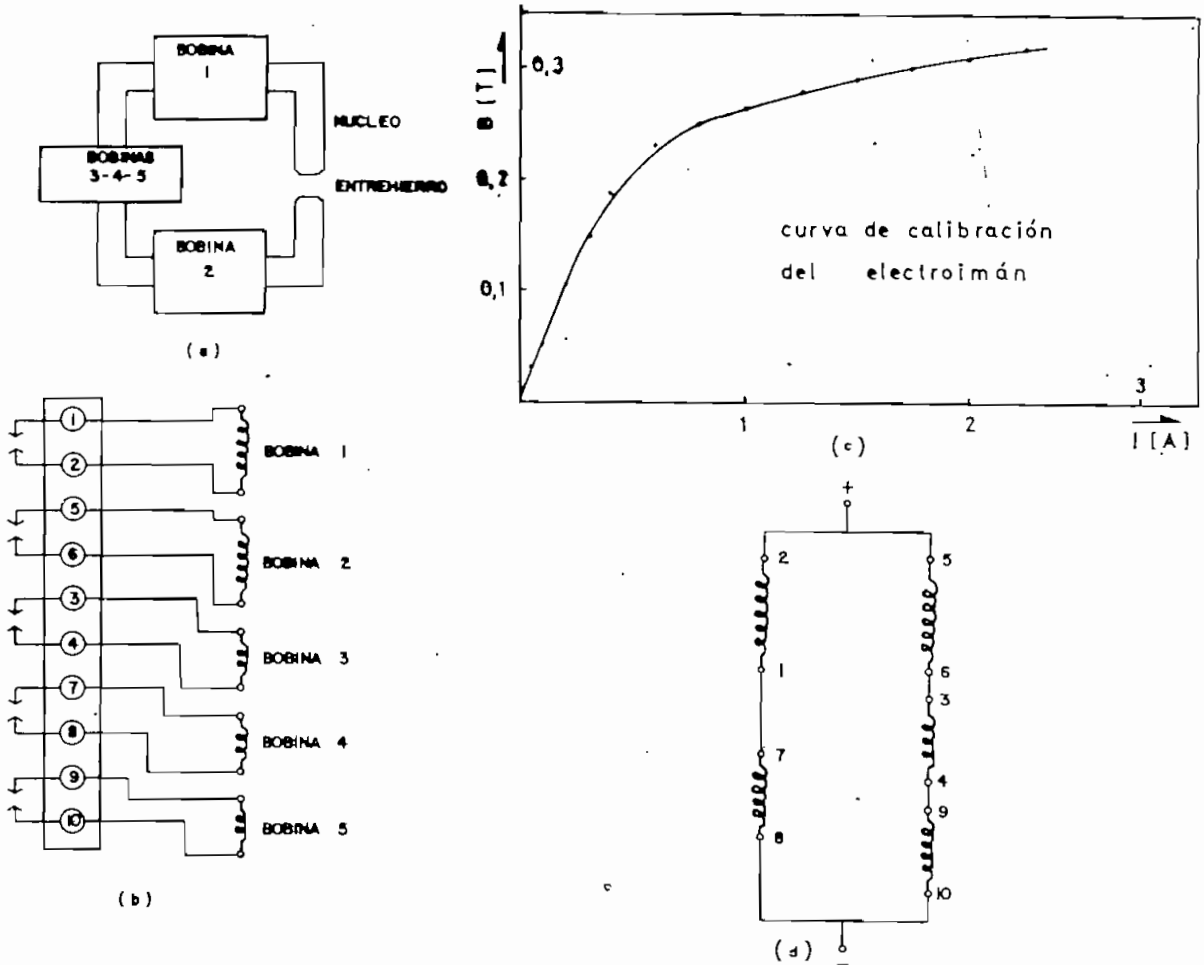


Figura 5. Electroimán.

- (a) Distribución de las bobinas.
- (b) Identificación de los terminales.

- (c) Curva de calibración.
- (d) Conexión de las bobinas en este experimento.

TABLA N° 5

Detalles constructivos y características del electroimán

N° de Bobina	Espiras	Terminales de identificación	Terminal positivo*	Resistencia ohms,
1	14.040	1 - 2	2	303
2	14.040	5 - 6	5	300
3	3.848	3 - 4	3	73,5
4	3.848	7 - 8	7	112,3
5	1.664	9 - 10	9	61,8

\* Se señala como terminal positivo aquel que conectado al terminal positivo de la fuente produce un campo hacia arriba en el entrehierro.

Amplificador Detector.-

Se indicó que la variación de la amplitud de la curva de resonancia cuando la muestra está en resonancia, era tan pequeña que no permitía cuantificarla con precisión. Para conseguir un escalamiento adecuado de esta variación se construyó el amplificador detector mostrado en la Figura 6.

La particularidad más significativa de este amplificador es que gracias a la introducción de un voltaje de desplazamiento en la primera etapa nos permite visualizar en escala ampliada solamente las variaciones del pico de la curva de resonancia de la cavidad, cuando la muestra está en resonancia.

La operación de este amplificador se deta-

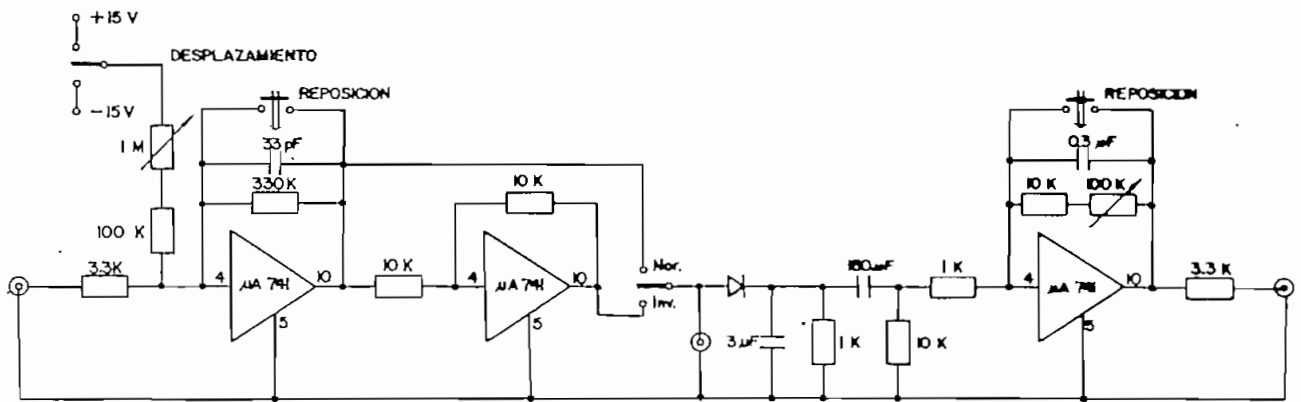


Figura 6. Amplificador Detector.

lla en las Figuras 7 (a), (b), (c) y (d).

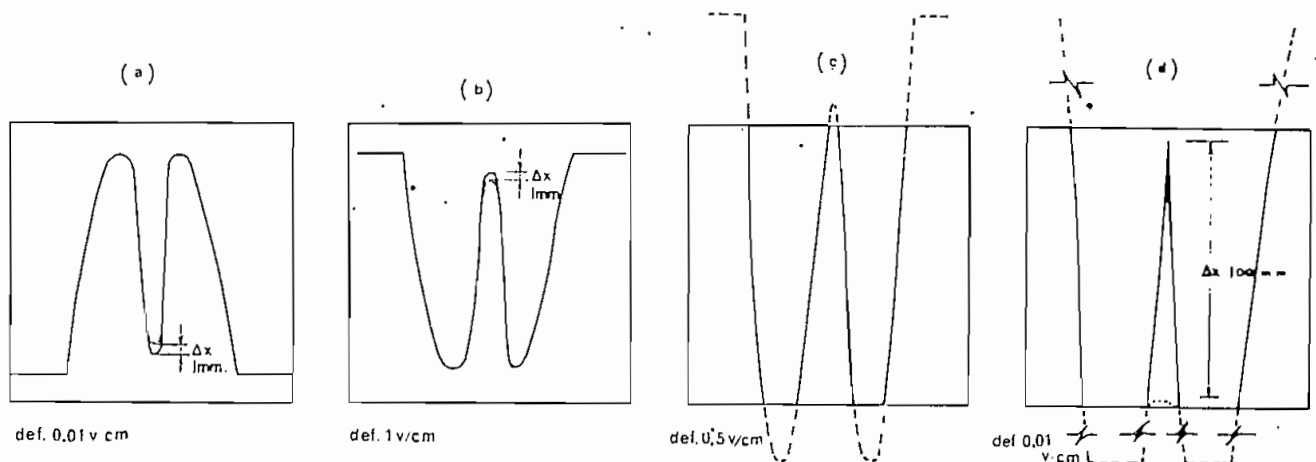


Figura 7. Representación esquemática de la operación del amplificador detector.

En la Figura 7 (a) se muestra la señal correspondiente a la curva de resonancia de la cavidad con la muestra tomada directamente del diodo detector. Para una deflexión del osciloscopio de 0,01 V/cm el desplazamiento  $\Delta x$  cuando la muestra está en resonancia es de 1 mm. En la Figura 7. (b) se muestra esta señal amplificada en 100 veces. Como puede notarse tenemos una señal proporcionalmente más grande (deflexión vertical 1 V/cm) pero el desplazamiento  $\Delta x$  sigue siendo 1 mm. Para lograr que este desplazamiento se presente con mayor amplitud en la pantalla, podríamos variar la posición de referencia del osciloscopio y reducir la deflexión vertical a valores menores. Con esto lograríamos en el mejor de los casos ampliar la resolución en un orden de dos y lo más probable es que la figura se salga de la pantalla perdiéndose la información, Figura 7 (c). Si introducimos el desplazamiento del amplificador y aumentamos la amplitud de la señal de entrada de manera de saturar el amplificador lo que corresponde a recortar los picos inferiores de la señal de entrada, variando la amplitud del desplazamiento podemos desplazar la línea de referencia del osciloscopio muy por encima de la pantalla y variar la deflexión vertical a valores más sensibles hasta lograr que la variación del pico de la resonancia  $\Delta x$  ocurra en toda la pantalla, Figura 7 (d). De

esta forma logramos cuantificar con mucha exactitud las variaciones de  $\Delta x$  en función del campo continuo. Con este procedimiento se obtuvieron las curvas que se muestran en los resultados experimentales.

Adicionalmente este amplificador está proyectado para determinar directamente la curva de resonancia de las muestras, utilizando un barrido de baja frecuencia en el campo magnético continuo. Para esta forma de medición, una vez que se ha determinado la inducción magnética  $B_0$  para producir la resonancia en la muestra, se introduce un barrido sinusoidal alrededor de  $B_0$ . Esto causa que el desplazamiento  $\Delta x$  varíe alternativamente sobre el nivel de referencia de la muestra fuera de resonancia dando origen a una señal modulada en amplitud cuya envolvente corresponde a la variación de la absorción de energía en la muestra. Esta señal se demodula y filtra convenientemente, se la amplifica en la tercera etapa del amplificador y se alimenta al osciloscopio. De esta forma logramos tener una indicación directa de la curva de resonancia magnética de la muestra. Este procedimiento tiene ciertas limitaciones especialmente por las inestabilidades de los equipos complementarios. Por esta razón no fue utilizado. En el circuito del amplificador se tiene

la etapa intermedia que constituye un amplificador inversor, el mismo que se utilizaría dependiendo de la forma de conexión que tenga el diodo detector en la guía de onda.

### Preparación de muestras.

Para la experimentación se seleccionó una amplia variedad de muestras: piedras preciosas (rubí, topacio, amatista, aguamarina, etc.), rocas con contenido de elementos paramagnéticos, compuestos químicos orgánicos e inorgánicos, ferritas, etc. Por las características físicas de las diferentes muestras fue necesario ensayar algunas alternativas para realizar las mediciones. Inicialmente se decidió por disolver los compuestos químicos a diferentes concentraciones e introducirlos en la cavidad en pequeños vasos de vidrio, diámetros entre 3 - 8 mm y 5 mm de altura. Este procedimiento no entregó resultados positivos primordialmente debido a que las pérdidas de microondas en el disolvente (agua) y en el vidrio son excesivas. Esto reduce significativamente el factor de calidad cargado de la cavidad y se torna inobservable la resonancia magnética de la muestra.

Para el análisis de rocas se cortaron trozos pequeños de formas geométricas regulares y simétricas, con volúmenes en el orden de 100 mm<sup>3</sup>. Con estas muestras tampoco se lograron identificar resonancias.

En cuanto a las piedras preciosas, se las midió en la forma natural que fueron proporcionadas. Como estas muestras son cristales casi puros, con un contenido muy pequeño de impurezas (elementos paramagnéticos) la absorción de energía de microondas en la cavidad es despreciable, siendo posible identificar muy claramente la resonancia magnética. La primera muestra en que se logró la resonancia fue el rubí.

Los resultados negativos de las primeras experiencias nos llevaron a descartar la utilización de agua, vidrio y trozos de rocas, y a buscar una tecnología apropiada para la preparación de muestras.

Una primera decisión fue convertir en polvo muy fino todas las muestras (excepto las piedras preciosas!). Para este objeto y debido a la dureza de las muestras se utilizó un mortero de agata. Luego se buscó un medio de introducir las en la cavidad sin que la contaminen. La solución alcanzada fue impregnar el polvo en cera de parafina, cuyas características de pérdida a la frecuencia de operación son mucho menores que las del vidrio o el agua. Para comparación se indican los valores del factor de disipación a 3 GHz:

Cera de parafina	0,00046
Vidrio	0,0054
Agua	0,157.

Para la preparación se mezcla la muestra pulverizada en parafina derretida y se vierte en un molde para obtener pequeñas pastillas cilíndricas de 4 mm de diámetro por 1 mm de espesor. Para este tamaño de muestra el campo eléctrico de microondas sobre la misma es prácticamente nulo de modo que las pérdidas de microondas en la cavidad con muestra se reducen substancialmente.

Con esta tecnología el factor de calidad cargado de la cavidad sin muestra es comparable con el factor de calidad de la cavidad con muestra, con lo cual se facilita notablemente la experimentación.

### Observaciones Adicionales.

Se tomaron todas las precauciones necesarias para evitar resonancias "falsas": se instaló una acometida eléctrica independiente a las fuentes de poder del electroimán; se midieron varias muestras de cada tipo para verificar que los resultados fuesen reproducibles; se verificó que no hay "resonancias" con la cavidad fuera del entrehierro y con muestra, o con la cavidad dentro del entrehierro y sin muestra; se calibró el electroimán con un fluxómetro marca Sensitive Research Instrument Corporation, modelo FM, y se verificó esta calibración mediante un integrador construido para este efecto. Todas las medidas se efectuaron a la temperatura ambiente de 298 K y a una frecuencia cercana a 9 GHz. Se ajustaron los acoplamientos de tal forma que los dos modos tuviesen la misma frecuencia y que la cavidad esté apenas sub-acoplada.

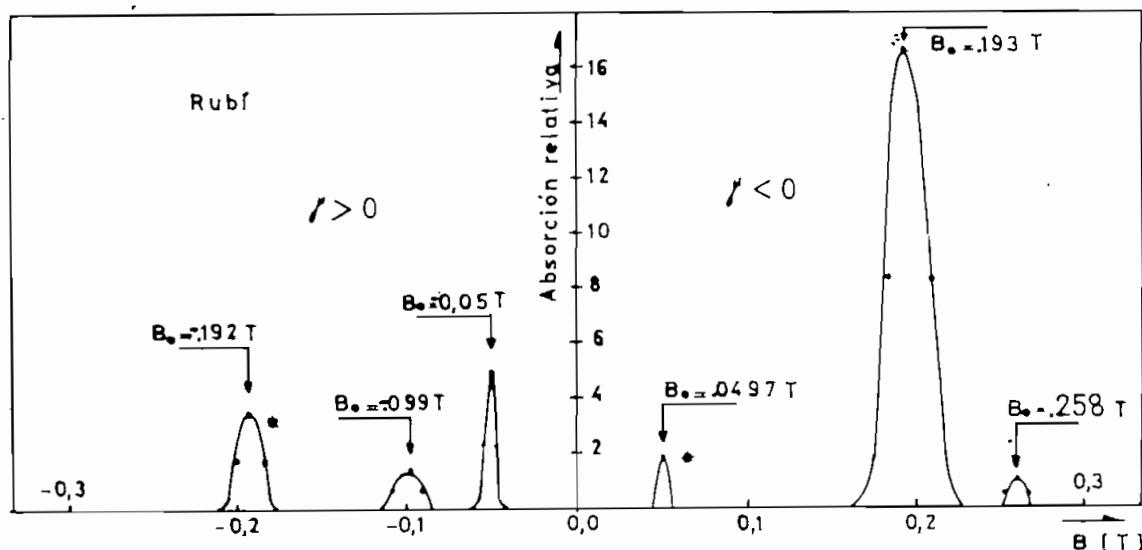


Figura 8. Rubí natural en forma de lenteja, sin facetas. Dimensiones 7,12 mm x 6,5 mm x 4,6 mm, masa 0,4116 gr. \* Resonancias "falsas".

4.- RESULTADOS EXPERIMENTALES.

En las figuras 8 a 22 y en la tabla 6 se indican los resultados de algunas de las medidas efectuadas.

En la figura 8 se indican las 4 resonancias observadas en un rubí natural de 0,4116 gr en forma de lenteja y de dimensiones 7,12 mm x 6,25 mm x 4,60 mm. La muestra no tiene simetría cilíndrica. Por lo tanto para observar el signo de la relación giromagnética es necesario orientar el rubí en la dirección de uno de los acoplamientos y ajustar este acoplamiento hasta igualar las frecuencias de los dos modos de oscilación. Sin embargo las amplitudes de los modos de oscilación no resultan iguales y se observa (por ejemplo) una resonancia "falsa" a  $B_0 = -0,1920T$  con la quinta parte de la amplitud de la resonancia verdadera a  $B_0 = +0,1930T$ .

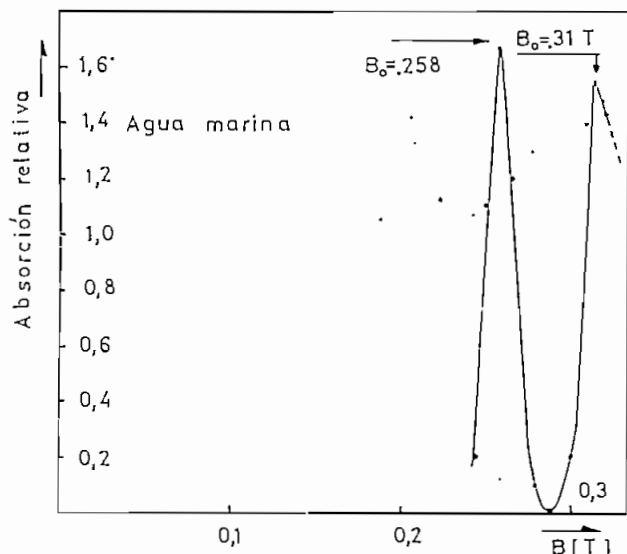


Figura 9. Aguamarina, forma ovalada, con facetas. Dimensiones: 9,7 mm x 7,46 mm x 5,34 mm, masa 0,479 gr.

Con muestras simétricas la relación entre las amplitudes de las resonancias observadas en  $B_0$  y  $-B_0$  es típicamente 10 a 20 de manera que el signo de la resonancia se ob

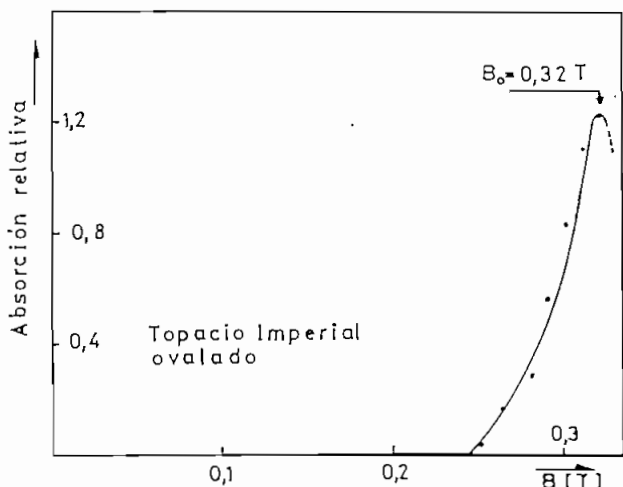


Figura 10. Topacio Imperial, forma ovalada, con facetas. Dimensiones: 11,05 mm x 9,85 mm x 6,45 mm, masa 0,78 gr.

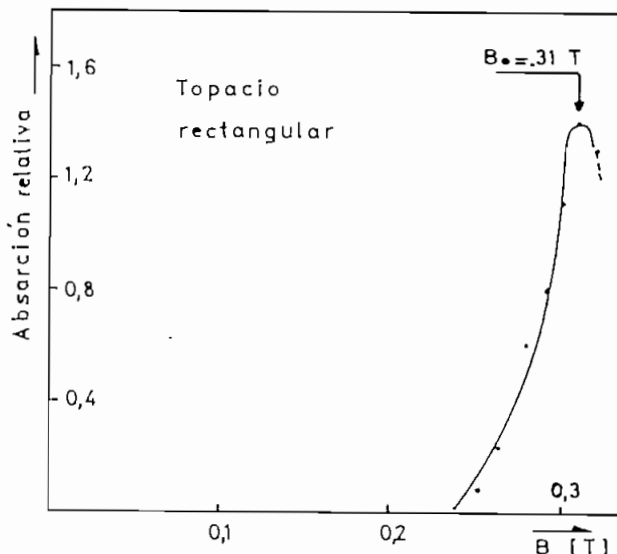


Figura 11. Topacio, forma rectangular, con facetas. Dimensiones: 9,8 mm x 8,22 mm x 5,05 mm, masa 0,583 gr.

tiene en forma inequívoca. En las demás figuras se han omitido las resonancias falsas que se observan debido a la asimetría de la muestra.

Note que 2 resonancias del rubí tienen  $\chi$  negativo y 2 resonancias tienen  $\chi$  positivo!

Efectuaremos medidas en función de la orientación del rubí y en función de la frecuencia para poder deducir la estructura fina del ión  $Cr^{+++}$  en rubí. Para explicar las resonancias con  $\chi$  positivo tal vez sea necesario revisar la figura 1.

En Aguamarina ( $3(B_2O_3)Al_2O_3 \cdot 6(SiO_2)$ ) se observaron 2 resonancias "delgadas" con  $\chi$  negativo como se indica en la figura 9.

Todos los iones propios del cristal son dia

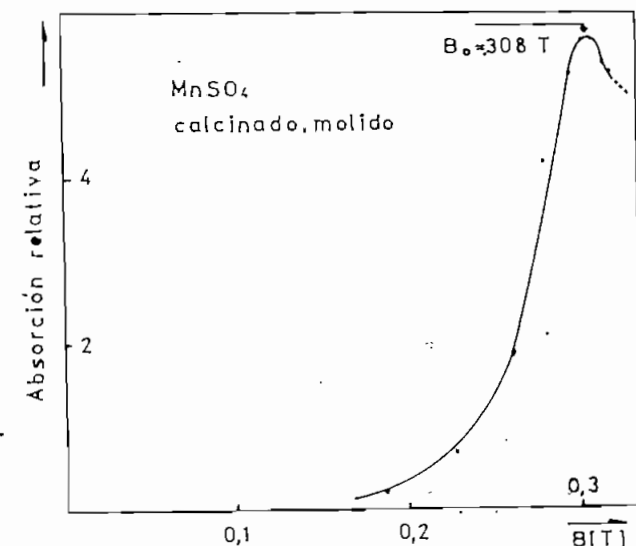


Figura 12. Sulfato de manganeso, molido, deshidratado, impregnado en cera de parafina. Pastilla cilíndrica de 4 mm x 1 mm.

magnéticos de manera que las resonancias provienen de impurezas paramagnéticas o bien de defectos cristalinos.

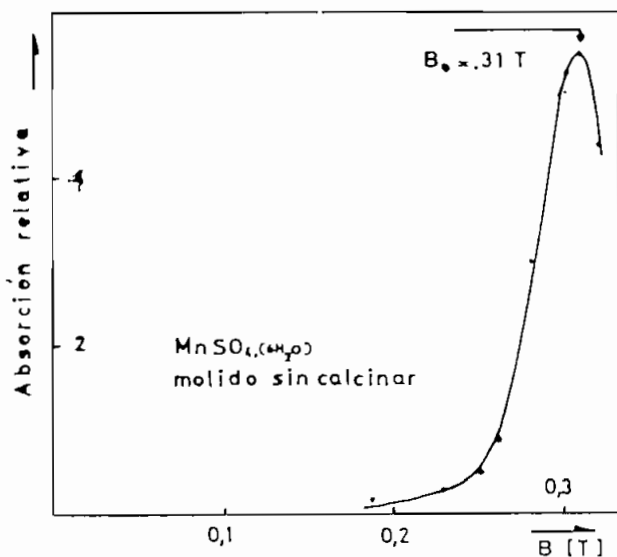


Figura 13. Sulfato de manganeso, molido, hidratado, impregnado en cera de parafina. Pastilla cilíndrica de dimensiones 4 mm x 1 mm.

Las muestras de topacio ( $Al_2(F,OH)_2 SiO_4$ ) presentaron una resonancia con  $\gamma$  negativo (figura 10 y 11).

Se observaron resonancias de spin de electrones en varias sales con iones paramagnéticos: sulfato de manganeso (figuras 12 y 13), sulfato amónico ferroso (figura 14), permanganato de potasio (figura 15).

Un cristal de fluoruro de calcio ( $F_2Ca$ ) presentó la resonancia indicada en la figura 16. Como el fluoruro de calcio es diamagnético la resonancia debe provenir de impurezas o defectos cristalinos.

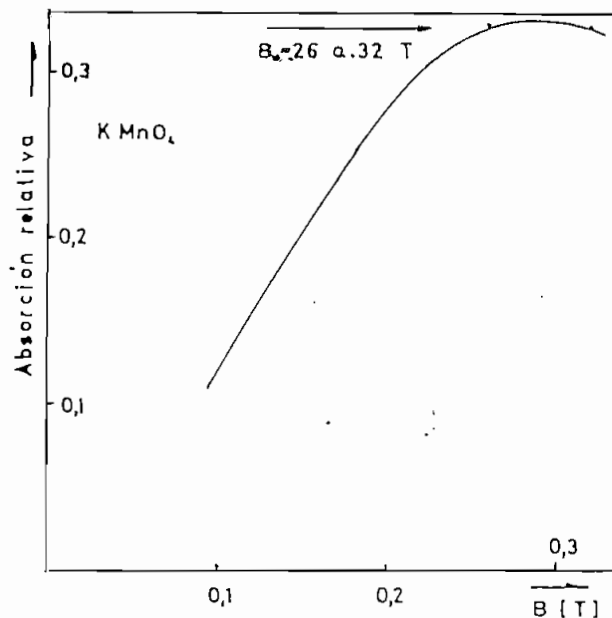


Figura 15. Permanganato de potasio, molido, deshidratado, impregnado en cera de parafina. Pastilla cilíndrica de dimensiones 4 mm x 1 mm.

Una muestra de silicio utilizada en la industria electrónica presentó la doble (?) resonancia indicada en la figura 17. Desconocemos el dopado de la muestra.

Todas las muestras de distintos tipos de ferrita que medimos presentaron la curiosa resonancia con cambio de frecuencia que se indica en la figura 18.

Esta resonancia se observa unicamente con campo magnético rotatorio (dos acoplamientos ajustados) y no con un solo acoplamiento. Desconocemos el origen de este fenómeno.

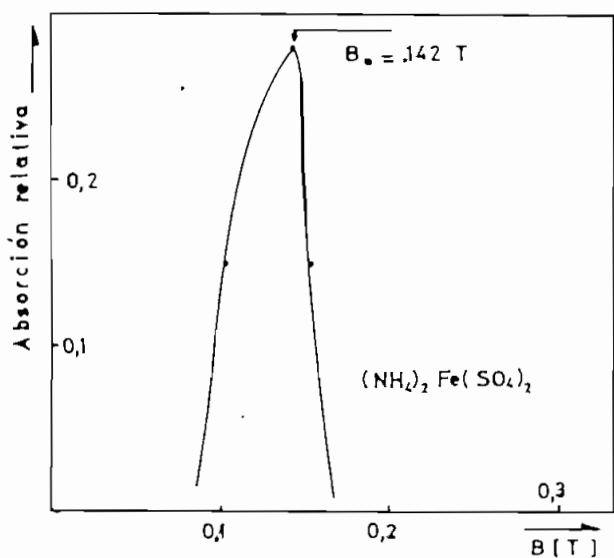


Figura 14. Sulfato Amónico ferroso, molido, deshidratado, impregnado en cera de parafina. Pastilla cilíndrica de dimensiones 4 mm x 1 mm.

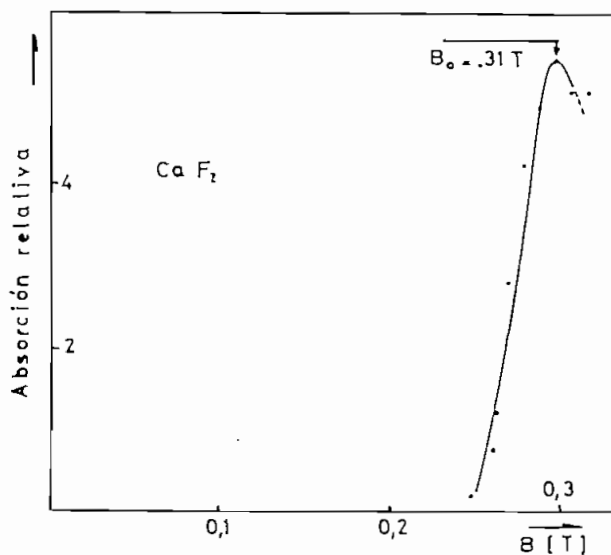


Figura 16. Fluoruro de calcio monocristalino, 4 mm x 4 mm x 1 mm.

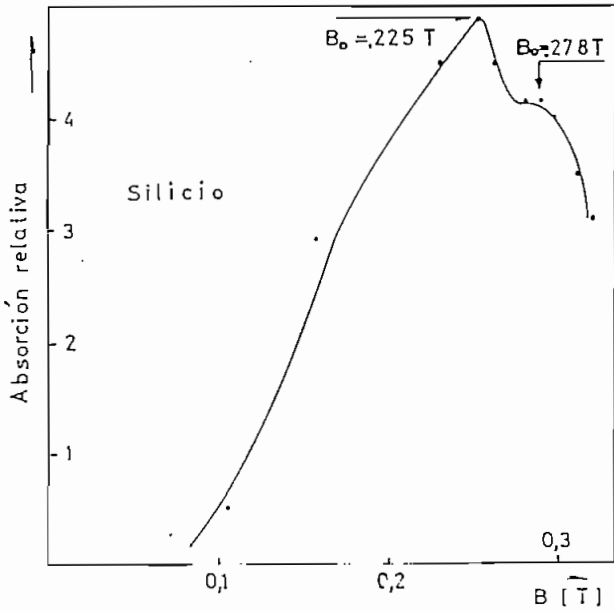


Figura 17. Silicio para fabricación de elementos semiconductores (se desconoce el dopado), molido, deshidratado, impregnado en cera de parafina. Pastilla cilíndrica de dimensiones 4 mm × 1 mm.

Se observaron resonancias en varios minerales: Cobaltita que contiene  $\text{SCoAs}$  (figura 19); Cromita que contiene  $\text{Cr}_2\text{O}_4\text{Fe}$  (figura 20); Manganita que contiene  $\text{MnO(OH)}$  (figura 21); y Rodonita que contiene  $\text{SiO}_4\text{Mn}$  (figura 22). Otros minerales medidos son Rutilo ( $\text{TiO}_2$ ); Bornita ( $\text{S}_4\text{Cu}_5\text{Fe}$ ); Calcopirita ( $\text{S}_2\text{Cu Fe}$ ); Magnetita ( $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ); Y Descloicita ( $\text{Pb (Zn, Cu) VO}_4 \cdot \text{OH}$ ).

En la Tabla 6 aparece la "amplitud" o absorción relativa de las resonancias. Esta amplitud, medida en unidades arbitrarias, permite comparar las resonancias de distintas muestras.

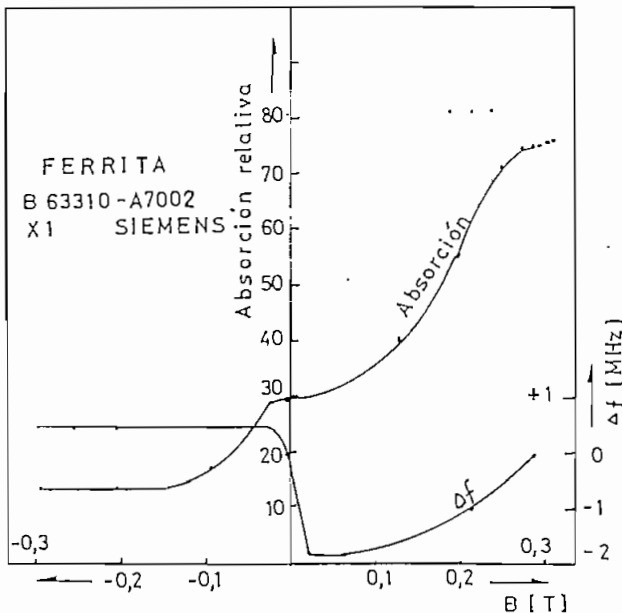


Figura 18. Ferrita Siemens tipo B 63310 - A7002-X1, molido, deshidratado, impregnado en cera de parafina. Pastilla cilíndrica de dimensiones 4 mm × 1 mm.

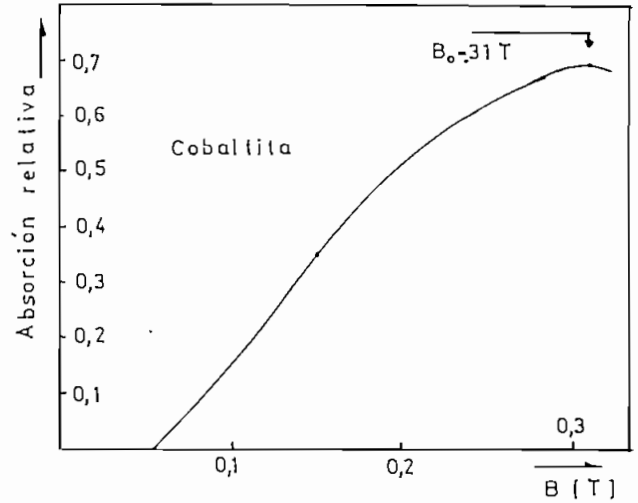


Figura 19. Cobaltita, molido, deshidratado, impregnado en cera de parafina. Disco de dimensiones 8 mm × 1 mm.

### 5.- EL SIGNO DE LA RELACION GIROMAGNETICA DEL ELECTRON.

En 1925 G. Uhlenbeck y S. Goudsmit propusieron la existencia del momento angular del electrón. En 1927 W. Pauli incorporó el spin a la mecánica cuántica. En esta época se decía que el electrón tenía su dipolo magnético opuesto al momento angular (o sea  $\gamma$  negativo) tal como corresponde a una distribución de carga negativa en rotación. Una medida directa del signo de  $\gamma$  mediante resonancia de spin no fue posible antes del desarrollo de las técnicas de microondas durante la 2ª guerra mundial. La primera medida de resonancia magnética de electrones fue realizada por E. Zavoisky en 1945.

Estas observaciones nos indujeron a revisar experimentalmente el signo de la relación giromagnética del electrón. Para este efecto

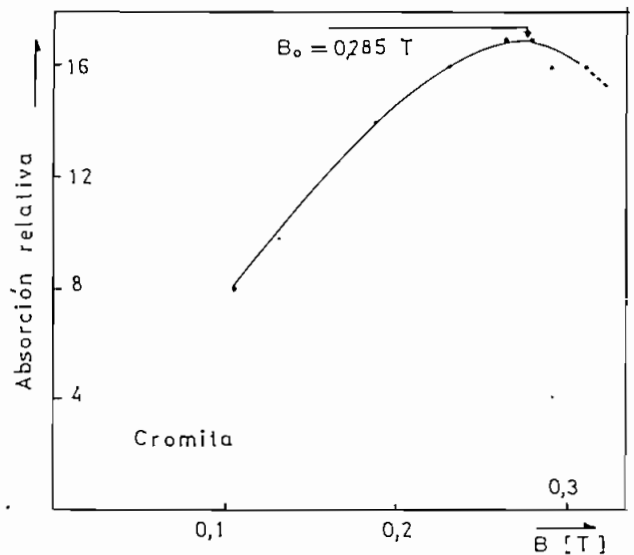


Figura 20. Cromita, molido deshidratado, impregnado en cera de parafina. Disco de dimensiones 8 mm × 1 mm.

TABLA N° 6

Resultados Experimentales

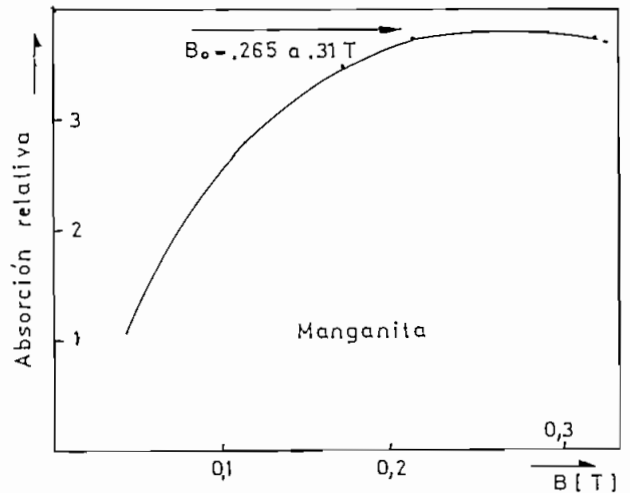
MUESTRA	$f_0$ (MHz)	$B_0$ (T)	$\Delta B_0$ (T)	Signo de $\gamma$	$ g $	$T_2 \times 10^{-9}$ s	Absorción relativa	
RUBI	8.937	- 0.0505	0,006	+	12,643	0,2998	5,0	
	8.937	- 0,099	0,0185	+	6,449	0,191	1,3	
	resonancias falsas	8.937	- 0,192	0,0155				3,4
		8.937	0,0497	0,006				1,8
	8.937	0,193	0,025	-	3,308	0,275	16,6	
	8.937	0,258	0,012	-	2,724	0,696	1,0	
AGUAMARINA	8.847	0,258	0,02	-	2,449	0,464	1,68	
	8.847	0,31	0,0133	-	2,039	0,839	1,56	
TOPACIO IMPERIAL (ovalado)	8.804	0,3178	0,0526	-	1,979	0,218	1,24	
TOPACIO (rectangular)	8.881	0,3104	0,0378	-	2,044	0,294	1,4	
SULFATO DE MANGÁNESO (deshidratado)	8.990	0,308	0,066	-	2,085	0,165	5,66	
SULFATO DE MANGANESO (hidratado)	8.991	0,31	0,067	-	2,072	0,164	5,5	
FLUORURO DE CALCIO	8.990	0,309	0,0578	-	2,134	0,184	5,45	
SULFATO AMONICO FERROSO	8.988	0,142	0,051	-	4,522	0,0986	0,28	
SILICIO	8.988	0,225	0,186	-	2,854	0,043	4,9	
	8.988	0,2787	0,06	-	2,309	0,164	4,2	
COBALTITA	8.984	0,31	0,32	-	2,070	0,034	0,7	
CROMITA	8.983	0,285	0,33	-	2,252	0,03	17	
MANGANITA	8.962	0,2 /					3,75	
RODONITA	8.977	0,318	0,24	-	2,017	0,469	98	
PERMANGANATO DE POTACIO	8.983	0,2/0,32					0,32	

to medimos numerosas muestras de sulfato de manganeso (hidratadas ( $MnSO_4 \cdot 6 H_2O$ ), calcinadas, molidas, sin moler, encapsuladas en cera de parafina, etc.).

La teoría ya se ha explicado en la sección 2. Con muestras de simetría cilíndrica se logró amplitudes de la resonancia falsa con  $B_0$  invertido menores que 1/20 de la amplitud de la resonancia verdadera. Por lo tanto la determinación experimental del signo de  $\gamma$  es inequívoca. Las características de las resonancias se indican en las figuras 12 y 13 y en la tabla 6. Se obtuvo una relación giromagnética del electrón negativa.

Según la tabla 6 todas las resonancias medidas, salvo dos del rubí, tienen  $\gamma$  negativo.

Figura 21. Manganita, molida deshidratada, impregnada en cera de parafina, Disco de dimensiones 8 mm x 1 mm.





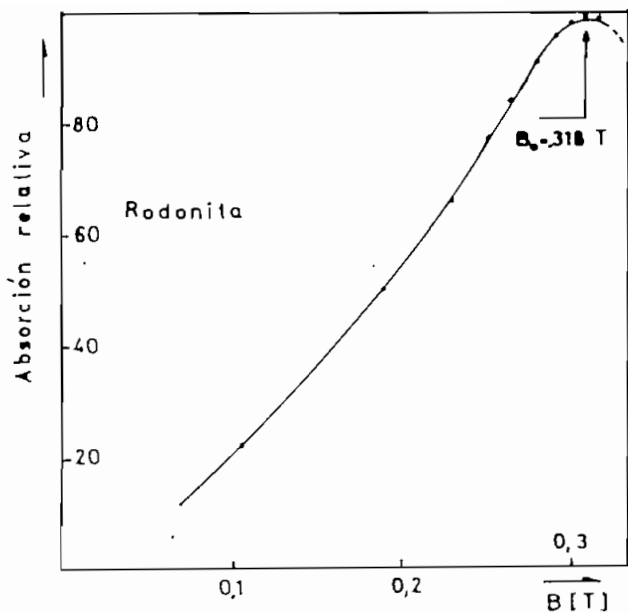


Figura 22. Rodonita, molida deshidratada, impregnada en cera de parafina. Disco de dimensiones 8 mm × 1 mm.

#### AGRADECIMIENTO.

Muchas personas contribuyeron a la presente investigación. En particular agradecemos a la Escuela Politécnica Nacional por el financiamiento de los equipos construidos, al Ing. Alfredo Mena, Decano de la Facultad de Ingeniería Eléctrica, por su decidido apoyo en la tramitación del financiamiento, al Sr. Miguel León, por la construcción de la cavidad; a Ecuatronic Cia. Ltda., por la construcción del electroimán; al Dr. Nestor Flor e Ing. Ricardo Muñoz, por la preparación de muestras químicas y provisión de piedras preciosas, al Ing. Renán Cornejo, por la provisión de rocas; al Sr. Jorge Jaramillo por el corte y pulido de rocas; al Sr. Pablo Peñafiel, por su colaboración en las mediciones y a la Srta. Ana Viteri por la transcripción del manuscrito.

#### REFERENCIAS

- (1) Charles Kittel, "Introduction to solid state physics", third edition, John Wiley (1968).
- (2) A.F. Harvey, "Microwave engineering", Academic Press (1963).

RESONANCIA MAGNETICA DE ELECTRONES EN RUBI

Se reproducen las secciones "Teoría" y "Anexo" del artículo "Resonancia magnética de electrones en rubí" de Bruce Hoeneisen, Mario Cevallos y Pablo Peñafiel que se rá publicado en la revista POLITECNICA.

## TEORIA

El rubí<sup>(3)</sup> es un cristal de corundum ( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) con aproximadamente 0.5% a 4% de iones Al<sup>+++</sup> sustituidos por iones Cr<sup>+++</sup>. Estas impurezas de cromo dan color al ru bí. Los iones Al<sup>+++</sup> y O<sup>--</sup> que forman el corundum tienen la configuración electrónica del Ne. Por lo tanto no tienen en conjunto momento orbital o de spin ni dipolo magnético, y no dan origen a resonancia magnética de electrones. La configuración electrónica de menor energía del ión Cr<sup>+++</sup> es<sup>(4)</sup> 1s<sup>2</sup> 2s<sup>2</sup> 2p<sup>6</sup> 3s<sup>2</sup> 3p<sup>6</sup> 3d<sup>3</sup>. Las capas nl = 1s, 2s,

2p, 3s y 3p están llenas con un total de 18 electrones tal como en el Ar. Estos electrones no tienen en conjunto momento orbital angular o de spin ni dipolo magnético. Los tres electrones restantes del ión  $\text{Cr}^{+++}$  están en la capa incompleta<sup>(4)</sup>  $3d$  y dan origen a resonancias magnéticas. Otras configuraciones electrónicas del ión  $\text{Cr}^{+++}$  están típicamente varios eV sobre la configuración electrónica de menor energía.

Las resonancias medidas en la banda de 8 GHz a 12 GHz corresponden a transiciones de  $3.3 \times 10^{-5}$  eV a  $5 \times 10^{-5}$  eV a la temperatura de medición de 297 K se tiene  $KT = 0.0256$  eV. Por lo tanto solo los estados dentro de aproximadamente 0.1 eV del estado de menor energía están suficientemente poblados para contribuir a las resonancias observadas.

En conclusión las resonancias medidas corresponden a iones cromo  $\text{Cr}^{+++}$  con la configuración electrónica  $3d^3$  (y talvés a otras impurezas o a Cr intersticial).

Según la mecánica cuántica los tres electrones con  $l = 2$  pueden estar en multipletes<sup>(5)</sup>  $(2s+1)_L = {}^2P, {}^2D, {}^2F, {}^2G, {}^2H, {}^4P$  y  ${}^4F$ . Un multiplete  $(2s+1)_L$  lleva la representación  $D^{(s)} \otimes D^{(L)}$  del grupo de rotaciones  $O^+(3)$  (si se desprecia la interacción spin-órbita que da lugar a desdoblamientos del orden de  $10^{-2}$  a  $10^{-3}$  eV). Entonces el multiplete  $(2s+1)_L$  contiene  $(2s+1)(2L+1)$  estados cuánticos.

Si el ión  $\text{Cr}^{+++}$  está libre todos los estados cuánticos de un multiplete tiene una misma energía debido a la simetría  $O^+(3)$ . Según las reglas de Hund el multiplete de menor energía de la configuración electrónica  $3d^3$  es  ${}^4F$ . Le sigue en energía<sup>(4)</sup> el multiplete  ${}^2G$ .

Consideremos ahora el ión  $\text{Cr}^{+++}$  en el campo cristalino del rubí. El corundum cristaliza en el grupo espacial<sup>(3)</sup>  $D_{3d}^6$  ( $R\bar{3}c$ ). El ión  $\text{Cr}^{+++}$  que sustituye a un ión  $\text{Al}^{+++}$  se encuentra rodeado por seis iones  $\text{O}^{--}$  con la simetría (aproximada) del octaedro ( $O_h = O \otimes C_i$ ). Este octaedro no es regular: está comprimido en la dirección del eje  $c$  en  $\approx 2\%$ . La simetría que ve el ión  $\text{Cr}^{+++}$  se reduce entonces a  $D_{3d} = D_3 \otimes C_i$ . Aún esta simetría  $D_{3d}$  puede reducirse a  $C_3$  dependiendo de la forma en que se distribuyen los iones  $\text{Al}^{+++}$ .

Finalmente la aplicación de un campo magnético en una dirección arbitraria elimina por completo las simetrías ( $C_i$ ).

¿Como se desdoblán los 28 estados cuánticos del multiplete  ${}^4F = D^{(3/2)} \otimes D^{(3)}$  y los 18 estados cuánticos del multiplete  ${}^2G = D^{(1/2)} \otimes D^{(4)}$  del ión  $\text{Cr}^{+++}$  en el campo cristalino?. La interacción del campo cristalino con el spin ( $D^{(5)}$ ) puede despreciarse en primera aproximación en comparación con la interacción del campo cristalino con las funciones de onda orbitales ( $D^{(L)}$ ). Entonces según la teo

ría de grupos <sup>(5,6)</sup> se tienen los siguientes desdoblamientos:

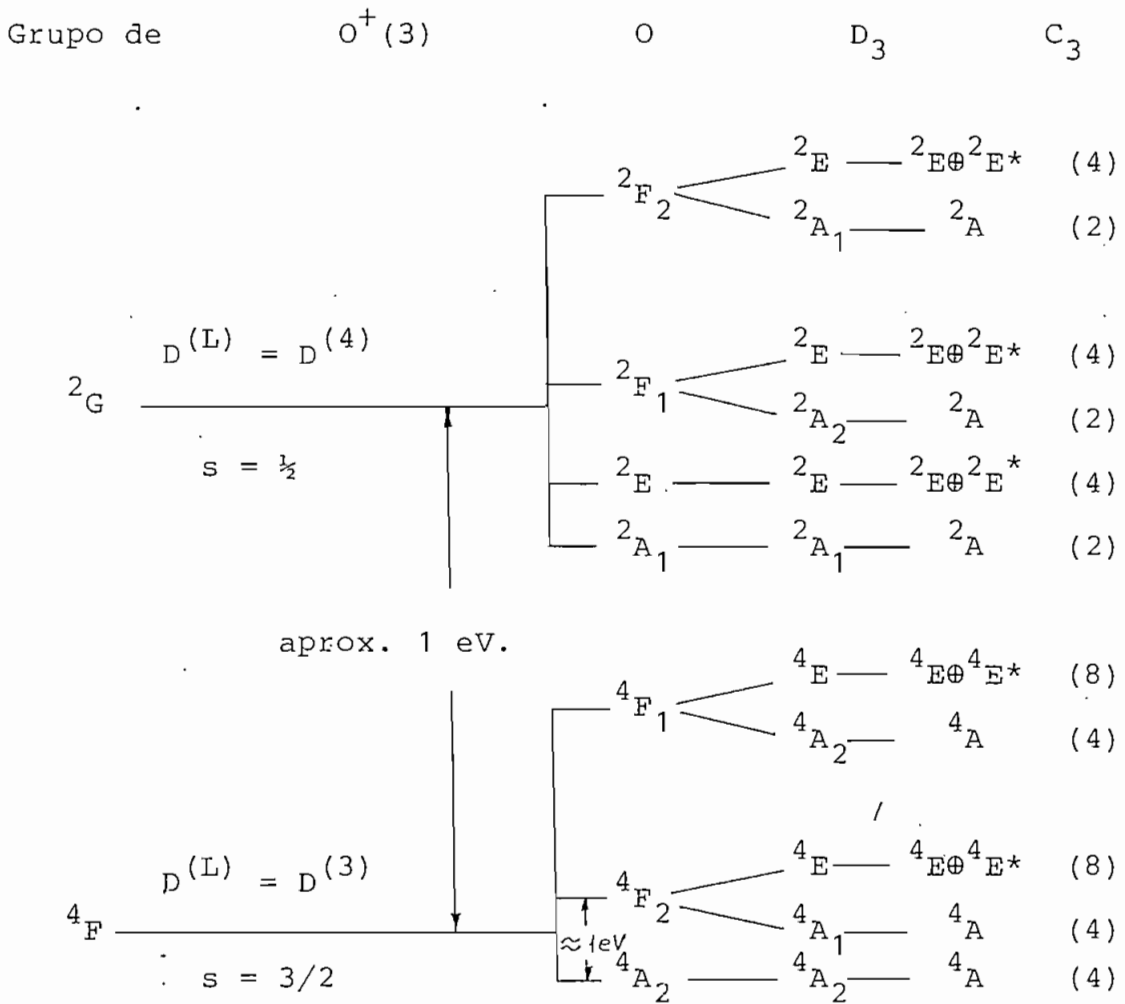


Figura 6.- Niveles energéticos de los iones con la configuración electrónica  $d^3$  multiplicidad

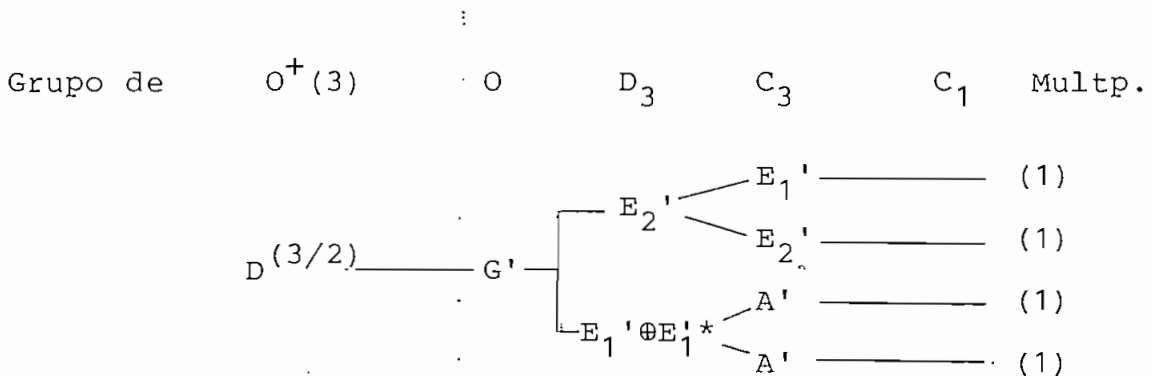
Los niveles energéticos de iones con la configuración electrónica  $d^3$  en la simetría del octaedro se indican en la Fig. 6. Note que los estados cuánticos de menor energía llevan la representación <sup>(4)</sup>  ${}^4A_2$ . La diferencia de

energía entre estos estados  ${}^4A_2$  y los estados que les siguen en energía es del orden de 1 eV. para  $Cr^{+++}$  en rubí. Por lo tanto solo los estados  ${}^4A_2$  pueden dar lugar a resonancias observables en nuestro experimento.

Debemos entonces considerar los desdoblamientos de los cuatro estados cuánticos  ${}^4A_2$  debido a interacciones con el spin. Consideramos primero interacciones spin-órbita y luego interacciones del campo cristalino con el spin.

La función de onda propia correspondiente a la representación  $A_2$  de  $O$  es  $(6) \cdot 2 P_3^2 (\cos \theta) \sin (2\theta)$  y tiene la simetría del tetraedro  $T$ . La representación  $D^{(3/2)}$  de  $O^+(3)$  se resuelve de la siguiente forma en representaciones irreducibles de  $T$ :  $D^{(3/2)} = G' + G'^*$ . Las representaciones  $G'$  y  $G'^*$  tienen la misma energía y por lo tanto la interacción spin-órbita en el ión  $Cr^{+++}$  libre no desdobra los estados  ${}^4A_2$ .

El campo cristalino y el campo magnético aplicado interactúan con el spin  $s = 3/2$  causando los siguientes desdoblamientos:



En los resultados experimentales de las Fig. 6.9 y 6.11 se observa el desdoblamiento de  $D_3$  de 11.4 GHz igual a  $4.7 \times 10^{-5}$  eV. No hay evidencia experimental del desdoblamiento de  $C_3$ ; si existe es menor que 0.2 GHz.

En resumen, nuestra interpretación de las resonancias magnéticas de electrones en rubí se basan en las siguientes suposiciones:

- a) Las resonancias más intensas observables se deben a iones  $Cr^{+++}$ .
- b) Estos iones sustituyen a iones  $Al^{+++}$ .
- c) Los iones  $Cr^{+++}$  tienen la configuración electrónica<sup>(4)</sup>  $3d^3$ .
- d) Los tres electrones en el ión  $Cr^{+++}$  libre tienen el multiplete de menor energía<sup>(5)</sup>  ${}^4F$  de  $O^+(3)$ .
- e) El campo cristalino que ven los iones  $Cr^{+++}$  tiene simetría  $D_{3d}$  (que difiere de la simetría  $O_h$  debido a un aproximadamente 2% de compresión según el eje c).
- f) El multiplete  ${}^4F$  de  $O^+(3)$  se desdobla debido a la simetría  $D_{3d}$  y el multiplete resultante de menor energía es<sup>(4)</sup>  ${}^4A_2$ .

- g) Los cuatro estados del multiplete  ${}^4A_2$  se dedoblan debido a la interacción del spin  $3/2$  con el campo cristalino de simetría  $D_{3d}$ .
- h) Las resonancias más intensas observadas se deben a transiciones entre los cuatro estados cuánticos del multiplete  ${}^4A_2$  de  $D_{3d}$ .
- i) Otros estados cuánticos tienen energía suficientemente alejadas<sup>(4)</sup> del multiplete  ${}^4A_2$  de manera que no están apreciablemente pobladas térmicamente y además no hay "mezclas" (Se requiere una separación mayor a 0.1 eV.)

En base a estas suposiciones se calcula (en el anexo la energía de los cuatro estados  ${}^4A_2$  en función del campo magnético aplicado.

#### ANEXO

Calculamos las energías de los cuatro estados correspondientes a  $s=3/2$  en el campo cristalino con simetría  $D_3$  y en una inducción magnética aplicada  $B$ . La teoría puede encontrarse en las referencias (5), (6) y (7).

Las matrices de la representación  $D^{(3/2)}$  del grupo de rotaciones  $O^+(3)$  en la base canónica pueden obtener-



se a partir de las siguientes dos matrices:

$$D^{(3/2)}(\alpha, 0, 0) = D^{(3/2)}(0, 0, \alpha) = \begin{bmatrix} e^{-i3\alpha/2} & & & \\ & e^{-i\alpha/2} & & \\ & & e^{i\alpha/2} & \\ & & & e^{3i\alpha/2} \end{bmatrix}$$

$$D^{(3/2)}(0, \beta, 0) = \begin{bmatrix} c^3 & -\sqrt{3}c^2s & \sqrt{3}cs^2 & -s^3 \\ \sqrt{3}c^2s & c(1-3s^2) & s(1-3c^2) & \sqrt{3}cs^2 \\ \sqrt{3}cs^2 & s(3c^2-1) & c(1-3s^2) & -\sqrt{3}c^2s \\ s^3 & \sqrt{3}cs^2 & \sqrt{3}c^2s & c^3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

donde  $c = \cos(\beta/2)$ ,  $s = \sin(\beta/2)$  y  $(\alpha, \beta, \gamma)$  son los ángulos de Euler:  $(\alpha, 0, 0) = (0, 0, \alpha)$  es una rotación de ángulo  $\alpha$  en torno de  $z$  y  $(0, \beta, 0)$  es una rotación de ángulo  $\beta$  en torno de  $y$ .

La representación  $D^{(3/2)}$  de  $O^+(3)$  contiene una representación de  $D_3$ . Damos dos matrices de esta representación en la base canónica:

$$D^{(3/2)}(2\pi/3, 0, 0) = \begin{bmatrix} -1 & & & \\ & \mathcal{J}^{-1} & & \\ & & \mathcal{J} & \\ & & & -1 \end{bmatrix} \quad D^{(3/2)}(0, \pi, 0) = \begin{bmatrix} & & -1 & \\ & & 1 & \\ & -1 & & \\ 1 & & & \end{bmatrix}$$

donde  $\mathcal{J} = \exp(i\pi/3)$ . Esta representación de  $D_3$  es reducible y se resuelve en las siguientes representaciones irreducibles  $D^{(3/2)} = E_2' \oplus E_1' \oplus E_1'^*$ . En efecto las matrices de

la representación canónica (2) pueden llevarse a la forma diagonal-en-bloques mediante una transformación de base con la matriz unitaria:

$$S = \begin{bmatrix} 1 & & & i \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ i & 0 & -1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

Se obtiene:

$$S^{-1} D^{(3/2)}(2\pi/3, 0, 0) S = \begin{bmatrix} -1 & & & \\ & \begin{bmatrix} \mathcal{J} & 0 \\ 0 & \mathcal{J} \end{bmatrix} & & \\ & & & -1 \end{bmatrix}$$

$$S^{-1} D^{(3/2)}(0, \pi, 0) S = \begin{bmatrix} -i & & & \\ & \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} & & \\ & & & i \end{bmatrix} \quad (3)$$

Los bloques en (3) corresponden a las representaciones irreducibles de  $D_3$  de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} E_1'^* & & & \\ & \begin{bmatrix} E_2' \end{bmatrix} & & \\ & & & E_1' \end{bmatrix}$$

El hamiltoniano en ausencia de la inducción magnética aplicada  $\vec{B}$  es  $H_0$ . El hamiltoniano total es

$H = H_0 + H_1$ . En la base diagonal-en-bloques de (3) se tiene:

$$H_0 = \begin{bmatrix} 0 & & & & \\ & \boxed{\begin{matrix} E & 0 \\ 0 & E \end{matrix}} & & & \\ & & & & 0 \end{bmatrix}$$

si tomamos como nivel de referencia la energía de los estados  $E_1'$  y  $E_1'^*$  en ausencia de B. E es el único parámetro ajustable del cálculo y le asignamos el valor de h.11.4 GHz como consecuencia de los resultados experimentales.

En la base canónica de (1) con el eje z en la dirección de la inducción magnética aplicada B se tiene:

$$H_1' = \frac{g e}{2m} \hbar B \begin{bmatrix} -3/2 & & & & \\ & -1/2 & & & \\ & & 1/2 & & \\ & & & & 3/2 \end{bmatrix}$$

donde  $g = 2$  y  $e > 0$ . Transformamos primero a la base canónica con eje z en la dirección del eje c del cristal. La matriz de transformación correspondiente es  $D^{(3/2)}(0, \beta, 0)$  donde  $\beta$  es el ángulo entre  $\vec{B}$  y el eje c. Luego efectuamos una rotación  $\alpha$  en torno del eje c. Finalmente transformamos a la base diagonal-en-bloques de (3) mediante la matriz S. Entonces en esta base se obtiene:

$$H_1 = S^{-1} D^{(3/2)}(0, -\alpha, 0) D^{(3/2)}(0, -\beta, 0) \dots \\ \dots H_1' D^{(3/2)}(0, \beta, 0) D^{(3/2)}(0, \alpha, 0) S$$

Los valores propios de la matriz  $H = H_0 + H_1$  son las energías de los cuatro estados cuánticos correspondientes a  $J=3/2$ . Algunas soluciones se indican en el apéndice 1. Para  $\beta = 0$  se obtiene las energías  $E \pm B'/2$  y  $\pm 3B'/2$  donde  $B' = ge\hbar B/2m$ .

Las probabilidades de transición se calculan mediante la ley de oro de Fermi y el hamiltoniano de perturbación  $H_2$  debido al campo magnético rotatorio perpendicular a  $\vec{B}$  (cuya magnitud es  $B_2$ ). En la base canónica de (1) con eje  $z$  en la dirección de  $\vec{B}$  se tiene:

$$H_2' = \frac{ge}{2m} \hbar B_2 \left[ \begin{array}{c} \cos \omega t D^{(3/2)}(0, -\pi/2, 0) \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{array} \left[ \begin{array}{ccc} -3/2 & & \\ & -1/2 & \\ & & 1/2 \\ & & & 3/2 \end{array} \right] \dots \right. \\ \left. \dots D^{(3/2)}(0, \pi/2, 0) + \sin \omega t D^{(3/2)-1}(-\pi/2, \pi/2, \pi/2) \dots \right. \\ \left. \dots \left[ \begin{array}{ccc} -3/2 & & \\ & -1/2 & \\ & & 1/2 \\ & & & 3/2 \end{array} \right] D^{(3/2)}(-\pi/2, \pi/2, \pi/2) \right]$$

donde  $D^{(3/2)}(-\pi/2, \pi/2, \pi/2) = D^{(3/2)}(\pi/2, 0, 0) \dots$   
 $\dots D^{(3/2)}(0, \pi/2, 0) D^{(3/2)}(0, 0, \pi/2)$ . En la base diagonal-en-bloque de (3) se tiene  $H_2 = S^{-1} D^{(3/2)}(0, -\alpha, 0) \dots$   
 $\dots D^{(3/2)}(0, -\beta, 0) H_2' D^{(3/2)}(0, \beta, 0) D^{(3/2)}(0, \alpha, 0) S$ . Por último falta calcular los elementos de matriz  $H_2$  entre los vectores propios de  $H_0 + H_1$ .

#### REFERENCIAS

- (1) Bruce Hoeneisen y Mario Cevallos, Anales de las Jornadas de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Vol 3, p.68, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 1982.
- (2) Pablo Peñafiel, Tesis, Escuela Politécnica Nacional Quito, Ecuador, 1982.
- (3) Deer, W.A., Rock Forming minerals, Longman, London, 1972.
- (4) M.J. Weber, S.A. Brawer y A. j. De Groot, Phys. Rev. B, No. 1, p11 (1981)
- (5) Landau y Lifshitz, "Mecánica Cuántica (teoría no relativista)". Editorial Reverté S.A. (1967)

PROGRAMAS DE SOPORTE

Los listados de los programas utilizados en esta tesis se encuentran en las siguientes hojas. Los programas están organizados de la siguiente manera:

NOMBRE	FUNCION
RESONANCIA	Programa maestro; es el primero que debe ejecutarse. <u>I</u> nicializa variables y define las teclas de usuario.
INDATPROC	Subprograma para ingreso de datos que serán utilizados por el programa Cálculo. Los datos son: rango de variación de los ángulos de giro y de la inducción magnética aplicada.
CALCULO, ASCII	Subprograma que calcula los

valores de energía de los cuatro estados cuánticos para los datos ingresados con el subprograma Indatproc.

IMPDATPROC

Subprograma para impresión de datos procesados con el programa Cálculo.

INDATEXP

Subprograma para ingreso de datos experimentales.

IMPDATEXP

Subprograma para impresión de tablas de datos experimentales.

GRAFCAL

Subprograma para graficar las curvas de calibración del electroimán utilizado en este experimento.

GRAFPROC

Subprograma para graficar las 6 diferencias (restas) de valores de energía de los cuatro estados cuánticos en varias escalas.

GRAFEXP

Subprograma para graficar los datos experimentales.

```

1 F$="*"
2 GO TO 100
4 GO TO 160
8 IF F$="2" THEN 1000
9 DELETE 1001,10000
10 APPEND "INDIATPROC";1000
11 GO TO 1000
12 IF F$="3" THEN 1000
13 DELETE 1001,10000
14 APPEND "CALCULO", "ASCII";1000
15 GO TO 1000
16 IF F$="4" THEN 1000
17 DELETE 1001,10000
18 APPEND "IMPDIATPROC";1000
19 GO TO 1000
20 IF F$="5" THEN 1000
21 DELETE 1001,10000
22 APPEND "INDATEXP";1000
23 GO TO 1000
24 IF F$="6" THEN 1000
25 DELETE 1001,10000
26 APPEND "IMPDATEXP";1000
27 GO TO 1000
28 IF F$="7" THEN 1000
29 DELETE 1001,10000
30 APPEND "GRAFCAL";1000
31 GO TO 1000
32 IF F$="8" THEN 1000
33 DELETE 1001,10000
34 APPEND "GRAFPROC";1000
35 GO TO 1000
36 IF F$="9" THEN 1000
37 DELETE 1001,10000
38 APPEND "GRAFEXP";1000
39 GO TO 1000
40 CLOSE
41 PAGE
42 END
100 REM
110 REM ***** ESTE PROGRAMA SE LLAMA RESONANCIA "RESONANCIA" ***
120 REM
130 PRINT "LJJJINGRESE LA UNIDAD DONDE SE ENCUENTRA EL DISCO (0-0 1 )"
140 INPUT UO
150 CALL "UNIT",UO
160 PRINT "LIVALORES PROPIOS DEL HAMILTONIANO"
170 PRINT "I*****"
180 PRINT "IDEL GRUPO DE ROTACIONES D3"
190 PRINT "I*****"
200 REM
210 PRINT "JJITECLA 1 --- INDICE DE PROGRAMAS"
220 PRINT "JITECLA 2 --- INGRESO DE DATOS PARA PROCESAMIENTO"
230 PRINT "JITECLA 3 --- CALCULO DE VALORES PROPIOS"
240 PRINT "JITECLA 4 --- IMPRESION DE DATOS PROCESADOS"
250 PRINT "JITECLA 5 --- INGRESO DE DATOS EXPERIMENTALES"

```



```
260 PRINT "JITECLA 6 --- IMPRESION DE DATOS EXPERIMENTALES"
270 PRINT "JITECLA 7 --- GRAFIZACION DE LA CURVA DE CALIBRACION"
280 PRINT "JITECLA 8 --- GRAFIZACION DE DATOS PROCESADOS"
290 PRINT "JITECLA 9 --- GRAFIZACION DE DATOS EXPERIMENTALES"
300 PRINT "JITECLA 10 --- FIN DE PROGRAMA"
310 PRINT "JJI*** ESCOJA LA TECLA ****GGGG"
320 END
330 REM
340 M$=STR(I0)
350 M$=SEG(M$,2,LEN(M$)-1)
360 N$=STR(R0)
370 N$=SEG(N$,2,LEN(N$)-1)
380 L$=M$&" /R"
390 L$=L$&N$
400 GO TO U3 OF 410,430
410 L$="!@AB" &L$
420 GO TO 440
430 L$="@A" &L$
440 RETURN
450 REM
1000 REM.
```

```

1000 REM
1010 INIT
1020 F#="2"
1030 REM
1040 REM
1050 REM ***** INGRESO DE DATOS *****
1060 PRINT "LJJIINGRESO DE DATOS"
1070 PRINT "I*****"
1080 REM
1090 SET DEGREES
1100 N=4
1110 C1=27.99221595
1120 C=11.4
1130 Y=1/SQR(2)
1140 T3=SQR(3)
1150 DELETE A1,A2,D1,D2,D3,D4,R,R1,R2,M,E9,S1,S2,R3,R4
1160 DIM D3(4,4),D4(4,4),E9(8),M(4),D1(4,4),D2(4,4),A1(4,4),
1170 DIM S(4,4),S1(4,4),S2(4,4),R(4,4),R1(4,4),R2(4,4),R3(4,4),R4(4,4)
1180 PRINT "¿DESEA INGRESAR VALORES DE ALFA ? (SI O NO) ";
1190 INPUT H$
1200 IF H#<>"SI" AND H#<>"S" THEN 1240
1210 PRINT "¿DESEA VALOR MINIMO, MAXIMO E INCREMENTO DEL RANGO"
1220 PRINT "¿DE ALFA EN GRADOS (EN ESE ORDEN) ";
1230 INPUT I1,I2,I3
1240 PRINT "¿DESEA INGRESAR VALORES DE BETA ? (SI O NO) ";
1250 INPUT H$
1260 IF H#<>"S" AND H#<>"SI" THEN 1300
1270 PRINT "¿DESEA VALOR MINIMO, MAXIMO E INCREMENTO DEL RANGO"
1280 PRINT "¿DE BETA EN GRADOS (EN ESE ORDEN) ";
1290 INPUT K1,K2,K3
1300 PRINT "¿DESEA VARIAR EL RANGO PREDEF. DEL CAMPO MAGNET. ? (SI O NO) ";
1310 INPUT H$
1320 IF H#<>"S" AND H#<>"SI" THEN 1410
1330 PRINT "¿DESEA VALOR MINIMO, MAXIMO E INCREMENTO DEL CAMPO"
1340 PRINT "¿MAGNETICO B' EN TESLA (EN ESE ORDEN) ";
1350 INPUT L1,L2,L3
1360 IF L1=0 AND L2=1 AND L3=0.025 THEN 1390
1370 U3=1
1380 GO TO 1400
1390 U3=2
1400 GO TO 1450
1410 L1=0
1420 L2=1
1430 L3=0.025
1440 U3=2
1450 PRINT "LJJI DATOS INGRESADOS:"
1460 PRINT "JJ",I1,"< ALFA <",I2
1470 PRINT "JJ----- DELTA ALFA =",I3
1480 PRINT "JJ",K1,"< BETA <",K2
1490 PRINT "JJ----- DELTA BETA =",K3
1500 PRINT "JJ",L1,"< B' <",L2
1510 PRINT "JJ----- DELTA B' =",L3
1520 PRINT "JJJ. TODO CORRECTO? ";
1530 INPUT N$

```

```
1540 IF N#="S" OR N#="SI" THEN 1560
1550 GO TO 1000
1560 PRINT "LJJISE HA TERMINADO EL INGRESO DE DATOS"
1570 PRINT "JJIGGGG APLASTE [RETURN] PARA CONTINUAR"
1580 INPUT J#
1590 GO TO 4
```

```

1000 REM
1010 F$="3"
1020 REM
1030 REM ***** CALCULO DE LOS VALORES PROPIOS *****
1040 PRINT "LJJICALCULO DE VALORES PROPIOS"
1050 PRINT "I*****"
1060 REM
1070 PRINT "JJJINGRESE LA UNIDAD EN LA QUE SE ENCUENTRA"
1080 PRI "JJEL DISCO PARA ALMACENAMIENTO DE DATOS CALCULADOS (0,0 1)"
1090 INPUT U1
1100 CALL "UNIT",U1
1110 PRINT "LJJJIFORMA DE CALCULO"
1120 PRINT "I*****"
1130 PRINT "JJJ1.- SE CALCULAN Y ALMACENAN UNICAMENTE"
1140 PRINT "    LOS DATOS NO EXISTENTES EN ARCHIVO"
1150 PRINT "JJ2.- SE CALCULAN Y ALMACENAN TODOS LOS"
1160 PRINT "    DATOS, ACTUALIZANDO EL ARCHIVO"
1170 PRINT "JJJIESCOJA LA OPCION: "
1180 INPUT A9
1190 FOR IO=I1 TO I2 STEP I3
1200 FOR BO=K1 TO K2 STEP K3
1210 CLOSE
1220 GOSUB 330
1230 GO TO A9 OF 1240,1270
1240 CALL "FILE",U1,L$,K$
1250 IF K$="" THEN 1280
1260 GO TO 2820
1270 KILL L$
1280 CREATE L$;(L2-L1)/L3+1)*4+(2-U3)*3,0
1290 OPEN L$;1,"F",X$
1300 GO TO U3 OF 1310,1330
1310 WRITE #1:L1,L2,L3
1320 GO TO 1330
1330 FOR B1=L1 TO L2 STEP L3
1340 REM
1350 REM DEFINICION DE LA MATRIZ S1
1360 REM
1370 S1=0
1380 S1(1,1)=Y
1390 S1(2,2)=1
1400 S1(3,3)=-1
1410 S1(4,4)=Y
1420 REM
1430 REM DEFINICION DE LA MATRIZ S2
1440 REM
1450 S2=0
1460 S2(1,4)=-Y
1470 S2(4,1)=-Y
1480 REM
1490 REM DEFINICION DEL VECTOR M
1500 REM
1510 M(1)=-1.5
1520 M(2)=-0.5
1530 M(3)=0.5

```

```

1540 M(4)=1.5
1550 REM
1560 REM DEFINICION DE LAS MATRICES D1 Y D2.
1570 REM
1580 Y1=BO/2
1590 T1=SIN(Y1)
1600 T2=COS(Y1)
1610 T4=T1*T1
1620 T5=T2*T2
1630 T6=-T1
1640 REM
1650 D1(1,1)=T5*T2
1660 D2(1,1)=D1(1,1)
1670 D1(1,2)=T3*T5*T1
1680 D2(1,2)=-D1(1,2)
1690 D1(1,3)=T3*T2*T4
1700 D2(1,3)=D1(1,3)
1710 D1(1,4)=T4*T1
1720 D2(1,4)=T4*T6
1730 D1(2,1)=D2(1,2)
1740 D2(2,1)=-D1(1,2)
1750 D1(2,2)=T2*(1-3*T4)
1760 D2(2,2)=D1(2,2)
1770 D1(2,3)=T6*(1-3*T5)
1780 D2(2,3)=-D1(2,3)
1790 D1(2,4)=D1(1,3)
1800 D2(2,4)=D2(1,3)
1810 D1(3,1)=D1(2,4)
1820 D2(3,1)=D2(2,4)
1830 D1(3,2)=D2(2,3)
1840 D2(3,2)=D1(2,3)
1850 D1(3,3)=D1(2,2)
1860 D2(3,3)=D1(2,2)
1870 D1(3,4)=D1(1,2)
1880 D2(3,4)=D2(1,2)
1890 D1(4,1)=T4*T6
1900 D2(4,1)=-D1(4,1)
1910 D1(4,2)=D1(3,1)
1920 D2(4,2)=D2(3,1)
1930 D1(4,3)=D1(2,1)
1940 D2(4,3)=D2(2,1)
1950 D1(4,4)=D1(1,1)
1960 D2(4,4)=D2(1,1)
1970 REM
1980 REM MULTIPLICACION DE LA MATRIZ M POR LA MATRIZ D2. SE OBTIENE
1990 REM
2000 FOR I=1 TO 4
2010 FOR J=1 TO 4
2020 R1(I,J)=M(I)*D2(I,J)
2030 NEXT J
2040 NEXT I
2050 REM
2060 REM MULTIPLICACION DE LA MATRIZ D1 POR LA MATRIZ R1. SE OBTIENE
2070 REM

```

```

2080 S=0
2090 FOR I=1 TO 4
2100 FOR J=1 TO 4
2110 FOR Z=1 TO 4
2120 S(I,J)=S(I,J)+D1(I,Z)*R1(Z,J)
2130 NEXT Z
2140 NEXT J
2150 NEXT I
2160 REM
2170 REM
2180 REM ***** ROTACION DE LA MATRIZ DE S EN ALFA GRADOS *****
2190 REM ***** EL RESULTADO SE ENCUENTRA EN [D3 + JD4] *****
2200 REM
2210 FOR I=1 TO 4
2220 FOR J=1 TO 4
2230 D3(I,J)=COS((I-J)*10)*S(I,J)
2240 D4(I,J)=SIN((I-J)*10)*S(I,J)
2250 NEXT J
2260 NEXT I
2270 REM
2280 REM ***** MULTIPLICACION DE LA MATRIZ (S1 + JS2) *****
2290 REM ***** POR D3 + JD4, EL RESULTADO ES R1 + JR2 *****
2300 REM
2310 R1=0
2320 R2=0
2330 FOR I=1 TO 4
2340 FOR J=1 TO 4
2350 FOR K=1 TO 4
2360 R1(I,J)=R1(I,J)+S1(I,K)*D3(K,J)-S2(I,K)*D4(K,J)
2370 R2(I,J)=R2(I,J)+S1(I,K)*D4(K,J)+S2(I,K)*D3(K,J)
2380 NEXT K
2390 NEXT J
2400 NEXT I
2410 REM
2420 REM MULTIPLICACION DE LA MATRIZ (R1+JR2) POR (S1-JS2), EL RESUL
2430 REM TADO ES (R+JS)
2440 REM
2450 R=0
2460 S=0
2470 FOR I=1 TO 4
2480 FOR J=1 TO 4
2490 FOR K=1 TO 4
2500 R(I,J)=R(I,J)+R1(I,K)*S1(K,J)+R2(I,K)*S2(K,J)
2510 S(I,J)=S(I,J)-R1(I,K)*S2(K,J)+R2(I,K)*S1(K,J)
2520 NEXT K
2530 NEXT J
2540 NEXT I
2550 REM
2560 REM EN EL SIGUIENTE LAZO SE DAN VALORES AL PARAMETRO B QUE SE E
2570 REM CUENTRA EN LA VARIABLE B1
2580 REM
2590 FOR B1=L1 TO L2 STEP L3
2600 B2=B1*C1
2610 REM

```

```

2620 REM MULTIPLICACION DE (R+JS) POR EL PARAMETRO B QUE SE ENCUENTRA
2630 REM EN LA VARIABLE B1. EL RESULTADO ES (A1+JA2),
2640 REM
2650 FOR I=1 TO 4
2660 FOR J=1 TO 4
2670 A1(I,J)=R(I,J)*B2
2680 A2(I,J)=S(I,J)*B2
2690 NEXT J
2700 NEXT I
2710 REM SUMA DE LA MATRIZ (A1+JA2) Y LA MATRIZ H0
2720 REM
2730 A1(2,2)=A1(2,2)+C
2740 A1(3,3)=A1(3,3)+C
2750 REM
2760 REM CALCULO DE LOS VALORES PROPIOS DE LA MATRIZ (A1+JA2) UTILIZAN
2770 REM DO LA SUBROUTINA VALORPROPH
2780 REM
2790 GOSUB 2900
2800 WRITE #1,E
2810 NEXT B1
2820 NEXT B0
2830 NEXT I0
2840 CLOSE
2850 CALL "UNIT",U0
2860 PRINT "LGGGGSE HA TERMINADO EL CALCULO DE VALORES PROPIOS"
2870 PRINT "JJAPLASTE [RETURN] PARA CONTINUAR"
2880 INPUT Q#
2890 GO TO 160
2900 REM VALORPROPH
2910 REM
2920 REM SUB. PARA EVALUAR V.P DE MATRIZ HERMITIANA
2930 REM
2940 REM N -- TAMANO DE LA MATRIZ
2950 REM A1 -- MATRIZ DE PARTES REALES (N,N)
2960 REM A2 -- MATRIZ DE PARTES IMAG. (N,N)
2970 REM
2980 REM VALORES PROPIOS QUEDAN EN VECTOR E1 (DIMENSION N)
2990 REM
3000 REM TOMADO DE CINTA DE MATH., VOL 2, DE TEKTRONIX
3010 REM ING. EFRAIN DEL PINO V.
3020 REM 27 DE ABRIL DE 1982
3030 REM
3040 REM ARCH. 8 EN CINTA MATH 2, VOL 2 UF
3050 P9=11
3060 REM *****
3070 IF INT(P9/10)<>1 THEN 3550
3080 REM *****
3090 REM EIGENVALUE ROUTINE
3100 REM PRINT "LDO YOU WANT TO SEE THE EIGENVECTORS ";
3110 REM PRINT "IN ADDITION TO THE EIGENVALUES: ";
3120 P#="N"
3130 IF P#="Y" THEN 3170
3140 IF P#<>"N" THEN 3100
3150 Q3=0

```

```

3160 GO TO 3360
3170 Q3=9
3180 REM *****
3190 REM REDUCES A COMPLEX HERMITIAN MATRIX TO
3200 REM A REAL SYMMETRIC TRIDIAGONAL MATRIX
3210 REM
3220 REM INPUT:
3230 REM N - ORDER OF THE MATRIX
3240 REM A1,A2 - REAL & IMAGINARY PARTS OF THE
3250 REM COMPLEX HERMITIAN MATRIX
3260 REM OUTPUT:
3270 REM A1,A2 - CONTAIN INFORMATION ABOUT THE
3280 REM UNITARY TRANSFORMATIONS DONE
3290 REM E - CONTAINS DIAGONAL ELEMENTS OF
3300 REM THE TRIDIAGONAL MATRIX
3310 REM Q1 - CONTAINS SUBDIAGONAL ELEMENTS OF THE TRI-
3320 REM DIAGONAL MATRIX IN ITS LAST N-1 PLACES
3330 REM Q2 - CONTAINS INFORMATION ABOUT THE
3340 REM UNITARY TRANSFORMATIONS DONE
3350 REM
3360 DELETE Q1,Q2,E,E1,E2
3370 DIM Q1(N),Q2(2,N),E(N),E1(N,N)
3380 Q2(1,N)=1
3390 Q2(2,N)=0
3400 FOR P1=1 TO N
3410 E(P1)=A1(P1,P1)
3420 NEXT P1
3430 FOR P6=1 TO N
3440 P1=N+1-P6
3450 P4=P1-1
3460 Q7=0
3470 Q4=0
3480 IF P4<1 THEN 3560
3490 REM SCALE ROW
3500 FOR P3=1 TO P4
3510 Q4=Q4+ABS(A1(P1,P3))+ABS(A2(P1,P3))
3520 NEXT P3
3530 IF Q4=0 THEN 3580
3540 Q2(1,P4)=1
3550 Q2(2,P4)=0
3560 Q1(P1)=0
3570 GO TO 4230
3580 P=1/Q4
3590 FOR P3=1 TO P4
3600 A1(P1,P3)=A1(P1,P3)*P
3610 A2(P1,P3)=A2(P1,P3)*P
3620 Q7=Q7+A1(P1,P3)*A1(P1,P3)+A2(P1,P3)*A2(P1,P3)
3630 NEXT P3
3640 Q9=SQR(Q7)
3650 Q1(P1)=Q4*Q9
3660 P8=SQR(A1(P1,P4)*A1(P1,P4)+A2(P1,P4)*A2(P1,P4))
3670 REM FORM NEXT DIAGONAL ELEMENT OF MATRIX T
3680 IF P8=0 THEN 3780
3690 P=1/P8

```



```

3700 Q2(1,F4)=(A2(P1,F4)*Q2(2,P1)-A1(P1,F4)*Q2(1,P1))*
3710 Q5=(A1(P1,F4)*Q2(2,P1)+A2(P1,F4)*Q2(1,P1))*P
3720 Q7=Q7+F8*Q9
3730 Q9=1+Q9*P
3740 A1(P1,P4)=Q9*A1(P1,P4)
3750 A2(P1,P4)=Q9*A2(P1,P4)
3760 IF P4=1 THEN 4180
3770 GO TO 3810
3780 Q2(1,F4)=-Q2(1,P1)
3790 Q5=Q2(2,P1)
3800 A1(P1,P4)=Q9
3810 P8=0
3820 P=1/Q7
3830 FOR P2=1 TO P4
3840 Q9=0
3850 Q8=0
3860 REM FORM ELEMENT OF AKU
3870 FOR P3=1 TO P2
3880 Q9=Q9+A1(P2,F3)*A1(P1,F3)+A2(P2,P3)*A2(P1,P3)
3890 Q8=Q8-A1(P2,F3)*A2(P1,F3)+A2(P2,P3)*A1(P1,P3)
3900 NEXT P3
3910 P7=P2+1
3920 IF P4<P7 THEN 3980
3930 FOR P3=P7 TO P4
3940 Q9=Q9+A1(P3,F2)*A1(P1,P3)-A2(P3,P2)*A2(P1,P3)
3950 Q8=Q8-A1(P3,F2)*A2(P1,F3)-A2(P3,P2)*A1(P1,P3)
3960 NEXT P3
3970 REM FORM ELEMENT OF P
3980 Q1(P2)=Q9*P
3990 Q2(2,P2)=Q8*P
4000 P8=P8+Q1(P2)*A1(P1,P2)-Q2(2,P2)*A2(P1,P2)
4010 NEXT P2
4020 Q6=0,5*P8*P
4030 REM FORM REDUCED A
4040 FOR P2=1 TO P4
4050 P8=A1(P1,P2)
4060 Q9=Q1(P2)-Q6*P8
4070 Q1(P2)=Q9
4080 P9=-A2(P1,P2)
4090 Q8=Q2(2,P2)-Q6*P9
4100 Q2(2,P2)=-Q8
4110 FOR P3=1 TO P2
4120 A1(P2,P3)=A1(P2,F3)-P8*Q1(P3)-Q9*A1(P1,P3)
4130 A1(P2,P3)=A1(P2,P3)+P9*Q2(2,P3)+Q8*A2(P1,P3)
4140 A2(P2,P3)=A2(P2,F3)-P8*Q2(2,P3)-Q9*A2(P1,P3)
4150 A2(P2,P3)=A2(P2,P3)-P9*Q1(P3)-Q8*A1(P1,P3)
4160 NEXT P3
4170 NEXT P2
4180 FOR P3=1 TO P4
4190 A1(P1,P3)=Q4*A1(P1,P3)
4200 A2(P1,P3)=Q4*A2(P1,P3)
4210 NEXT P3
4220 Q2(2,P4)=-Q5
4230 Q6=E(P1)

```

```

4240 E(P1)=A1(P1,P1)
4250 A1(P1,P1)=Q6
4260 A2(P1,P1)=Q4*Q4*Q7
4270 NEXT P6
4280 GO TO 4540
4290 REM BRING IN NEXT PROGRAM OVERLAY
4300 P9=21
4310 GO TO 3550
4320 REM          ARCH. 9      MATH 2, VOL 2          VP1
4330 REM *****
4340 IF INT(P9/10) <> 2 THEN 3550
4350 REM *****
4360 REM FINDS THE EIGENVALUES AND EIGENVECTORS OF A SYMMETRIC
4370 REM TRIDIAGONAL MATRIX BY THE IMPLICIT QL METHOD
4380 REM
4390 REM INPUT:
4400 REM N - ORDER OF THE MATRIX
4410 REM E - CONTAINS DIAGONAL ELEMENTS OF THE TRIDIAGONAL MATRIX
4420 REM Q1 - CONTAINS THE SUBDIAGONAL ELEMENTS OF THE
4430 REM TRIDIAGONAL MATRIX IN ITS LAST N-1 PLACES
4440 REM E1 - CONTAINS IDENTITY MATRIX
4450 REM OUTPUT:
4460 REM E - CONTAINS EIGENVALUES IN ASCENDING ORDER. ON ERROR EXIT
4470 REM EIGENVALUES ARE CORRECT BUT UNORDERED FOR 1 THRU Q7
4480 REM E1 - CONTAINS ORTHONORMAL EIGENVECTORS OF SYMMETRIC TRI-
4490 REM DIAGONAL MATRIX. IF ERROR EXIT OCCURS, E1 CONTAINS
4500 REM EIGENVECTORS WITH EIGENVALUES IN E.
4510 REM Q7 - ZERO FOR NORMAL RETURN OR J IF THE J-TH EIGEN-
4520 REM VALUE HAS NOT BEEN DETERMINED AFTER 30 ITERATIONS
4530 REM
4540 E1=0
4550 FOR P1=1 TO N
4560 E1(P1,P1)=1
4570 NEXT P1
4580 Q7=0
4590 Q6=1.0E-14
4600 IF N=1 THEN 5440
4610 FOR P1=2 TO N
4620 Q1(P1-1)=Q1(P1)
4630 NEXT P1
4640 Q1(N)=0
4650 FOR P4=1 TO N
4660 P2=0
4670 REM LOOK FOR SMALL SUB DIAGONAL ELEMENT
4680 FOR P5=P4 TO N
4690 IF P5=N THEN 4720
4700 IF ABS(Q1(P5)) <= Q6*(ABS(E(P5))+ABS(E(P5+1))) THEN 4720
4710 NEXT P5
4720 P=E(P4)
4730 IF P5=P4 THEN 5190
4740 IF P2=30 THEN 5410
4750 P2=P2+1
4760 REM FORM SHIFT
4770 Q9=(E(P4+1)-P)/(2*Q1(P4))

```

```

4780 Q4=SQR(Q9*Q9+1)
4790 Q8=ABS(Q4)
4800 IF Q9=>0 THEN 4820
4810 Q8=-Q8
4820 Q9=E(P5)-P+Q1(P4)/(Q9+Q8)
4830 Q5=1
4840 Q=1
4850 F=0
4860 P7=P5-P4
4870 FOR P6=1 TO P7
4880 P1=P5-P6
4890 P8=Q5*Q1(P1)
4900 P9=Q*Q1(P1)
4910 IF ABS(P8)<ABS(Q9) THEN 4980
4920 Q=Q9/P8
4930 Q4=SQR(Q*Q+1)
4940 Q1(P1+1)=P8*Q4
4950 Q5=1/Q4
4960 Q=Q*Q5
4970 GO TO 5030
4980 Q5=P8/Q9
4990 Q4=SQR(Q5*Q5+1)
5000 Q1(P1+1)=Q9*Q4
5010 Q=1/Q4
5020 Q5=Q5*Q
5030 Q9=E(P1+1)-P
5040 Q4=(E(P1)-Q9)*Q5+2*Q*P9
5050 P=Q5*Q4
5060 E(P1+1)=Q9+P
5070 Q9=Q*Q4-P9
5080 REM FORM VECTOR
5090 FOR P3=1 TO N
5100 P8=E1(P3,P1+1)
5110 E1(P3,P1+1)=Q5*E1(P3,P1)+Q*P8
5120 E1(P3,P1)=Q*E1(P3,P1)-Q5*P8
5130 NEXT P3
5140 NEXT P6
5150 E(P4)=E(P4)-P
5160 Q1(P4)=Q9
5170 Q1(P5)=0
5180 GO TO 4680
5190 NEXT P4
5200 REM ORDER EIGENVALUES AND EIGENVECTORS
5210 FOR P6=2 TO N
5220 P1=P6-1
5230 P3=P1
5240 P=E(P1)
5250 FOR P2=P4 TO N
5260 IF E(P2)=>P THEN 5290
5270 P3=P2
5280 P=E(P2)
5290 NEXT P2
5300 IF P3=P1 THEN 5380
5310 E(P3)=E(P1)

```

```
5320 E(P1)=P
5330 FOR P2=1 TO N
5340 P=E1(P2,P1)
5350 E1(P2,P1)=E1(P2,P3)
5360 E1(P2,P3)=P
5370 NEXT P2
5380 NEXT P1
5390 GO TO 5440
5400 REM SET ERROR-NO CONVERGENCE TO EIGENVALUE AFTER 30 ITERATIONS
5410 Q7=P4
5420 PRINT "ERROR - NO CONVERGENCE AFTER 30"
5430 PRINT "ITERATIONS FOR EIGENVALUE # " ; Q7 ; "J"
5440 RETURN
5450 PRINT "EIGENVALUES"
5460 FOR P1=1 TO N
5470 PRINT E(P1)
5480 NEXT P1
5490 IF Q3=9 THEN 5570
5500 REM PRINT "DO YOU WANT THE EIGENVECTORS, NOW? ";
5510 P$="N"
5520 IF P$="Y" THEN 5570
5530 IF P$<>"N" THEN 5500
5540 DELETE Q1,Q2,E,E1
5550 RETURN
5560 REM BRING IN NEXT PROGRAM OVERLAY
5570 P9=31
5580 GO TO 3550
```

```

1000 REM
1010 F#="4"
1020 REM
1030 REM ***** IMPRESION DE DATOS PROCESADOS *****
1040 REM
1050 DELETE E,E9
1060 DIM E9(6),E(4)
1070 REM
1080 PRINT "LJJIIMPRESION DE RESULTADOS"
1090 PRINT "JI*****"
1100 PRINT "JJJINGRESE LA UNIDAD EN LA QUE SE ENCUENTRA"
1110 PRINT "JEL DISCO CON LOS DATOS PROCESADOS: ";
1120 INPUT U1
1130 CALL "UNIT",U1
1140 PRINT "LJJJICLASE DE IMPRESION"
1150 PRINT "I*****"
1160 PRINT "JJ1,- PARA UN SOLO VALOR DE ALFA Y BETA"
1170 PRINT "JJ2,- PARA UN RANGO DE VALORES DE ALFA Y BETA"
1180 PRINT "JJJIESCOJA LA OPCION: ";
1190 INPUT K9
1200 GO TO K9 OF 1210,1280
1210 PRINT "LJJJINGRESE EL VALOR DE ALFA Y EL DE BETA (EN ESE ORDEN):"
1220 INPUT I1,K1
1230 I2=I1
1240 K2=K1
1250 I3=10
1260 K3=10
1270 GO TO 1340
1280 PRINT "LJJJINGRESE LOS VALORES MINIMO, MAXIMO E INCRE-"
1290 PRINT "JMENTO DE ALFA (EN ESE ORDEN): ";
1300 INPUT I1,I2,I3
1310 PRINT "JJINGRESE LOS VALORES MINIMO, MAXIMO E INCRE-"
1320 PRINT "JMENTO DE BETA (EN ESE ORDEN): ";
1330 INPUT K1,K2,K3
1340 PRINT "JJDESEA IMPRESION EN PAPEL ? (SI O NO) ";
1350 INPUT H#
1360 IF H#="S" OR H#="SI" THEN 1390
1370 W9=32
1380 GO TO 1420
1390 W9=51
1400 PRINT "JALISTE EL IMPRESOR (RETURN PARA CONTINUAR)GGG";
1410 INPUT Y#
1420 FOR I0=I1 TO I2 STEP I3
1430 FOR B0=K1 TO K2 STEP K3
1440 FOR U3=1 TO 2
1450 GOSUB 330
1460 CALL "FILE",U1,L#,K#
1470 IF K#="" THEN 2010
1480 OPEN L#;1,"R",X#
1490 K9=0
1500 GO TO U3 OF 1510,1530
1510 READ #1:L1,L2,L3
1520 GO TO 1560
1530 L1=0

```

```

1540 L2=1
1550 L3=0.025
1560 FOR B1=L1 TO L2 STEP L3
1570 IF K9=0 THEN 1590
1580 IF K9<50 THEN 1880
1590 PRINT @W9: USING 1600:
1600 IMAGE/ "LJ VALORES PROPIOS DE FRECUENCIA (EN GHz) DE RESONANCIA" , S
1610 PRINT @W9: USING 1620:
1620 IMAGE " PARAMAGNETICA DE ELECTRONES EN RUBI, "
1630 PRINT @W9: USING 1640:
1640 IMAGE " EN FUNCION DE LOS ANGULOS DE GIRO ALFA Y BETA (EN GRADOS) " ,
1650 PRINT @W9: USING 1660:
1660 IMAGE " Y DEL CAMPO MAGNETICO B' (EN TESLA) "
1670 PRINT @W9: USING 1680:
1680 IMAGE " LAMBDA1 --- VALORES PROPIOS DE FRECUENCIA" , S
1690 PRINT @W9: USING 1700:
1700 IMAGE 15X, "Ek = LAMBDA1 - LAMBDAJ"
1710 PRINT @W9: USING 1720:
1720 IMAGE 107( " _ " )
1730 PRINT @W9: USING 1740: IO, BO
1740 IMAGE 7/41( "*" ) : ALFA = "FD" BETA = "FD" "40( "*" ) /
1750 PRINT @W9: USING 1760:
1760 IMAGE 2X "B' " 3X, S
1770 FOR K=1 TO 4
1780 PRINT @W9: USING 1790: K
1790 IMAGE 2X "LAMBDA " FD, S
1800 NEXT K
1810 FOR K=1 TO 6
1820 PRINT @W9: USING 1830: K
1830 IMAGE 5X "E " FD 3X, S
1840 NEXT K
1850 PRINT @W9:
1860 PRINT @W9: USING 1870:
1870 IMAGE 107( " - " ) /
1880 K9=K9+1
1890 READ #1: E
1900 E9(1)=E(2)-E(1)
1910 E9(2)=E(3)-E(1)
1920 E9(3)=E(3)-E(2)
1930 E9(4)=E(4)-E(1)
1940 E9(5)=E(4)-E(2)
1950 E9(6)=E(4)-E(3)
1960 PRINT @W9: USING "1D,3D,2X,10(5D,4D)": B1,E,E9
1970 IF K9=50 THEN 1990
1980 GO TO 2000
1990 K9=0
2000 NEXT B1
2010 NEXT U3
2020 CLOSE
2030 NEXT BO
2040 NEXT IO
2050 CLOSE
2060 PRINT "JJSE TERMINO IMPRESION DE RESULTADOS"
2070 PRINT "JJAPLASTE [RETURN] PARA CONTINUARGGGG"

```

2080 INPUT H#  
2090 CALL "UNIT",UO  
2100 GO TO 180

```

1000 REM
1010 F#="5"
1020 REM
1030 REM ***** INGRESO DE DATOS EXPERIMENTALES *****
1040 REM
1050 PRINT "LJINGRESO DE DATOS EXPERIMENTALES"
1060 PRINT "I*****"
1070 PRINT "JIINGRESE NOMBRE DEL ARCHIVO EN EL QUE SE VA A"
1080 PRINT "IJALMACENAR LOS DATOS (1 A 6 CARACTERES) "
1090 PRINT "IJFORMATO MXXX/R Y: M --- MUESTRA"
1100 PRINT "I XXX --- # DE LA MUESTRA"
1110 PRINT "I RY --- # DE CURVA DE RESONANCIA"
1120 PRINT "JJIARCHIVO:"
1130 INPUT L#
1140 REM
1150 L#="@&L#
1160 CALL "FILE",O,L#,K#
1170 IF K#="" THEN 1230
1180 PRINT "JJIESTE ARCHIVO CONTIENE DATOS. DESEA DESTRUIRLO ?"
1190 INPUT H#
1200 IF H#<>"S" AND H#<>"SI" THEN 1020
1210 REM
1220 KILL L#
1230 REM
1240 CREATE L#;30,0
1250 REM
1260 PAGE
1270 PRINT "LJESCRIBA: CAMPO MAGNETICO (EN TESLA) Y FRECUENCIA (EN GHz)
1280 PRINT "J (EN ESE ORDEN PARA UNA SOLA RESONANCIA"
1290 PRINT "JINGRESE 1000*1000 PARA TERMINAR"
1300 DELETE X,Y
1310 DIM X(200),Y(200),Z(200)
1320 I=0
1330 PRINT "JAPLASTE [RETURN] PARA CONTINUAR"
1340 INPUT Z#
1350 PRINT "LJ B' (Tesla) F(GHz)"
1360 I=I+1
1370 PRINT "J"
1380 INPUT X(I)
1390 Z(I)=I
1400 PRINT "K"
1410 INPUT Y(I)
1420 IF X(I)<>1000 AND Y(I)<>1000 THEN 1360
1430 PRINT "LJSE HA INGRESADO ";I-1;" PUNTOS"
1440 DIM X(I-1),Y(I-1)
1450 PRINT "JJDESEA CORREGIR ALGUN DATO ? (SI O NO) "
1460 INPUT H#
1470 IF H#<>"S" AND H#<>"SI" THEN 1590
1480 PRINT "# DE DATO B' [TESLA] F [GHz]"
1490 FOR L=1 TO I-1
1500 PRINT Z(L),X(L),Y(L)
1510 NEXT L
1520 PRINT "JJEN QUE LUGAR SE ENCUENTRA EL DATO?: "
1530 INPUT K

```



```

1540 PRINT "JJINGRESE EL PAR ORDENADO CORRESPONDIENTE: ";
1550 INPUT X(K),Y(K)
1560 PRINT "JJDESEA CORRÉGIR OTRO DATO? (SI O NO): ";
1570 INPUT K$
1580 IF K$="S" OR K$="SI" THEN 1520
1590 PRINT "# DE DATO      B [TESLA]      FIGH=zJ"
1600 FOR L=1 TO I-1
1610 PRINT Z(L),X(L),Y(L)
1620 NEXT L
1630 PRINT "JJESTA TODO CORRECTO? (SI O NO): ";
1640 INPUT K$
1650 IF K$="S" OR K$="SI" THEN 1670
1660 GO TO 1450
1670 PRINT "EL EJE HORIZONTAL ESTA EN AMPERIOS?"
1680 INPUT Q$
1690 IF Q$="N" OR Q$="NO" THEN 1850
1700 DELETE CO
1710 DIM CO(6)
1720 OPEN "@MCAL/COEF";1,"R",X$
1730 READ #1:CO
1740 CLOSE
1750 FOR D=1 TO I-1
1760 X1=CO(6)
1770 IF X(D)<=0.024 THEN 1830
1780 FOR E=5 TO 1 STEP -1
1790 X1=X1*X(D)+CO(E)
1800 NEXT E
1810 X(D)=X1
1820 IF X(D)=>0.023763250184 THEN 1840
1830 X(D)=0.023763250184/0.024*X(D)
1840 NEXT D
1850 OPEN L$;1,"F",X$
1860 WRITE #1:I-1
1870 FOR J=1 TO I-1
1880 WRITE #1:X(J),Y(J)
1890 NEXT J
1900 CLOSE
1910 PRINT "LJSE HA TERMINADO INGRESO DE DATOSGGG"
1920 PRINT "JJAPLASTE [RETURN] PARA CONTINUAR"
1930 INPUT K$
1940 GO TO 160

```

```

1000 REM
1010 F$="6"
1020 REM ***** IMPRESION DE RESULTADOS EXPERIMENTALES *****
1030 REM
1040 PRINT "LJJJINGRESE LA UNIDAD DEL DISCO DE DATOS"
1050 INPUT U1
1060 PRINT "LJJIIMPRESION DE RESULTADOS EXPERIMENTALES"
1070 PRINT "I*****"
1080 PRINT "JJINGRESE NOMBRE DEL ARCHIVO (1 A 6 CARACTERES)"
1090 INPUT L$
1100 L$="@ "&L$
1110 CALL "FILE",U1,L$,K$
1120 IF K$="" THEN 1170
1130 PRINT "EL ARCHIVO DE DATOS ";L$;" NO EXISTE"
1140 PRINT "JJAFLASTE [RETORN] PARA CONTINUAR"
1150 INPUT K$
1160 GO TO 1160
1170 OPEN L$;1,"R",X$
1180 READ #1;I6
1190 DELETE X,Y
1200 DIM X(I6),Y(I6)
1210 FOR I=1 TO I6
1220 READ #1:X(I),Y(I)
1230 NEXT I
1240 CLOSE
1250 PAGE
1260 PRINT "JJDESEA IMPRESION EN PAPEL ?. (SI O NO)";
1270 INPUT H$
1280 IF H$="S" OR H$="SI" THEN 1310
1290 W9=32
1300 GO TO 1320
1310 W9=51
1320 P7=LEN(L$)
1330 T$=SEG(L$,3,P7)
1340 K7=0
1350 FOR I=1 TO INT(I6/3)
1360 IF K7<>0 THEN 1430
1370 PRINT @W9:"LJJDATOS EXPERIMENTALES DE LA MUESTRA ";T$;
1380 PRINT @W9:"JFRECUENCIA F(GHz) Y CAMPO MAGNETICO B' (TESLA)";
1390 PRINT @W9: USING 1400:
1400 IMAGE //107("-")/
1410 PRINT @W9: USING 1420:
1420 IMAGE //7X"B'"9X"F"29X"B'"9X"F"29X"B'"9X"F"
1430 PRINT @W9: USING 1450:X(I),Y(I),X(I+INT(I6/3)),Y(I+INT(I6/3));
1440 PRINT @W9: USING 1460:X(I+2*INT(I6/3)),Y(I+2*INT(I6/3))
1450 IMAGE 5X,2(1D,3D,1X,5D,4D,25X),S
1460 IMAGE1D,3D,1X,5D,4D
1470 K7=K7+1
1480 IF K7<>50 THEN 1500
1490 K7=0
1500 NEXT I
1510 I5=I6-3*INT(I6/3)
1520 GO TO I5 OF 1540,1570
1530 GO TO 1590

```

```
1540 PRINT @W9: USING 1550:X(I6),Y(I6):
1550 IMAGE / 5X,1D,3D,1X,5D,4D
1560 GO TO 1590
1570 PRINT @W9: USING 1580:X(I6-1),Y(I6-1),X(I6),X(I6)
1580 IMAGE / 5X2(1D,3D,1X,5D,4D,25X)
1590 PRINT "JJSE HA TERMINADO LA IMPRESION DE RESULTADOS"
1600 PRINT @W9: USING 1610:
1610 IMAGE//107("-")
1620 PRINT "JJAPLASTE [RETURN] PARA CONTINUAR"
1630 INPUT K#
1640 GO TO 160
```

```

1000 REM
1010 F#="7"
1020 REM
1030 REM ***** GRAFIZACION DE LA CURVA DE CALIBRACION *****
1040 PRINT "LJJJINGRESE UNIDAD DEL DISCO DE DATOS"
1050 INPUT U1
1060 CALL "UNIT",U1
1070 PRINT "LJJJINGRESE EL NOMBRE DEL ARCHIVO DE DATOS"
1080 INPUT L#
1090 L#="@&L#"
1100 PRINT "JJJTIENE DATOS DE LA REGRESION? (SI O NO): "
1110 INPUT K#
1120 D#="L#&R#"
1130 PRINT "LJJIGRAFIZACION DE LA CURVA DE CALIBRACION"
1140 PRINT "I*****"
1150 PRINT "JUEL NOMBRE DEL ARCHIVO PARA CALIBRACION ES ";L#
1160 OPEN D#;1,"R",X#
1170 READ #1;I6
1180 DELETE X,Y
1190 DIM X(I6),Y(I6)
1200 FOR I=1 TO I6
1210 READ #1;X(I),Y(I)
1220 NEXT I
1230 CLOSE
1240 IF K#="N" OR K#="NO" THEN 1330
1250 OPEN D#;1,"R",X#
1260 READ #1;I7
1270 DELETE X1,Y1
1280 DIM X1(I7),Y1(I7)
1290 FOR I=1 TO I7
1300 READ #1;X1(I),Y1(I)
1310 NEXT I
1320 CLOSE
1330 PRINT "LJJJUICLASES DE GRAFIZACION"
1340 PRINT "I*****"
1350 PRINT "JJJJJ1.- GRAFIZACION EN PANTALLA"
1360 PRINT "JJ2.- GRAFIZACION EN PAPEL"
1370 PRINT "JJ3.- FIN DE GRAFIZACION"
1380 PRINT "JJJJIESCOJA LA OPCION --- ";
1390 INPUT T
1400 GO TO T OF 1490,1460,160
1410 PRINT "LJJJGRAFIZACION DE LA CURVA DE CALIBRACION CONCLUIDA"
1420 PRINT "JJJAPLASTE [RETURN] PARA CONTINUAR"
1430 INPUT X#
1440 CALL "UNIT",U0
1450 GO TO 4
1460 W9=1
1470 W8=150
1480 GO TO 1510
1490 W9=32
1500 W8=130
1510 PRINT "LJJJIESCALAS DEL GRAFICO"
1520 PRINT "I*****"
1530 PRINT "JJJ1.- HORIZONTAL --- DE 0 A 0.7 [A]"

```

```

1540 PRINT " VERTICAL --- DE 0 A 0.6 [TESLA]"
1550 PRINT " JJ2:-- HORIZONTAL --- DE 0 A 2.4 [A]"
1560 PRINT " VERTICAL --- DE 0 A 6.2 [TESLA]"
1570 PRINT " JJ3.-- OPCIONAL"
1580 PRINT " JJJIESCOJA EL NUMERO"
1590 INPUT A0
1600 GO TO A0 OF 1610,1680,1750
1610 W1=0
1620 W2=0.7
1630 W3=0
1640 W4=0.6
1650 D1=0.1
1660 D2=0.1
1670 GO TO 1880
1680 W1=0
1690 W2=2.4
1700 W3=0
1710 W4=0.62
1720 D1=0.2
1730 D2=0.1
1740 GO TO 1880
1750 PRINT "LJJJINGRESE EL VALOR MINIMO DE INTENSIDAD ";
1760 INPUT W1
1770 PRINT "JJJINGRESE EL VALOR MAXIMO DE INTENSIDAD ";
1780 INPUT W2
1790 PRINT "JJJINGRESE EL VALOR MINIMO DE CAMPO MAGNETICO ";
1800 INPUT W3
1810 PRINT "JJJINGRESE EL VALOR MAXIMO DE CAMPO MAGNETICO ";
1820 INPUT W4
1830 PRINT "JJJINGRESE EL INTERVALO DE MARCAS EN EL EJE DE INTENSIDAD ";
1840 INPUT D1
1850 PRINT "JJJINGRESE EL INTERV. DE MARCAS EN EL EJE DE CAMPO MAGNET. ";
1860 INPUT D2
1870 PAGE
1880 GOSUB 2700
1890 PRINT "JJIINGRESE LA MARCA --- ";
1900 INPUT C$
1910 PRINT "JJDESEA EJES? ";
1920 INPUT O$
1930 IF O$="N" OR O$="NO" THEN 2510
1940 PRINT "LJJJINGRESE EL TITULOJJ"
1950 INPUT H$
1960 PAGE
1970 I$=""
1980 FOR I=1 TO LEN(H$)
1990 I$=I$&"-"
2000 NEXT I
2010 H=LEN(H$)
2020 MOVE @W9:(W2+W1)/2,W4
2030 FOR I=1 TO H/2
2040 PRINT @W9:" ";
2050 NEXT I
2060 PRINT @W9:"KKK";
2070 PRINT @W9:H$;

```

```

2080 FOR I=1 TO H
2090 PRINT @W9:" ";
2100 NEXT I
2110 PRINT @W9:"J";
2120 PRINT @W9:I#;
2130 AXIS @W9:D1,D2,W1,W3
2140 FOR I=W1 TO W2 STEP D1
2150 W#=STR(I)
2160 MOVE @W9:I,W1
2170 PRINT @W9:"J";
2180 FOR K=1 TO LEN(W#)/2
2190 PRINT @W9:" ";
2200 NEXT K
2210 PRINT @W9:W#
2220 NEXT I
2230 FOR I=W3 TO W4 STEP D2
2240 W#=STR(I)
2250 MOVE @W9:W3,I
2260 PRINT @W9:" ";
2270 FOR K=1 TO LEN(W#)
2280 PRINT @W9:" ";
2290 NEXT K
2300 PRINT @W9:W#
2310 NEXT I
2320 MOVE @W9:(W1+W2)/2,W1
2330 PRINT @W9:"JJJJ";
2340 N#="INTENSIDAD DE CORRIENTE EN [A]"
2350 FOR I=1 TO LEN(N#)/2
2360 PRINT @W9:" ";
2370 NEXT I
2380 PRINT @W9:N#
2390 N#="CAMPO MAGNETICO EN TESLA"
2400 MOVE @W9:W3,(W3+W4)/2
2410 PRINT @W9:" ";
2420 FOR K=1 TO LEN(N#)/2
2430 PRINT @W9:"K";
2440 NEXT K
2450 DELETE X#
2460 FOR I=1 TO LEN(N#)
2470 X#=SEG(N#,I,1)
2480 PRINT @W9:X#;"J";
2490 NEXT I
2500 HOME
2510 IF K#="N" OR K#="NO" THEN 2580
2520 MOVE @W9:X1(1),Y1(1)
2530 DRAW @W9:X1,Y1
2540 HOME
2550 PRINT "PUNTOS EXP.?"
2560 INPUT J#
2570 IF J#<>"SI" AND J#<>"S" THEN 2660
2580 FOR I=1 TO I6
2590 MOVE @W9:X(I),Y(I)
2600 IF C#<>"." THEN 2630
2610 DRAW @W9:X(I),Y(I)

```

```
2620 GO TO 2640
2630 GOSUB 2760
2640 NEXT I
2650 HOME
2660 PRINT "GRAFICO CONCLUIDO"
2670 PRINT "APLASTE [RETURN] PARA CONTINUAR"
2680 INPUT X$
2690 GO TO 1330
2700 REM
2710 REM ***** SUBROUTINA DE WINDOW Y VIEWPORT *****
2720 REM
2730 VIEWPORT 9*1.79,W8-2*1.79,5*2.82,100-5*2.82
2740 WINDOW W1,W2,W3,W4
2750 RETURN
2760 SCALE 1,1
2770 RMOVE -0.5*1.55,-0.5*1.88
2780 PRINT @W9;C$;
2790 RMOVE 0.5*1.55,0.5*1.88
2800 GOSUB 2700
2810 RETURN
```

```

1000 REM
1010 F#="B"
1020 REM
1030 REM ***** GRÁFICOS DE VALORES PROCESADOS *****
1040 REM
1050 PRINT "LJJIINGRESE LA UNIDAD DEL DISCO DE DATOS"
1060 INPUT U1
1070 CALL "UNIT",U1
1080 PRINT "JJIGRAFICOS PROCESADOS"
1090 PRINT "I*****"
1100 PRINT "JJJ1.- PARA VARIACION OPCIONAL DE CAMPO MAGNET."
1110 PRINT "JJ2.- PARA CAMPO MAGNET. ENTRE 0 Y 1 TESLA"
1120 PRINT "JJJTESCOJA LA OPCION: --- ";
1130 INPUT U3
1140 PRINT "EJJIINGRESE EL VALOR DE ALFA Y EL DE BETA (EN ESE ORDEN). ";
1150 INPUT IO,B0
1160 GOSUB 330
1170 CALL "FILE",U1,L#,K#
1180 IF K#<>" THEN 1240
1190 PRINT "JJARCHIVO DE DATOS ";L#;" NO EXISTE"
1200 PRINT "JJAPLASTAR [RETORN] PARA CONTINUAR"
1210 CALL "UNIT",U0
1220 INPUT N#
1230 GO TO 160
1240 PRINT "LJJJICLASES DE GRAFIZACION"
1250 PRINT "I*****"
1260 PRINT "JJJJJ1.- GRAFIZACION EN PANTALLA"
1270 PRINT "JJ2.- GRAFIZACION EN PAPEL"
1280 PRINT "JJ3.- FIN DE GRAFIZACION"
1290 PRINT "JJJIESCOJA LA OPCION --- ";
1300 INPUT T
1310 GO TO T OF 1400,1370,1320
1320 PRINT "LJJJGRAFIZACION DE LA CURVA CALCULADA ESTA CONCLUIDA"
1330 PRINT "JJJAFLASTE [RETORN] PARA CONTINUAR"
1340 INPUT X#
1350 CALL "UNIT",U0
1360 GO TO 160
1370 W9=1
1380 W8=150
1390 GO TO 1420
1400 W9=32
1410 W8=130
1420 PRINT "LJJJIESCALAS DEL GRAFICO"
1430 PRINT "I*****"
1440 PRINT "JJJ1.- HORIZONTAL --- DE 0 A 0.6 [TESLA]"
1450 PRINT "      VERTICAL --- DE 8 A 12.5 [GHZ]"
1460 PRINT "JJ2.- HORIZONTAL --- DE 0 A 1.0 [TESLA]"
1470 PRINT "      VERTICAL --- DE 8 A 12.5 [GHZ]"
1480 PRINT "JJ3.- OPCIONAL"
1490 PRINT "JJJIESCOJA EL NUMERO --- ";
1500 INPUT A0
1510 GO TO A0 OF 1520,1590,1660
1520 W1=0
1530 W2=0.6

```



```

1540 W3=8
1550 W4=12.5
1560 D1=0.1
1570 D2=1
1580 GO TO 1790
1590 W1=0
1600 W2=1
1610 W3=8
1620 W4=12.5
1630 D1=0.2
1640 D2=1
1650 GO TO 1790
1660 PRINT "LJJINGRESE EL VALOR MINIMO DE CAMPO MAGNETICO ";
1670 INPUT W1
1680 PRINT "JJJINGRESE EL VALOR MAXIMO DE CAMPO MAGNETICO ";
1690 INPUT W2
1700 PRINT "JJJINGRESE EL VALOR MINIMO DE FRECUENCIA ";
1710 INPUT W3
1720 PRINT "JJJINGRESE EL VALOR MAXIMO DE FRECUENCIA ";
1730 INPUT W4
1740 PRINT "JJJINGRESE EL INTERV. DE MARCAS EN EL EJE DE CAMPO MAGNET. ";
1750 INPUT D1
1760 PRINT "JJJINGRESE EL INTERVALO DE MARCAS EN EL EJE DE FRECUENCIA ";
1770 INPUT D2
1780 PAGE
1790 GOSUB 2770
1800 PRINT "LJJINGRESE EL TITULO DEL GRAFICO ";
1810 INPUT H$
1820 I$=""
1830 FOR I=1 TO LEN(H$)
1840 I$=I$&I$
1850 NEXT I
1860 H=LEN(H$)
1870 PAGE
1880 MOVE @W9:(W2+W1)/2,W4
1890 FOR I=1 TO H/2
1900 PRINT @W9:" ";
1910 NEXT I
1920 PRINT @W9:"KKK";
1930 PRINT @W9:H$;
1940 FOR I=1 TO H
1950 PRINT @W9:" ";
1960 NEXT I
1970 PRINT @W9:"J";
1980 PRINT @W9:I$;
1990 AXIS @W9:D1,D2,W1,W3
2000 FOR I=W1 TO W2 STEP D1
2010 W$=STR(I)
2020 MOVE @W9:I,W3
2030 PRINT @W9:"J";
2040 FOR K=1 TO LEN(W$)/2
2050 PRINT @W9:" ";
2060 NEXT K
2070 PRINT @W9:W$

```

```

2080 NEXT I
2090 FOR I=W3 TO W4 STEP D2
2100 W#=STR(I)
2110 MOVE @W9:W1,I
2120 PRINT @W9:"";
2130 FOR K=1 TO LEN(W#)
2140 PRINT @W9:"";
2150 NEXT K
2160 PRINT @W9:W#
2170 NEXT I
2180 MOVE @W9:(W1+W2)/2,W3
2190 PRINT @W9:"JJJJ";
2200 N#="CAMPO MAGNETICO EN ETESLAJ"
2210 FOR I=1 TO LEN(N#)/2
2220 PRINT @W9:"";
2230 NEXT I
2240 PRINT @W9:N#
2250 N#="FRECUENCIA EN -GHZ-"
2260 MOVE @W9:W1,(W3+W4)/2
2270 PRINT @W9:"";
2280 FOR K=1 TO LEN(N#)/2
2290 PRINT @W9:"K";
2300 NEXT K
2310 DELETE X#
2320 FOR I=1 TO LEN(N#)
2330 X#=SEG(N#,I,1)
2340 PRINT @W9:X#;"J";
2350 NEXT I
2360 OPEN L#;1,"R",X#
2370 GO TO U3 OF 2380,2400
2380 READ #1:L1,L2,L3
2390 GO TO 2430
2400 L1=0
2410 L2=1
2420 L3=0.025
2430 N=INT((L2-L1)/L3)+1
2440 DELETE X,Y1,Y2,Y3,Y4,Y5,Y6,Z1,Z2,Z3,Z4,Z5,Z6
2450 DIM X(N),Y1(N),Y2(N),Y3(N),Y4(N),Y5(N),Y6(N)
2460 DIM Z1(N),Z2(N),Z3(N),Z4(N),Z5(N),Z6(N)
2470 M=0
2480 FOR I=L1 TO L2 STEP L3
2490 M=M+1
2500 READ #1:Y1(M),Y2(M),Y3(M),Y4(M)
2510 X(M)=I
2520 NEXT I
2530 CLOSE
2540 Z1=Y2-Y1
2550 Z2=Y3-Y1
2560 Z3=Y3-Y2
2570 Z4=Y4-Y1
2580 Z6=Y4-Y3
2590 Z5=Y4-Y2
2600 GOSUB 2780
2610 MOVE @W9:X(1),Z1(1)

```

```
2620 DRAW @W9:X,Z1
2630 DRAW @W9:X,Z2
2640 MOVE @W9:X(1),Z3(1)
2650 DRAW @W9:X,Z3
2660 MOVE @W9:X(1),Z4(1)
2670 DRAW @W9:X,Z4
2680 MOVE @W9:X(1),Z5(1)
2690 DRAW @W9:X,Z5
2700 MOVE @W9:X(1),Z6(1)
2710 DRAW @W9:X,Z6
2720 HOME
2730 PRINT "ARCHIVO: ***** L$ *****"
2740 PRINT "GGGGGRAFICO CONCLUIDO (RETURN PARA CONTINUAR)"
2750 INPUT K$
2760 GO TO 1140
2770 REM
2780 REM ***** SUBROUTINA DE WINDOW Y VIEWPORT *****
2790 REM
2800 VIEWPORT 9*1.79,W8-2*1.79,5*2.82,100-5*2.82
2810 WINDOW W1,W2,W3,W4
2820 RETURN
```

```

1000 REM
1010 F#="9"
1020 PRINT "LJJJINGRESE LA UNIDAD DEL DISCO DE DATOS ";
1030 INPUT U1
1040 CALL "UNIT",U1
1050 REM
1060 PRINT "LJJJGRAFIZACION DE CURVAS EXPERIMENTALES"
1070 PRINT "I*****"
1080 PRINT "JJJINGRESE EL NOMBRE DEL ARCHIVO DE DATOS"
1090 PRINT "JJFORMATO MXXX/R Y: M --- MUESTRA"
1100 PRINT "XXX --- # DE MUESTRA"
1110 PRINT "RY --- IDENTIF. DE RESONANCIA"
1120 PRINT "JJJARCHIVO ---";
1130 INPUT L$
1140 L#="@"&L$
1150 CALL "FILE",U1,L$,K$
1160 IF K#<>" THEN 1230
1170 PRINT "JJARCHIVO DE DATOS ,",L$, " NO EXISTE"
1180 PRINT "JJAPLASTAR [RETURN] PARA CONTINUAR"
1190 INPUT N$
1200 CALL "UNIT",U0
1210 GO TO 160
1220 INPUT K$
1230 PRINT "JJJINGRESE MARCA DE PUNTOS EXPERIMENTALES: ";
1240 INPUT C$
1250 OPEN L#;1,"R",X$
1260 READ #1:I6
1270 DELETE X,Y
1280 DIM X(I6),Y(I6)
1290 FOR I=1 TO I6
1300 READ #1:X(I),Y(I)
1310 NEXT I
1320 CLOSE
1330 PRINT "LJJJCLASES DE GRAFIZACION"
1340 PRINT "I*****"
1350 PRINT "JJJJ1.- GRAFIZACION EN PANTALLA"
1360 PRINT "JJ2.- GRAFIZACION EN PAPEL"
1370 PRINT "JJ3.- FIN DE GRAFIZACION"
1380 PRINT "JJJIESCOJA LA OPCION --- ";
1390 INPUT T
1400 GO TO T OF 1490,1460,1410
1410 PRINT "LJJJGRAFIZACION DE LA CURVA EXPERIMENTAL ESTA CONCLUIDA"
1420 PRINT "JJJAPLASTE [RETURN] PARA CONTINUAR"
1430 INPUT X$
1440 CALL "UNIT",U0
1450 GO TO 4
1460 W9=1
1470 W8=150
1480 GO TO 1510
1490 W9=32
1500 W8=130
1510 PRINT "LJJJIESCALAS DEL GRAFICO"
1520 PRINT "I*****"
1530 PRINT "JJJ1.- HORIZONTAL --- DE 0 A 0.6 [TESLA]"

```

```

1540 PRINT " VERTICAL --- DE 8 A 12.5 [GHz]"
1550 PRINT " JJ2.- HORIZONTAL --- DE 0 A 1.2 [TESLA]"
1560 PRINT " VERTICAL --- DE 8 A 12.5 [GHz]"
1570 PRINT " JJ3.- OPCIONAL"
1580 PRINT " JJJIESCOJA EL NUMERO --- "
1590 INPUT A0
1600 GO TO A0 OF 1610,1680,1750
1610 W1=0
1620 W2=0.6
1630 W3=8
1640 W4=12.5
1650 D1=0.1
1660 D2=1
1670 GO TO 1880
1680 W1=0
1690 W2=1.2
1700 W3=8
1710 W4=12.5
1720 D1=0.2
1730 D2=1
1740 GO TO 1880
1750 PRINT "LJJINGRESE EL VALOR MINIMO DE CAMPO MAGNETICO "
1760 INPUT W1
1770 PRINT "JJJINGRESE EL VALOR MAXIMO DE CAMPO MAGNETICO "
1780 INPUT W2
1790 PRINT "JJJINGRESE EL VALOR MINIMO DE FRECUENCIA "
1800 INPUT W3
1810 PRINT "JJJINGRESE EL VALOR MAXIMO DE FRECUENCIA "
1820 INPUT W4
1830 PRINT "JJJINGRESE EL INTERV. DE MARCAS EN EL EJE DE CAMPO MAGNET. "
1840 INPUT D1
1850 PRINT "JJJINGRESE EL INTERVALO DE MARCAS EN EL EJE DE FRECUENCIA. "
1860 INPUT D2
1870 PAGE
1880 GOSUB 2870
1890 PRINT "LJJINGRESE EL TITULO DEL GRAFICO "
1900 INPUT H$
1910 I$=""
1920 FOR I=1 TO LEN(H$)
1930 I$=I$&I$
1940 NEXT I
1950 H=LEN(H$)
1960 PAGE
1970 MOVE @W9:(W2+W1)/2,W4
1980 FOR I=1 TO H/2
1990 PRINT @W9:" ";
2000 NEXT I
2010 PRINT @W9:"KKK";
2020 PRINT @W9:H$;
2030 FOR I=1 TO H
2040 PRINT @W9:" ";
2050 NEXT I
2060 PRINT @W9:"J";
2070 PRINT @W9:I$;

```

```

2080 AXIS @W9:D1,D2,W1,W3
2090 FOR I=W1 TO W2 STEP D1
2100 W#=STR(I)
2110 MOVE @W9:I,W3
2120 PRINT @W9:"J";
2130 FOR K=1 TO LEN(W#)/2
2140 PRINT @W9:" ";
2150 NEXT K
2160 PRINT @W9:W#
2170 NEXT I
2180 FOR I=W3 TO W4 STEP D2
2190 W#=STR(I)
2200 MOVE @W9:W1,I
2210 PRINT @W9:" ";
2220 FOR K=1 TO LEN(W#)
2230 PRINT @W9:" ";
2240 NEXT K
2250 PRINT @W9:W#
2260 NEXT I
2270 MOVE @W9:(W1+W2)/2,W3
2280 PRINT @W9:"JJJJ";
2290 N#="CAMPO MAGNETICO EN [TESLA]"
2300 FOR I=1 TO LEN(N#)/2
2310 PRINT @W9:" ";
2320 NEXT I
2330 PRINT @W9:N#
2340 N#="FRECUENCIA EN -GHZ-"
2350 MOVE @W9:W1,(W3+W4)/2
2360 PRINT @W9:" ";
2370 FOR K=1 TO LEN(N#)/2
2380 PRINT @W9:"K";
2390 NEXT K
2400 DELETE X#
2410 FOR I=1 TO LEN(N#)
2420 X#=SEG(N#,I,1)
2430 PRINT @W9:X#;"J";
2440 NEXT I
2450 HOME
2460 FOR I=1 TO I6
2470 MOVE @W9:X(I),Y(I)
2480 GOSUB 2930
2490 NEXT I
2500 D#=L#&"R"
2510 CALL "FILE",U1,D#,K#
2520 IF K#="" THEN 2650
2530 PRINT "REGRESION R "
2540 INPUT G#
2550 IF G#="NO" OR G#="N" THEN 2650
2560 OPEN D#;1,"R",X#
2570 READ #1;I7
2580 DELETE X1,Y1
2590 DIM X1(I7),Y1(I7)
2600 FOR I=1 TO I7
2610 READ #1;X1(I7),Y1(I7)

```

```
2620 NEXT I
2630 MOVE @W9:X1(1),Y1(1)
2640 DRAW @W9:X1,Y1
2650 HOME
2660 PRINT '1.- SUPERPONER; 2.- CONTINUAR -- ESCOJA: ';
2670 INPUT A
2680 GO TO A DE 2690,1330
2690 PRINT "ARCHIVO? ";
2700 INPUT L$
2710 L$="@"&L$
2720 CALL "FILE",U1,L$,K$
2730 IF K$<>" " THEN 2760
2740 PRINT "ARCHIVO INEXISTENTE (RETURN PARA CONTINUAR)"
2750 GO TO 1330
2760 OPEN L$;1,"R",X$
2770 READ #1:I6
2780 DELETE X,Y
2790 DIM X(I6),Y(I6)
2800 FOR I=1 TO I6
2810 READ #1:X(I),Y(I)
2820 NEXT I
2830 CLOSE
2840 PRINT "MARCA?";
2850 INPUT C$
2860 GO TO 2450
2870 REM
2880 REM ***** SUBROUTINA DE WINDOW Y VIEWPORT *****
2890 REM
2900 VIEWPORT 9*1.79,W8-2*1.79,5*2.82,100-5*2.82
2910 WINDOW W1,W2,W3,W4
2920 RETURN
2930 SCALE 1,1
2940 RMOVE -0.5*1.55,-0.5*1.88
2950 PRINT @W9:C$;
2960 RMOVE @W9;0.55*1.55,0.55*1.88
2970 GOSUB 2870
2980 RETURN
```

## R E F E R E N C I A S

- (1) HOENEISEN B. - CEVALLOS M., Resonancia magnética de electrones, Anales de las jornadas en Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Vol 3, p. 68, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 1982.
- (2) HARVEY A. F., Microwave engineering, Academic Press Incorporated, New York, 1963.
- (3) KRAUS-CARVER, Electromagnetics, McGraw-Hill Kogakusha, Tokyo, 1973.
- (4) KITTEL, Charles, Introducción a la física del estado sólido, Editorial Reverté, Barcelona, 1975-1976.
- (5) Patrones para el aparato de rayos X de la Facultad de Geología Minas y Petróleos de la Escuela Politécnica Nacional.
- (6) DEER, W.A., Rock forming minerals - Non silicates, Longman, Londres, 1972
- (7) LANDAU-LIFSHITZ, Mecánica cuántica (teoría no relativista), Editorial Reverté, Barcelona, 1967.



(8) KLEBER, Will, Einführung in die Kristallographie,  
Verlag Technik, Berlin, 1963.

(9) THE CHEMICAL RUBBER Co., Handbook of Chemistry and  
Physics, The Chemical Rubber Co., Cleveland, 1971.