

Universidad Autónoma de Nuevo León  
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica  
Escuela de Graduados

VERIFICACION DE EFECTIVIDAD DE BLINDAJE  
ELECTROMAGNETICO POR TEOREMA DE  
RECIPROCIDAD



MANUEL RETA HERNANDEZ

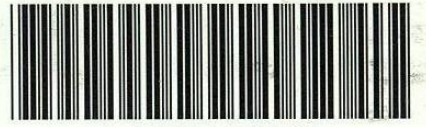
EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA  
INGENIERIA ELICTRICA CON ESPECIALIDAD EN SISTEMAS  
ELCTRICOS DE POTENCIA.

EN NICOLAS DE LOS CAERZA, N.L., NOVIEMBRE DE 1982.



SE  
SE  
SE

TM  
Z5853  
.M2  
FIME  
1992  
R4



1020070643

*Universidad Autónoma de Nuevo León*  
*Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica*  
*Escuela de Graduados*

**VERIFICACION DE EFECTIVIDAD DE BLINDAJE  
ELECTROMAGNETICO POR TEOREMA DE  
RECIPROCIDAD**

**TESIS**

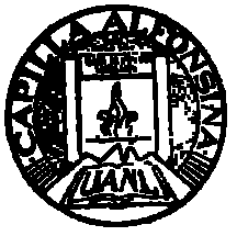
**QUE PRESENTA**

***MANUEL RETA HERNANDEZ***

**EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA  
INGENIERIA ELECTRICA CON ESPECIALIDAD EN SISTEMAS  
ELECTRICOS DE POTENCIA.**

**SN. NICOLAS DE LOS GARZA, N.L., NOVIEMBRE DE 1992.**

TM  
25853  
•M2  
FINE  
1992  
R4



**FONDO TESIS**

· 24082



Department of Electrical/Electronic Engineering  
(916) 898-5343

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica  
Universidad Autónoma de Nuevo Leon  
Coordinación Maestrías

Attn.: Ing. Rodolfo Ayala

De acuerdo al nombramiento recibido como asesor de la tesis de maestría titulada *Verificación de Efectividad de Blindaje por Teorema de Reciprocidad*, que para obtener el grado de Maestro en Ciencias en la especialidad de sistemas eléctricos de potencia solicitaron los ingenieros Manuel Reta Hernández y Guillermo Romo Guzmán, le hago saber que he visto y revisado esta tesis. Es mi opinión que el trabajo experimental fue hecho cuidadosamente, y que las conclusiones son originales e interesantes y tienen soporte abundante en los resultados de mediciones que hicieron estos investigadores.

Me da gusto otorgar a esta obra mi aprobación como tesis de maestría.

Chico, California, E.U.A.  
1 de agosto de 1992

A handwritten signature in cursive script, reading "Lyle E. McBride".

Lyle E. McBride, Ph.D.

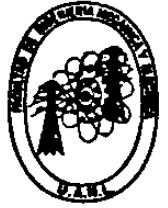
Chairman, Department of  
Electrical/Electronic Engineering





# UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA



Monterrey, N. L., 30 de Octubre de 1992

ING. RODOLFO AYALA ESTRADA  
COORDINADOR DE MAESTRIAS, FIME  
Presente

Por este medio me es grato informar a Ud. que se ha concluido satisfactoriamente la revisión del trabajo de Tesis de maestría de los Ing. MANUEL RETA HERNANDEZ Y GUILLERMO ROMO GUZMAN que versa sobre "VERIFICACION DE EFECTIVIDAD DE BLINDAJE ELECTROMAGNETICO POR TEOREMA DE RECIPROCIDAD". Por lo expresado es de recomendarse la aceptación de dicho trabajo.

Sin otro particular por el momento quedo de Ud. como su Seguro Servidor.

Dr. Salvador Acha Daza  
Coordinador Académico  
Sistemas Eléctricos de Potencia

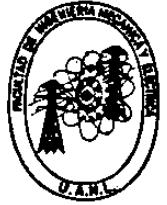
Apartado Postal 076 Suc. "F"  
Ciudad Universitaria  
66450 San Nicolás de los Garza, N. L.

Teléfonos: (83) 320-903  
Conmutador (83) 320-870  
(83) 522-530

] Pedro de Alba S/N  
Ciudad Universitaria  
San Nicolás de los Garza, N.L.



**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**  
**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA**



Monterrey, N.L., 29 de Octubre de 1992

ING. RODOLFO AYALA ESTRADA  
COORDINADOR DE MAESTRIAS,  
F.I.M.E.  
Presente.-

Por este medio me es grato informar a usted que se ha -  
concluido satisfactoriamente la revisión del trabajo de Tesis de -  
Maestría de los Ing. MANUEL RETA HERNANDEZ Y GUILLERMO ROMO GUZMAN  
que versa sobre "VERIFICACION DE EFECTIVIDAD DE BLINDAJE ELECTRO--  
MAGNETICO POR TEOREMA DE RECIPROCIDAD". Por lo expresado es de re-  
comendarse la aceptación del trabajo.

Sin otro particular por el momento quedo de Usted, como  
su Seguro Servidor.

M.C. ENRIQUE BETANCOURT RAMIREZ  
REVISOR

Apartado Postal 076 Suc. "F"  
Ciudad Universitaria  
66450 San Nicolás de los Garza, N. L.

Teléfonos: (83) 320-903  
Conmutador (83) 320-970  
(83) 522-530

Pedro de Alba S/N  
Ciudad Universitaria  
San Nicolás de los Garza, N.L.



## INDICE

INTRODUCCION.....	1
<b>CAPITULO 1. TEORIA DEL BLINDAJE ELECTROMAGNETICO</b>	
1.1 Blindaje electromagnético.....	4
1.2 Características de los campos electromagnéticos.....	5
1.3 Efectividad de blindaje.....	11
1.4 Pérdida por absorción.....	13
1.5 Pérdidas por reflexión.....	16
1.6 Pérdidas por reflexión de ondas planas.....	18
1.7 Pérdidas por reflexión en el campo eléctrico.....	18
1.8 Pérdidas por reflexión en el campo magnético.....	20
1.9 Ecuación general para las pérdidas por reflexión.....	22
1.10 Reflexiones múltiples en blindajes delgados.....	22
1.11 Ecuación simplificada de la efectividad de blindaje.....	23
<b>CAPITULO 2. VERIFICACION DE EFECTIVIDAD DE BLINDAJE POR RECIPROCIDAD.</b>	
2.1 Teorema de reciprocidad.....	25
2.2 Aparato de medición de efectividad de blindaje.....	27
2.3 Amplificador.....	29
2.4 Pruebas realizadas.....	31
2.5 Resultados de las pruebas.....	33
2.6 Análisis de resultados.....	34
2.7 Cálculo de efectividad de blindaje por Schelkunoff. Comparación de resultados.....	59
CONCLUSIONES.....	64
APENDICE A. Valores de voltaje (dB) obtenidos a diferentes frecuencias para cinco posiciones distintas entre dos tipos de impedancia. Materiales de blindaje: Ni, Al, metal compuesto, papel aluminio.....	66
APENDICE B. Curvas de efectividad de blindaje (dB) versus frecuencia (esc. logarítmica) para tres posiciones diferentes en dos tipos de impedancia. Material de blindaje: Al, metal compuesto, papel aluminio....	77
APENDICE C. Curvas de efectividad (dB) con respecto a la posición central, versus distancia de la fuente en varios niveles de frecuencia en dos tipos de impedancia. Material de blindaje: Cu, Ni, Al, metal compuesto, papel aluminio.....	84

APENDICE D. Curvas de desviación máxima (dB) versus frecuencia (escala logarítmica) para varias posiciones y a diferentes frecuencias, en dos tipos de impedancia. Material de blindaje: Al, metal compuesto, papel aluminio.....	91
APENDICE E. Tablas complementarias.....	112
APENDICE F. Términos y definiciones de decibeles.....	114
REFERENCIAS.....	118

## NOMENCLATURA

- K - Coeficiente de reflexión
- $\Gamma$  - Constante de propagación compleja en el blindaje
- $\sigma$  - Conductividad del material
- $\sigma_r$  - Conductividad del material relativa a la del cobre
- $\epsilon$  - Constante dieléctrica
- I - Corriente eléctrica
- d - Distancia de la fuente al blindaje
- S - Efectividad de blindaje
- $S_T$  - Efectividad de blindaje total
- B - Factor de corrección (reflexiones múltiples)
- f - Frecuencia eléctrica
- t - Grosor del material de blindaje
- $Z_w$  - Impedancia de onda
- $Z_o$  - Impedancia del medio
- $Z_m$  - Impedancia de blindaje
- $Z_{aa}$  - Impedancia de superficie interna del blindaje
- $Z_{bb}$  - Impedancia de superficie externa del blindaje
- $Z_{ab}$  - Impedancia de superficie de transferencia del blindaje
- E - Intensidad de campo eléctrico
- $E_o$  - Intensidad del campo magnético antes del blindaje
- $E_1$  - Intensidad del campo magnético después del blindaje
- H - Intensidad de campo magnético
- $H_o$  - Intensidad de campo magnético antes del blindaje
- $H_1$  - Intensidad de campo magnético después del blindaje
- $\lambda$  - Longitud de onda
- $\alpha$  - Parte real de la propagación compleja en el blindaje
- $M_o$  - Permeabilidad del espacio libre
- $M_r$  - Permeabilidad del material relativa a la del cobre
- R - Pérdidas por reflexión
- A - Pérdidas por absorción
- $\mu$  - Permeabilidad del material
- $\delta$  - Profundidad de penetración
- $\omega$  - Velocidad angular de la onda
- $V_{pp}$  - Voltaje de pico a pico

## **AGRADECIMIENTOS**

Manifestamos nuestro reconocimiento a California State University, Chico en Estados Unidos de Norteamérica, por facilitarnos el uso de los Laboratorios de la Facultad de Ingeniería durante el desarrollo del trabajo. Asimismo damos reconocimiento al Centro Regional de Estudios Nucleares, y a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Zacatecas por las facilidades brindadas en sus laboratorios.

Deseamos expresar una especial gratitud al asesor de la Tesis Ph.D Lyle E. McBride por su paciente asistencia en el desarrollo del trabajo. Asimismo, manifestamos nuestro reconocimiento al Dr. Salvador Acha Daza y al M. en C. Enrique Betancourt R., revisores de la Tesis, por su valiosa colaboración.



## INTRODUCCION

Se entiende por blindaje electromagnético a la propiedad de un material conductor para atenuar la salida (o entrada) de ondas electromagnéticas de un lugar a otro. La efectividad de blindaje electromagnético es entonces, una medida de capacidad del material de blindaje para poder efectuar la atenuación.

De acuerdo a la Teoría electromagnética, cualquier dispositivo que maneje voltajes y corrientes eléctricas emite cierta cantidad de ondas electromagnéticas al exterior del mismo con determinadas características de longitud de onda, frecuencia, amplitud, etc., Dichas ondas electromagnéticas pueden interferir con algún otro dispositivo eléctrico - electrónico, sensible a las características de las ondas extrañas, alterando su funcionamiento. También se producen ondas electromagnéticas por diferentes fenómenos naturales que pueden alterar notablemente el funcionamiento de ciertos dispositivos.

Se conoce de algunos reportes, por ejemplo, que en la marina de Estados Unidos de Norteamérica ciertos helicópteros controlados totalmente por computadoras instaladas en el interior de los mismos, al acercarse al radar de un buque sufrían desperfectos en su funcionamiento para finalmente colapsarse. La razón de la alteración del funcionamiento era la interacción de ondas emitidas por el radar con el control del aparato y por la falta de un adecuado blindaje electromagnético en el control del helicóptero.

En el mundo actual existe una gran cantidad de aparatos electrónicos que casi saturan el ambiente con determinadas ondas electromagnéticas, que constantemente interfieren con otros aparatos de determinada sensibilidad que pueden alterar sus características de funcionamiento. Desde luego, se deben cumplir ciertas condiciones para que esto suceda, pero la posibilidad no es tan remota. Es por eso que surge la necesidad práctica de colocar elementos de blindaje a diferentes aparatos con la finalidad de protegerlos de ondas extrañas, o bien para evitar que salgan ondas al exterior del aparato.

La teoría del blindaje electromagnético es una teoría establecida desde hace aproximadamente sesenta años por Schelkunoff (1934) principalmente para el blindaje de cables coaxiales. Actualmente la teoría de blindajes ha cobrado un notable interés por las circunstancias de avance tecnológico que la hacen indispensable.

Schelkunoff establece<sup>(1)</sup> que la atenuación de ondas electromagnéticas depende de las características del material de blindaje (permeabilidad, conductividad, grosor), de la frecuencia de la onda, de las características del medio de transmisión de la onda antes y después de llegar al blindaje (permeabilidad, constante dieléctrica), y de la distancia que hay entre la fuente de emisión de ondas y el blindaje. Sin embargo, no contempla la ubicación del aparato de recepción en el cual serán medidas las ondas atenuadas, ni tampoco contempla las impedancias de la fuente y del receptor.

Esto significa que, de acuerdo a Schelkunoff, la efectividad de blindaje normalmente será mayor a medida que el blindaje esté más alejado de la fuente, sin importar que tan lejano o cercano se encuentre el receptor del blindaje.

De acuerdo con el Teorema de Reciprocidad, al aplicarlo al sistema de blindaje (lineal por supuesto), se deben considerar tanto a las impedancias de la antena fuente como a las impedancias de la antena receptora, además de considerar la posición del blindaje con respecto a la fuente y al receptor. Si las impedancias fuente y receptor son iguales, entonces para un blindaje de material no magnético la efectividad de blindaje no debe variar para una posición cerca de la fuente o cerca del receptor, lo cual no establece Schelkunoff.

El presente trabajo de Tesis es esencialmente de carácter experimental y pretende demostrar, a través de múltiples mediciones realizadas bajo el marco del Teorema de Reciprocidad, que la Teoría de Blindajes establecida por Schelkunoff es válida únicamente bajo ciertas condiciones, y no para todo el rango de valores indicados por la misma.

Los resultados de los experimentos realizados mostraron la validez del Teorema de Reciprocidad, y las diferentes gráficas obtenidas fueron muy elocuentes de este señalamiento. Por tanto se deduce que la Teoría de Schelkunoff es válida solamente en el caso en que el material de blindaje se encuentra muy cerca de la posición media entre la fuente y el receptor.

En el Capítulo I se detalla la Teoría de Blindajes, señalando algunas formas simplificadas de la expresión original. En el capítulo II se plantea el teorema de Reciprocidad, aplicándolo a las características del problema planteado. Se dan las características del aparato de medición de blindaje y del amplificador empleado en la bobina receptora, a través del cual se obtuvieron las mediciones.

En el Cap. 3 se habla de los resultados obtenidos en las mediciones. Se analizan las diferentes gráficas trazadas.

En las conclusiones se señala el alcance del trabajo y las recomendaciones finales. Se anexan algunos apéndices con datos complementarios al trabajo.

## CAPITULO 1

### TEORIA DEL BLINDAJE ELECTROMAGNETICO

#### 1.1 BLINDAJE ELECTROMAGNETICO

Se define como elemento de blindaje a un material conductor colocado entre dos regiones específicas. Tal material controlará la propagación de ondas de los campos eléctrico y magnético de una región a otra. Es válido decir entonces, que un material utilizado como blindaje cumple los propósitos opuestos a los de una antena: impide la salida o llegada de ondas electromagnéticas a un determinado lugar.

De acuerdo a esto, se puede colocar un blindaje a una fuente de ruido para contener los campos electromagnéticos y brindar protección a cualquier equipo sensible localizado fuera del blindaje (Fig. 1.1). O bien, podrá colocarse el blindaje a un equipo predeterminado para evitar que sea perturbado por campos extraños. Sin embargo, esta protección solo será efectiva para el equipo contenido en el blindaje (Fig. 1.2)

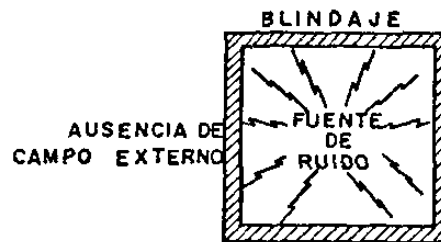


FIG. 1.1 Fuente de ruido contenida por capas de blindaje evitando interferencia con equipo externo.

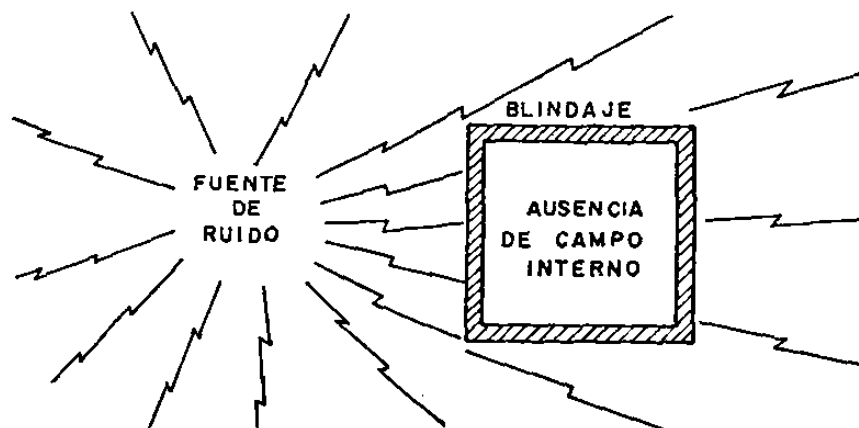


FIG. 1.2 Receptor protegido con blindaje evitando interferencias de la fuente de ruido exterior.

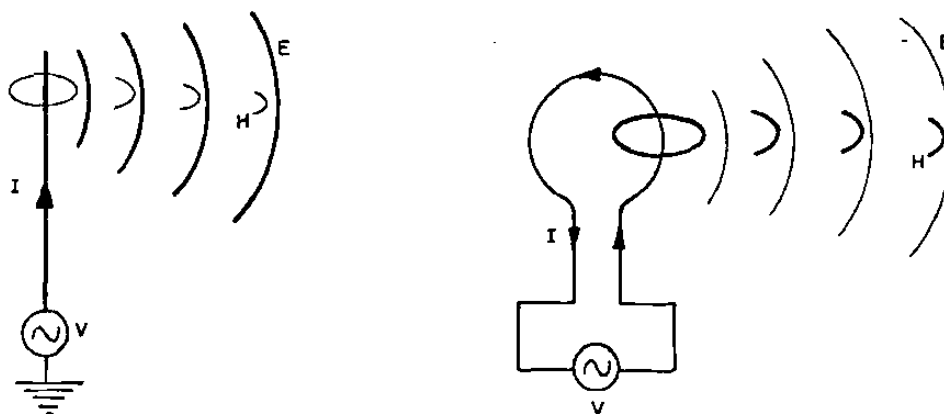


Cualquier blindaje, no importa cuan efectivo pueda ser su diseño, tendrá muy poco valor si se permite que los campos electromagnéticos lleguen a la región protegida mediante cables de penetración, los cuales recogerán el ruido en una región para conducirlo a la región protegida en donde será nuevamente propagado. Para mantener una región debidamente protegida se deberá conservar la integridad de la región blindada, filtrando de ruido los voltajes de todos los cables (de potencia o de señalización) que penetran el blindaje.

## 1.2 CARACTERISTICAS DE LOS CAMPOS ELECTROMAGNETICOS.

Las características de los campos eléctrico y magnético estan dadas por la fuente y el medio en el que se encuentra, y la distancia entre la fuente y el punto de observación. Si el punto está muy cercano a la fuente, las propiedades de los campos dependen básicamente de la fuente. Si el punto está muy alejado de la fuente, entonces las propiedades de los campos dependen principalmente de su medio de propagación. Por tanto, el espacio que rodea a una fuente de radiación puede clasificarse respecto a dos regiones (Fig. 1.4).

Se considera que el punto está cerca de la fuente si la distancia entre ambos no es mayor a una sexta parte de la longitud de onda; y el campo será predominantemente eléctrico si la impedancia de la fuente es alta (antena dipolo), y predominantemente magnético si la impedancia de la fuente es baja (antena bobina) (Fig. 1.3)



A) ALTA IMPEDANCIA , ONDA Y FUENTE DE CAMPO ELECTRICO.

B) BAJA IMPEDANCIA , ONDA Y FUENTE DE CAMPO MAGNETICO.

FIG.1.3 Ilustración conceptual de capacidad de campos contra tipo de fuente y distancia.

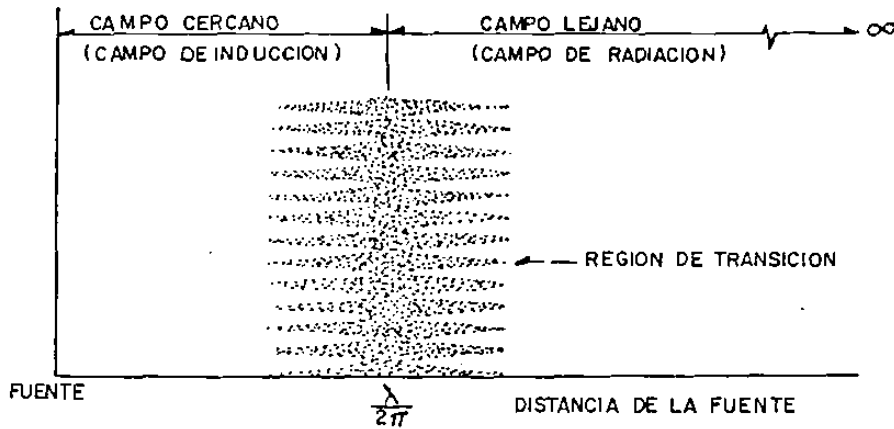


FIG. 1.4 La característica del campo depende de la distancia de la fuente

La región alrededor de esta distancia base ( $\lambda/2\pi$ ) es, por tanto, la región de transición entre los campos lejanos y los campos cercanos (Figs. 1.4 y 1.5)

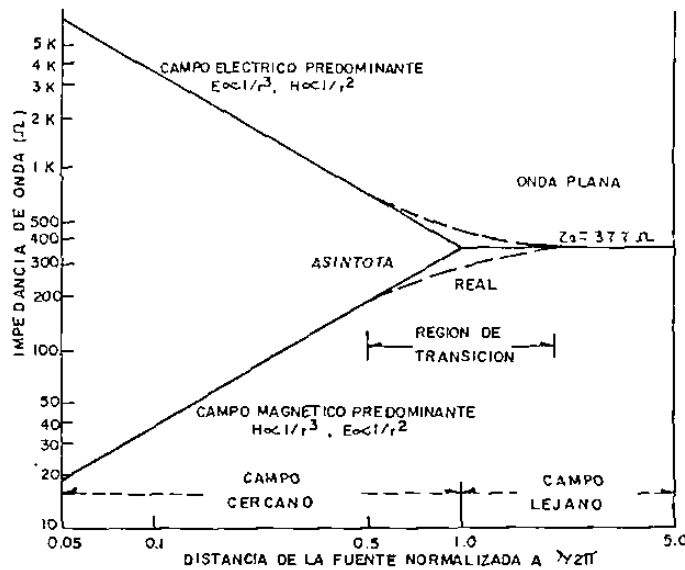


FIG. 1.5 La impedancia de onda depende de la distancia de la fuente y del tipo de campo (eléctrico o magnético)

Para cualquier onda electromagnética, se define como impedancia de onda a la relación:

$$Z_w = \frac{E}{H} \quad \dots EC. (1.1)$$

donde:

$Z_w$  - impedancia de la onda ( $\Omega$ )

$E$  - intensidad del campo eléctrico (volts)

$H$  - intensidad del campo magnético (amp.-vuelts/mt)

Esta misma impedancia de onda  $Z_w$ , si está cerca de la antena bobina, se puede expresar (Schelkunoff, 1934) como:

$$Z_w = j\omega\mu d \quad \dots Ec. (1.2)$$

donde:

$\omega = 2\pi f$  - vel. angular de la onda

$\mu$  = permeabilidad del medio

$d$  = radio efectivo de la onda en el aire. Puede considerarse como la distancia de la fuente al blindaje.

Se define como impedancia característica del medio (Hayt, 1974) a la expresión:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}} \quad \dots Ec. (1.3)$$

donde:

$Z_0$  = impedancia característica del medio ( $\Omega$ )

$\sigma$  = conductividad del medio (U/mt)

$\epsilon$  = constante dieléctrica (F/mt)

$\mu$  = permeabilidad del medio (H/m)

Para el espacio libre:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$$

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$$

Para el cobre:

$$\mu = 4\pi \times 10^{-7}$$

$$\sigma = 5.82 \times 10^7$$

Para una distancia lejana,  $Z_w$  es igual al valor de la impedancia característica del medio  $Z_0$ .

En el caso de los aislantes ( $\sigma \rightarrow 0$ , es decir  $\sigma \ll j\omega\epsilon$ ), la impedancia característica es independiente de la frecuencia y viene a ser:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad \dots Ec. (1.4)$$

para el espacio libre:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{e}} = \sqrt{\frac{4\pi \times 10^{-7}}{8.85 \times 10^{-12}}} = 377 \Omega \quad \dots \text{Ec. (1.5)}$$

donde:

$Z_0$  - impedancia característica del aire

$\mu_0$  - permeabilidad del aire

En el caso de los conductores ( $\sigma \gg j\omega e$ ), la impedancia característica se conoce como impedancia de blindaje, y toma la forma:

$$Z_s = \sqrt{\frac{j\omega \mu}{\sigma}} \quad \dots \text{Ec. (1.6)}$$

como:

$$\frac{(1+j)^2}{2} = \frac{(1+2j-1)}{2} = j$$

entonces:

$$\sqrt{j} = \sqrt{\frac{(1+j)^2}{2}} = \frac{(1+j)}{\sqrt{2}}$$

sustituyendo:

$$Z_s = (1+j) \sqrt{\frac{\omega \mu}{2\sigma}} \quad \dots \text{Ec. (1.7)}$$

tomando la magnitud:

$$|Z_s| = \sqrt{\frac{\omega \mu}{\sigma}} \quad \dots \text{Ec. (1.8)}$$

donde:  $Z_s$  - impedancia de blindaje



o bien, en forma general para cualquier conductor (ver Apéndice E. Tab. E.1):

$$\begin{aligned} |Z_d| &= \sqrt{\frac{\mu}{\sigma}} = \sqrt{2\pi f} \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\sigma_0 \sigma_r}} = \sqrt{2\pi} \sqrt{\frac{4\pi \times 10^{-7}}{5.82 \times 10^7}} \sqrt{f} \sqrt{\frac{\mu_r}{\sigma_r}} \\ &= 3.68 \times 10^{-7} \sqrt{f} \sqrt{\frac{\mu_r}{\sigma_r}} \quad \dots Ec. (1.9) \end{aligned}$$

donde:

- $\mu = \mu_0 \mu_r =$  permeabilidad del material
- $\sigma = \sigma_0 \sigma_r =$  conductividad del material
- $\mu_0 =$  permeabilidad del espacio libre
- $\sigma_0 =$  conductividad del espacio libre
- $\mu_r =$  permeabilidad del material relativa a la del cobre
- $\sigma_r =$  conductividad del material relativa a la del cobre

Para cualquier frecuencia, se define como profundidad de penetración ( $\delta$ ) a la profundidad requerida de material para que la onda sea atenuada en  $1/e$  (ó el 37 %) de su valor original. En términos de las características de los materiales es válido expresar a la profundidad de penetración como:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} = \sqrt{\frac{2}{2\pi f \mu \sigma}} = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}} \quad (\text{en mts.}) \quad \dots Ec. (1.10)$$

Una profundidad  $t > 3\delta$  es aceptada como un valor en el cual es despreciable la corriente inducida por la onda.

La impedancia de blindaje expresada en términos de la profundidad de penetración resulta:

De (1.7)

$$\begin{aligned} Z_s &= (1+j) \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}} = \frac{(1+j)}{\sqrt{\sigma}} \frac{\sqrt{\sigma}}{\sqrt{\sigma}} \sqrt{\frac{\omega\mu}{2}} \\ &= \frac{(1+j)}{\sigma} \sqrt{\frac{\sigma\omega\mu}{2}} = \frac{(1+j)}{\sigma} \sqrt{\frac{2\pi f\sigma\mu}{2}} = \frac{(1+j)}{\sigma} \sqrt{\pi f\sigma\mu} \end{aligned}$$

sustituyendo el valor de la profundidad de penetración (Ec. 1.10)

$$Z_s = \frac{(1+j)}{\sigma\delta}$$

tomando solamente la magnitud:

$$|Z_s| = \sqrt{\left(\frac{1}{\sigma\delta}\right)^2 + \left(\frac{1}{\sigma\delta}\right)^2} = \frac{\sqrt{2}}{\sigma\delta} \quad \dots Ec. (1.11)$$

Para una distancia cercana,  $Z_w$  (impedancia de onda) está determinada por las características de la fuente y la distancia del punto de observación.

Es decir, si la fuente es de baja impedancia (antena bobina), entonces  $Z_w < 377$  y el campo es predominantemente magnético.

Si la fuente es de alta impedancia (antena dipolo), entonces  $Z_w > 377$  y el campo es predominantemente eléctrico.

En la distancia cercana, los campos eléctrico y magnético se deben considerar separadamente, ya que la relación de los dos no es constante. Sin embargo, en una distancia lejana, se combinan para formar una onda plana con una impedancia de  $377 \Omega$  en el aire. Por tanto, cuando se menciona a los ondas planas se suponen en un punto lejano de la fuente.

### 1.3 EFECTIVIDAD DE BLINDAJE

La efectividad del blindaje se puede definir como la reducción de la intensidad del campo eléctrico y/o magnético, provocada por el material de blindaje. Es conveniente expresar a la efectividad de blindaje en términos de decibeles (dB).

$$S = 10 \log_{10} \left( \frac{\text{densidad de potencia incidente}}{\text{densidad de potencia transmitida}} \right) \quad \dots \text{Ec. (1.12)}$$

La ecuación esta definida como una pérdida ya que S es siempre positiva. La densidad de potencia (W/m ) también se puede expresar como el producto de E (V/m) por H (Amp/m); entonces la efectividad del blindaje también se puede escribir como:

$$S = 10 \log_{10} \left( \frac{E_0 H_0}{E_1 H_1} \right) \quad \dots \text{Ec. (1.13)}$$

donde:

*S* - efectividad de blindaje (dB)

$E_0, H_0$  - valores de intensidad de los campos antes del blindaje

$E_1, H_1$  - valores de intensidad de los campos después del blindaje

Si la impedancia de onda  $Z_w = E/H$  es la misma antes y después del blindaje, o si la atenuación en el blindaje es la misma para E y para H, entonces:

$$Z_w = \frac{E_0}{H_0} \quad ; \quad H_0 = \frac{E_0}{Z_w}$$

$$Z_w = \frac{E_1}{H_1} \quad ; \quad H_1 = \frac{E_1}{Z_w}$$

por tanto, sustituyendo en (1.13)

$$\begin{aligned} S &= 10 \log_{10} \left( \frac{\frac{E_0^2}{Z_w}}{\frac{E_1^2}{Z_w}} \right) = 10 \log_{10} \left( \frac{E_0^2}{E_1^2} \right) = 10 \log_{10} \left( \frac{E_0}{E_1} \right)^2 \\ &= 20 \log_{10} \left( \frac{E_0}{E_1} \right) \quad \dots Ec. (1.14) \end{aligned}$$

En términos de la intensidad de campo, (1.12) también se puede definir como sigue, si los dos campos fueron medidos en el mismo medio teniendo la misma impedancia de onda.

$$S = 20 \log_{10} \left( \frac{E_0}{E_1} \right) \quad \dots Ec. (1.15)$$

$$S = 20 \log_{10} \left( \frac{H_0}{H_1} \right) \quad \dots Ec. (1.16)$$

La efectividad de blindaje varía con la frecuencia, la geometría del blindaje, la posición dentro del blindaje donde se mide el campo, la magnitud del campo, la dirección de incidencia, y la polarización. Para los propósitos del presente trabajo sólo se consideró el material de blindaje de figura plana.

Existen básicamente dos tipos de pérdidas en una onda electromagnética al chocar con una superficie metálica: la pérdida por reflexión, y la pérdida por absorción o penetración. La primera ocurre cuando la onda incidente es parcialmente reflejada por las interfases entre aire y metal (o entre medios distintos). La segunda ocurre cuando la porción de onda transmitida (no reflejada), es atenuada al penetrar en el material.

La pérdida por penetración es la misma si la antena dipolo o la antena bobina se encuentra cerca o lejos. Sin embargo, la pérdida por reflexión depende del tipo de onda y de la impedancia de la onda.



La efectividad de blindaje total de un material (expresado en decibeles) es igual entonces, a la suma de la pérdida por reflexión (R), la pérdida por absorción (A), y un factor de corrección (B) que toma en cuenta a las reflexiones múltiples en los blindajes delgados. Este último factor se puede despreciar si la pérdida por absorción es mayor a 9 dB. Desde un punto de vista práctico<sup>[2]</sup>, A y B se puede despreciar para campos eléctricos y ondas planas.

$$S_T = A + B + R \quad \text{Ec. (1.17)}$$

donde:

$S_T$  - efectividad total de blindaje (en dB)

#### 1.4 PERDIDAS POR ABSORCION

Cuando una onda electromagnética pasa a través de un material su amplitud disminuye exponencialmente (Hayt, 1974)<sup>[11]</sup>, (Fig. 1.6).

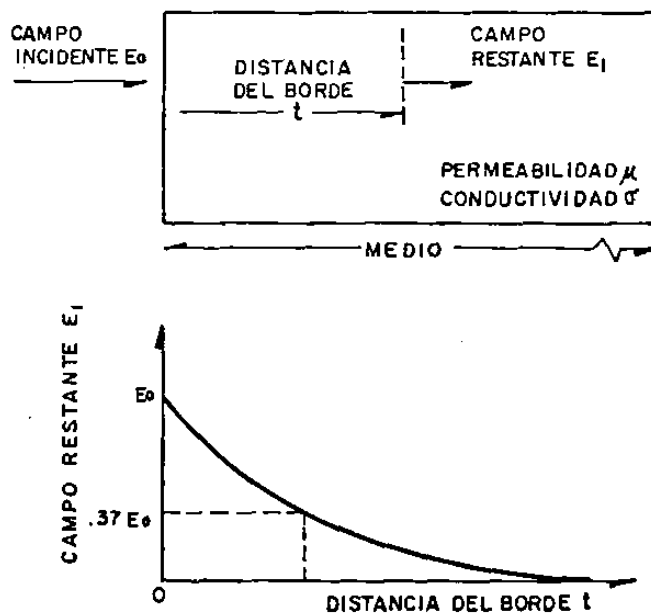


FIG. 1.6 Onda electromagnética atenuada exponencialmente al pasar a través de un medio absorbente.

Tal decaimiento ocurre debido a que las corrientes inducidas en el material producen pérdidas óhmicas y calentamiento dentro del material. El decaimiento es expresado como:

$$E_1 = E_0 e^{-t/\delta} \quad \dots Ec. (1.18)$$

y

$$H_1 = H_0 e^{-t/\delta} \quad \dots Ec. (1.19)$$

donde:

$E_1, H_1$  son intensidades de onda a una distancia  $t$  dentro del medio

$E_0, H_0$  son intensidades de onda dentro de la superficie del medio

$\delta$  - profundidad de penetración

La pérdida por absorción ahora puede expresarse como:

$$\begin{aligned} A &= 20 \left( \frac{t}{\delta} \right) \log_{10} e = 20 (0.434) \left( \frac{t}{\delta} \right) \\ &= 8.69 \left( \frac{t}{\delta} \right) \text{ en dB.} \end{aligned} \quad Ec. (1.20)$$

Se observa en esta ecuación que las pérdidas por absorción en un metal con un grosor de una profundidad de penetración es aproximadamente de 9 dB. Si el grosor se duplica, entonces las pérdidas también se duplican (en dB)

Sustituyendo (1.10) en (1.20) se obtiene el valor de las pérdidas por absorción totales de cualquier material en términos de la permeabilidad y conductividad relativas respecto del cobre:

$$A = 8.69 \left( \frac{t}{\sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}}} \right) = 8.69 \left( \frac{t}{\frac{1}{\sqrt{\pi \mu_0 \sigma_0} \sqrt{f \mu_r \sigma_r}}} \right) = 8.69 \left( \frac{t}{15.15 \sqrt{f \mu_r \sigma_r}} \right)$$

$$= 131.72 t \sqrt{f \mu_r \sigma_r} \quad (dB) \quad \dots Ec. (1.21.a)$$

para grosor del material ( $t$ ) en metros.

$$= 3.34 t \sqrt{f \mu_r \sigma_r} \quad (dB) \quad \dots Ec. (1.21.b)$$

para grosor del material ( $t$ ) en pulgadas

La gráfica de la Fig. (1.7) muestra la curva de las pérdidas por absorción (en dB) contra la relación  $t/\delta$ . Esta curva es aplicable tanto para ondas planas, campos eléctricos, o campos magnéticos.

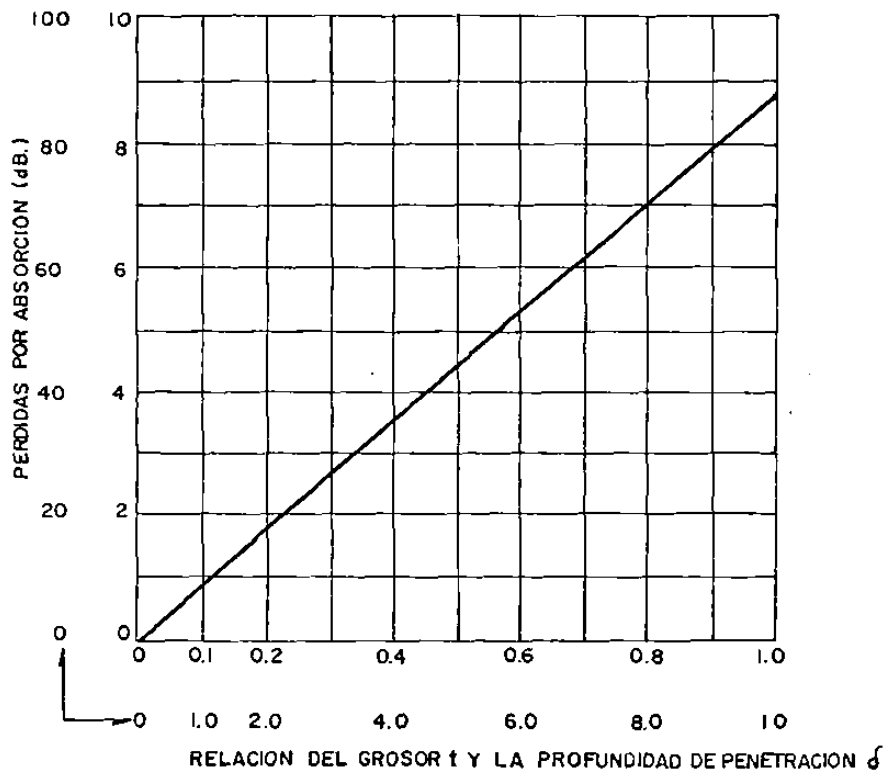


FIG. 1.7 pérdidas por absorción proporcionales al grosor e inversamente proporcionales a la profundidad de penetración del medio. Para campos eléctricos, campos magnéticos y ondas planas.

### 1.5 PERDIDAS POR REFLEXION

La intensidad de la onda transmitida de un medio con impedancia  $Z_1$  a un medio con impedancia  $Z_2$  (Hayt, 1974)<sup>[11]</sup> es:

$$E_1 = \frac{2 Z_2}{Z_1 + Z_2} E_0 \quad \text{Ec. (1.22)}$$

y

$$H_1 = \frac{2 Z_1}{Z_1 + Z_2} H_0 \quad \text{Ec. (1.23)}$$

donde:

$E_0, H_0$  = Intensidades de la onda incidente  
 $E_1, H_1$  = Intensidades de la onda transmitida

Cuando una onda atraviesa un blindaje se encuentra con dos fronteras (Fig. 1.8). La segunda de ellas se encuentra entre un medio de impedancia  $Z_2$  y el otro con impedancia  $Z_1$ .

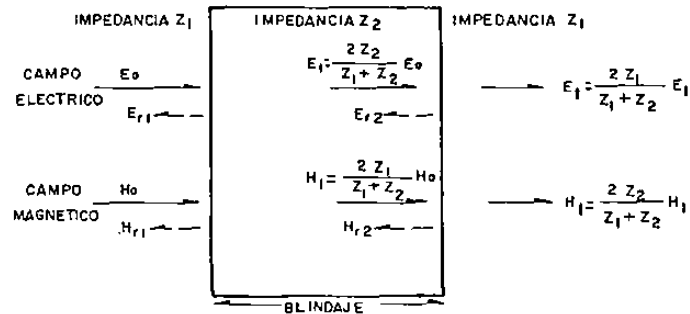


FIG. 1.8 La reflexión y transmisión parcial ocurren a ambas caras del blindaje

La onda transmitida  $E_t, H_t$ , a través de esta frontera es:

$$E_{trans} = \frac{2 Z_1}{Z_1 + Z_2} E_1 \quad \text{Ec. (1.24)}$$

y

$$H_{trans} = \frac{2 Z_2}{Z_1 + Z_2} H_1 \quad \text{Ec. (1.25)}$$

Si el blindaje es grueso comparado con la profundidad de penetración, la intensidad total de la onda transmitida es:

$$E_{trans} = \left( \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} \right) \left( \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \right) E_0 = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} E_0 \quad Ec. (1.26)$$

y:

$$H_{trans} = \left( \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \right) \left( \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} \right) H_0 = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} H_1 \quad Ec. (1.27)$$

Es de notarse que, aunque los campos eléctrico y magnético son reflejados en forma diferente en cada frontera, el efecto total a través de ambas fronteras es el mismo en ambos campos. Si el blindaje es metálico y el área circundante es un aislante, entonces  $Z_1 \gg Z_2$ . Bajo esas condiciones, la reflexión más grande (onda transmitida más pequeña) ocurre cuando la onda entra en el blindaje (primera frontera) para el caso del campo eléctrico, y cuando la onda abandona el blindaje (segunda frontera) para el caso del campo magnético.

Ya que la reflexión fundamental ocurre en la primera superficie en el caso de los campos eléctricos, aunque el material sea muy delgado tendrá pérdidas por reflexión. Sin embargo, en el caso de los campos magnéticos la principal reflexión ocurre en la segunda superficie y por tanto, existirán reflexiones múltiples dentro del blindaje que reducirán la efectividad del mismo. Si  $Z_1 \gg Z_2$ , entonces:

$$E_{trans} = \frac{4Z_2}{Z_1} E_0 \quad Ec. (1.28)$$

y:

$$H_{trans} = \frac{4Z_2}{Z_1} H_0 \quad Ec. (1.29)$$

sustituyendo los términos  $Z_1$  y  $Z_2$  por sus respectivos valores equivalentes  $Z_w$  y  $Z_m$ , en las ecuaciones anteriores, darán por resultado las pérdidas totales por reflexión (despreciando las reflexiones múltiples), para  $Z_w \gg Z_m$

$$R = 20 \log_{10} \frac{|Z_w|}{4 |Z_m|} \quad \text{en dB} \quad \dots Ec. (1.30)$$

donde:

$Z_w$  - impedancia de onda al entrar al blindaje (Ec. 1.1)

$Z_m$  - impedancia de blindaje (Ec. 1.9)

### 1.6 PERDIDAS POR REFLEXION EN ONDAS PLANAS

En el caso de las ondas planas (campos lejanos), la  $Z_w$  es igual a la impedancia característica  $Z_0 = 377 \Omega$ . Por tanto:

$$R = 20 \log_{10} \frac{94.25}{|Z_p|} \quad \text{dB} \quad \dots \text{Ec. (1.31)}$$

$$\text{como: } |Z_p| = 3.68 \times 10^{-7} \sqrt{f} \sqrt{\frac{\mu_r}{\sigma_r}}$$

entonces, sustituyendo:

$$R = 20 \log_{10} \left( \frac{2.6 \times 10^8}{\sqrt{\frac{f \mu_r}{\sigma_r}}} \right) = 20 \log_{10} \left( \frac{2.6 \times 10^8}{\left(\frac{\sigma_r}{f \mu_r}\right)^{-1/2}} \right)$$

$$R = 20 \log_{10} \left( 2.6 \times 10^8 \left(\frac{\sigma_r}{f \mu_r}\right)^{1/2} \right)$$

$$R = 20 \log_{10} (2.6 \times 10^8) + 20/2 \log_{10} \left(\frac{\sigma_r}{f \mu_r}\right)$$

$$R = 168 + 10 \log_{10} \left(\frac{\sigma_r}{f \mu_r}\right) \quad \text{dB} \quad \dots \text{Ec. (1.32)}$$

### 1.7 PERDIDAS POR REFLEXION EN EL CAMPO ELECTRICO

La impedancia de onda debida a una fuente puntual de campo eléctrico (cuando  $d < \lambda / 2\pi$ ) se puede aproximar al siguiente valor<sup>(2)</sup>:

$$|Z_p|_e = \frac{1}{2\pi f \epsilon r} \quad \text{Ec. (1.33)}$$

donde:

$d$  - distancia de la fuente al blindaje (en mts.)  
 $\epsilon$  - constante dieléctrica



Las pérdidas por reflexión se pueden determinar entonces, sustituyendo la Ecuación anterior en (1.30), resultando:

$$R_e = 20 \log_{10} \frac{1}{8\pi f \epsilon d |Z_j|} \quad \text{dB} \quad \dots \text{Ec. (1.34)}$$

con el valor de  $\epsilon$ , y el valor de  $|Z_j|$ , se tiene:

$$R_e = 20 \log_{10} \frac{4.5 \times 10^9}{f d |Z_j|}$$

$$= 322 + 10 \log_{10} \frac{\sigma_r}{\mu_r f^3 d^2} \quad \text{dB} \quad \dots \text{Ec. (1.35)}$$

En la Fig. 1.9 las curvas llamadas "de campo eléctrico" se obtienen de (1.31) para un blindaje de cobre con  $d$  igual a 1 y 30 mts. La ecuación y su gráfica representan las pérdidas por reflexión a una distancia específica de una fuente de antena dipolo que produce solamente campo eléctrico.

Sin embargo, una fuente real de campo eléctrico tiene una pequeña componente de campo magnético. Por tanto, tiene una pérdida por reflexión entre la línea del campo eléctrico y la línea de la onda plana. Como, generalmente, no se conoce exactamente en que lugar de esas dos líneas puede caer la fuente real, los cálculos de la onda plana (Ec. 1.25) se emplean normalmente para determinar la pérdida por reflexión para el campo eléctrico. La pérdida por reflexión real entonces, es igual o más grande que la calculada.

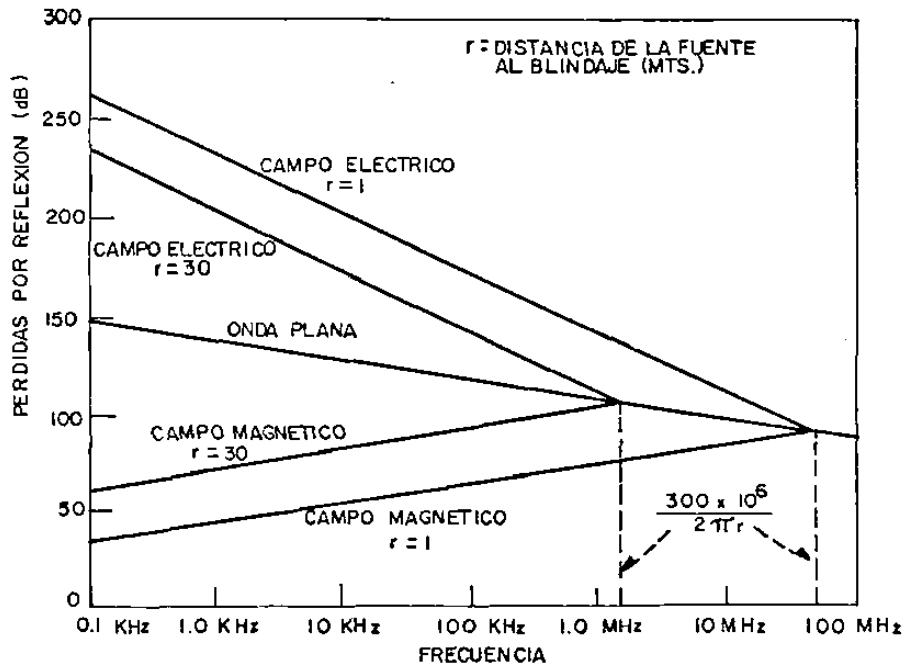


FIG. 1.9 Las pérdidas por reflexión en el cobre varían con la frecuencia, distancia de la fuente y tipo de onda.

### 1.8 PERDIDAS POR REFLEXION EN EL CAMPO MAGNETICO

La impedancia de onda debida a una fuente antena bobina de campo magnético (cuando  $d < \lambda/20$ ) se puede aproximar al siguiente valor<sup>(2)</sup>:

$$|Z_{\text{ref}}| = 2\pi f \mu d \quad \text{Ec. (1.36)}$$

donde:

$d$  - distancia de la fuente al blindaje (mts)

$\mu$  - permeabilidad del medio

Las pérdidas por reflexión se pueden determinar entonces, sustituyendo la Ecuación anterior en (1.30), resultando:

$$R_m = 20 \log_{10} \frac{2\pi f \mu d}{4 |Z_f|} \quad \text{dB} \quad \dots \text{Ec. (1.37)}$$

sustituyendo el valor de  $\mu_0$  y el valor de  $|Z_f|$ , se tiene

$$R_m = 20 \log_{10} \left( \frac{1.97 \times 10^{-6} f d}{|Z_f|} \right)$$

$$R_m = 14.6 + 10 \log_{10} \left( \frac{f d^2 \sigma_r}{\mu_r} \right) \quad \text{dB} \quad \dots \text{Ec. (1.38)}$$

En la Fig. 1.9, la curvas llamadas "de campo magnético" se obtienen de (1.38) para un blindaje de cobre con  $r$  igual a 1 y 30 mts. La Ecuación (1.38) y su gráfica (Fig.1.9) representan la pérdida por reflexión a un distancia específica desde la fuente puntual que produce solamente un campo magnético.

La mayoría de las fuentes de campo magnético reales tienen también un pequeña cantidad de campo eléctrico, de modo que la pérdida por reflexión se encuentra entre la línea de campo magnético y la línea de onda plana. Como, generalmente no se conoce el punto preciso entre esas dos líneas, donde cae la fuente, la (1.38) se debe emplear para determinar la pérdida por reflexión para un campo magnético. Esto significa que la pérdida real por reflexión será igual o más grande que la calculada.

Si no se conoce la distancia a la fuente, las pérdidas por reflexión del campo magnético cercano se pueden despreciar a bajas frecuencias.

### 1.9 ECUACION GENERAL PARA LAS PERDIDAS POR REFLEXION

Despreciando las reflexiones múltiples, la ecuación general para las pérdidas por reflexión es:

$$R = C + 10 \log_{10} \left( \frac{\sigma_z}{\mu_z} \right) \left( \frac{1}{f^n d^m} \right) \quad \text{Ec. (1.39)}$$

donde  $C$ ,  $n$ ,  $m$  son constantes

La Ecuación (1.39) es equivalente a (1.32) para ondas planas, a (1.35) para campos eléctricos, y a (1.38) para campos magnéticos. La Ecuación (1.39) muestra que las pérdidas por reflexión están en función de la conductividad del material, dividido por su permeabilidad.

### 1.10 REFLEXIONES MULTIPLES EN BLINDAJES DELGADOS

Si el blindaje es delgado, la onda reflejada de la segunda frontera es a su vez reflejada de la primera frontera, para luego regresar a la segunda frontera y ser nuevamente reflejada (Fig. 1.10)

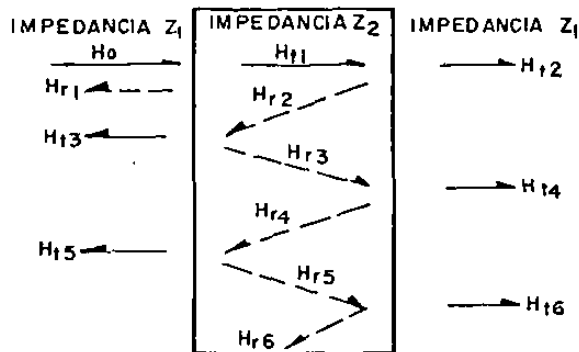


FIG. 1.10 Las reflexiones múltiples que ocurren en un blindaje delgado; parte de la onda es transmitida a través de cada reflexión.

Este efecto se puede despreciar si el blindaje es muy delgado, ya que la pérdida por absorción será alta. En el momento en que la onda alcance la segunda frontera por segunda vez, la amplitud será despreciable, ya que para entonces habrá atravesado el grosor del blindaje en tres ocasiones.

Para los campos eléctricos la mayoría de las ondas incidentes son reflejadas en la primer frontera, y solamente un pequeño porcentaje

entra al material. Esto se puede deducir de (1.22) y del hecho que  $Z_2 \gg Z_1$ . Por tanto, las reflexiones múltiples dentro del blindaje se pueden despreciar para los campos eléctricos.

Para los campos magnéticos, la mayoría de las ondas incidentes pasan dentro del material por la primer frontera, como lo muestra (1.23) cuando  $Z_2 \gg Z_1$ . La magnitud de la onda transmitida es realmente el doble de la onda incidente. Por tanto, con un campo magnético de tal magnitud dentro del blindaje, deberá considerarse el efecto de las reflexiones múltiples.

El factor de corrección para las reflexiones múltiples de los campos magnéticos en un blindaje de grosor  $t$  y profundidad de penetración  $\delta$  es aproximadamente, si  $Z_1 \gg Z_2$  :

$$B = 20 \log_{10} (1 - e^{-t/\delta}) \quad dB \quad \dots Ec. (1.40)$$

### 1.11 ECUACION SIMPLIFICADA DE LA EFECTIVIDAD DE BLINDAJE.

La ecuación original para el blindaje electromagnético de Schelkunoff está expresada como:

$$S = R + A + B$$

*sustituyendo los valores de R, A, y B*

$$S = 20 \left( \log_{10} \frac{|K+1|^2}{4|K|} + \log_{10} e^{\alpha t} + \log_{10} \left| 1 - \frac{(K-1)^2}{(K+1)^2} e^{-2\Gamma t} \right| \right) \quad \dots Ec. (1.41)$$

*donde:*

$$K = \frac{Z_w}{Z_a} = \text{coeficiente de reflexión}$$

$\Gamma$  = constante de propagación compleja en el metal

$\alpha$  = parte no imaginaria de  $\Gamma$

$t$  = grosor del material

Tal expresión no está en términos de las características intrínsecas de los materiales de blindaje, por lo que su uso resulta un tanto complicado. Sin embargo, si los materiales de blindaje no son de una sola capa, sino que son multicapas (metales compuestos), la Ecuación (1.17) que contempla a (1.21), a (1.32), y a (1.40), (Ott, 1988)<sup>(2)</sup>, también resulta inadecuada ya que es

difícil conocer las características precisas en tales condiciones.

Existe, por tanto, otra manera de expresar a las diferentes pérdidas (y en consecuencia la efectividad de blindaje), en términos de impedancias (McBride 1987)<sup>(8)</sup>. La expresión general es:

$$S = 20 \log \left| \frac{2 Z_{ab} Z_w}{(Z_{aa} + Z_w)(Z_{bb} + Z_w) - Z_{ab}^2} \right| \quad \text{dB} \quad \dots \text{Ec. (1.42)}$$

donde:

$Z_w$  = impedancia de onda

$Z_{aa}$  = impedancia de superficie interna del metal

$Z_{bb}$  = impedancia de superficie externa del metal

$Z_{ab}$  = impedancia de superficie de transferencia del metal

Los valores de las diferentes impedancias se calculan, para una sola capa:

$$Z_{aa} = Z_{bb} = \left( \frac{1+j}{\delta \sigma} \right) \coth \left( \frac{(1+j)t}{\delta} \right) \quad \dots \text{Ec. (1.43)}$$

$$Z_{ab} = \left( \frac{1+j}{\delta \sigma} \right) \operatorname{csch} \left( \frac{(1+j)t}{\delta} \right) \quad \dots \text{Ec. (1.44)}$$

$$Z_w = j\omega \mu_0 d \quad \dots \text{Ec. (1.45)}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}} \quad \dots \text{Ec. (1.46)}$$

donde:

$\omega$  - frecuencia angular de la onda

$\mu$  - permeabilidad del material de blindaje

$\sigma$  - conductividad del blindaje

$t$  - grosor del blindaje

$d$  - distancia de la fuente al blindaje

$\delta$  - profundidad de penetración

## CAPITULO 2

### VERIFICACION DE EFECTIVIDAD DE BLINDAJE POR RECIPROCIDAD

#### 2.1 TEOREMA DE RECIPROCIDAD

Existe un interesante principio que concierne al comportamiento de una red cuando una fuente de voltaje es cambiada de un punto a otro de un circuito. Ese principio es establecido por el Teorema de reciprocidad, cuyo enunciado es:

" Si un voltaje se aplica en una rama de una red lineal-bilateral, se produce una corriente en cualquier otra rama de la red de idéntico valor a la corriente obtenida en la primer rama si el voltaje se aplicara en la segunda rama."

Esto significa que, si suponemos que a una red se aplica una fuente de voltaje constante, se obtiene una corriente en alguna parte de la red (medida con un amperímetro); si el generador y el amperímetro se intercambian de posición, y el generador aún suministra el mismo voltaje, el amperímetro, en su nueva posición continuará midiendo el mismo resultado (Fig. 2.1a y 2.1b)

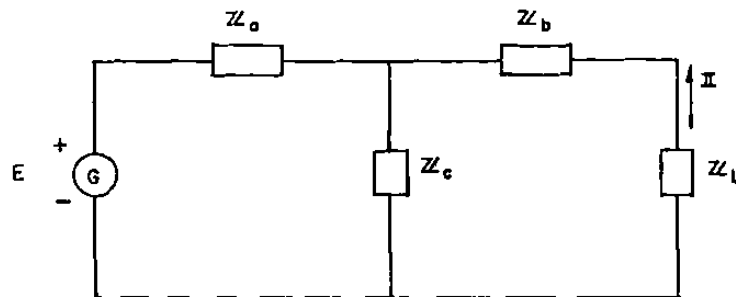


FIG. 2.1a

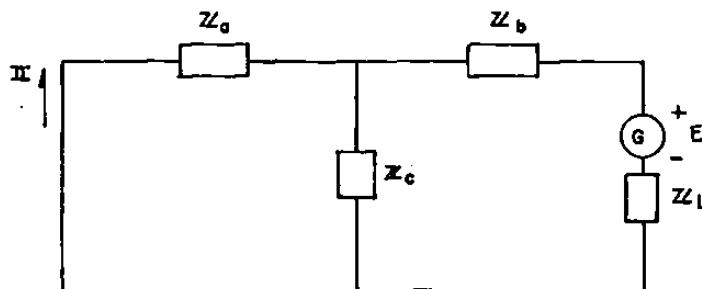


FIG. 2.1b

Teorema de Reciprocidad

El teorema se puede demostrar analíticamente como sigue. De la Fig. 2.1a, la impedancia vista desde la fuente es:

$$\begin{aligned}
 Z_{A_{eq}} &= Z_a + \frac{Z_c (Z_b + Z_L)}{Z_b + Z_c + Z_L} \\
 &= \frac{Z_a Z_b + Z_b Z_c + Z_c Z_a + Z_L (Z_a + Z_c)}{Z_b + Z_c + Z_L} \quad \dots EC. (2.1)
 \end{aligned}$$

y la corriente es:

$$\begin{aligned}
 I &= -\frac{E}{Z_{A_{eq}}} \times \frac{Z_c}{Z_b + Z_c + Z_L} \\
 &= \frac{-E Z_c}{Z_a Z_b + Z_b Z_c + Z_c Z_a + Z_L (Z_a + Z_c)} \quad \dots EC. (2.2)
 \end{aligned}$$

De la Fig. 2.1b, la impedancia vista desde la fuente es:

$$\begin{aligned}
 Z_{B_{eq}} &= Z_b + Z_L + \frac{Z_c Z_a}{Z_a + Z_c} \\
 &= \frac{Z_a Z_b + Z_b Z_c + Z_c Z_a + Z_L (Z_a + Z_c)}{Z_a + Z_c} \quad \dots EC. (2.3)
 \end{aligned}$$

y la corriente es:

$$\begin{aligned}
 I &= -\frac{E}{Z_{B_{eq}}} \times \frac{Z_c}{Z_a + Z_c} \\
 &= \frac{-E Z_c}{Z_a Z_b + Z_b Z_c + Z_c Z_a + Z_L (Z_a + Z_c)} \quad \dots EC. (2.4)
 \end{aligned}$$

Se observa que las corrientes producidas en las dos diferentes posiciones, al intercambiar la fuente, son de idéntico valor; por tanto el teorema es válido.



## 2.2 APARATO DE MEDICION DE EFECTIVIDAD DE BLINDAJE

La aplicación del Teorema de Reciprocidad en la medición de efectividad de blindaje no significa realmente que la fuente se aplique en una determinada posición del sistema, para luego colocarse en otra diferente. Se interpreta que, al tener impedancias similares tanto en la fuente como en el receptor, es idéntico el resultado de la medición de efectividad de blindaje teniendo al material de blindaje en una posición cercana a la fuente o cercana al receptor.

Para el desarrollo de las pruebas de efectividad de blindaje se utilizó un aparato especialmente diseñado para ello por Texas Instruments, en el cual se pudieron colocar las hojas de diferentes materiales de blindaje a diferentes posiciones predeterminadas. Dentro del aparato se contienen las bobinas fuente y receptora, esta última con un amplificador añadido para poder detectar las ondas atenuadas.

El aparato de prueba (Fig. 2.2) consiste básicamente de un par de bobinas coaxiales de diámetro interior de 18.4 mm. (0.725") devanado sobre cilindros de Teflón en una ranura de 5.1 mm. (0.2") de ancho y 3.2 mm. (0.125") de profundidad. La separación entre las caras de las bobinas es exactamente de 20 mm. Cada bobina está cubierta por una capa tubular de 50.8 mm. de diámetro (2"), una longitud de 63.5 mm. (2.5"), y 0.25 mm. (0.010") de grueso, hecho de una aleación Mumetal recocido. La primer capa es cubierta por una segunda capa (separadas con Mylar de 0.08 mm. (0.003")) con el idéntico material, grosor y longitud. Cada bobina y cada capa estan cubiertas por hule de silicón de 12.5 mm. (0.5") en un tubo de permalloy 49 de 1.3 mm. (0.050") de grueso y encapsulados en una caja hecha de metal compuesto (cobre/ invar/ cobre) de 1.3 mm. (0.50"). la abertura entre las dos bobinas (y su respectivas capas) está cubierta en cada extremo por fieltro que permite la fácil inserción de blindajes y previene daño a las bobinas.

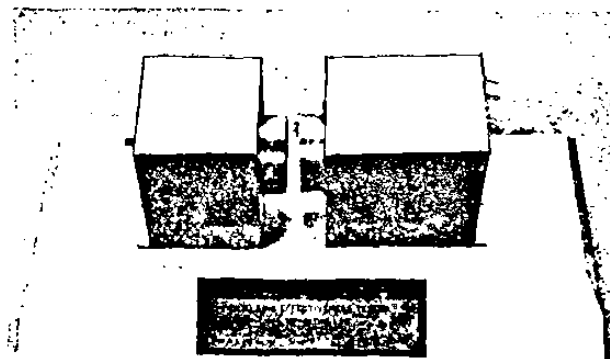


FIGURA 2.2 APARATO DE MEDICION

La primer bobina consiste de 400 vueltas de alambre de cobre # 34, y sus terminales conducen directamente a la entrada de una fuente de señal senoidal. El valor de la impedancia de dicha bobina es de 50 Ohms., aunque puede variarse el valor de dicha impedancia con un transformador de impedancia. La segunda bobina es idéntica a la primera y está conectada directamente a un amplificador del tipo operacional; acoplado directamente a la segunda caja. Este amplificador fué diseñado específicamente para la realización de las mediciones del presente trabajo por los tesisistas, en forma separada al aparato.

Tanto la bobina fuente como la bobina receptora están ubicadas en el aparato diseñado por Texas Instruments. Para la medición de la efectividad de blindaje son necesarias una fuente de generación de ondas electromagnéticas y un circuito receptor que detecte el valor de las ondas que logran atravesar el blindaje. Para ello son necesarios, entonces, un par de bobinas (emisora y receptora) que permitan emitir y recibir respectivamente los campos magnéticos en cuestión. La impedancia de la fuente de señales tiene, al igual que el circuito de recepción, una impedancia de 50 Ohms. Es por eso que la reciprocidad se demuestra cuando, tanto la fuente como el circuito receptor tienen impedancias iguales (en este caso de 50 Ohms).

La Fig. 2.3 ilustra la forma en la que se interpreta la reciprocidad en las mediciones efectuadas, cambiando de posición el blindaje (cerca de la fuente ó cerca del receptor), y no cambiando de posición la fuente.

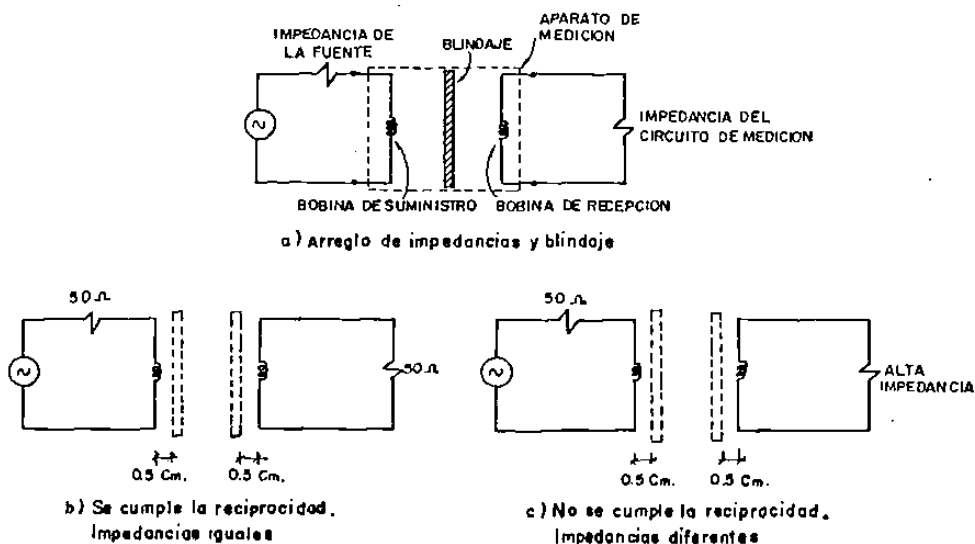


FIGURA 2.3

### 2.3 AMPLIFICADOR OPERACIONAL

Las características del amplificador empleado fueron las siguientes:

AMPLIFICADOR OPERACIONAL TIPO : LF356 (National)

Característica	Valor	Tolerancia(%)
a) Resistencia de entrada	1E+12	10
b) Ganancia de lazo abierto	25000	10
c) Resistencia de salida	75	0
d) voltaje offset (Voffset)	0.005	50
e) Coef. de temp. Voffset (V/°c)	0.000003	10
f) Primer polo (Hz)	5	40
g) Segundo polo (Hz)	1E+07	10
h) Slew rate (V/seg)	1.2E+07	10
i) Corr. de ent. offset (Ioffset)	3E-12	10
j) Corr. ent. bias	3e-11	0
K) Corr. de doble intervalo ( c )	0	0

La Fig. 2.4 muestra el arreglo del amplificador operacional para una ganancia de 40 dB, con resistencia de retroalimentación de 2200 Ohms, resistencia de entrada de 56 Ohms y alimentación de +9 V.

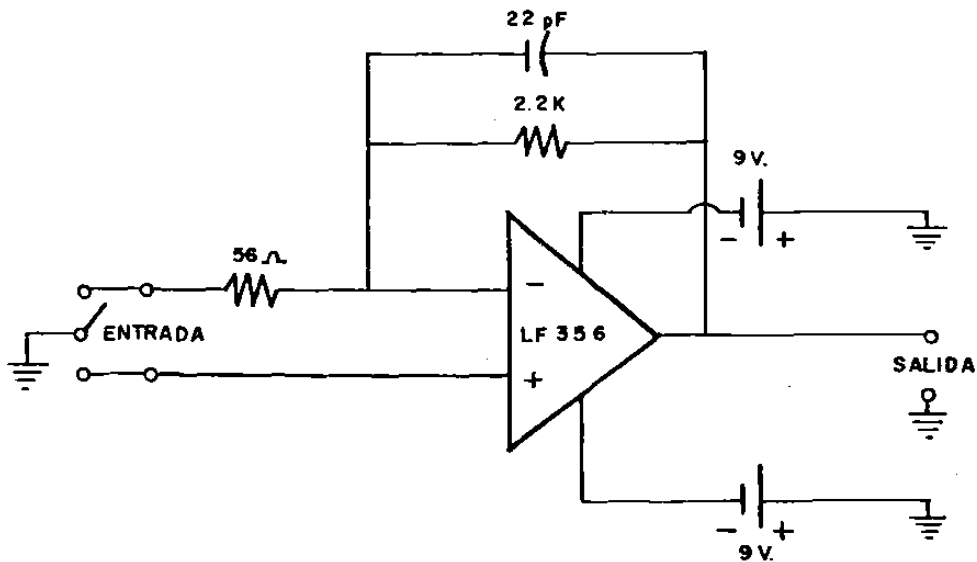
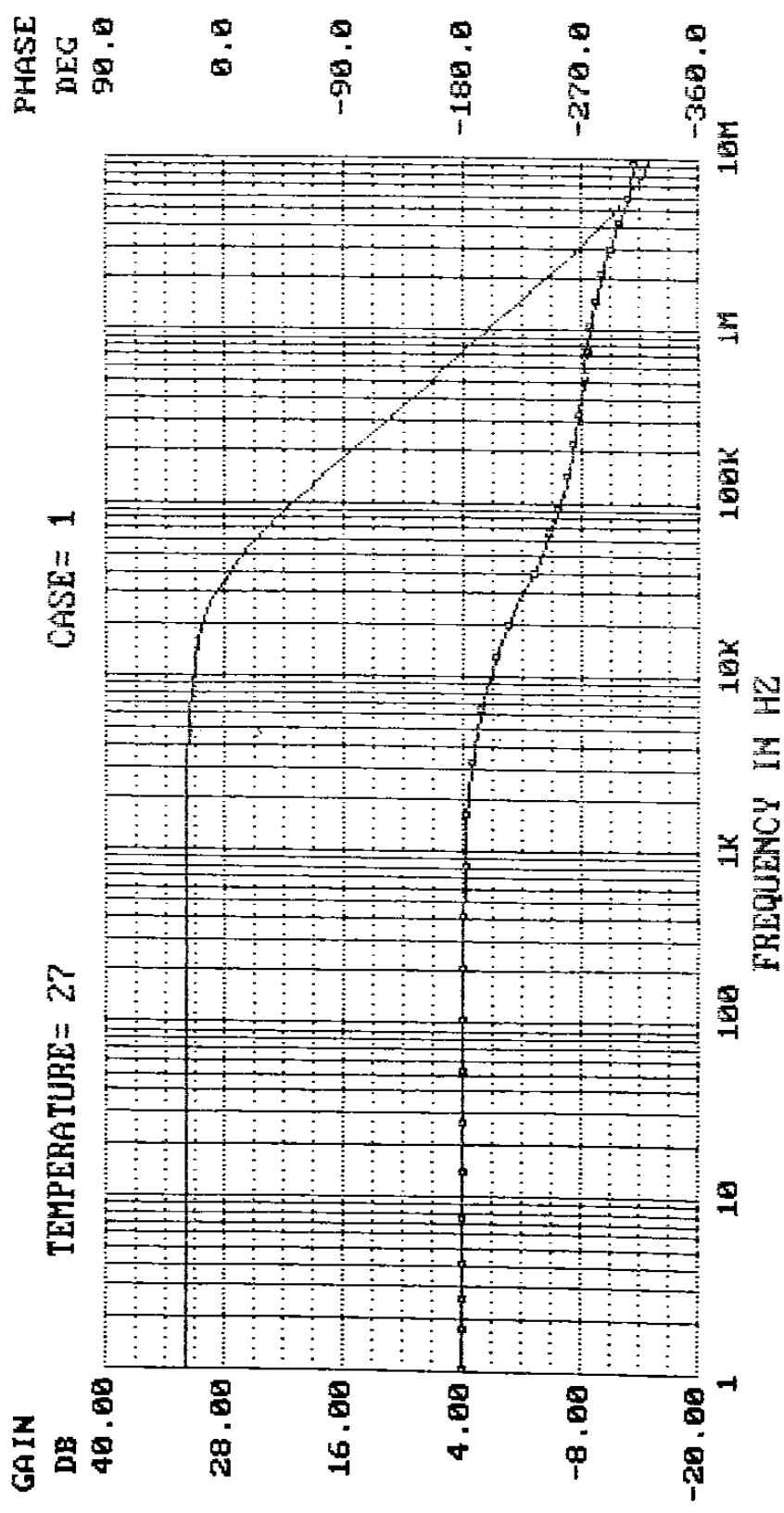


FIG. 2.4 Arreglo del circuito del amplificador utilizado

La Fig. 2.5 muestra la gráfica del comportamiento del amplificador operacional ganancia contra frecuencia. Se observa que, de 1 a 10 KHz de frecuencia, la ganancia es aproximadamente estable, y que entre 10 y 100 KHz, (máxima frecuencia medida en las pruebas) la ganancia disminuye considerablemente.

FIGURA 2.5



Frequency = 100.00000D+05 HZ      Gain = -14.978 DB  
 Phase angle= -309.749      Degrees      Group delay= 0.00000D+00 Sec  
 Gain slope = -199.38954E-02 DB/OCT      Peak gain = 31.883DB/F= 100.00000D-02

## 2.4 PRUEBAS REALIZADAS

Los materiales de blindaje sometidos a las pruebas de efectividad de blindaje fueron:

Tabla 2.1 MATERIALES DE PRUEBA

MATERIAL	PROPORCION	GROSOR t	
		(cm.)	(pulg.)
1.- Cobre		0.0393	0.0155
2.- Niquel		0.0228	0.009
3.- Aluminio		0.0635	0.025
4.- Metal compuesto*	20-60-20	0.0254	0.01
5.- Papel Aluminio		0.0032	0.00128

\*El metal compuesto seleccionado está formado por tres capas: cobre(20% del grosor), aleación níquel- hierro (60% del grosor), cobre (20% del grosor).

Cada una de las placas de blindaje tiene una dimensión aproximada de 20 x 25 cm. variando un poco según el material.  
Las frecuencias aplicadas en cada medición fueron:

Tabla 2.2 FRECUENCIAS APLICADAS

1.- 500	Hz.	17.- 10000	Hz.
2.- 666.66	Hz.	18.- 12500	Hz.
3.- 800	Hz.	19.- 15037	Hz.
4.- 1000	Hz.	20.- 17543	Hz.
5.- 1250	Hz.	21.- 20000	Hz.
6.- 1666.66	Hz.	22.- 25000	Hz.
7.- 2000	Hz.	23.- 31250	Hz.
8.- 2500	Hz.	24.- 36363	Hz.
9.- 3030	Hz.	25.- 40000	Hz.
10.- 3571	Hz.	26.- 50000	Hz.
11.- 4000	Hz.	27.- 60240	Hz.
12.- 5000	Hz.	28.- 65019	Hz.
13.- 6024	Hz.	29.- 70422	Hz.
14.- 7042	Hz.	30.- 80645	Hz.
15.- 8024	Hz.	31.- 90900	Hz.
16.- 9009	Hz.	32.- 100000	Hz.

Para cada frecuencia, las mediciones se realizaron a dos diferentes valores de impedancia en el circuito de recepción:

- a) con impedancia de 56 Ohms (aproximadamente igual a la impedancia de la fuente, 50 Ohms)
- b) con muy alta impedancia.



## 2.5 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS

Los valores de voltaje (en volts) obtenidos sin blindaje se dan en la siguiente tabla.

Tabla 2.4 VOLTAJES DE SALIDA SIN BLINDAJE

FRECUENCIA (Khz.)	Vpp (v.) (a 50 Ohms)	Vpp (v.) (a alta impedancia)
0.5	0.7	1.14
0.666	0.87	1.45
0.8	1.02	1.7
1.0	1.17	2.0
1.25	1.31	2.35
1.666	1.44	2.82
2.0	1.48	3.12
2.5	1.44	3.45
3.03	1.34	3.6
3.571	1.24	3.72
4.0	1.16	3.8
5.0	0.99	3.9
6.024	0.86	3.95
7.042	0.74	3.95
8.024	0.65	3.92
9.009	0.58	3.65
10.0	0.54	3.9
12.5	0.43	3.9
15.037	0.355	3.95
17.543	0.297	4.05
20.0	0.26	4.1
25.0	0.207	4.2
31.25	0.18	4.35
36.363	0.14	5.0
40.0	0.126	5.4
50.0	0.098	7.8
60.24	0.08	19.59
65.019	0.074	19.8
70.422	0.068	19.9
80.645	0.058	5.6
90.09	0.051	2.9
100.0	0.046	2.0

Los valores de voltaje de salida (en decibels) registrados con los distintos materiales de blindaje, en las diferentes posiciones, se indican en las tablas del apéndice A. Se especifican las mediciones tanto a 50 Ohms como a alta impedancia.

El procesamiento de los datos permitió obtener una serie de curvas que indican el comportamiento de la efectividad de blindaje con respecto a la posición, a la frecuencia, y a la impedancia del circuito de recepción a fin de comprobar gráficamente el Teorema de Reciprocidad planteado. Los apéndices B, C y D detallan, para todas las muestras de blindaje las siguientes curvas:

- a) Apéndice B.- Curvas de efectividad de blindaje versus frecuencia.
- b) Apéndice C.- Curvas de efectividad de blindaje con respecto a la posición central versus distancia de la fuente.
- c) Apéndice D.- Curvas de desviación máxima versus frecuencia.

## 2.6 ANALISIS DE RESULTADOS.

Las curvas de variación de efectividad de las posiciones 1, 2, 4, y 5 con respecto a la posición central para el cobre a 50 Ohms en el receptor, se muestran en la Fig. 2.6. Se observa con detalle que existe simetría entre los valores de las posiciones 1 - 5, y 2 - 4, y por tanto se muestra la evidencia de la reciprocidad. Los valores son mostrados para frecuencias entre 0.5 KHz. y 70.422 KHz. Es interesante notar que para frecuencias abajo de 2 KHz. los valores tienen una efectividad mayor a la de la posición central, pero para frecuencias mayores a 2 KHz. los valores son siempre menores.

La Fig. 2.7 es una figura similar a la anterior pero para el cobre con alta impedancia en el receptor. Se observa la falta de simetría entre los valores de las posiciones 1 - 5, y 2 - 4, y por tanto la ausencia de la reciprocidad, debido a que no se cumplen las condiciones de igualdad de impedancias entre la impedancia de la fuente (50 Ohms) y la impedancia del circuito receptor (alta impedancia).

En la fig. 2.8 se muestran las curvas de efectividad de las posiciones 1, 2, 4, y 5 con respecto a la posición central para el níquel a 50 ohms en el receptor. Es interesante notar que, aunque las impedancias de la fuente y circuito receptor son iguales no existe simetría entre las posiciones 1 -5, y 2 -4. Es decir, no se cumple la reciprocidad. Esto es debido a que dado que el níquel no es un material con características lineales, entonces no se cumplen las condiciones para la reciprocidad.



La Fig. 2.9 es similar a la Fig. 2.8 pero con una impedancia alta en el receptor. Nuevamente se dá la falta de simetría (no existe reciprocidad) dado que el material no es lineal y además porque no son iguales las impedancias de la fuente y circuito receptor.

La variación de efectividad de las diferentes posiciones de blindaje con respecto a la posición central se observa con mas detalle en las figuras de desviación máxima versus frecuencia. La Fig. 2.10 muestra, para el caso del cobre, 50 ohms, pos. 1 y 5, como cambia de valores positivos a negativos, en un frecuencia aproximada de 2 KHz. (0.3 en escala logarítmica). Este cambio de valor positivo a negativo lo adquiere cuando el valor de la impedancia de onda  $Z_w$  es de un valor muy cercano al valor de la impedancia del material  $Z_{aa}$ .

En las gráficas de la Fig. 2.11 a la Fig. 2.15 se indican las curvas de desviación máxima versus frecuencia para diferentes posiciones del cobre para 50 Ohms y para alta impedancia.

Las gráficas de la Fig. 2.16 a la Fig. 2.23 indican las curvas de desviación máxima versus frecuencia para diferentes posiciones del níquel a 50 Ohms y a alta impedancia. Se observa que el cambio de desviación positiva a negativa ocurre a un frecuencia mucho más alta que en el caso del cobre; es decir para una  $Z_w$  mucho más alta. Parece ser que este cambio está relacionado con la frecuencia en donde  $|Z_w|$  es aproximadamente igual a  $|Z_{aa}|$  (mucho más alto en el níquel que en el cobre).

En las diferentes curvas de las Figs. 2.10 a la 2.23 se observaron cambios bruscos en el extremo derecho. Esto se debió principalmente a la imprecisión de las mediciones detectadas a frecuencias cercanas a los 100 KHz. La imprecisión se debió, asimismo, a las limitaciones del amplificador y en consecuencia a la inexactitud de las mediciones logradas en el osciloscopio a dichas frecuencias. Es recomendable por tanto, utilizar un amplificador de señales con un rango de frecuencias de corte más alto.

FIG. 2.6 Blindaje y Reciprocidad  
 Cobre (0.0155") 50 Ohms

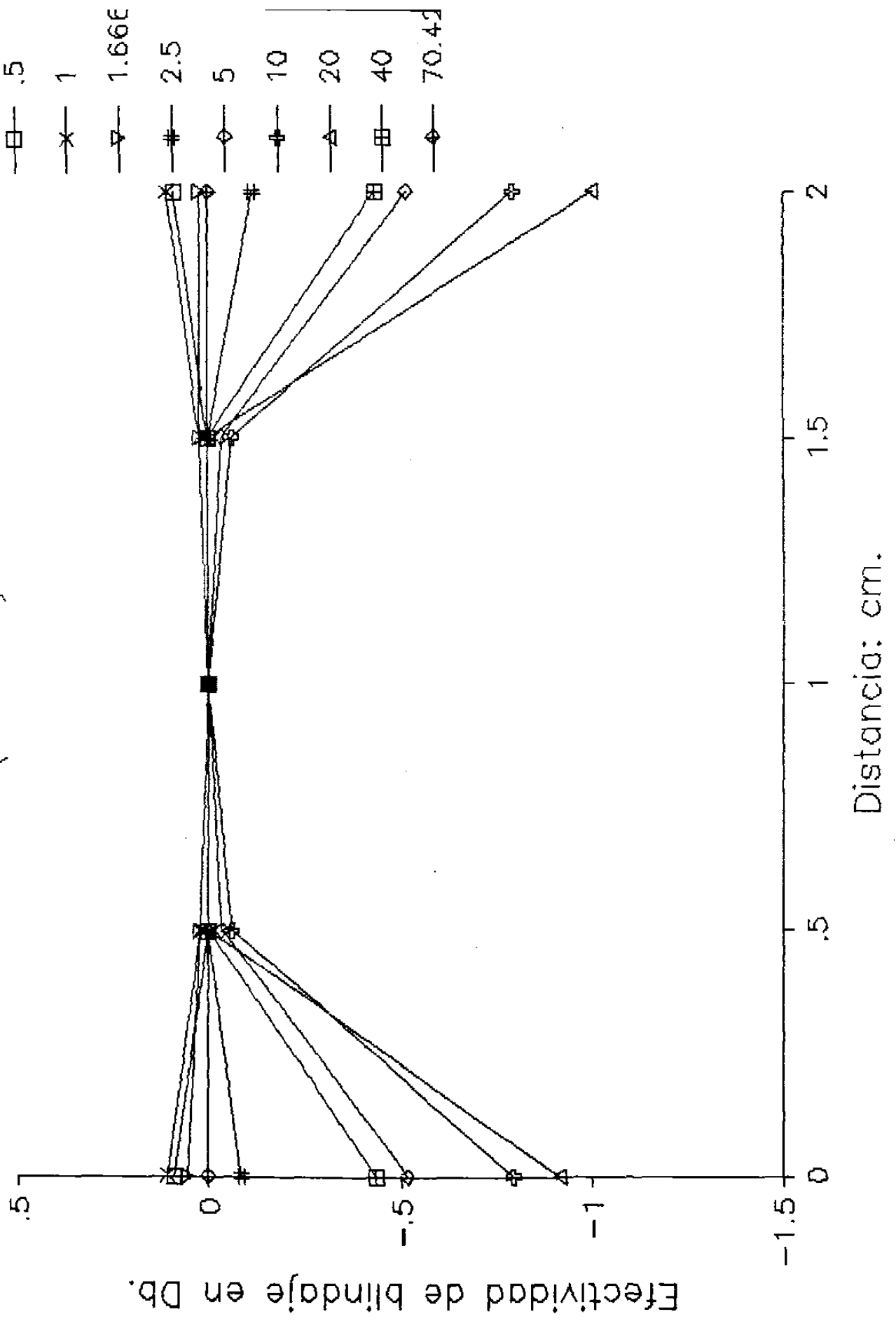


FIG. 2.8 Blindaje y Reciprocidad  
 Niquel (0.009") 50 Ohms

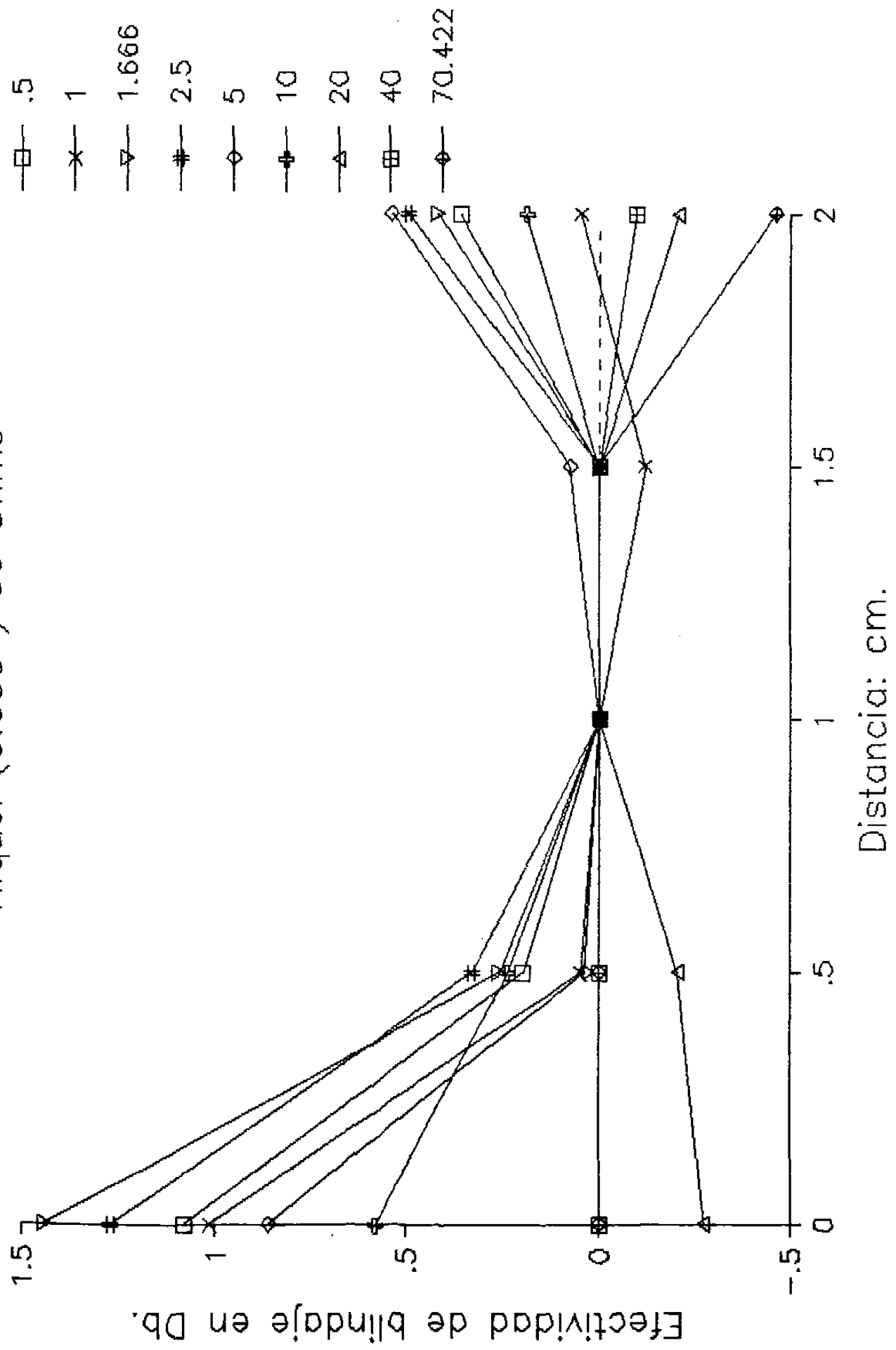


FIG. 2.9 Blindaje y Reciprocidad  
 Niquel (0.009") Alta impedancia

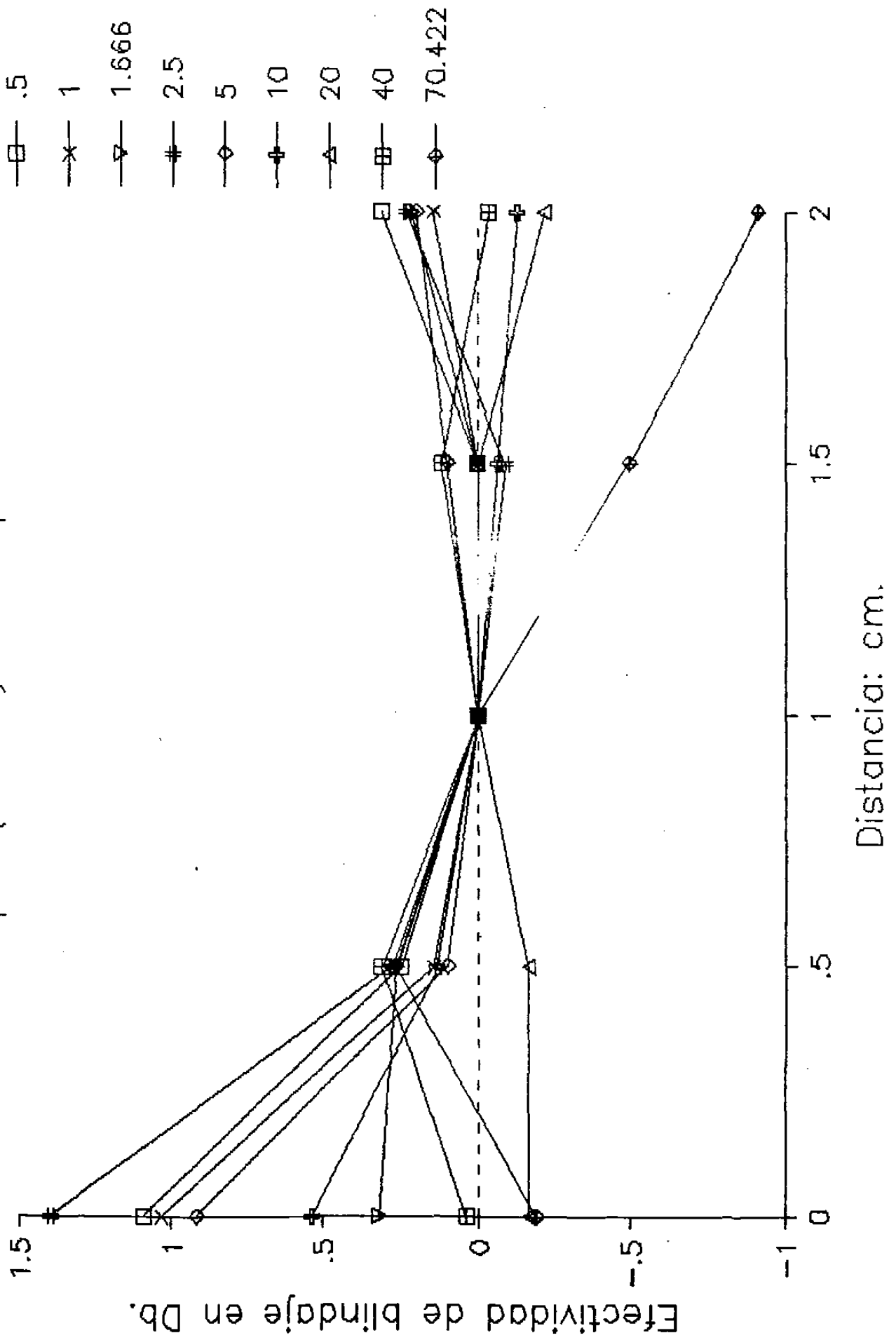


FIG. 2.10 Blindaje y Reciprocidad  
 Cobre (0.0155") 50 ohms, pos. 1 y 5

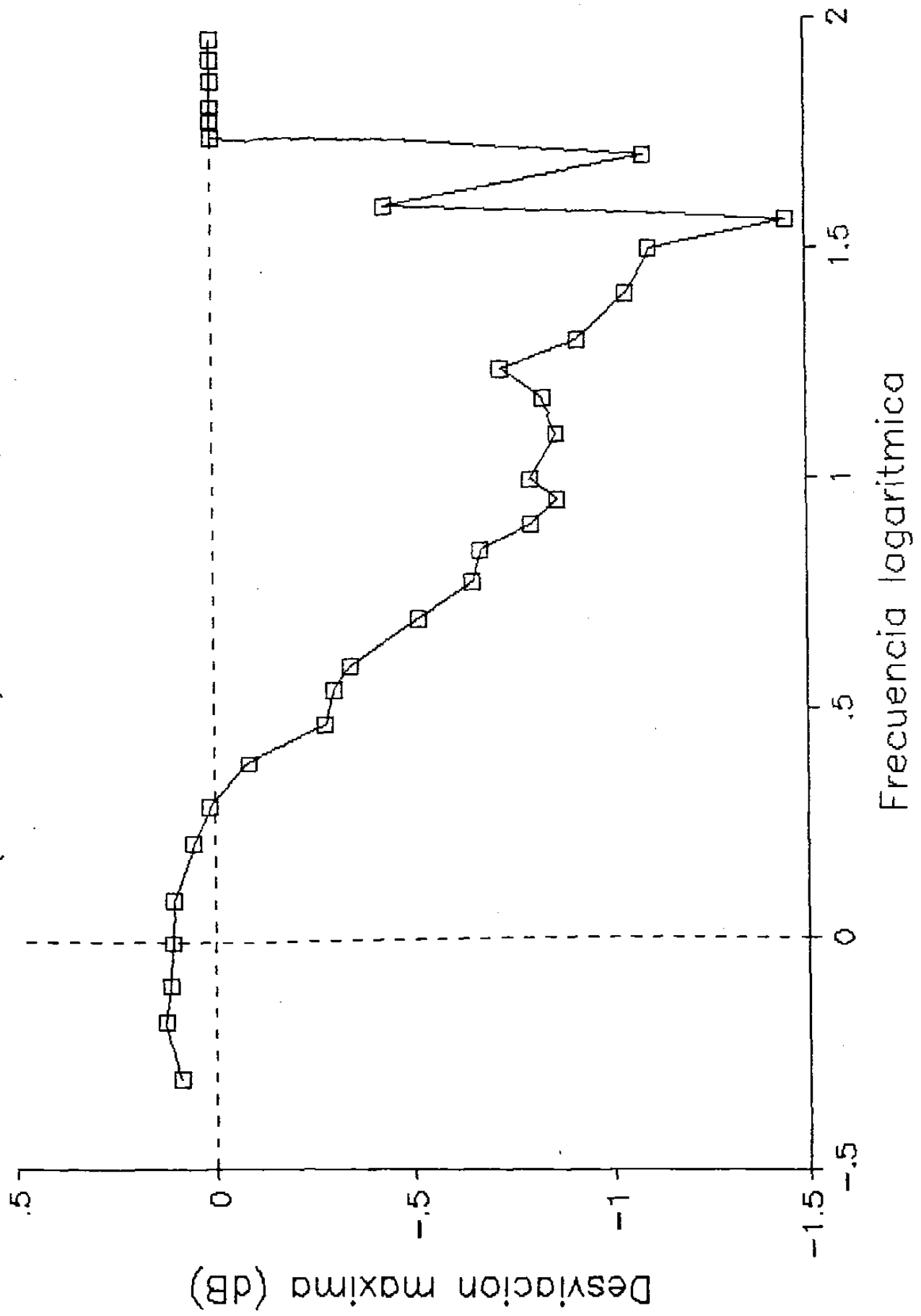


FIG. 2.11 Blindaje y Reciprocidad  
 Cobre (0.0155") 50 ohms, pos. 2 y 4

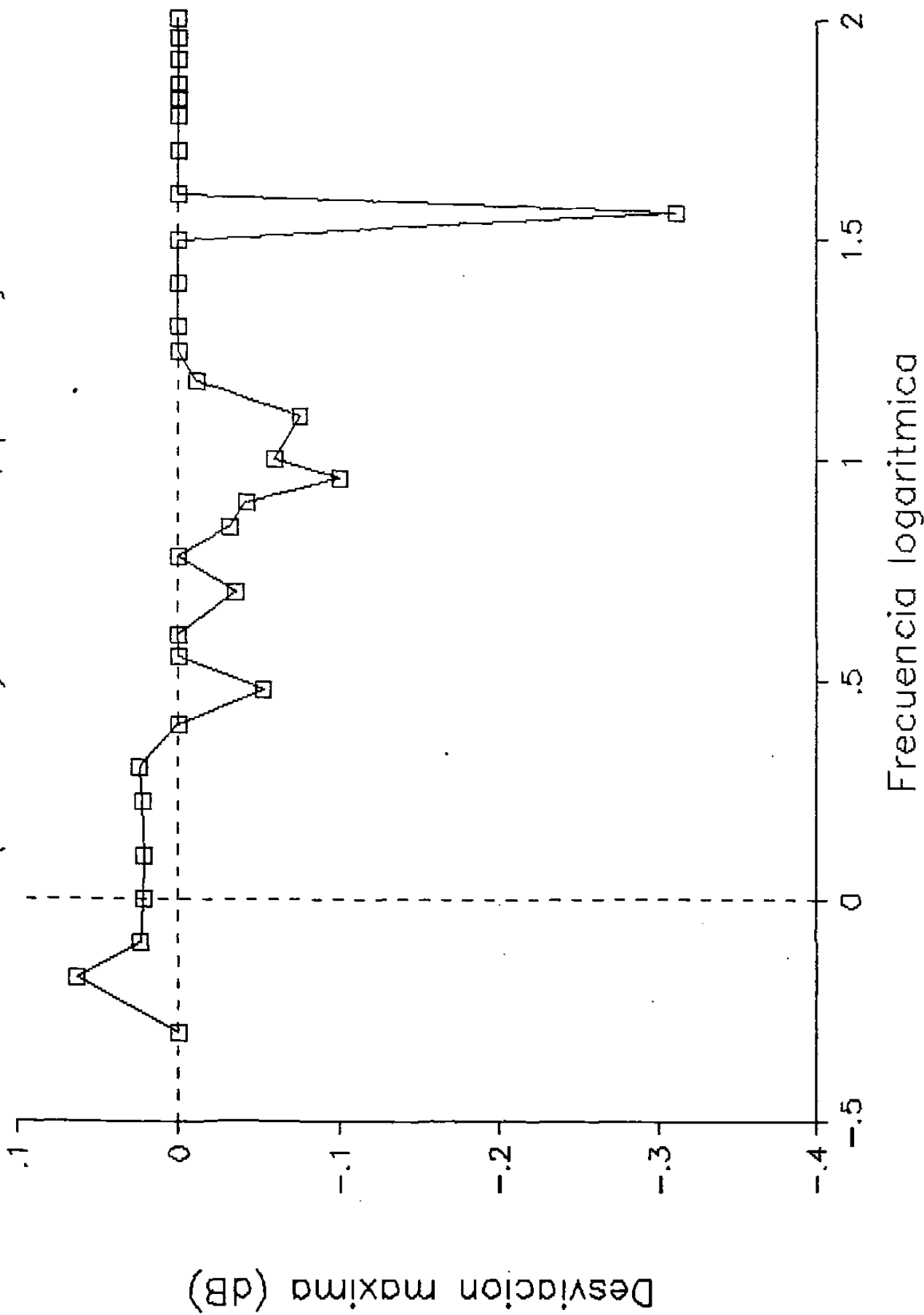


FIG. 2.13 Blindaje y Reciprocidad  
Cobre (0.0155") alta impedancia, pos. 2

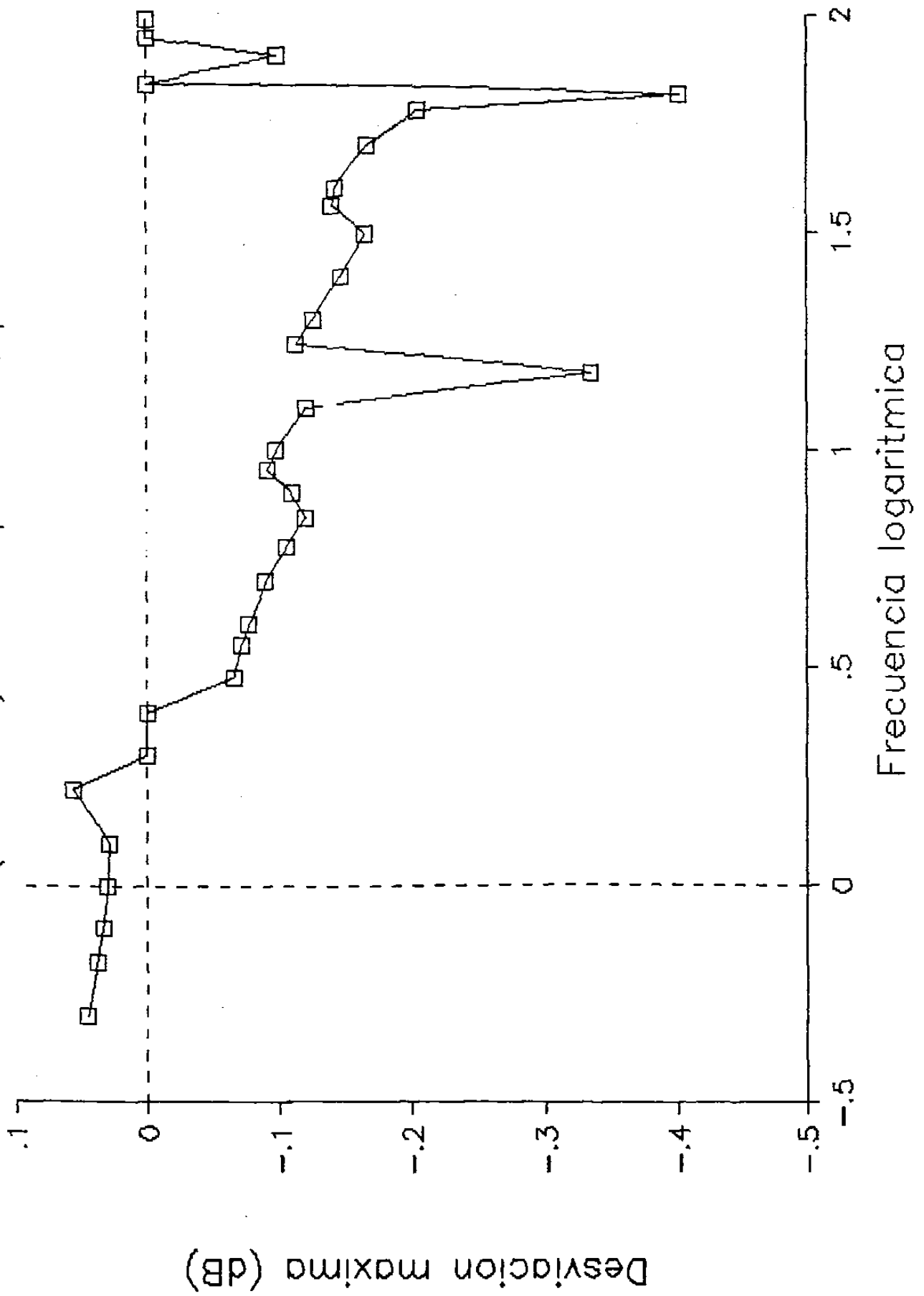


FIG. 2.14 Blindaje y Reciprocidad  
Cobre (0.0155") alta impedancia, pos. 4

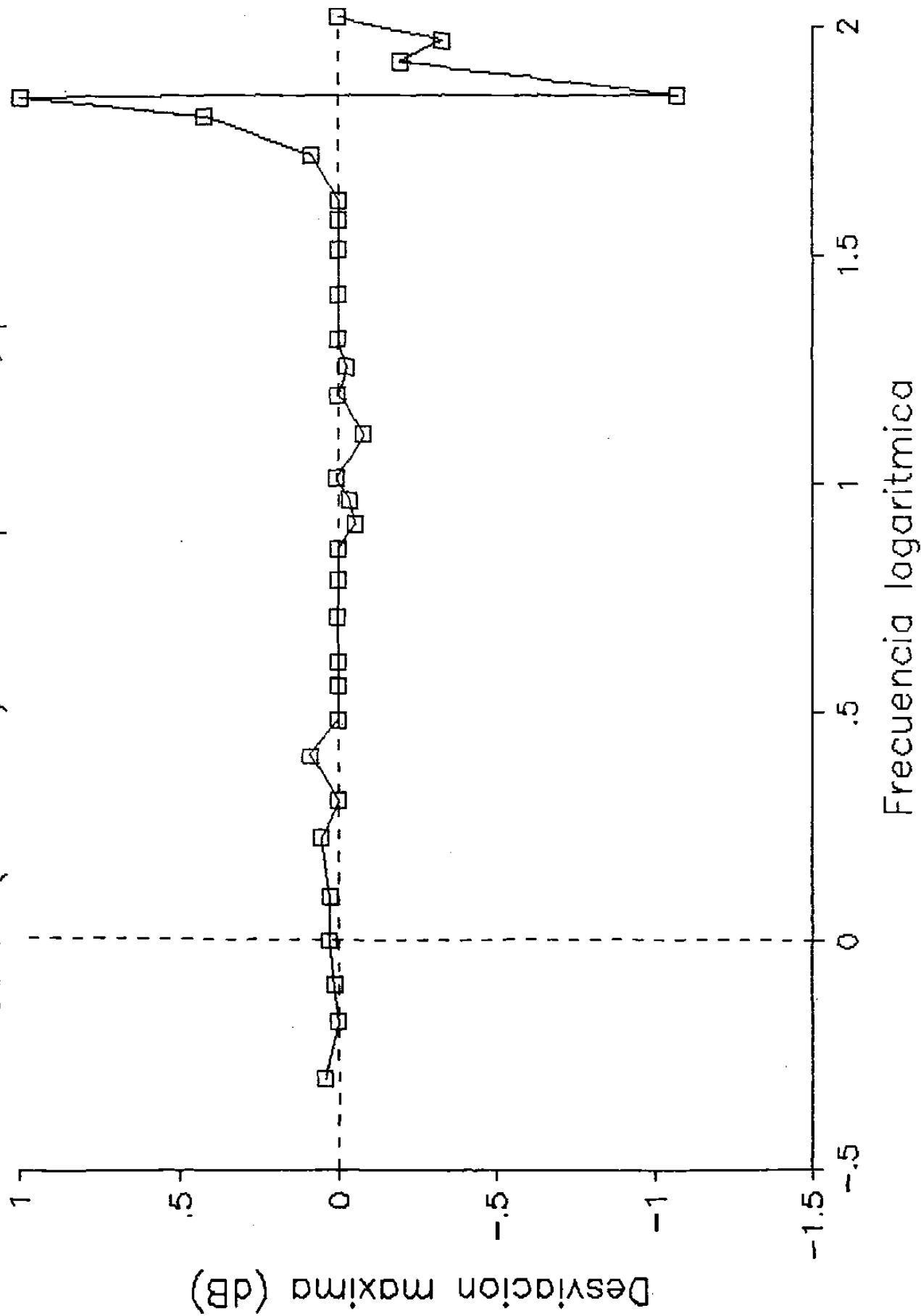




FIG. 2.15 Blindaje y Reciprocidad  
Cobre (0.0155") alta impedancia, pos. 5

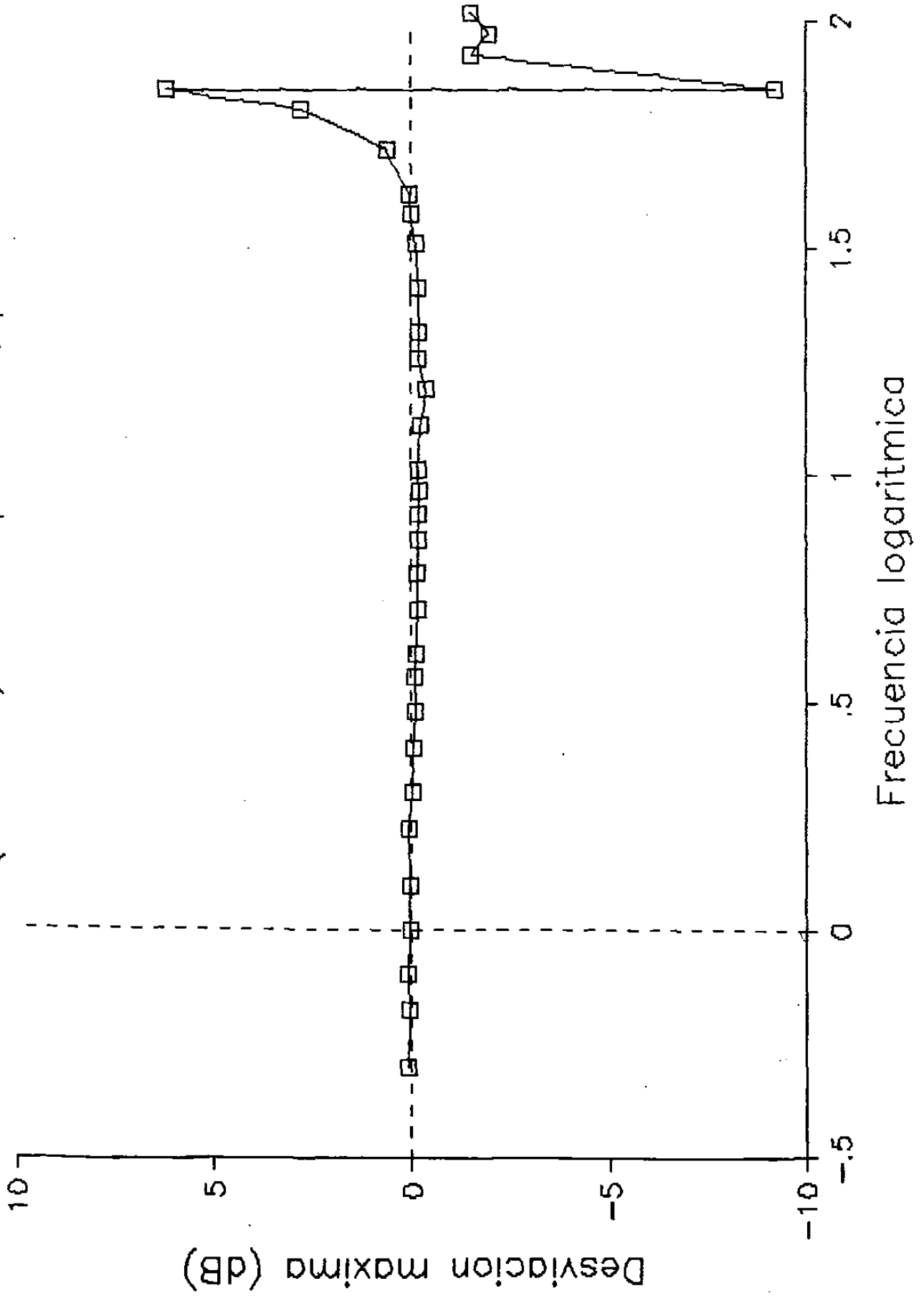


FIG. 2.16 Blindaje y Reciprocidad

Niquel (0.009") 50 ohms, pas. 1

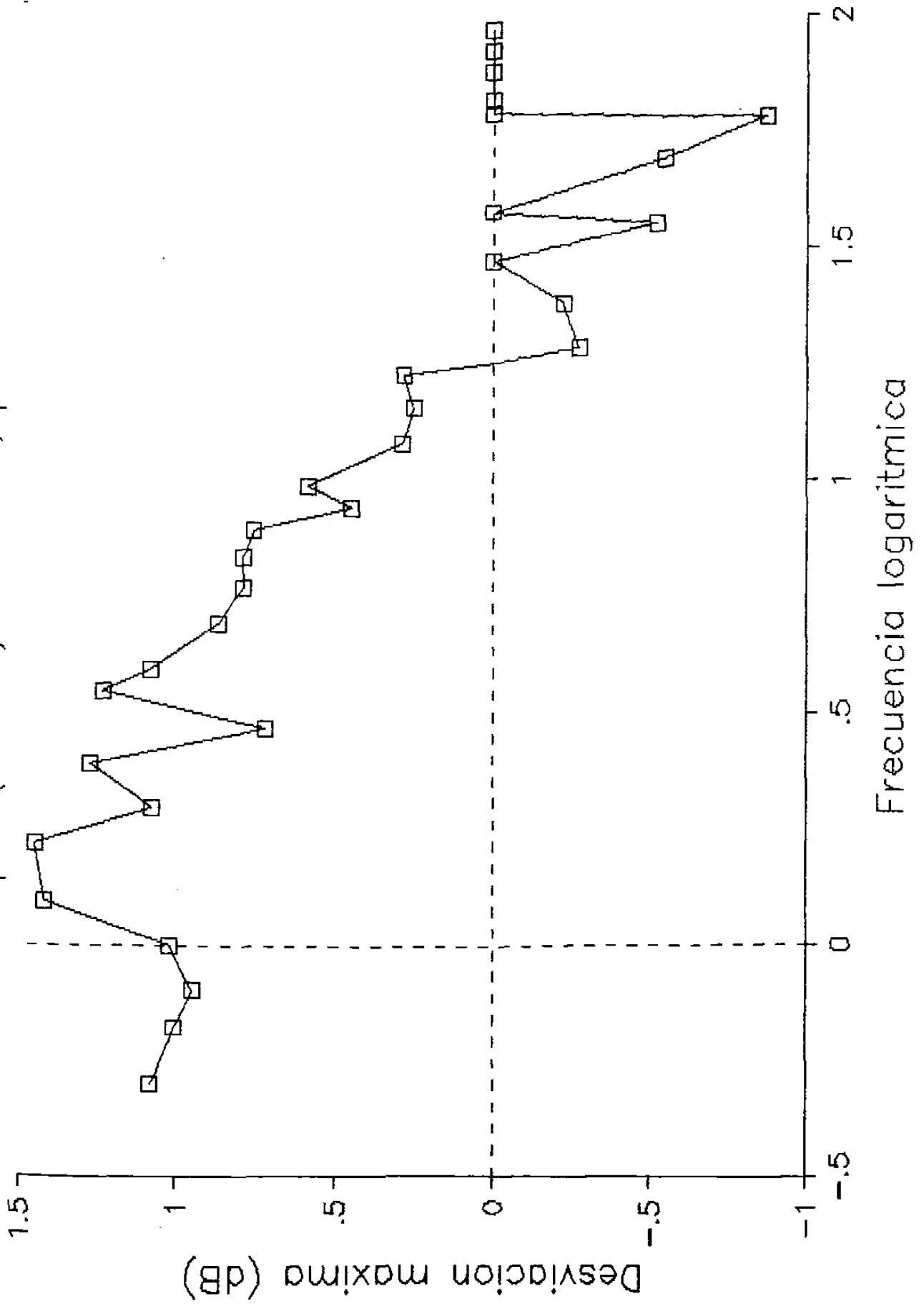


FIG. 2.17 Blindaje y Reciprocidad  
 Niquel (0.009") 50 ohms, pas. 2

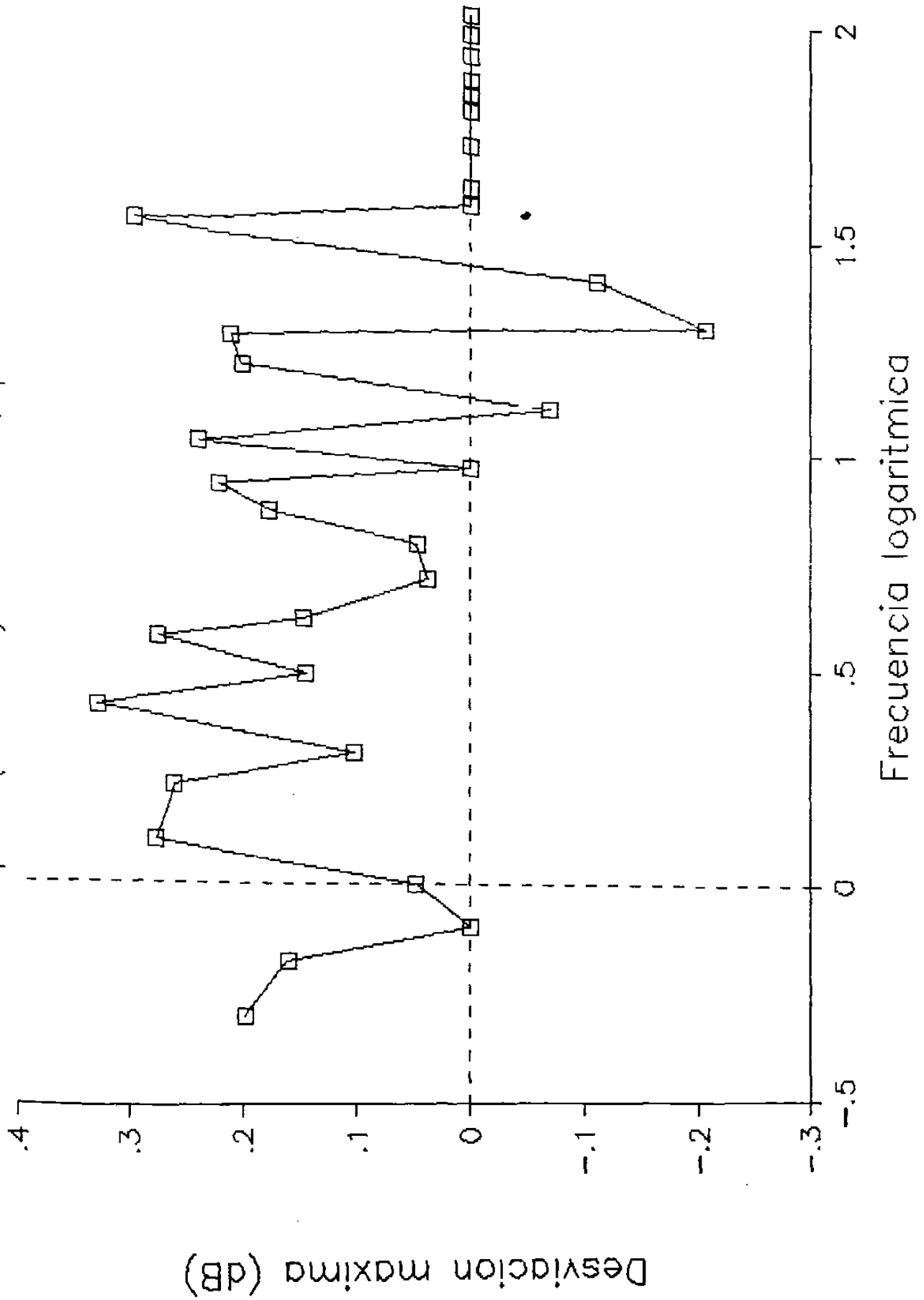


FIG. 2.18 Blindaje y Reciprocidad  
 Niquel (0.009") 50 ohms, pas. 4

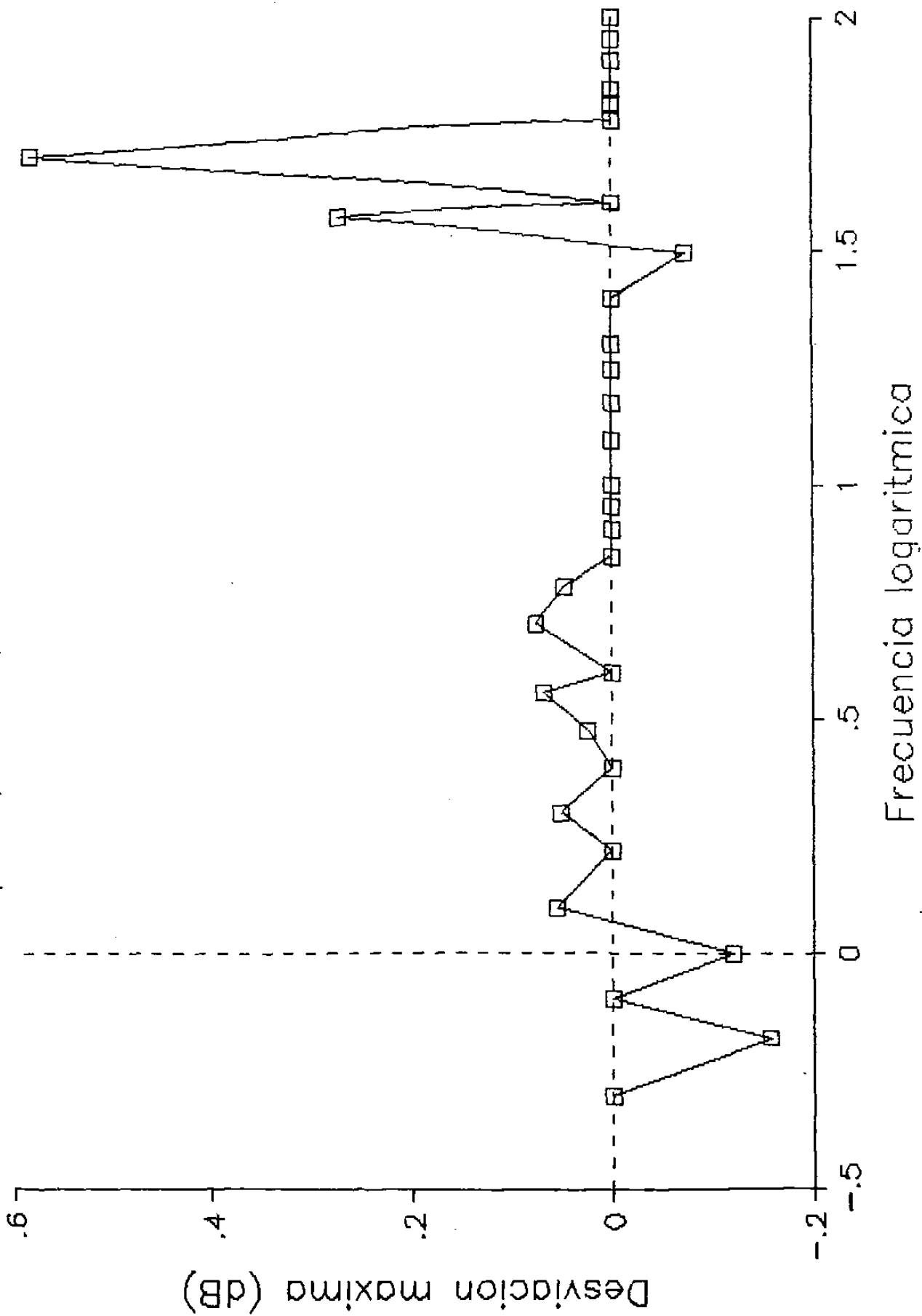


FIG. 2.19 Blindaje y Reciprocidad  
Niquel (0.009") 50 ohms, pos. 5

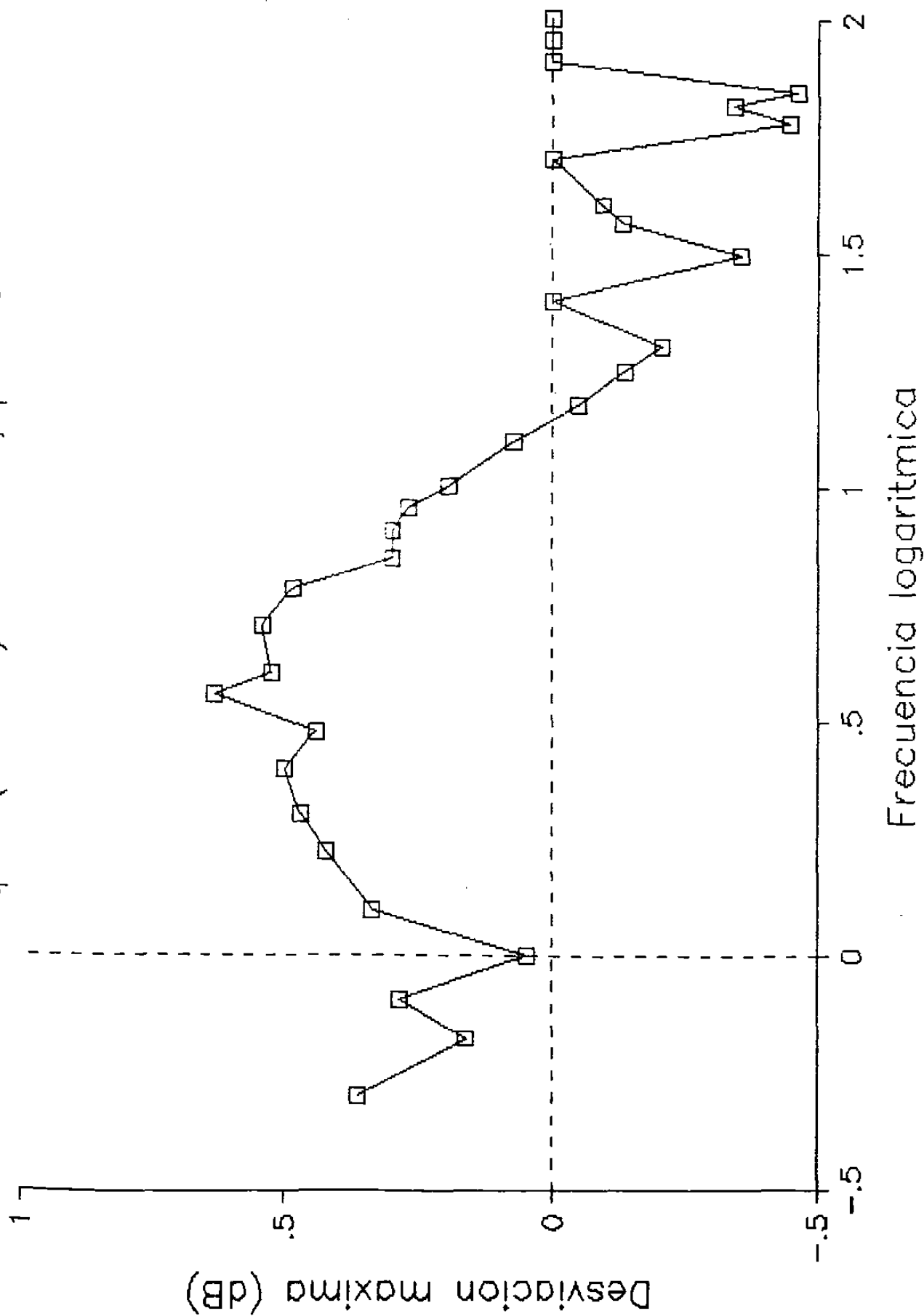


FIG. 2.20 Blindaje y Reciprocidad  
Niquel (0.009") alta imp., pas. 1

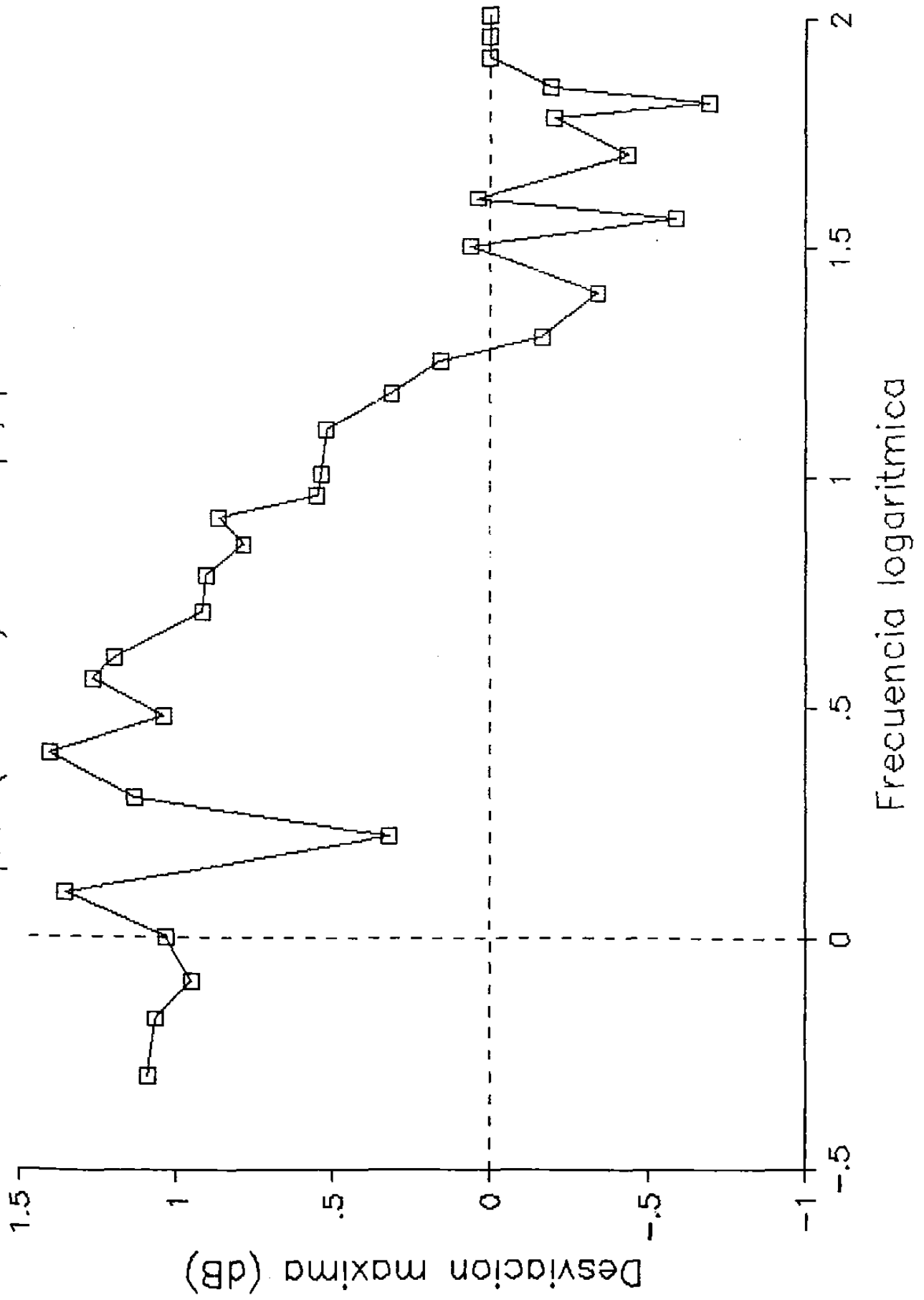


FIG. 2.21 Blindaje y Reciprocidad  
 Niquel (0.009") alta imp., pos. 2

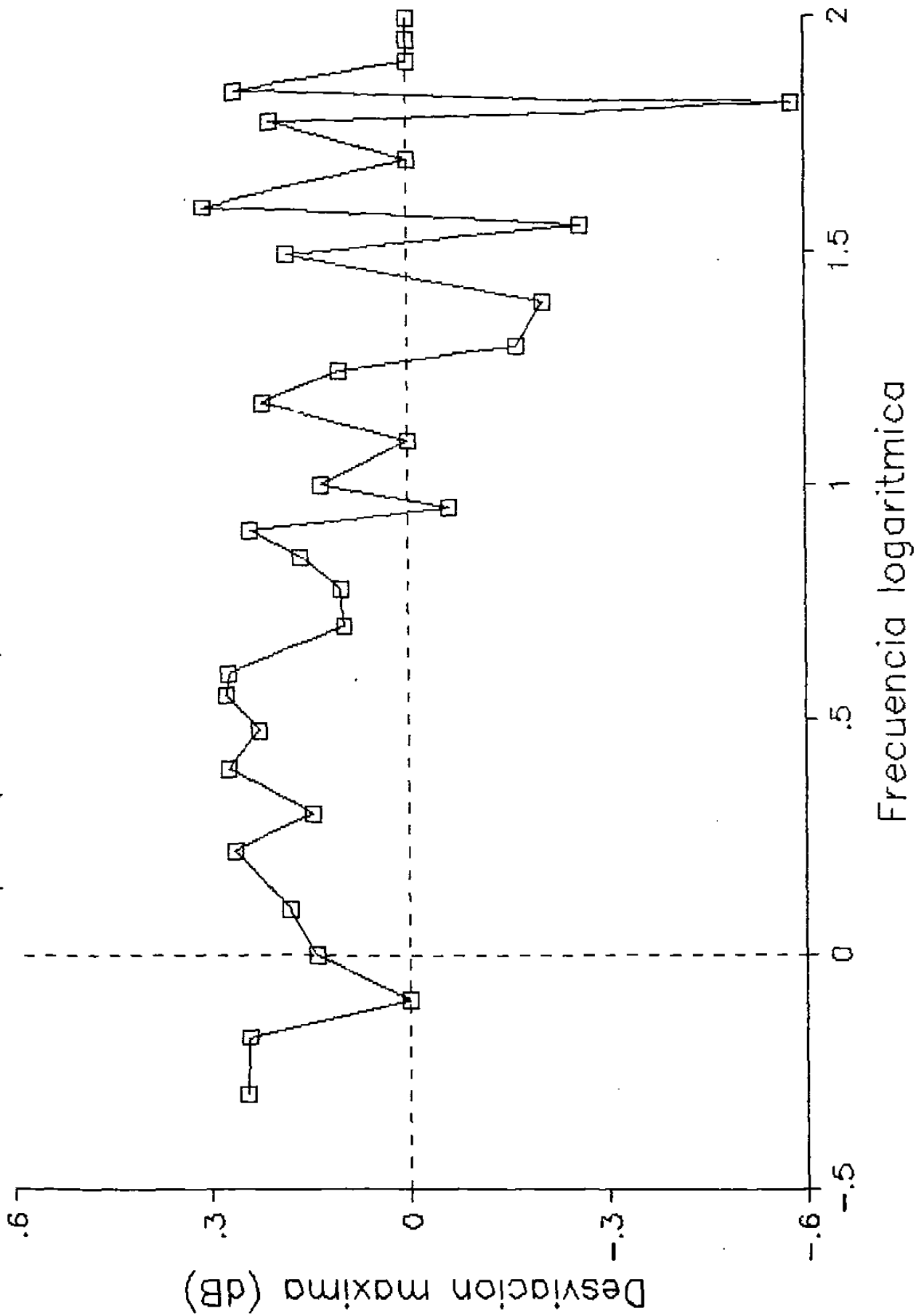


FIG. 2.22 Blindaje y Reciprocidad  
Niquel (0.009") alta imp., pos. 4

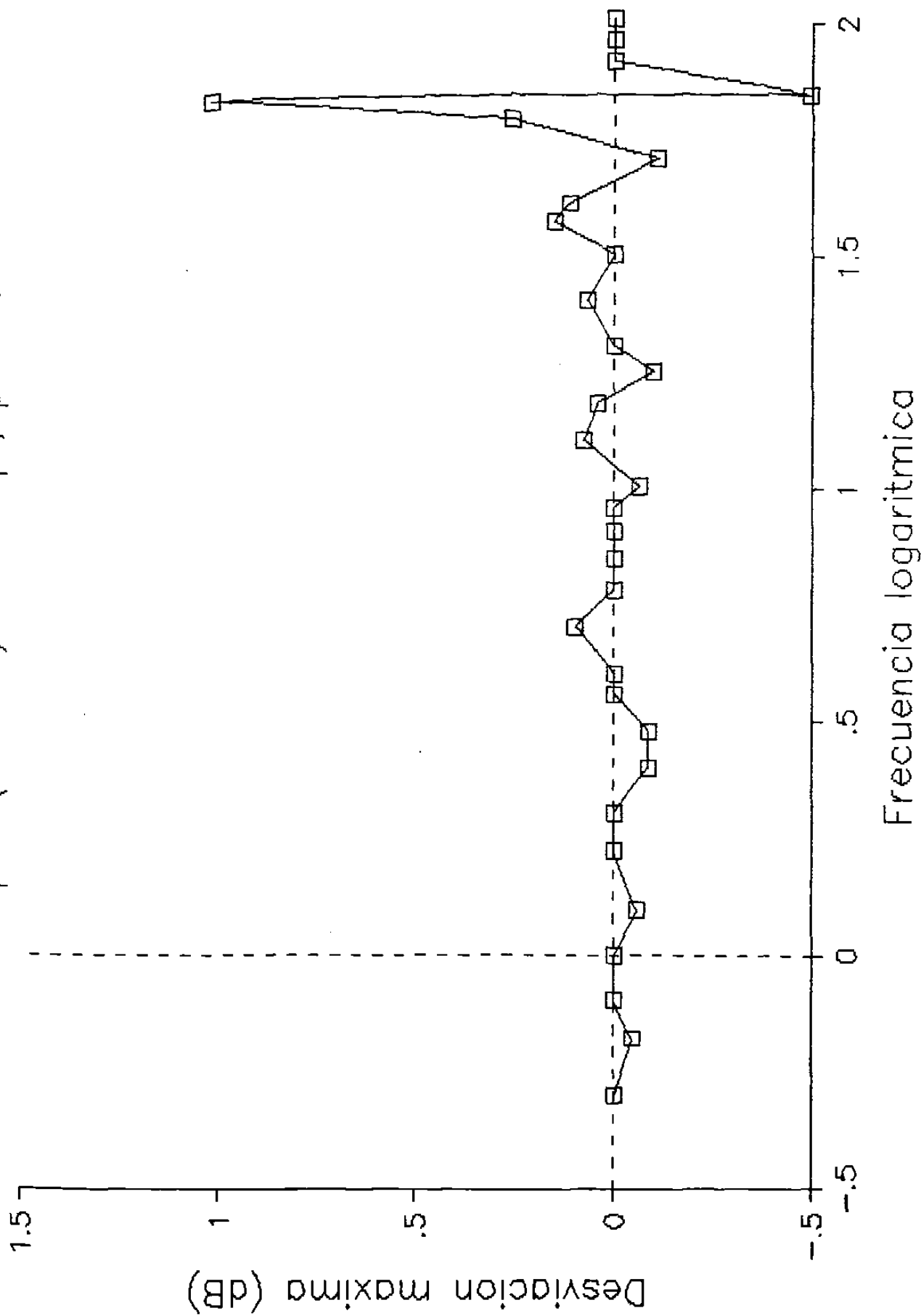
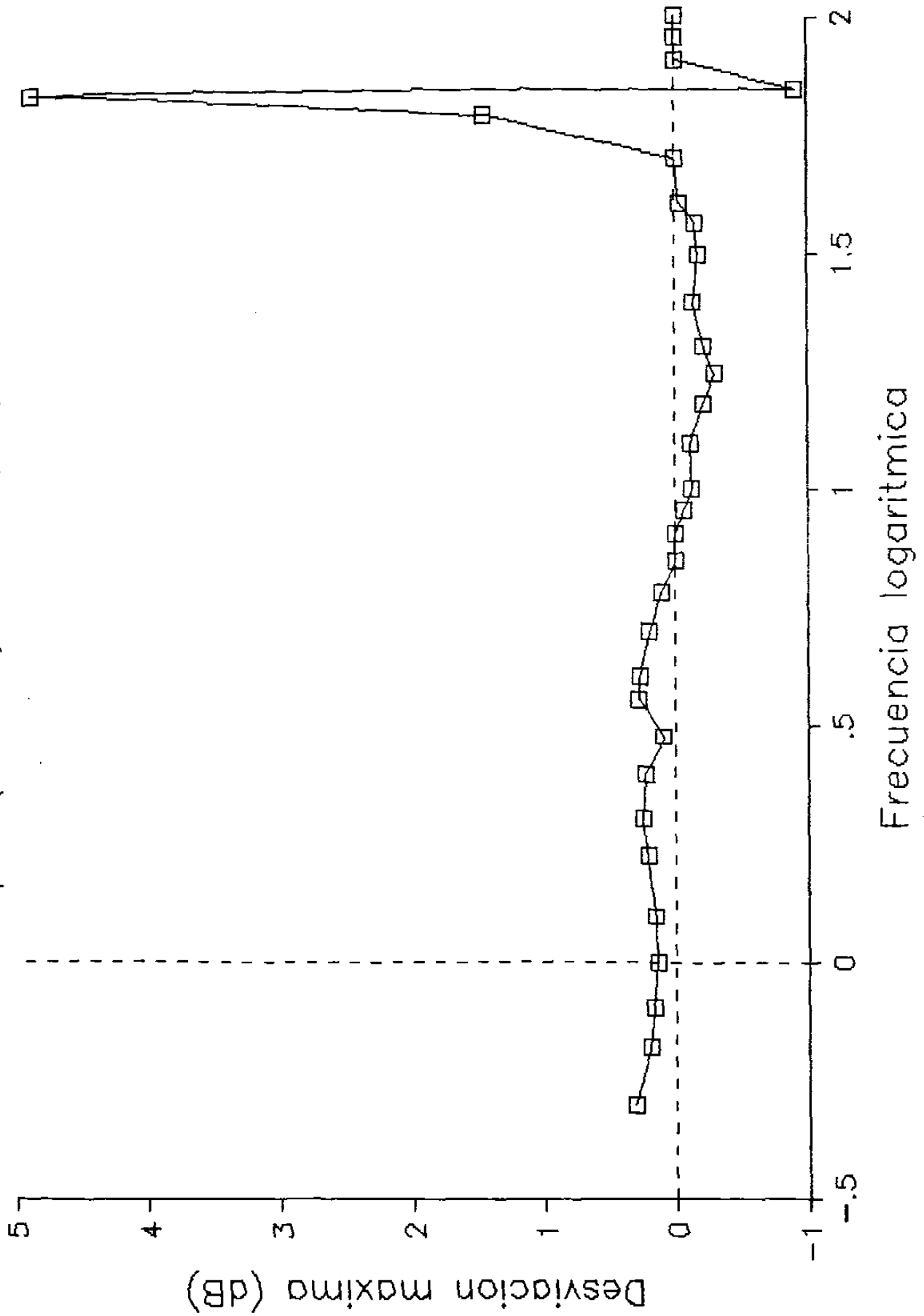




FIG. 2.23 Blindaje y Reciprocidad  
Niquel (0.009") alta imp., pos. 5



La curva de efectividad de blindaje (dB.) versus frecuencia (logarítmica) para el cobre a 50 Ohms de impedancia en el circuito de medición, descrita en la Fig. 2.24, muestra que los valores de efectividad para las posición 1 (cerca de la bobina fuente) y la posición 5 (cerca de la bobina de recepción) son muy similares. Esto significa que lo predicho por el Teorema de Reciprocidad se cumple teniendo a las impedancias de la fuente y receptor iguales, siendo el cobre un material con características lineales.

Se observa también que, si la impedancia del receptor es alta (Fig. 2.25), los valores de efectividad son diferentes para las posiciones 1 y 5. En estos resultados no se cumple la reciprocidad debido a que no son iguales las impedancias de la fuente (50 ohms) y del receptor (alta impedancia).

Para el caso del níquel, la efectividad versus frecuencia con 50 ohms en el receptor (Fig. 2.26) muestra también que los valores en las posiciones 1 y 5 son un tanto diferentes ya que el material tiene características magnéticas (no lineales) y por tanto no se cumple la Reciprocidad. Si la impedancia del receptor cambia a alta impedancia los valores de efectividad en las posiciones 1 y 5 continúan siendo diferentes (Fig. 2.27)

Es de notarse que la efectividad aumenta con cualquiera de los blindajes empleados, a medida que aumenta el valor de la frecuencia de la señal aplicada. Sin embargo, se entiende que los valores no son iguales para cada material empleado, ya que las características de permeabilidad, conductividad y grosor son diferentes.

FIG. 2.24 Blindaje y Reciprocidad  
 Cobre (0.0155") 50 Ohms

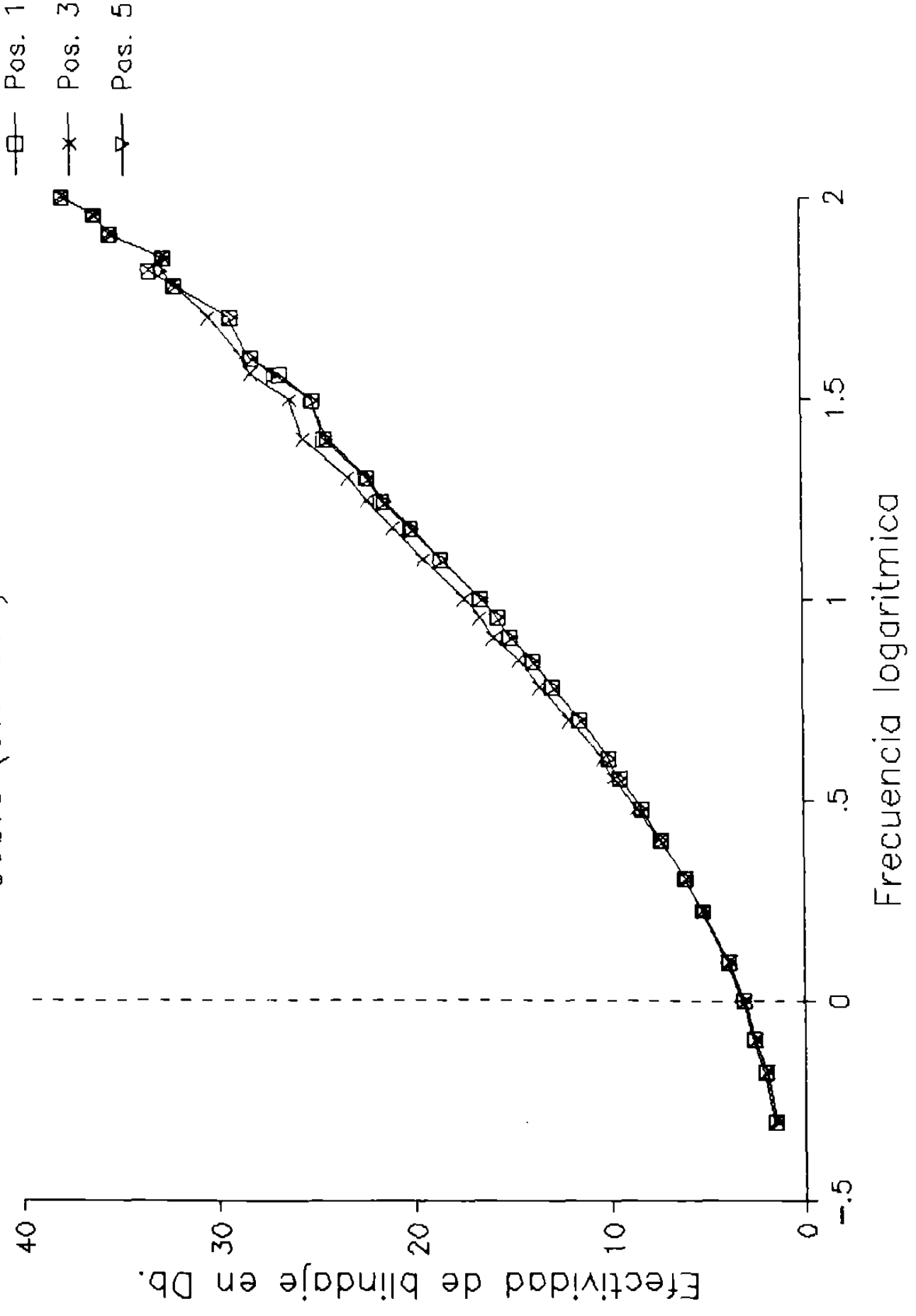


FIG. 2.25 Blindaje y Reciprocidad  
 Cobre (0.0155") a alta imped.

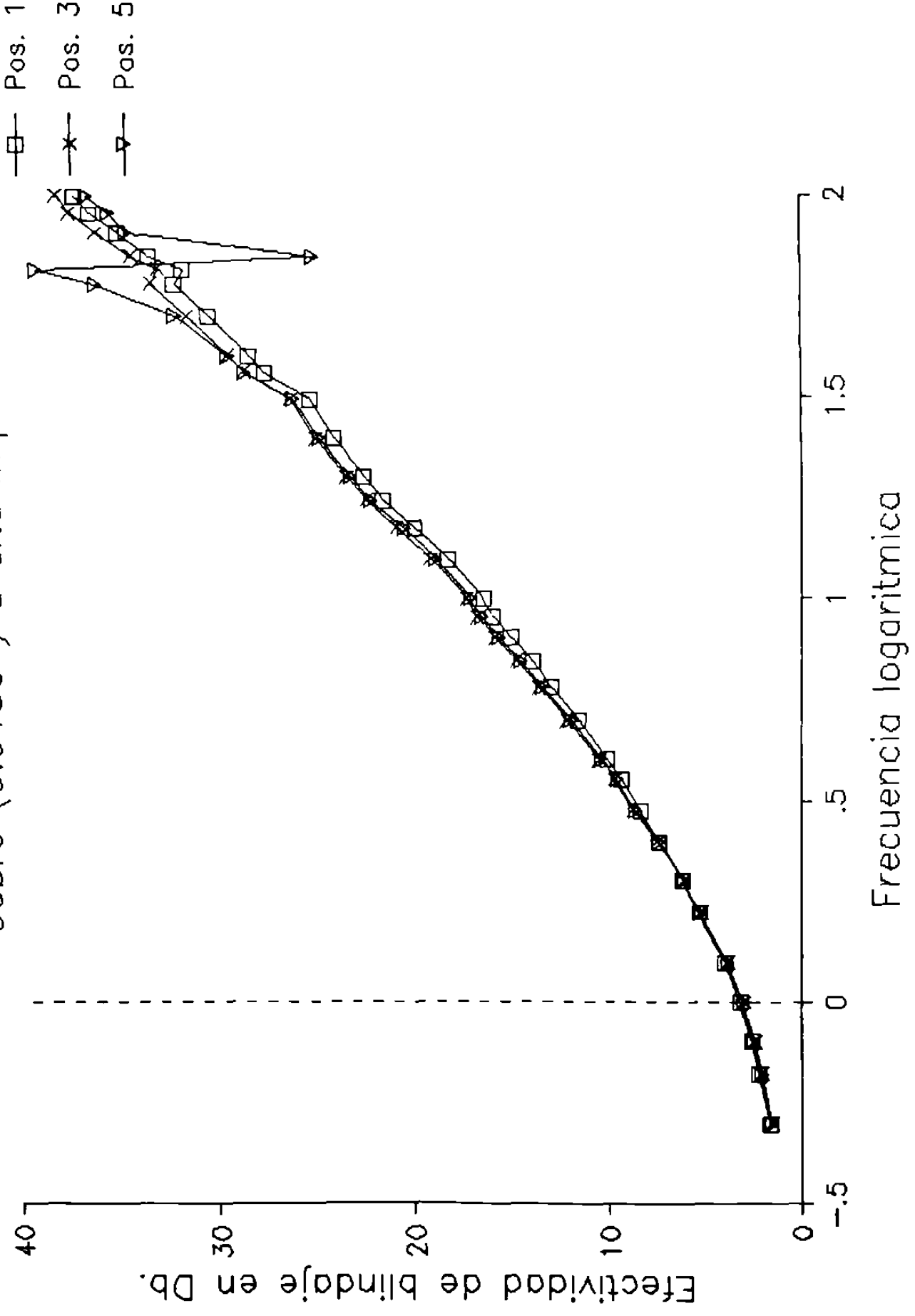


FIG. 2.26 Blindaje y Reciprocidad  
 Niquel (0.009") 50 Ohms

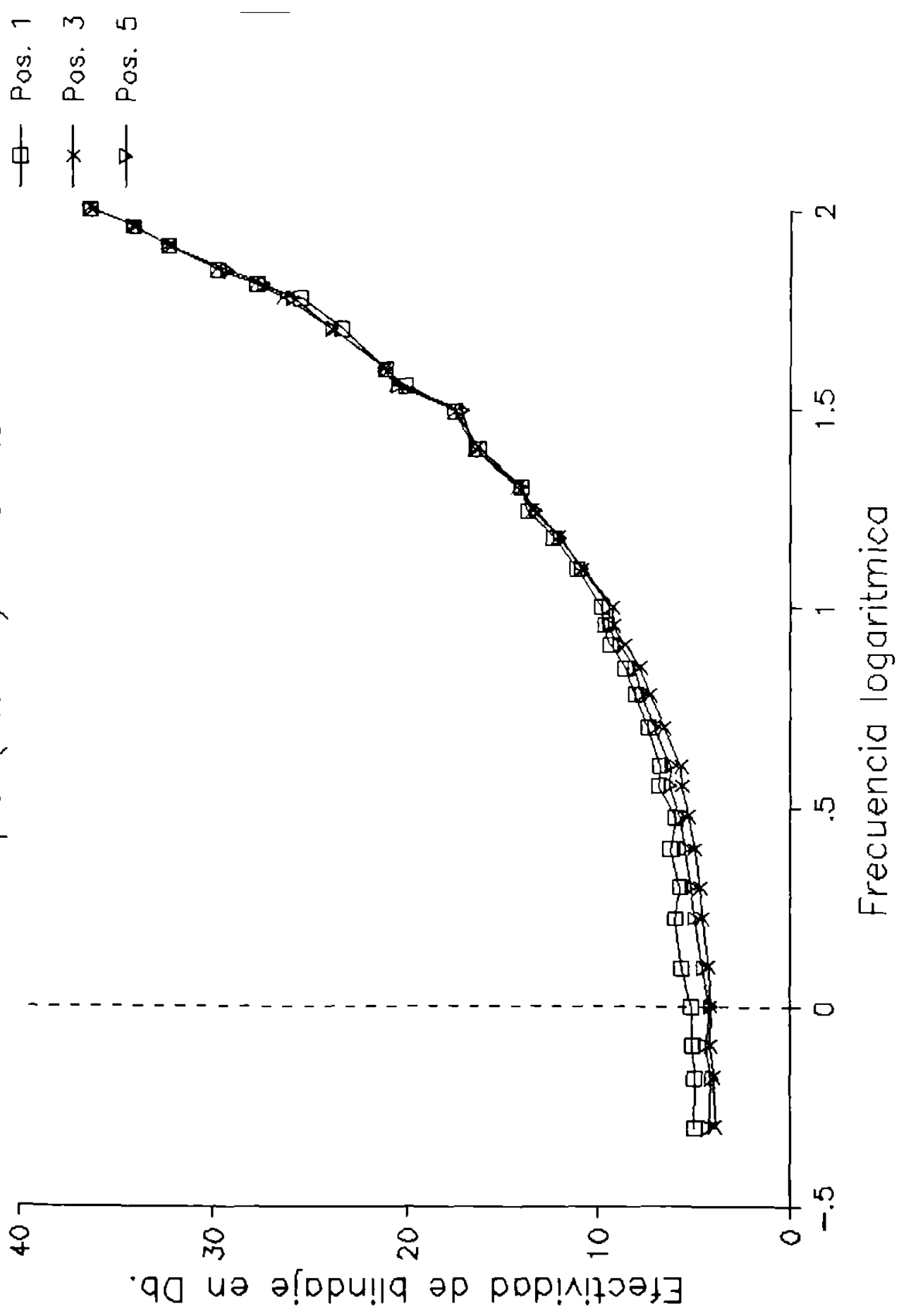
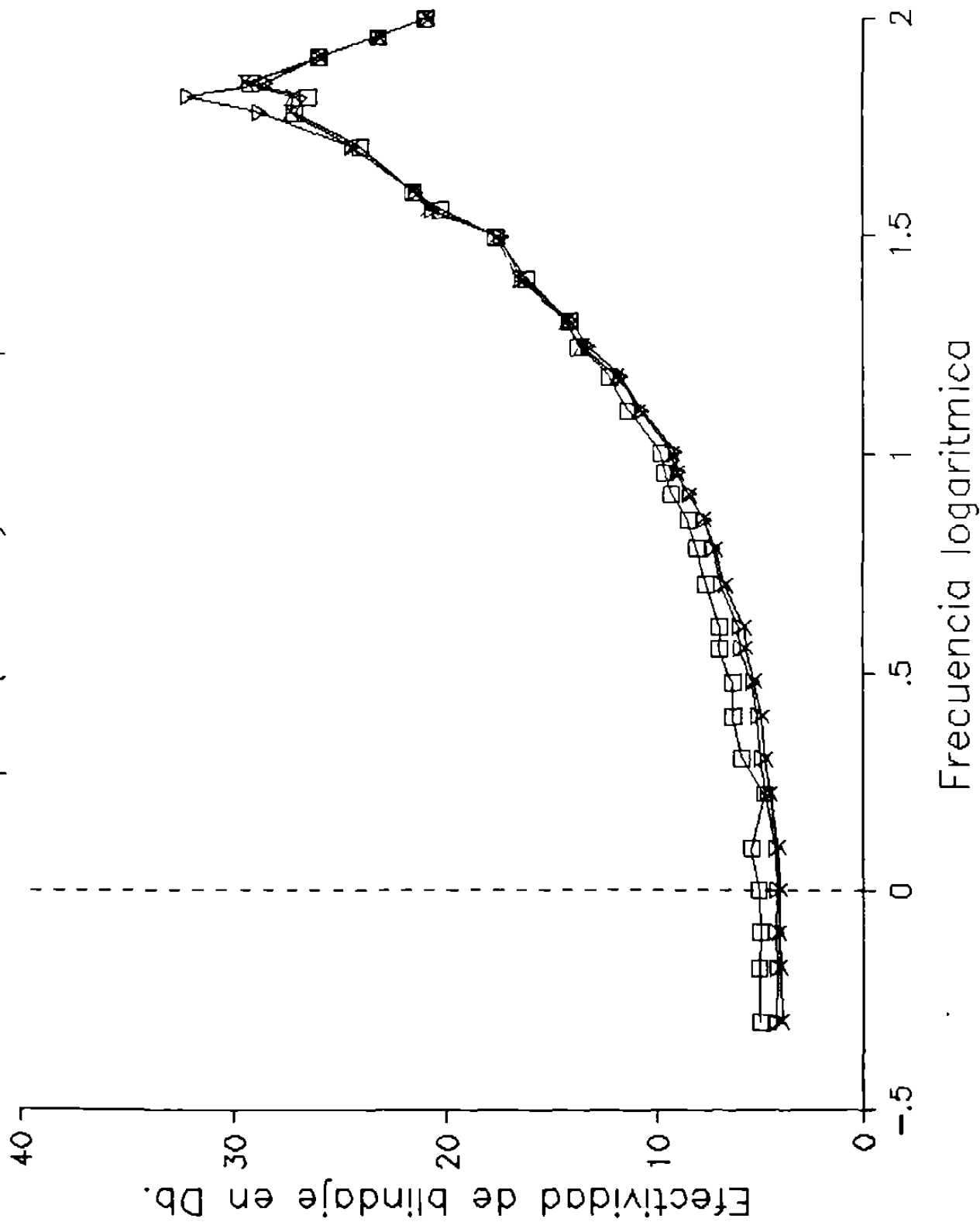


FIG. 2.27 Blindaje y Reciprocidad  
 Niquel (0.009") Alta impedancia

- Pos. 1
- ×— Pos. 3
- ▽— Pos. 5



## 2.7 CALCULOS DE EFECTIVIDAD DE BLINDAJE POR SCHELKUNOFF, COMPARACION DE RESULTADOS.

Siguiendo las ecuaciones establecidas por la Teoría de Schelkunoff<sup>(2)</sup>, se calcularon los valores de efectividad de blindaje para el cobre, grosor 0.0155", al mismo rango de frecuencias empleadas en las mediciones por Reciprocidad, para las posiciones 1, 3 y 5. Se utilizó en el cálculo la expresión general de Mcbride<sup>(3)</sup>.

Cada uno de los valores de efectividad de blindaje obtenidos según Schelkunoff, fué calculado mediante un programa de computadora en GWBASIC<sup>(4)</sup> (5). El programa además de proporcionar la efectividad de blindaje, indica el valor de profundidad de penetración del material, y las impedancias de superficie de entrada, de superficie de salida y de transferencia de superficie del mismo blindaje. Los datos suministrados al programa fueron: frecuencia, grosor (en cm.), permeabilidad relativa del blindaje, porcentaje de conductividad del blindaje, y el valor de la impedancia de onda.

Los resultados obtenidos se indican en la tabla 2.5 . La fig. 2.28 muestra las curvas de efectividad de blindaje (dB) versus frecuencia (escala logarítmica) para las posiciones 1, 3, y 5. Se observa como, al igual que los resultados experimentales obtenidos, la efectividad aumenta a medida que la frecuencia aumenta. Sin embargo, es interesante notar que las curvas de las tres posiciones son diferentes entre sí, sobre todo para las posiciones 1 y 5. La Fig. 2.29 muestra los resultados obtenidos con las tres diferentes posiciones por Reciprocidad y por Schelkunoff. Nótese como los valores de la posición central obtenidos por Schelkunoff son los más cercanos a los obtenidos en la posición central también por Reciprocidad. De aquí la deducción de que la efectividad de blindaje predicha por Schelkunoff es válida únicamente si el material de blindaje se encuentra aproximadamente en la posición media entre la fuente y el receptor.

La Fig. 2.30 muestra los valores de efectividad tanto por Schelkunoff como por Reciprocidad para las posiciones extremas, con el fin de observar la diferencia de simetría en Schelkunoff.

**TABLA 2.5**  
**EFFECTIVIDAD DE BLINDAJE SEGUN SCHELKUNOFF**

**MATERIAL DE BLINDAJE : COBRE**  
**GROSOR : 0.0393 cm.**

	FRECUENCIA (KHz.)	MEDICIONES CALCULADAS (dB.)					
		Pos.1	Pos.3	Pos.5	Pos.7	Pos.9	Pos.11
4	.5		.6		1.4		3.2
5	.666		.7		2.2		4.7
6	.8		.8		2.9		5.8
7	1		.9		3.9		7.3
8	1.25		1		5.1		9
9	1.666		1.4		7		11.2
10	2		1.7		8.3		12.7
11	2.5		2.2		10		14.5
12	3		2.9		11.5		16.2
13	3.571		3.5		12.8		17.5
14	4		4		13.8		18.5
15	5		5.2		15.6		20.4
16	6.024		6.3		17.2		22
17	7.042		7.3		18.6		23.3
18	8.024		8.3		19.7		24.5
19	9.009		9.1		20.7		25.5
20	10		9.9		21.6		26.4
21	12.5		11.7		23.5		28.4
22	15.037		13.2		25.1		30
23	17.543		14.5		26.5		31.4
24	20		15.6		27.6		32.5
25	25		17.5		29.6		34.5
26	31.25		19.5		31.6		36.5
27	36.363		20.9		33.1		37.9
28	40		21.8		33.9		38.8
29	50		23.9		36.1		41
30	60.24		25.7		37.9		42
31	65.619		26.5		38.7		43
32	70.422		27.3		39.5		43.9
33	80.645		28.8		41		45.5
34	90.09		30		42.3		47
35	100		31.2		43.2		48.3



FIG. 2.28 Blindaje segun Schelkunoff  
 Cobre (0.0155")

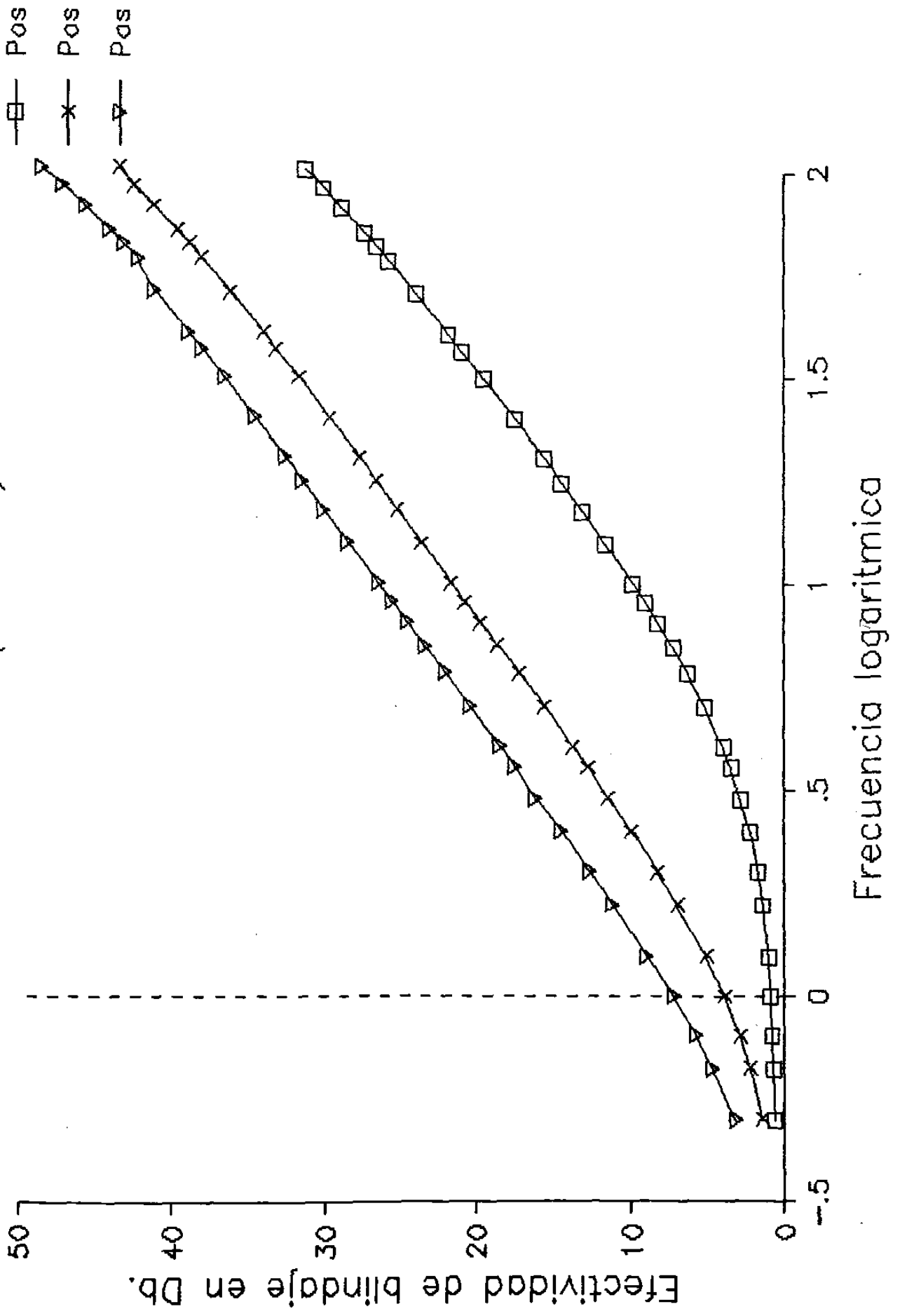


FIG. 2.29 Comparacion de blindajes

Cobre (0.0155"), 50 ohms

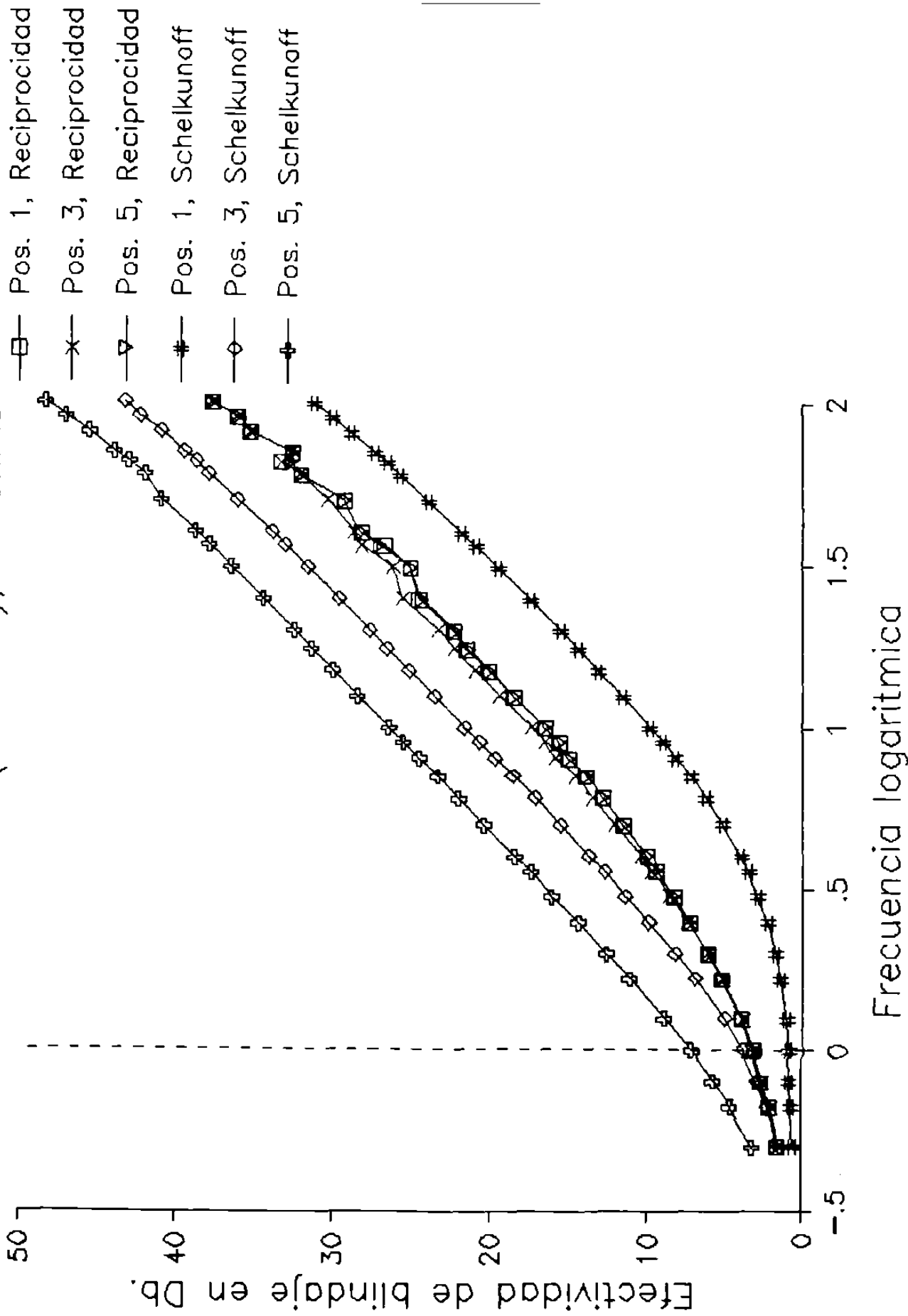
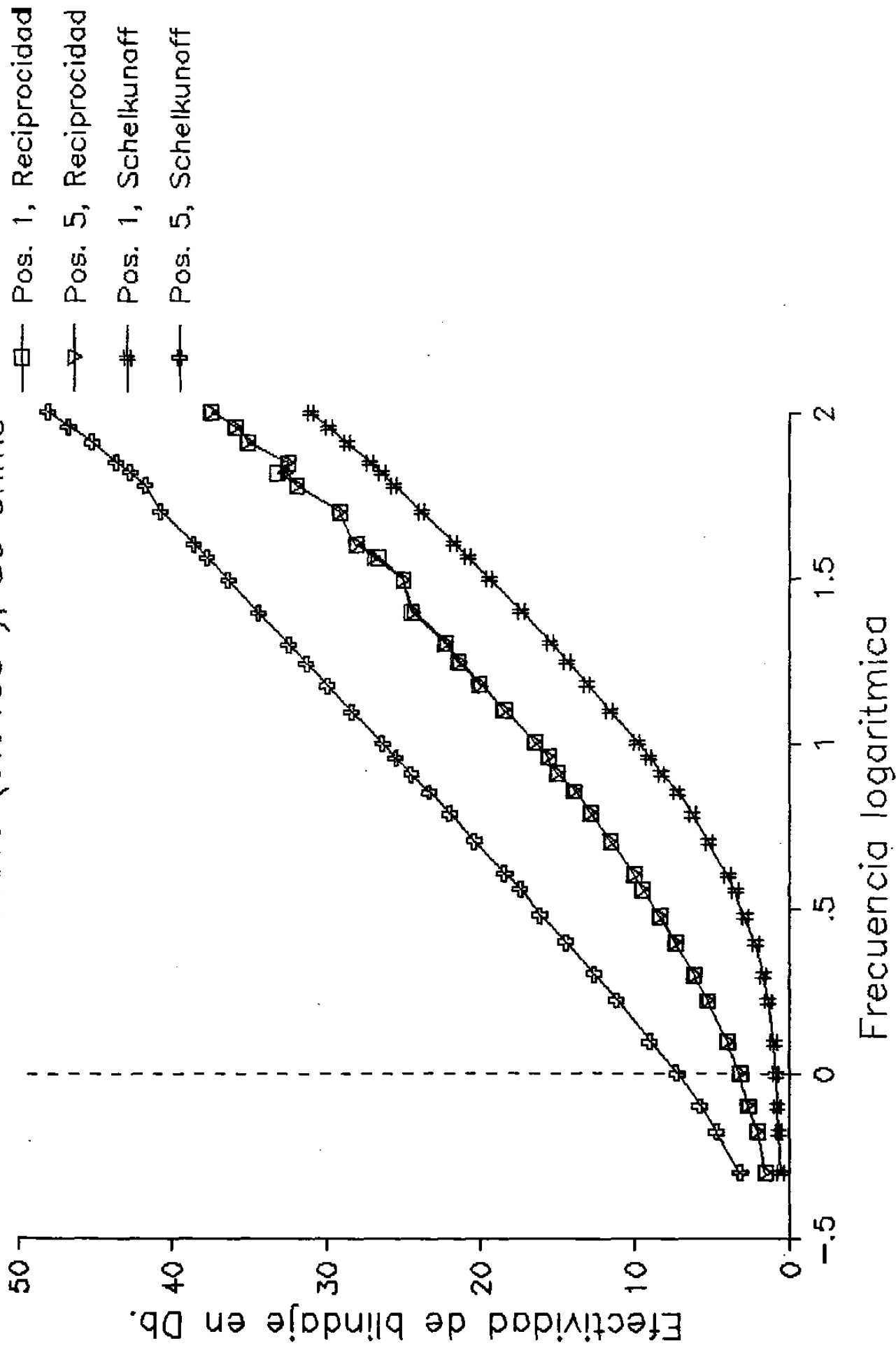


FIG. 2.30 Comparacion de blindajes

Cobre (0.0155"), 50 ohms



## CONCLUSIONES

El análisis de los resultados obtenidos en las diferentes pruebas, permite concluir varios aspectos:

- 10.- La teoría de Reciprocidad se cumple para el sistema de medición de efectividad de blindaje, siempre y cuando se cumpla la linealidad del sistema. Esto sucede si las impedancias de la fuente (50 Ohms para el caso) y la impedancia del circuito de medición (50 Ohms) son iguales, y además el material de blindaje tiene características lineales (cobre y aluminio). Si no se cumple alguna de las dos condiciones (impedancias distintas, o materiales como el níquel con características no-lineales), es claro que la efectividad de blindaje será diferente cerca de la fuente y cerca del receptor.
- 20.- Se demuestra que la Teoría de Schelkunoff no es válida para posiciones del blindaje distintas a la posición media, aproximadamente. Esto significa que los cálculos efectuados para el diseño de blindajes usando esta teoría, no serán del todo correctos si éstos se colocan ya sea cerca de la fuente o cerca del receptor. De acuerdo a los cálculos realizados con la Teoría de Schelkunoff para la efectividad de blindaje del cobre, será necesario un grosor mucho mayor cerca de la fuente que cerca del receptor. De acuerdo al Teorema de Reciprocidad, los grosores deben ser iguales.
- 30.- Debe observarse que, aunque el Teorema de Reciprocidad demuestra la validez parcial de la Teoría de Schelkunoff, esto no significa que tal Teorema sustituya a la Teoría sobre el blindaje. Esto es, la Reciprocidad por sí misma no puede predecir la efectividad de blindaje de un determinado material; únicamente indica la posibilidad de error en los cálculos realizados al aplicar las fórmulas de Schelkunoff.

Es necesario recordar que los experimentos realizados con Reciprocidad se efectuaron en un rango específico de frecuencias de entre 500 y 100 000 Hz. Por tanto, las conclusiones señaladas anteriormente corresponden únicamente al rango señalado. Es muy posible que para rangos diferentes (frecuencias muy altas) las conclusiones sean las mismas. Sin embargo, experimentalmente no se tocaron frecuencias muy altas.

La diferencia de resultados entre la Teoría de Schelkunoff y los resultados experimentales mostrados en el presente trabajo indica, en todo caso, que la primera debe replantearse. Sin embargo, los alcances del presente trabajo no fueron los de encontrar una modificación a Schelkunoff, ya que esto conduciría a un análisis más complejo que tal vez no condujera a los resultados esperados.

Tal vez, como una propuesta no definitiva, es muy posible que los replanteamientos deban estar en términos de la modificación de la ecuación para la impedancia de onda, y en la consideración de las rereflexiones que pudieran ocurrir en los diferentes medios en los que se propaga la onda antes y después de tocar al material de blindaje. En todo caso esto podrá ser materia de otro trabajo.

## APENDICE A

VALORES DE VOLTAJE (EN dB.) OBTENIDOS A DIFERENTES FRECUENCIAS  
PARA CINCO POSICIONES DISTINTAS, EN DOS TIPOS DE IMPEDANCIAS.

MATERIALES DE BLINDAJE: COBRE  
NIQUEL  
ALUMINIO  
METAL COMPUESTO  
PAPEL ALUMINIO

**TABLA A.1**  
**MATERIAL DE BLINDAJE : COBRE**  
**GROSOR : 0.0393 cm.**  
**IMPEDANCIA DE LA FUENTE : 50 Ohms**  
**IMPEDANCIA DE RECEPTOR : 50 Ohms**

FRECUENCIA (KHz.)		MEDICIONES OBTENIDAS (dB.)				
		Pos.1	Pos.2	Pos.3	Pos.4	Pos.5
A	B	C	D	E	F	G
41	.5	1.573704	1.484921	1.484921	1.484921	1.573704
42	.666	2.076574	2.013403	1.950689	2.013403	2.076574
43	.8	2.670778	2.578619	2.555732	2.578619	2.670778
44	1	3.194017	3.108651	3.087440	3.108651	3.194017
45	1.25	3.963864	3.880546	3.859840	3.880546	3.942959
46	1.666	5.269857	5.236725	5.214708	5.236725	5.236725
47	2	6.153067	6.162607	6.138777	6.153067	6.115013
48	2.5	7.375636	7.460653	7.460653	7.460653	7.347480
49	3	8.373678	8.597509	8.649992	8.597509	8.373678
50	3.571	9.528427	9.827234	9.827234	9.827234	9.528427
51	4	10.06713	10.40780	10.40780	10.40780	10.06713
52	5	11.61324	12.09400	12.12938	12.09400	11.61324
53	6.024	12.93393	13.58452	13.58452	13.58452	12.93393
54	7.042	13.97940	14.61858	14.65022	14.61858	13.95011
55	8.024	15.12017	15.87594	15.91760	15.87594	15.12017
56	9.009	15.71409	16.47817	16.57859	16.47817	15.71409
57	10	16.58608	17.32213	17.38142	17.32213	16.58608
58	12.5	18.55209	19.33901	19.41421	19.33901	18.55209
59	15.037	20.07371	20.89072	20.90157	20.89072	19.97557
60	17.543	21.49633	22.22057	22.22057	22.22057	21.35845
61	20	22.27887	23.19402	23.19402	23.19402	22.19244
62	25	24.45097	25.49155	25.49155	25.49155	24.31200
63	31.25	25.01902	26.11765	26.11765	26.11765	25.01902
64	36.363	26.66429	27.80506	28.11531	27.80506	26.93575
65	40	28.13287	28.56545	28.56545	28.56545	28.13287
66	50	29.19494	30.28210	30.28210	30.28210	29.19494
67	60.24	32.04120	32.04120	32.04120	32.04120	32.04120
68	65.619	33.30223	33.30223	33.30223	33.30223	32.67407
69	70.422	32.56778	32.56778	32.56778	32.56778	32.56778
70	80.645	35.26856	35.26856	35.26856	35.26856	35.26856
71	90.09	36.08960	36.08960	36.08960	36.08960	36.08960
72	100	37.69213	37.69213	37.69213	37.69213	37.69213

**TABLA A.2**

**MATERIAL DE BLINDAJE : COBRE**  
**GROSOR : 0.0393 cm.**  
**IMPEDANCIA DE LA FUENTE : 50 Ohms**  
**IMPEDANCIA DE RECEPTOR : ALTA**

FRECUENCIA		MEDICIONES OBTENIDAS				
(KHz.)		(dB.)				
		Pos.1	Pos.2	Pos.3	Pos.4	Pos.5
J	K	L	M	N	O	P
41	.5	1.583625	1.538030	1.492672	1.538030	1.565358
42	.666	2.165791	2.051250	2.013403	2.013403	2.051250
43	.8	2.567168	2.430916	2.397184	2.410661	2.464779
44	1	3.129116	3.005471	2.974833	3.005471	3.005471
45	1.25	3.928533	3.813105	3.784485	3.813105	3.813105
46	1.666	5.311154	5.254568	5.198348	5.254568	5.254568
47	2	6.143965	6.132677	6.132677	6.132677	6.110146
48	2.5	7.380541	7.469325	7.469325	7.559025	7.410035
49	3	8.328468	8.649017	8.714571	8.714571	8.616425
50	3.571	9.334784	9.612757	9.683662	9.683662	9.577520
51	4	10.12130	10.45757	10.53410	10.53410	10.41956
52	5	11.60681	12.08586	12.17587	12.17587	11.99677
53	6.024	13.02257	13.55038	13.65566	13.65566	13.49821
54	7.042	13.97940	14.66548	14.78529	14.78529	14.60620
55	8.024	15.08874	15.76931	15.87891	15.82394	15.68800
56	9.009	16.00046	16.72349	16.81444	16.77795	16.60368
57	10	16.49304	17.23800	17.33577	17.33577	17.15414
58	12.5	18.26915	19.03156	19.15192	19.07150	18.91285
59	15.037	19.95613	20.54446	20.87858	20.87858	20.49777
60	17.543	21.54511	22.29389	22.40633	22.37809	22.21051
61	20	22.54125	23.34359	23.46902	23.46902	23.28155
62	25	24.06587	24.89703	25.04363	25.04363	24.86076
63	31.25	25.31155	26.16151	26.32540	26.32540	26.20219
64	36.363	27.61813	28.49624	28.63597	28.63597	28.63597
65	40	28.41280	29.30444	29.44645	29.44645	29.49430
66	50	30.45757	31.35624	31.52249	31.60681	32.13075
67	60.24	32.14378	33.13101	33.33571	33.75949	36.14322
68	65.619	31.73096	32.58424	32.98564	33.97940	39.12442
69	70.422	33.47081	34.33579	34.33579	33.26739	25.13343
70	80.645	34.96376	35.97596	36.07411	35.87891	34.53997
71	90.09	36.37891	37.42667	37.42667	37.09886	35.44404
72	100	37.13970	38.06180	38.06180	38.06180	36.53627



**TABLA A.3**

**MATERIAL DE BLINDAJE : NIQUEL**  
**GROSOR : 0.0228 cm.**  
**IMPEDANCIA DE LA FUENTE : 50 Ohms**  
**IMPEDANCIA DE RECEPTOR : 50 Ohms**

FRECUENCIA (KHz.)		MEDICIONES OBTENIDAS (dB.)				
		Pos.1	Pos.2	Pos.3	Pos.4	Pos.5
A	B	C	D	E	F	G
159	.5	5.014110	4.132176	3.934761	3.934761	4.293403
160	.666	4.986463	4.142510	3.983131	3.826625	4.142510
161	.8	5.131034	4.185192	4.185192	4.185192	4.465407
162	1	5.172523	4.205012	4.156957	4.037970	4.205012
163	1.25	5.695248	4.559392	4.283626	4.338083	4.615611
164	1.666	6.020600	4.838171	4.578871	4.578871	4.997549
165	2	5.788962	4.816856	4.715265	4.765912	5.182082
166	2.5	6.265289	5.325358	4.997549	4.997549	5.494021
167	3	5.994711	5.419607	5.275639	5.299468	5.714907
168	3.571	6.904673	5.950833	5.677239	5.744834	6.305409
169	4	6.803642	5.872120	5.726135	5.726135	6.248191
170	5	7.427062	6.601084	6.563645	6.638685	7.103075
171	6.024	8.111635	7.373013	7.325935	7.373013	7.808608
172	7.042	8.629623	8.017688	7.842209	7.842209	8.136674
173	8.024	9.409814	8.873950	8.654042	8.654042	8.948507
174	9.009	9.693488	9.247960	9.247960	9.247960	9.512525
175	10	9.886953	9.542425	9.304441	9.304441	9.494304
176	12.5	11.15843	10.80094	10.87127	10.87127	10.94217
177	15.037	12.36524	12.31460	12.11491	12.11491	12.06570
178	17.543	13.74853	13.67763	13.46832	13.46832	13.33153
179	20	14.04647	14.11407	14.32007	14.32007	14.11407
180	25	16.27086	16.38081	16.49217	16.49217	16.49217
181	31.25	17.50123	17.79569	17.50123	17.42914	17.14665
182	36.363	20.12498	20.64369	20.64369	20.91515	20.51108
183	40	21.17956	21.17956	21.17956	21.17956	21.08532
184	50	23.43364	23.97669	23.97669	24.55596	23.97669
185	60.24	25.59681	26.46613	26.46613	26.46613	26.02060
186	65.619	27.84221	27.84221	27.84221	27.84221	27.50154
187	70.422	29.80172	29.80172	29.80172	29.80172	29.34042
188	80.645	32.34600	32.34600	32.34600	32.34600	32.34600
189	90.09	34.15140	34.15140	34.15140	34.15140	34.15140
190	100	36.35320	36.35320	36.35320	36.35320	36.35320

**TABLA A.4**  
**MATERIAL DE BLINDAJE : NIQUEL**  
**GROSOR : 0.0228 cm.**  
**IMPEDANCIA DE LA FUENTE : 50 Ohms**  
**IMPEDANCIA DE RECEPTOR : ALTA**

FRECUENCIA (KHz.)		MEDICIONES OBTENIDAS (dB.)				
		Pos.1	Pos.2	Pos.3	Pos.4	Pos.5
J	K	L	M	N	O	P
159	.5	5.082623	4.236136	3.991447	3.991447	4.298401
160	.666	5.111442	4.288495	4.046532	3.998938	4.239560
161	.8	5.054506	4.102861	4.102861	4.102861	4.268312
162	1	5.114140	4.222498	4.082400	4.082400	4.222498
163	1.25	5.483157	4.314636	4.134300	4.075011	4.284319
164	1.666	4.841532	4.787915	4.524686	4.524686	4.734627
165	2	5.909950	4.923627	4.777642	4.777642	5.022331
166	2.5	6.354220	5.227146	4.955690	4.867057	5.181310
167	3	6.365128	5.550978	5.325358	5.236725	5.414904
168	3.571	7.008697	6.020600	5.744834	5.744834	6.020600
169	4	6.986694	6.066436	5.794980	5.794980	6.066436
170	5	7.630992	6.812892	6.715842	6.812892	6.911039
171	6.024	8.125308	7.322963	7.221373	7.221373	7.322963
172	7.042	8.526708	7.903999	7.741642	7.741642	7.741642
173	8.024	9.323625	8.698471	8.460487	8.460487	8.460487
174	9.009	9.619732	9.009381	9.071646	9.071646	9.009381
175	10	9.813881	9.409814	9.279196	9.214617	9.150514
176	12.5	11.35624	10.83693	10.83693	10.91483	10.72137
177	15.037	12.24140	12.15185	11.93194	11.97548	11.71746
178	17.543	13.71537	13.66351	13.56072	13.45913	13.25945
179	20	14.13976	14.13976	14.30314	14.30314	14.08598
180	25	16.14016	16.27379	16.47817	16.54739	16.34139
181	31.25	17.56134	17.68282	17.50123	17.50123	17.32335
182	36.363	20.14010	20.46383	20.72424	20.87663	20.57448
183	40	21.43057	21.70022	21.39272	21.50676	21.35504
184	50	23.96735	24.39993	24.39993	24.28975	24.39993
185	60.24	27.05030	27.45913	27.25231	27.51161	28.69404
186	65.619	26.45229	26.56364	27.14292	28.15848	31.98872
187	70.422	29.13737	29.58618	29.32688	28.83041	28.41812
188	80.645	25.95878	25.95878	25.95878	25.95878	25.95878
189	90.09	23.14093	23.14093	23.14093	23.14093	23.14093
190	100	20.86703	20.86703	20.86703	20.86703	20.86703

**TABLA A.5**  
**MATERIAL DE BLINDAJE : ALUMINIO**  
**GROSOR : 0.635 cm.**  
**IMPEDANCIA DE LA FUENTE : 50 Ohms**  
**IMPEDANCIA DE RECEPTOR : 50 Ohms**

FRECUENCIA (KHz.)		MEDICIONES OBTENIDAS (dB.)				
		Pos.1	Pos.2	Pos.3	Pos.4	Pos.5
A	B	C	D	E	F	G
277	.5	1.338936	1.252508	1.195364	1.223889	1.310031
278	.666	1.643735	1.547757	1.523928	1.547757	1.643735
279	.8	2.219462	2.110204	2.110204	2.110204	2.219462
280	1	2.673748	2.593323	2.573332	2.593323	2.673748
281	1.25	3.406560	3.279899	3.260576	3.279899	3.406560
282	1.666	4.376865	4.277596	4.277596	4.277596	4.376865
283	2	5.192746	5.150168	5.128957	5.160793	5.192746
284	2.5	6.327554	6.390268	6.390268	6.390268	6.327554
285	3	7.184144	7.424599	7.424599	7.424599	7.184144
286	3.571	8.207493	8.389594	8.426477	8.389594	8.207493
287	4	8.700968	8.991215	9.033483	8.991215	8.700968
288	5	10.19828	10.60505	10.66474	10.60505	10.19828
289	6.024	11.60780	12.16325	12.24558	12.16325	11.60780
290	7.042	12.32757	12.97201	13.03496	12.97201	12.32757
291	8.024	13.49221	14.18219	14.25086	14.14806	13.49221
292	9.009	14.20699	14.92789	15.01182	14.92789	14.20699
293	10	14.91244	15.66008	15.75822	15.66008	14.91244
294	12.5	16.82154	17.62840	17.70561	17.62840	16.82154
295	15.037	18.53958	19.40890	19.40890	19.40890	18.53958
296	17.543	19.57204	20.26728	20.51197	20.26728	19.46139
297	20	21.06491	21.85508	21.85508	21.85508	20.84123
298	25	22.23701	23.03235	23.39685	23.03235	22.23701
299	31.25	23.52183	24.76478	25.10545	24.76478	23.81629
300	36.363	26.27238	26.53168	26.53168	26.53168	26.27238
301	40	25.35723	27.04365	27.04365	27.04365	25.61653
302	50	28.00323	28.94316	28.94316	28.94316	28.00323
303	60.24	31.21335	31.21335	31.21335	31.21335	31.21335
304	65.619	32.27918	32.27918	32.27918	32.27918	32.27918
305	70.422	32.56778	32.56778	32.56778	32.56778	32.56778
306	80.645	35.26856	35.26856	35.26856	35.26856	35.26856
307	90.09	36.08960	36.08960	36.08960	36.08960	36.08960
308	100	36.35320	36.35320	36.35320	36.35320	36.35320

**TABLA A.6**  
**MATERIAL DE BLINDAJE : ALUMINIO**  
**GROSOR : 0.0635 cm.**  
**IMPEDANCIA DE LA FUENTE : 50 Ohms**  
**IMPEDANCIA DE RECEPTOR : ALTA**

FRECUENCIA (KHz.)		MEDICIONES OBTENIDAS (dB.)				
		Pos.1	Pos.2	Pos.3	Pos.4	Pos.5
J	K	L	M	N	O	P
277	.5	1.313576	1.269372	1.225393	1.269372	1.269372
278	.666	1.716421	1.658224	1.643735	1.658224	1.716421
279	.8	2.066882	1.970193	1.938200	1.970193	1.963785
280	1	2.556875	2.412347	2.383728	2.412347	2.412347
281	1.25	3.177605	3.092761	3.071678	3.092761	3.092761
282	1.666	4.550653	4.447248	4.396004	4.447248	4.447248
283	2	5.248604	5.197809	5.147310	5.197809	5.197809
284	2.5	6.375175	6.406703	6.406703	6.427785	6.406703
285	3	7.180439	7.319416	7.375636	7.375636	7.291442
286	3.571	8.094106	8.334562	8.365092	8.395730	8.304138
287	4	8.766676	9.079543	9.118639	9.151354	9.040622
288	5	10.27393	10.68320	10.75972	10.75972	10.64518
289	6.024	11.46689	12.01924	12.10742	12.10742	11.97548
290	7.042	12.51571	13.14156	13.24197	13.24197	13.09178
291	8.024	13.53664	14.24945	14.36450	14.36450	14.24945
292	9.009	14.43072	15.15496	15.28176	15.28176	15.09225
293	10	14.79613	15.56303	15.69769	15.69769	15.49647
294	12.5	16.62794	17.48454	17.58515	17.58515	17.38508
295	15.037	18.34338	19.14221	19.26257	19.22227	19.10246
296	17.543	19.76723	20.64534	20.78507	20.72891	20.64534
297	20	20.77505	21.65168	21.75478	21.75478	21.65168
298	25	22.47124	23.33767	23.46000	23.46000	23.36809
299	31.25	23.67289	24.63898	24.77631	24.77631	24.43697
300	36.363	25.88273	26.78269	26.93575	26.93575	26.97444
301	40	26.61986	27.60422	27.79942	27.79942	27.87875
302	50	28.68425	29.60950	29.81388	29.84842	30.45757
303	60.24	30.51243	31.58769	31.86129	32.32512	34.86062
304	65.619	29.86416	30.72485	31.28543	32.30848	37.90529
305	70.422	31.65699	32.72190	32.72190	31.82566	25.47094
306	80.645	33.38014	34.45764	34.45764	34.13591	31.21335
307	90.09	34.63231	35.65940	35.80600	35.51523	33.54136
308	100	35.86348	36.77264	36.77264	36.77264	35.13924

**TABLA A.7**  
**MATERIAL DE BLINDAJE : METAL COMPUESTO**  
**GROSOR : 0.0254 cm.**  
**IMPEDANCIA DE LA FUENTE : 50 Ohms**  
**IMPEDANCIA DE RECEPTOR : 50 Ohms**

FRECUENCIA (KHz.)		MEDICIONES OBTENIDAS (dB.)				
		Pos.1	Pos.2	Pos.3	Pos.4	Pos.5
A	B	C	D	E	F	G
396	.5	24.27309	24.52009	24.03291	24.03291	24.35464
397	.666	26.83648	25.02199	24.81098	24.81098	24.88075
398	.8	28.13080	25.68649	25.05451	24.60898	24.82889
399	1	29.54243	26.39996	25.94668	25.65712	26.09516
400	1.25	29.09027	26.92839	26.35861	26.35861	27.07687
401	1.666	31.12605	28.36000	27.31942	27.18044	28.04975
402	2	28.91972	26.75506	27.01436	27.14697	27.41842
403	2.5	30.91157	28.51937	28.84718	29.01585	29.72529
404	3	30.81035	29.87273	29.47785	29.47785	29.71261
405	3.571	34.33689	31.81989	30.98707	30.98707	32.38411
406	4	31.80483	31.24062	30.91888	30.91888	31.46193
407	5	35.83030	33.89210	33.06425	33.22363	34.06758
408	6.024	35.28473	35.05310	34.60757	35.05310	35.28473
409	7.042	39.10836	37.56011	36.55678	37.56011	37.56011
410	8.024	37.46788	37.46788	37.46788	37.46788	37.66989
411	9.009	38.74706	38.74706	38.74706	38.74706	38.74706
412	10	39.68411	39.68411	39.68411	39.68411	39.68411
413	12.5	42.56637	42.56637	42.56637	42.56637	42.56637
414	15.037	46.39559	46.39559	46.39559	46.39559	46.39559
415	17.543	49.45513	49.45513	49.45513	49.45513	49.45513
416	20	49.21462	49.21462	49.21462	49.21462	49.21462
417	25	49.41745	49.41745	49.41745	49.41745	49.41745
418	31.25	53.06425	53.06425	53.06425	53.06425	53.06425
419	36.363	53.38014	53.38014	53.38014	53.38014	53.38014
420	40	52.46499	52.46499	52.46499	52.46499	52.46499
421	50	50.88136	50.88136	50.88136	50.88136	50.88136
422	60.24	50.45757	50.45757	50.45757	50.45757	50.45757
423	65.619	49.78041	49.78041	49.78041	49.78041	49.78041
424	70.422	30.62958	30.62958	30.62958	30.62958	30.62958
425	80.645	55.26856	55.26856	55.26856	55.26856	55.26856
426	90.09	56.08960	56.08960	56.08960	56.08960	56.08960
427	100	59.27576	59.27576	59.27576	59.27576	59.27576

**TABLA A.9**  
**MATERIAL DE BLINDAJE : PAPEL ALUMINIO**  
**GROSOR : 0.0032 cm.**  
**IMPEDANCIA DE LA FUENTE : 50 Ohms**  
**IMPEDANCIA DE RECEPTOR : 50 Ohms**

FRECUENCIA (KHz.)		MEDICIONES OBTENIDAS (dB.)				
		Pos.1	Pos.2	Pos.3	Pos.4	Pos.5
A	B	C	D	E	F	G
515	.5	.3158853	.3158853	.3158853	.3158853	.3158853
516	.666	.3047993	.3047993	.3047993	.3047993	.3047993
517	.8	.3474819	.3474819	.3474819	.3474819	.3474819
518	1	.1497604	.1497604	.1497604	.1497604	.1497604
519	1.25	.2080150	.2012265	.2012265	.2012265	.2080150
520	1.666	.1276019	.1214830	.1214830	.1214830	.1276019
521	2	.2440184	.2379845	.2379845	.2379845	.2440184
522	2.5	.1276019	.1214830	.1214830	.1214830	.1276019
523	3	.1437878	.1306173	.1306173	.1306173	.1437878
524	3.571	.0915424	.0773960	.0703315	.0773960	.1270096
525	4	.3203237	.2583920	.2275909	.2583920	.3203237
526	5	.1951967	.1772692	.1772692	.1772692	.1951967
527	6.024	.2250887	.2043833	.2043833	.2043833	.2250887
528	7.042	.3374747	.3131035	.2985136	.3131035	.3374747
529	8.024	.2990743	.2824929	.2714561	.2714561	.2990743
530	9.009	.4140572	.3827002	.3827002	.3827002	.4140572
531	10	.6165155	.5820476	.5820476	.5820476	.6027119
532	12.5	.6542661	.6281693	.6281693	.6281693	.6542661
533	15.037	.9015675	.9015675	.9015675	.9015675	.9015675
534	17.543	.8924331	.9249038	.9249038	.9249038	.8859535
535	20	1.102757	1.178950	1.178950	1.178950	1.064910
536	25	1.311007	1.409154	1.458646	1.409154	1.286643
537	31.25	1.411621	1.583625	1.583625	1.554720	1.411621
538	36.363	2.174031	2.416443	2.416443	2.416443	2.174031
539	40	2.452939	2.731654	2.731654	2.731654	2.452939
540	50	3.174343	3.566254	3.566254	3.566254	3.174343
541	60.24	3.576282	4.082400	4.082400	4.082400	3.576282
542	65.619	3.979717	4.476189	4.515581	4.476189	3.979717
543	70.422	4.310171	4.784457	4.828886	4.784457	4.226653
544	80.645	4.898281	5.385468	5.441326	5.385468	4.845798
545	90.09	5.524128	6.192603	6.192603	6.192603	5.460025
546	100	6.096460	6.810771	6.810771	6.810771	6.096460

**TABLA A.10**  
**MATERIAL DE BLINDAJE : PAPEL ALUMINIO**  
**GROSOR : 0.0032 cm.**  
**IMPEDANCIA DE LA FUENTE : 50 Ohms**  
**IMPEDANCIA DE RECEPTOR : ALTA**

FRECUENCIA (KHz.)		MEDICIONES OBTENIDAS (dB.)				
		Pos.1	Pos.2	Pos.3	Pos.4	Pos.5
J	K	L	M	N	O	P
	.5	.3102433	.3102433	.3102433	.3102433	.3102433
516	.666	.1815932	.1815932	.1815932	.1815932	.1815932
517	.8	.2592995	.2592995	.2592995	.2592995	.2592995
518	1	.1092579	.1092579	.1092579	.1092579	.1092579
519	1.25	.1190886	.1115975	.1115975	.1115975	.1115975
520	1.666	.1616605	.1553868	.1553868	.1553868	.1553868
521	2	.1318407	.1261895	.1261895	.1261895	.1318407
522	2.5	.2606729	.2554858	.2554858	.2554858	.2606729
523	3	.1459848	.1263778	.1214830	.1214830	.1312754
524	3.571	.1459848	.1270096	.1175375	.1080758	.1364920
525	4	.2504381	.2316375	.2316375	.2316375	.2316375
526	5	.2439256	.2256202	.2256202	.2256202	.2256202
527	6.024	.3180031	.3088841	.2906747	.3088841	.3088841
528	7.042	.3821059	.3637425	.3362700	.3545753	.3637425
529	8.024	.4082893	.3804647	.3619644	.3619644	.3897297
530	9.009	.4791560	.4513166	.4513166	.4513166	.4513166
531	10	.3638601	.3406668	.3406668	.3406668	.3499367
532	12.5	.4713543	.4572577	.4572577	.4572577	.4572577
533	15.037	.7577705	.7577705	.7577705	.7577705	.7577705
534	17.543	1.008586	1.023050	1.023050	1.023050	1.023050
535	20	1.703079	1.754781	1.754781	1.728892	1.703079
536	25	1.509492	1.558843	1.583625	1.583625	1.534133
537	31.25	1.619641	1.716421	1.765218	1.814291	1.863643
538	36.363	2.225181	2.498775	2.498775	2.545223	2.406616
539	40	2.413409	2.672065	2.715933	2.715933	2.628417
540	50	2.987389	3.340002	3.438706	3.471858	3.505138
541	60.24	3.682928	4.099265	4.206543	4.388339	5.236793
542	65.619	3.681204	4.349679	4.795207	5.812545	10.02961
543	70.422	4.178959	4.613344	4.613344	4.321354	3.698194
544	80.645	4.915218	5.450337	5.508632	5.334908	4.257878
545	90.09	5.497546	6.080710	6.141239	5.990700	5.030893
546	100	5.721793	6.330054	6.375175	6.285165	5.432924

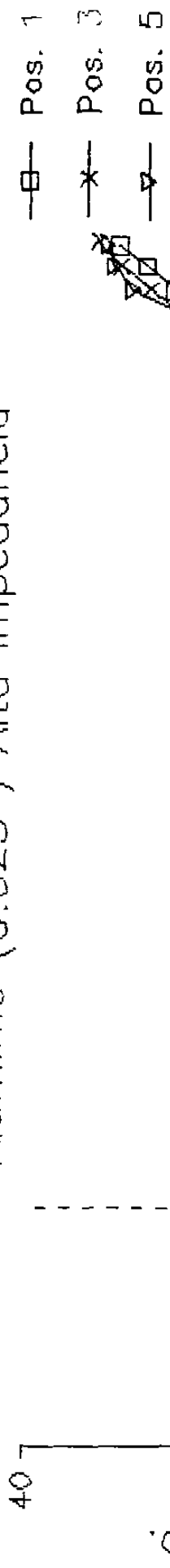
## APENDICE B

CURVAS DE EFECTIVIDAD DE BLINDAJE (dB) VERSUS FRECUENCIA  
(ESCALA LOGARITMICA) PARA TRES POSICIONES DIFERENTES  
EN DOS TIPOS DE IMPEDANCIA

MATERIALES DE BLINDAJE: ALUMINIO  
METAL COMPUESTO  
PAPEL ALUMINIO

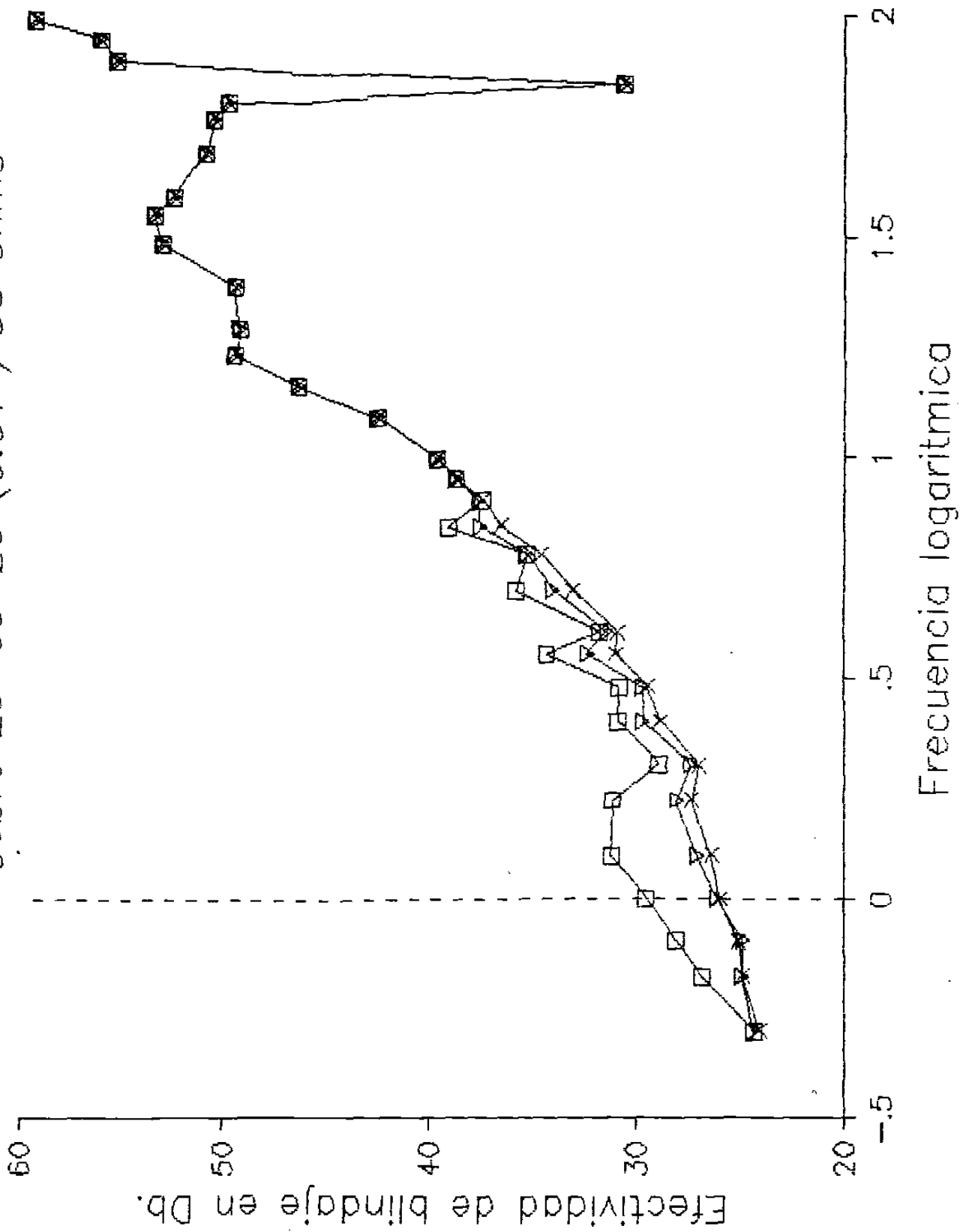


Ensayo y Reciprocidad  
Aluminio (0.025") Alta impedancia



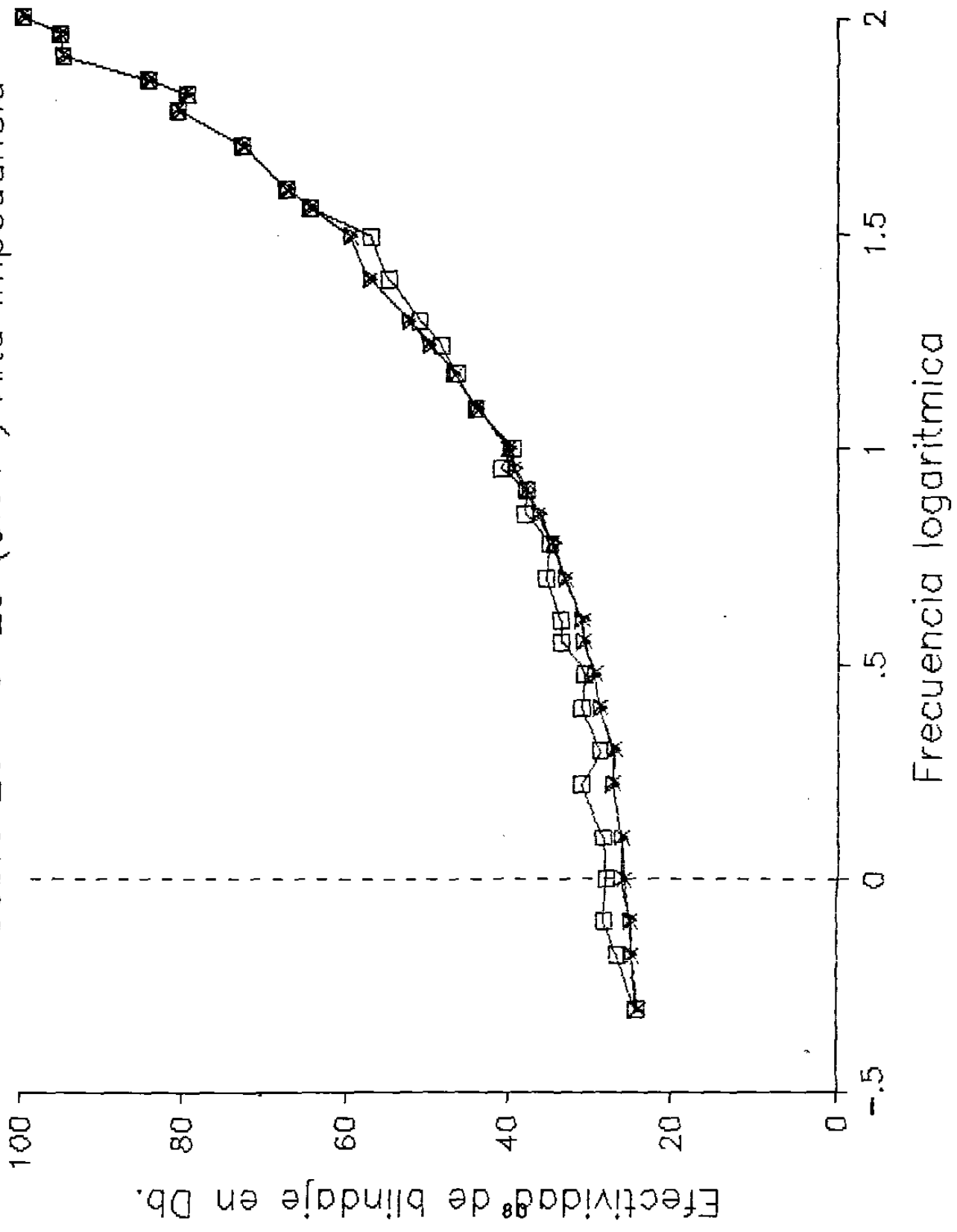
Blindaje y Reciprocidad  
 Cobre 20-60-20 (0.01") 50 Ohms

- Pos. 1
- × Pos. 3
- ▽ Pos. 5



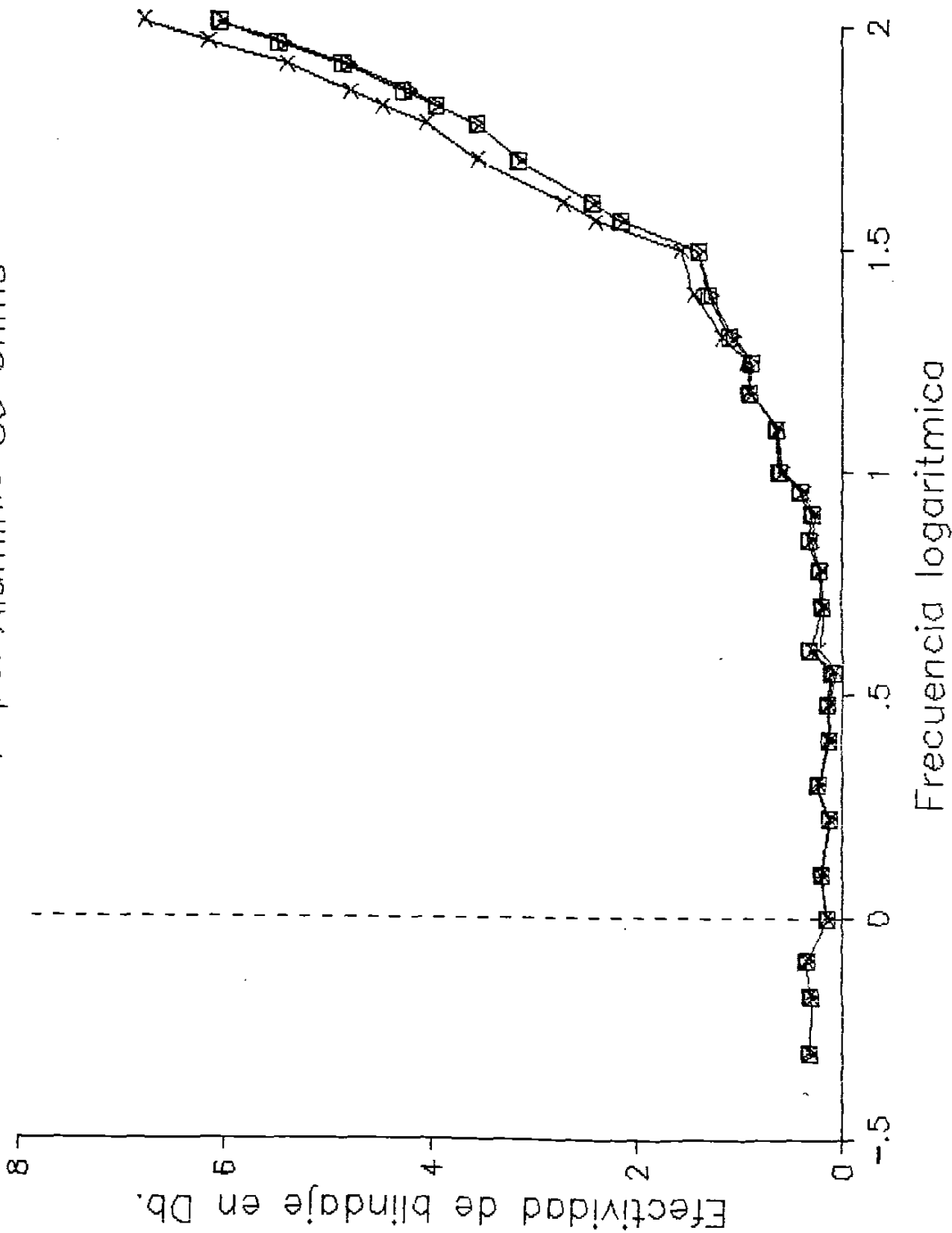
Blindaje y Reciprocidad  
 Cobre 20-60-20 (0.01") Alta impedancia

- Pos. 1
- × Pos. 3
- ▽ Pos. 5



Blindaje y Reciprocidad  
 Papel Aluminio 50 Ohms

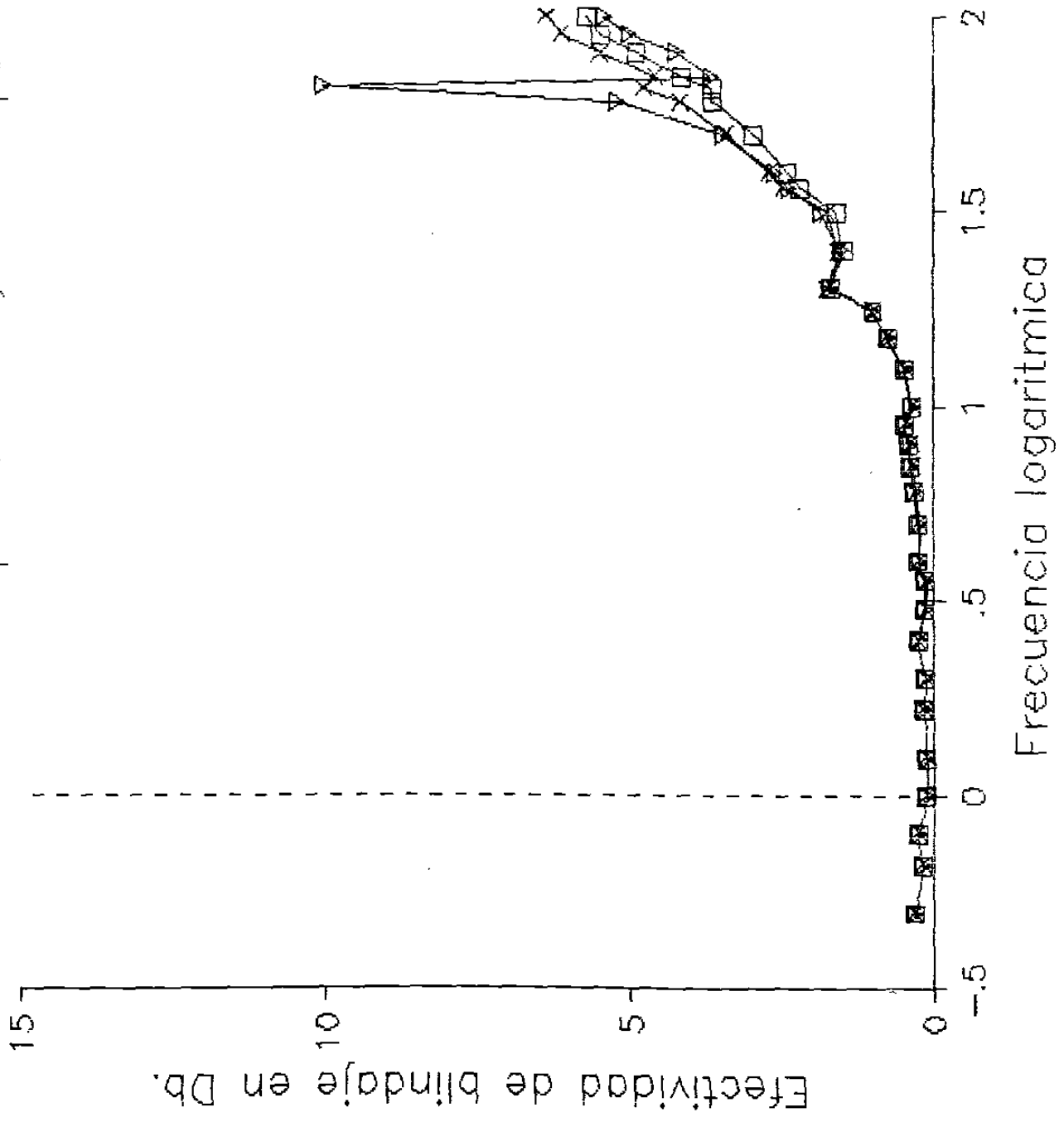
- Pos. 1
- ×— Pos. 3
- ▽— Pos. 5



Blindaje y Reciprocidad

Papel Aluminio, alta imped.

- Posicio
- \*— Posicio
- ▽— Posicio

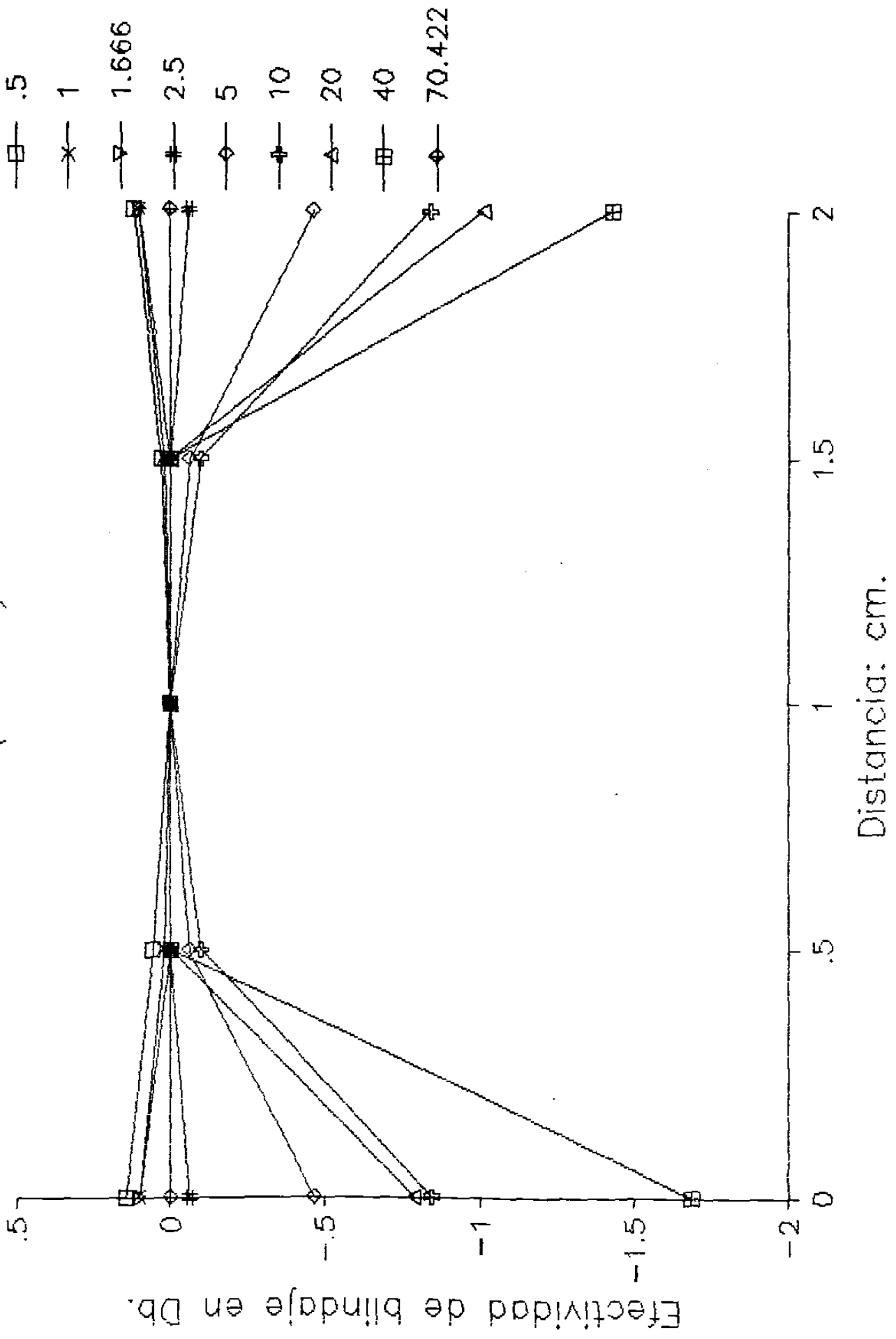


## **APENDICE C**

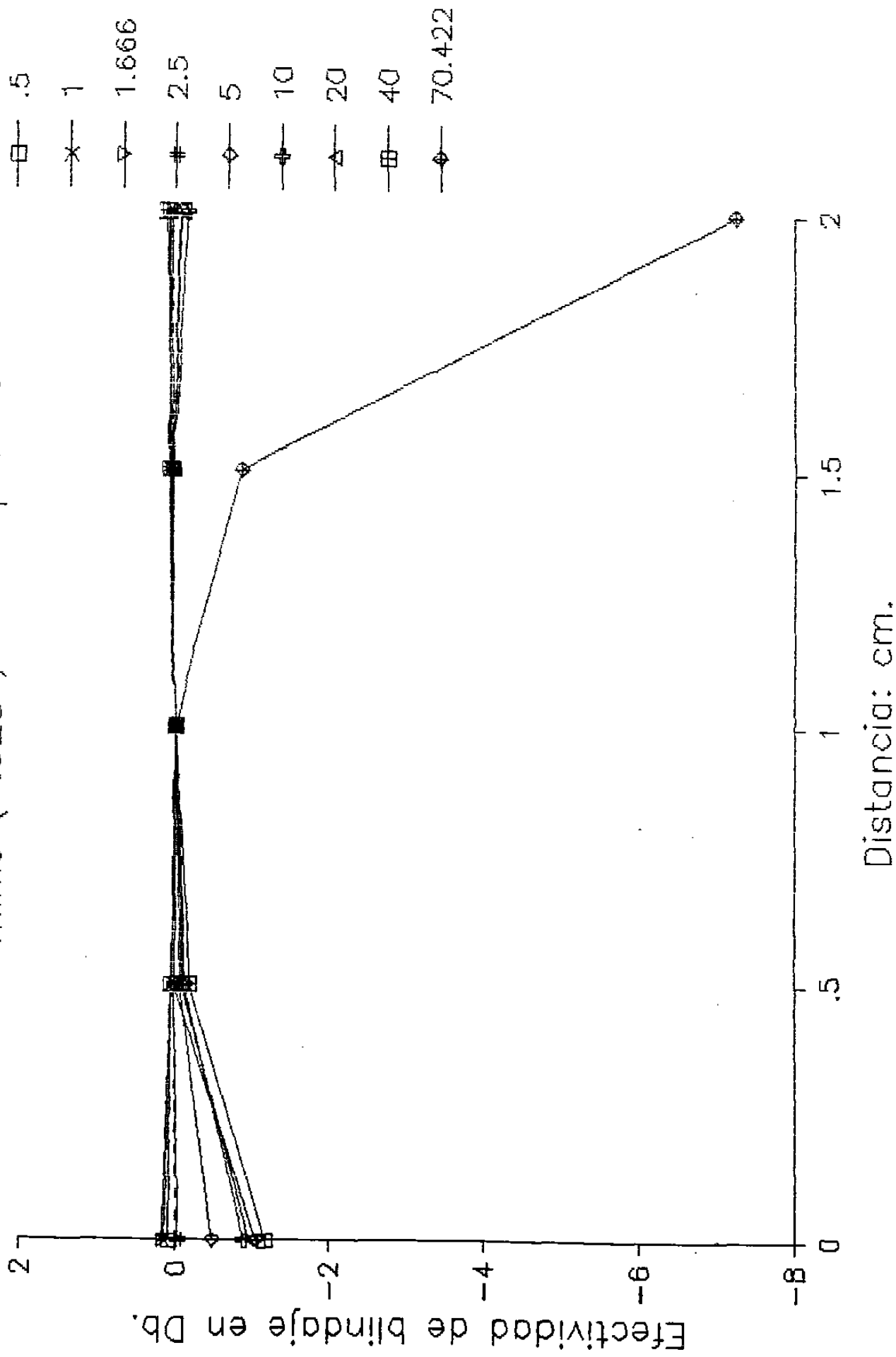
**CURVAS DE VARIACION DE EFECTIVIDAD (dB) CON RESPECTO  
A LA POSICION CENTRAL, VERSUS DISTANCIA DE LA FUENTE  
EN VARIOS NIVELES DE FRECUENCIA, Y EN DOS TIPOS DE IMPEDANCIA**

**MATERIALES DE BLINDAJE: COBRE  
NIQUEL  
ALUMINIO  
METAL COMPUESTO  
PAPEL ALUMINIO**

# Blindaje y Reciprocidad Aluminio (0.025") 50 Ohms

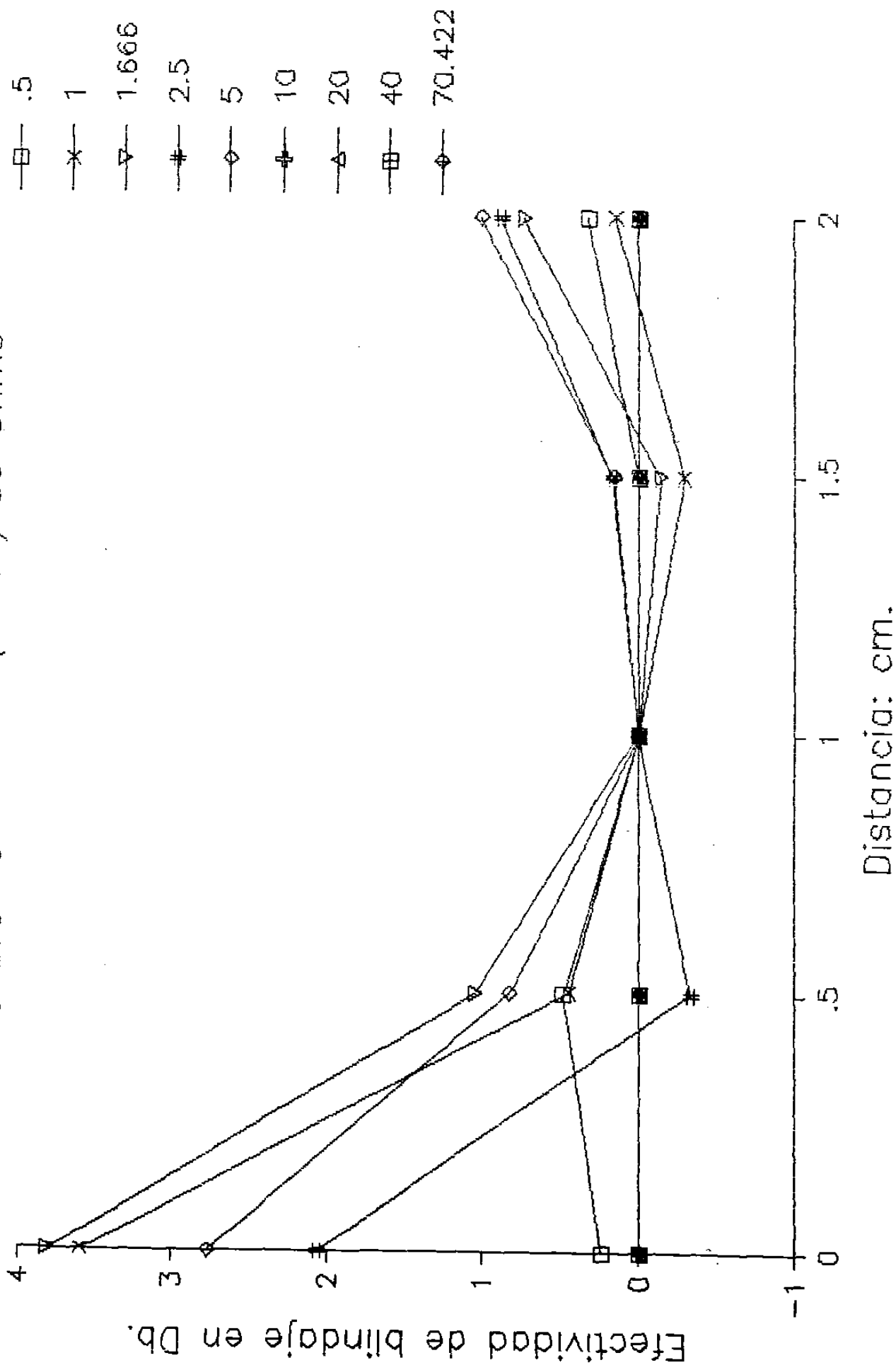


Blindaje y Reciprocidad  
 Aluminio (0.025") Alta impedancia



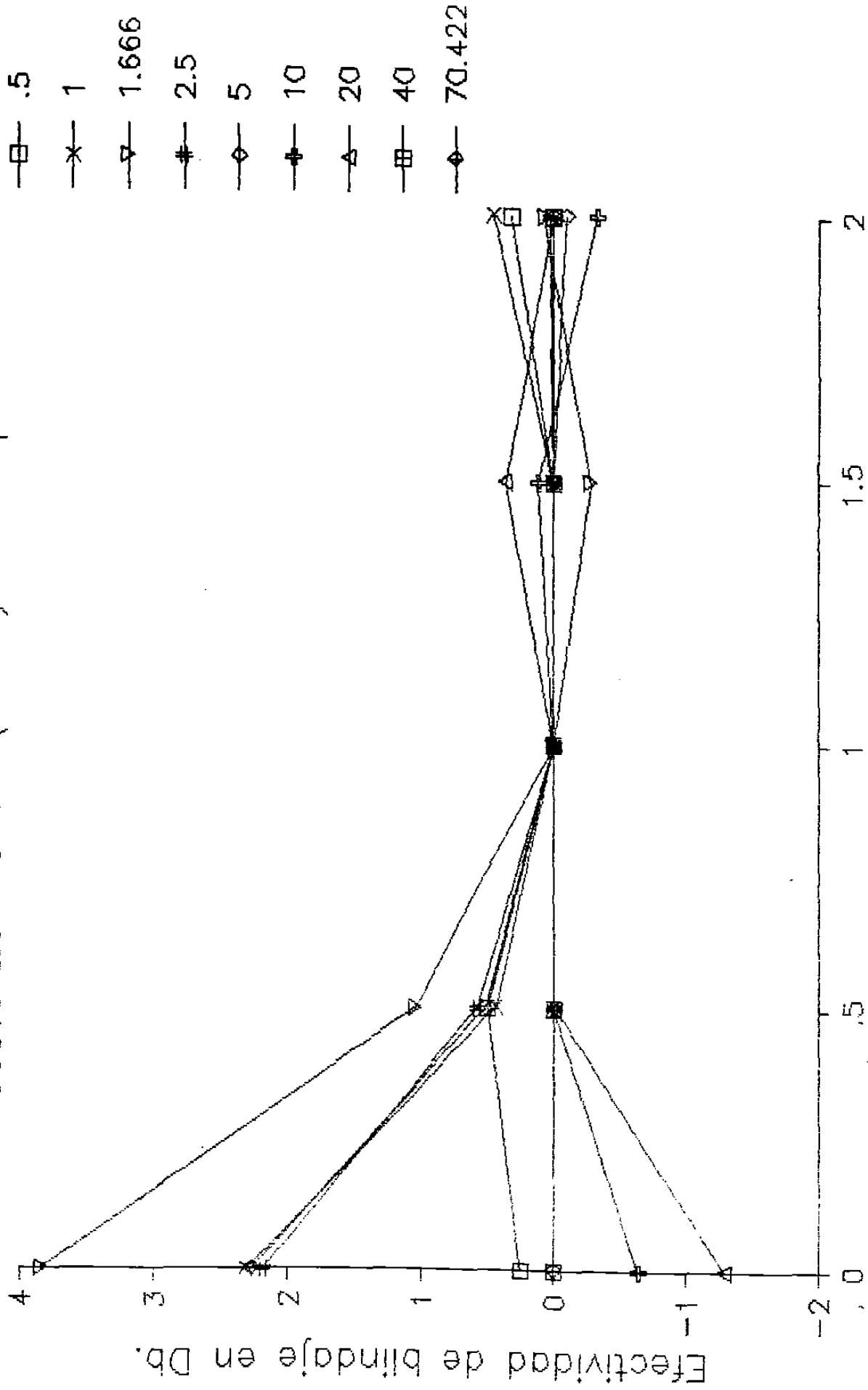


Blindaje y Reciprocidad  
 Cobre 20-60-20 (0.01") 50 Ohms

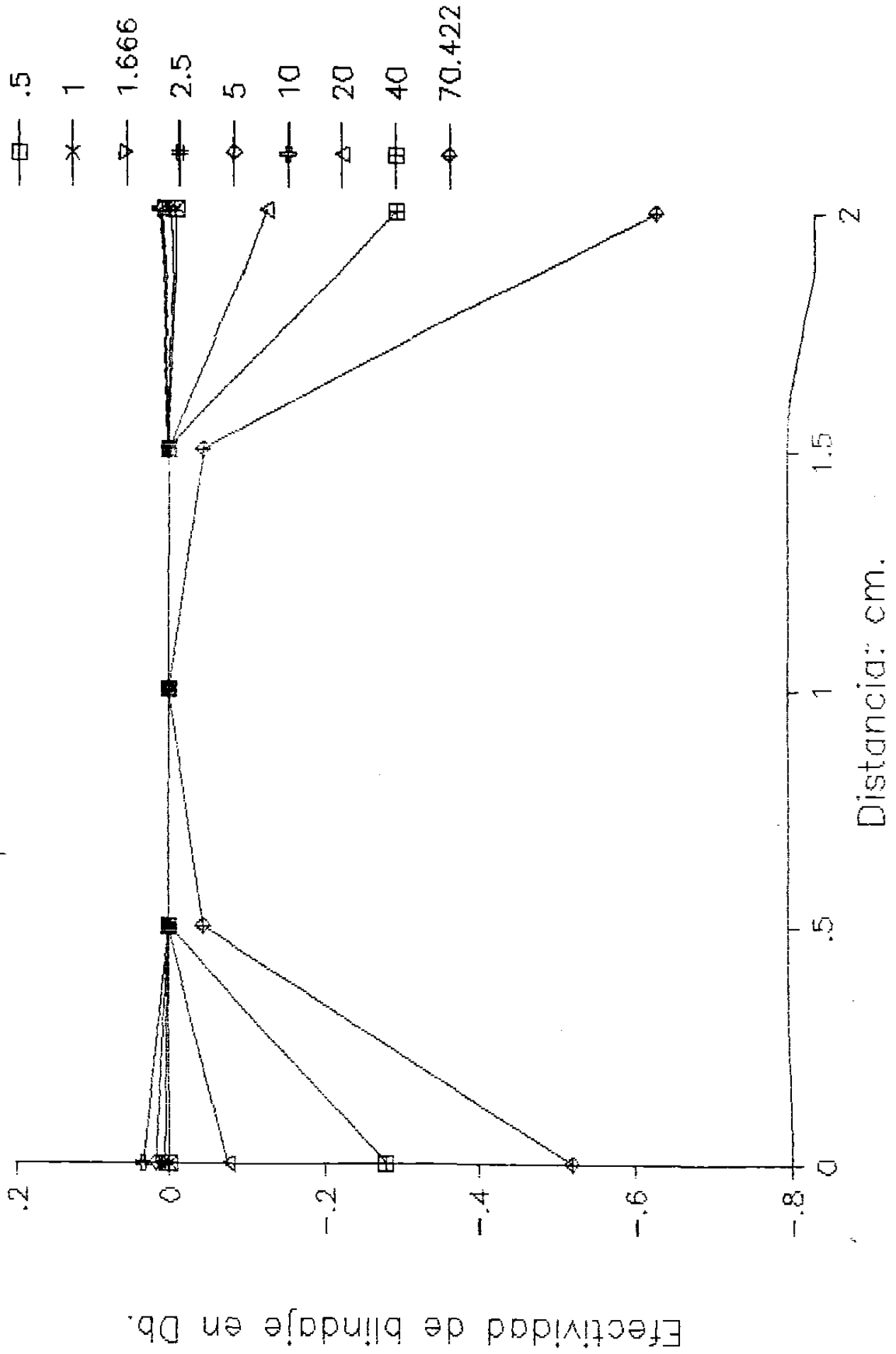


# Blindaje y Reciprocidad

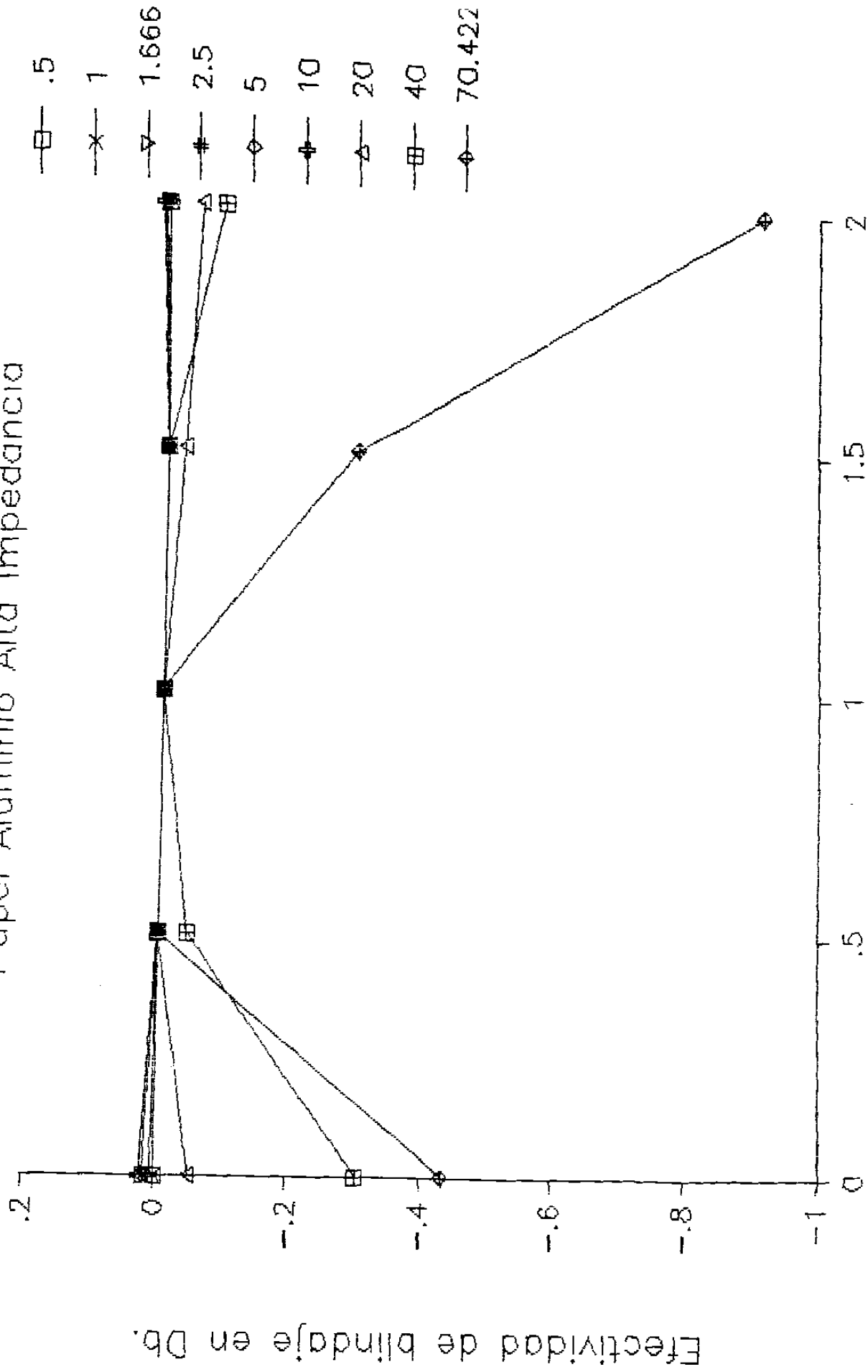
## Cobre 20-60-20 (0.01") Alta impedancia



# Blindaje y Reciprocidad Papel Aluminio 50 Ohms



# Blindaje y Reciprocidad Papel Aluminio Alta impedancia



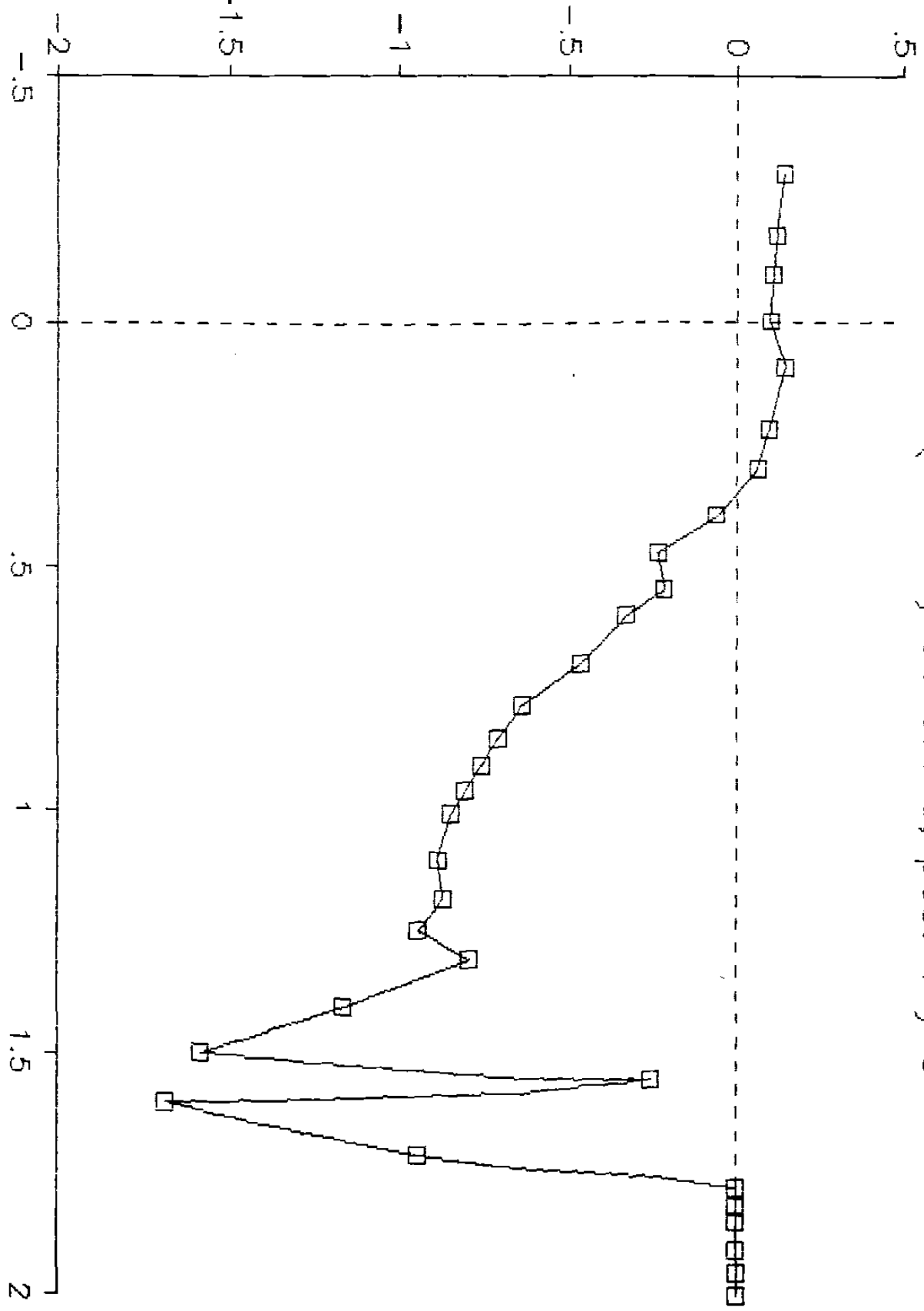
## **APENDICE D**

**CURVAS DE DESVIACION MAXIMA (dB) VERSUS FRECUENCIA  
(ESCALA LOGARITMICA), PARA VARIAS POSICIONES Y A DIFERENTES  
FRECUENCIAS, Y EN DOS TIPOS DE IMPEDANCIA**

**MATERIALES DE BLINDAJE: ALUMINIO  
METAL COMPUESTO  
PAPEL ALUMINIO**

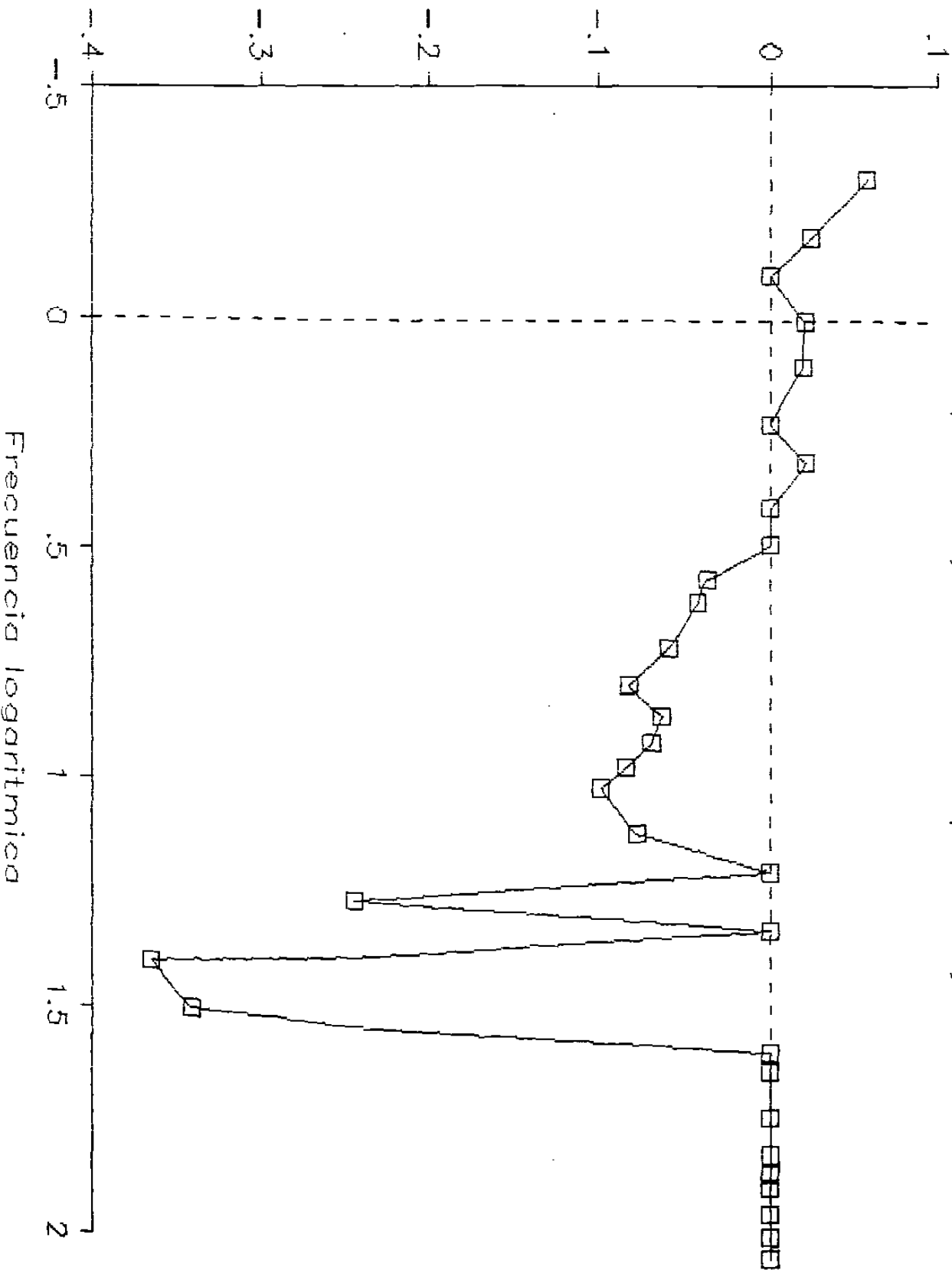
Desviacion maxima (dB)

Blindaje y Reciprocidad  
Aluminio (0.025") 50 ohms, pos. 1 y 5

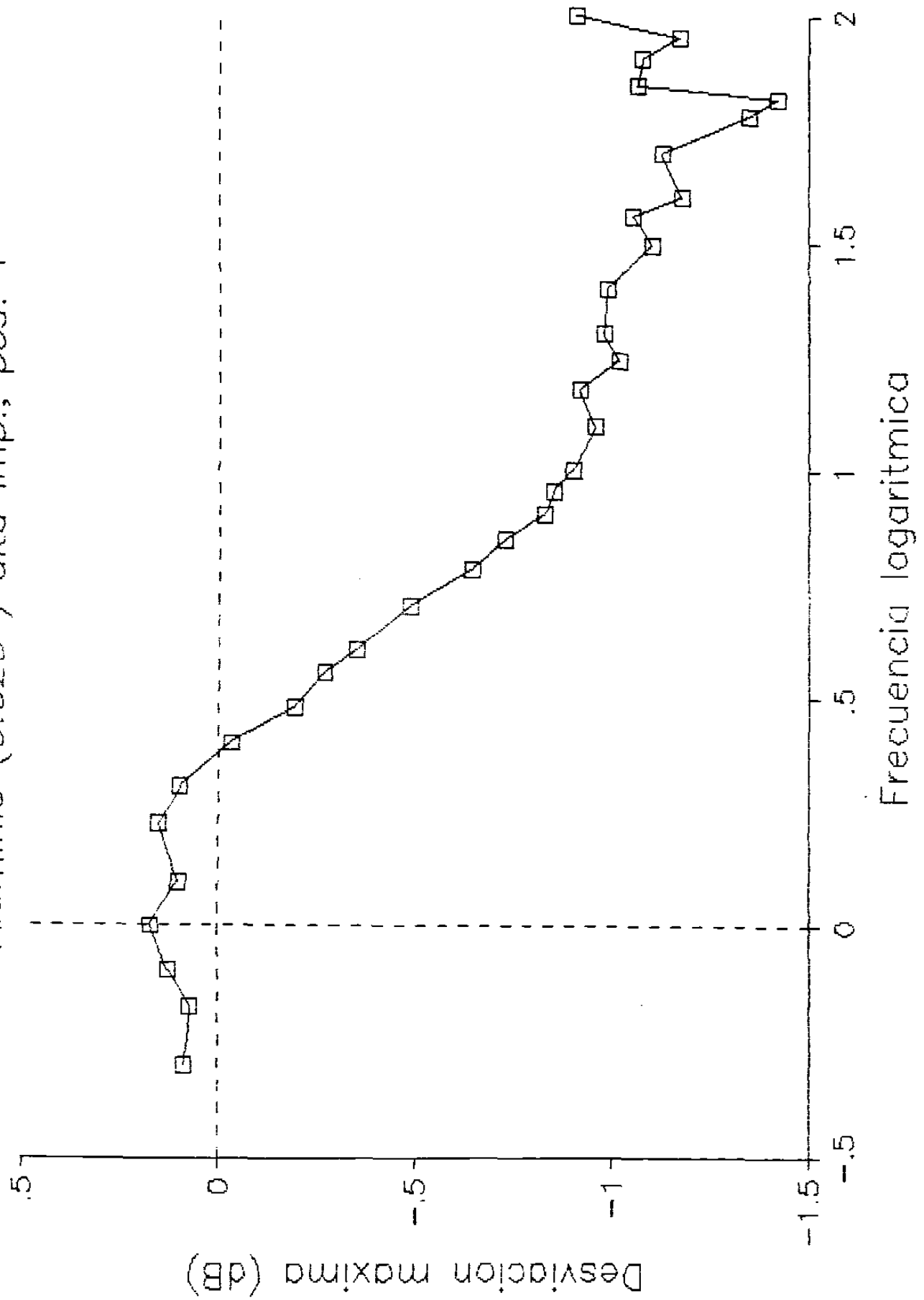


Desviacion maxima (dB)

Blindaje y Reciprocidad  
Aluminio (0.025") 50 ohms, pos. 2 y 4

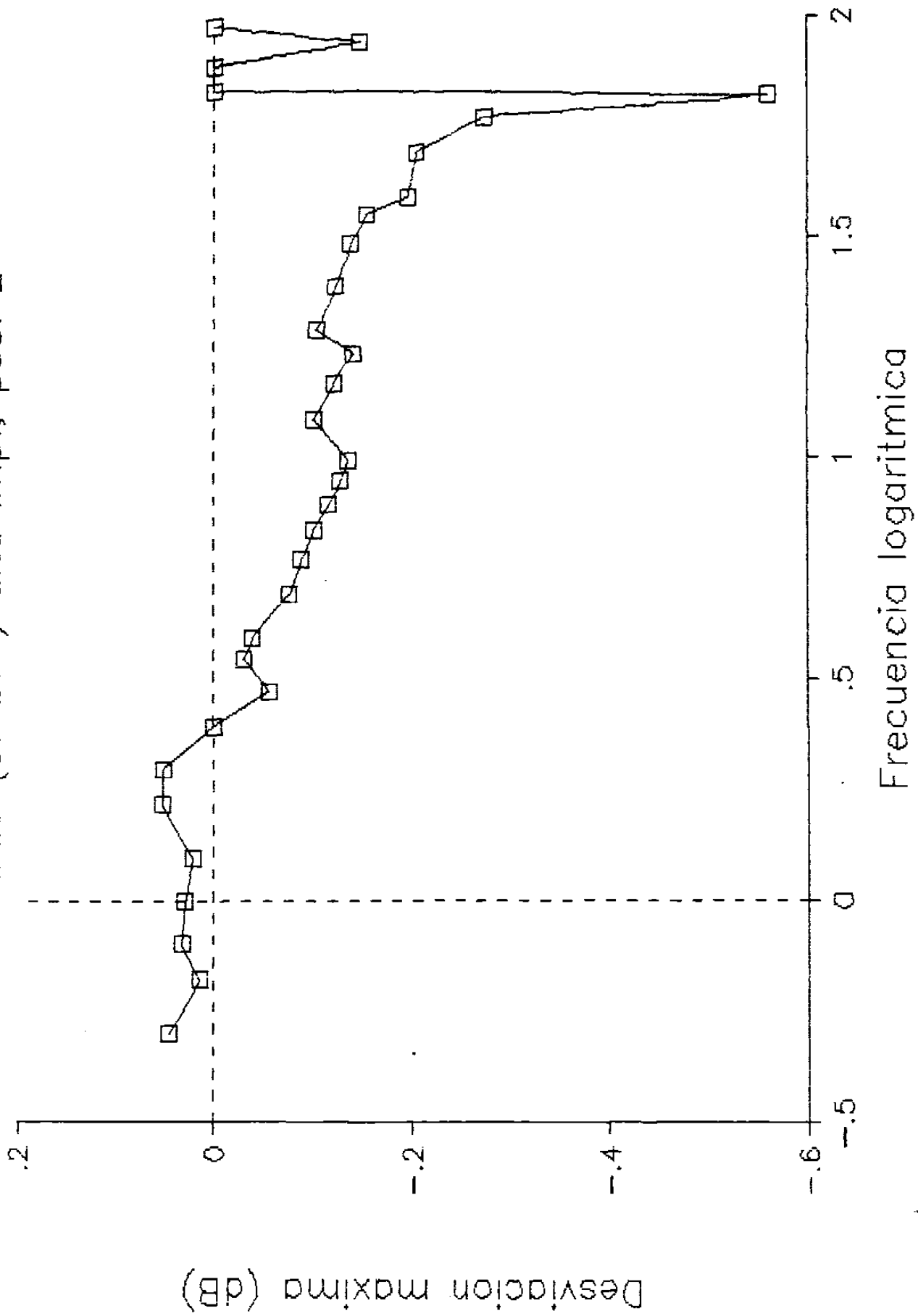


Blindaje y Reciprocidad  
Aluminio (0.025") alta imp., pos. 1



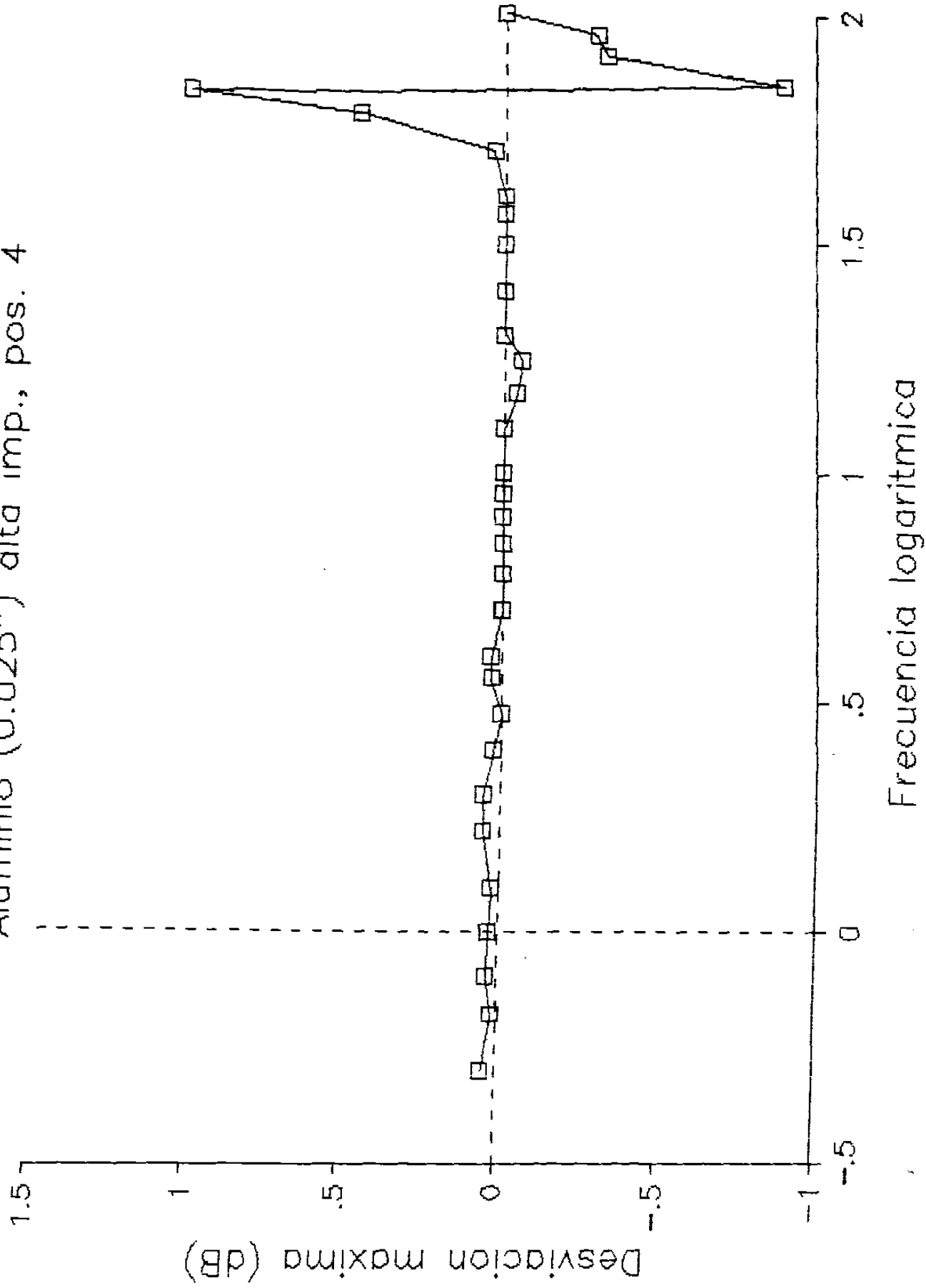


Blindaje y Reciprocidad  
Aluminio (0.025") alta imp., pos. 2

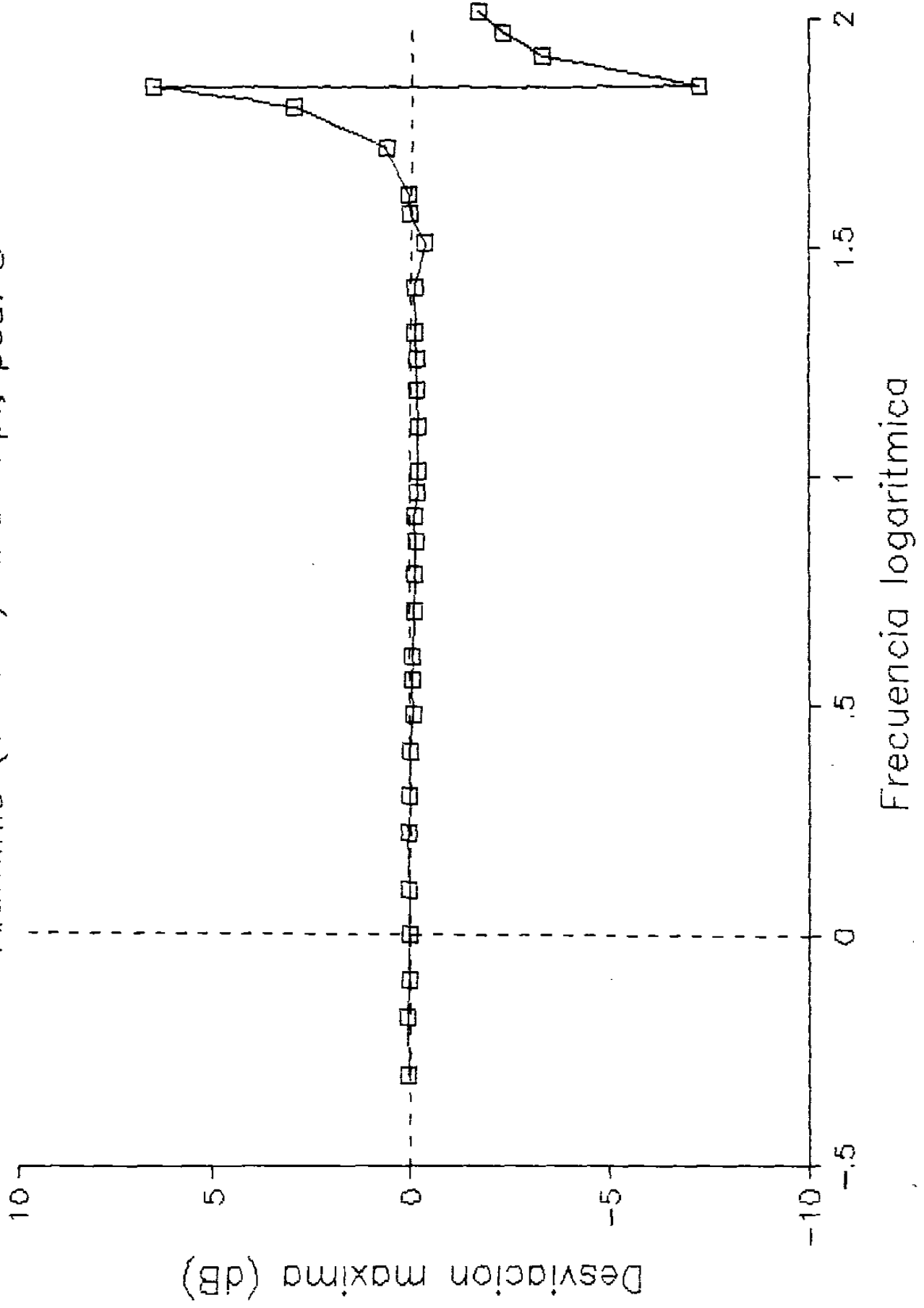


# Blindaje y Reciprocidad

Aluminio (0.025") alta imp., pos. 4

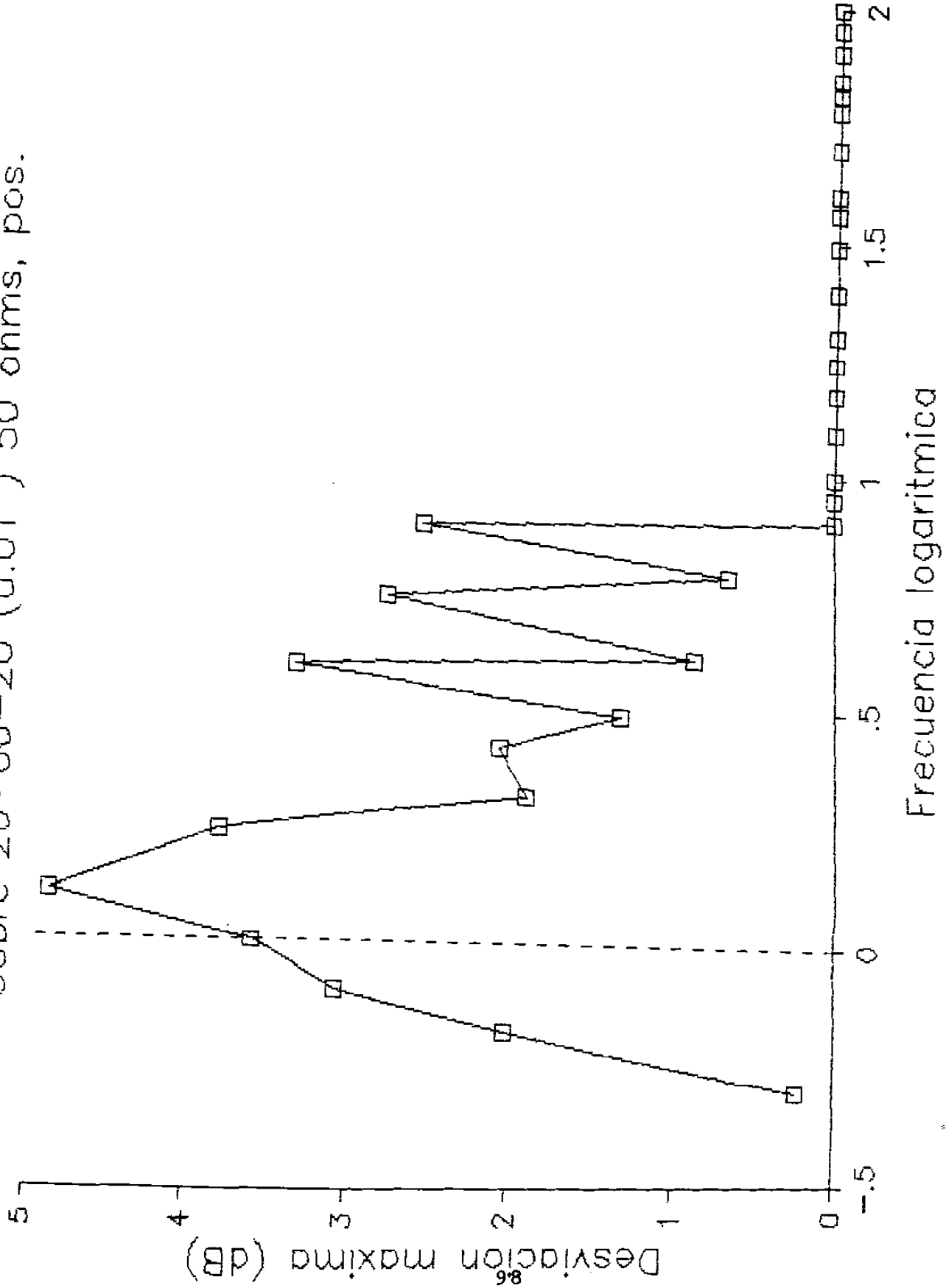


Blindaje y Reciprocidad  
Aluminio (0.025") alta imp., pos. 5



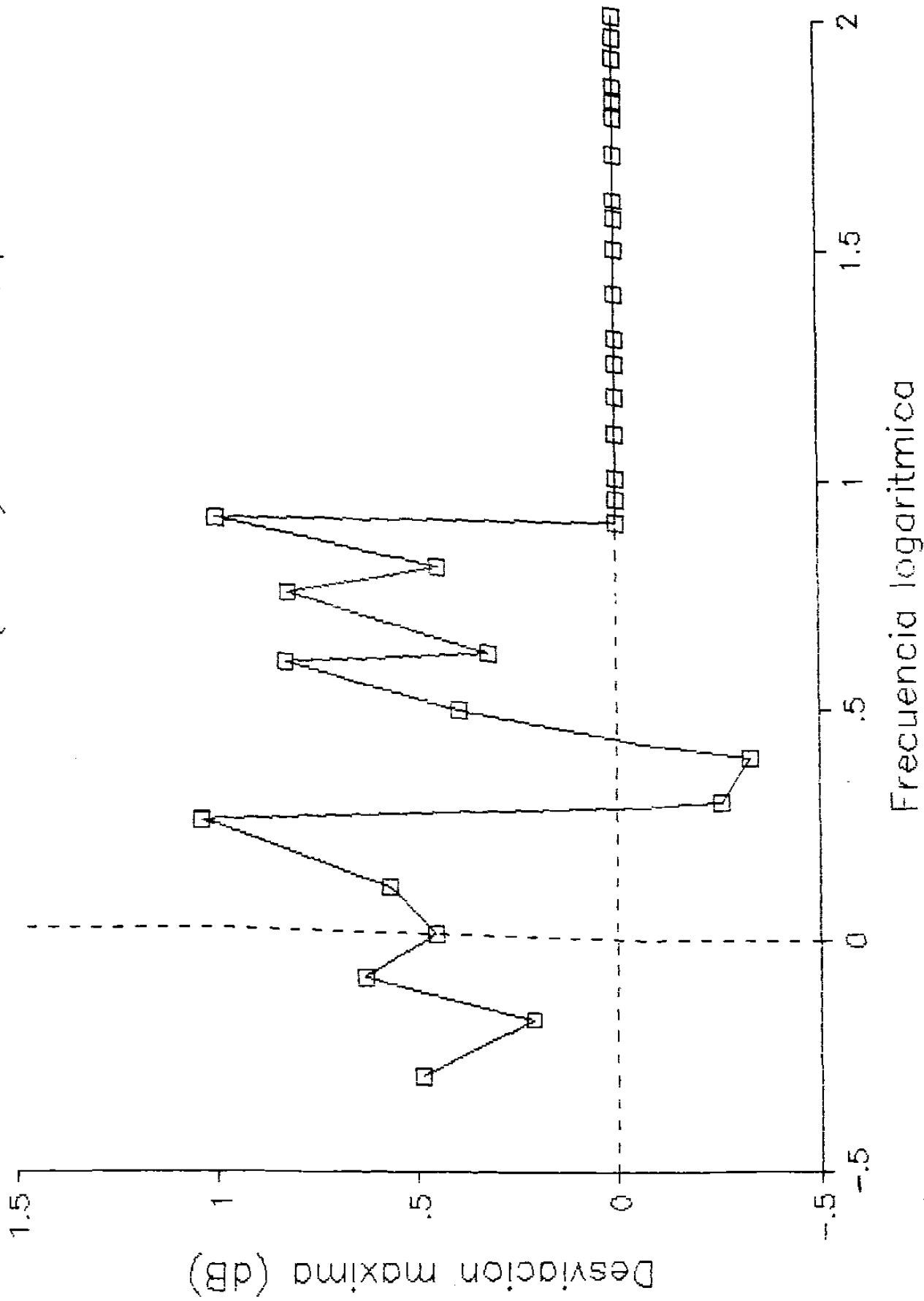
# Blindaje y Reciprocidad

Cobre 20-60-20 (0.01") 50 ohms, pos.

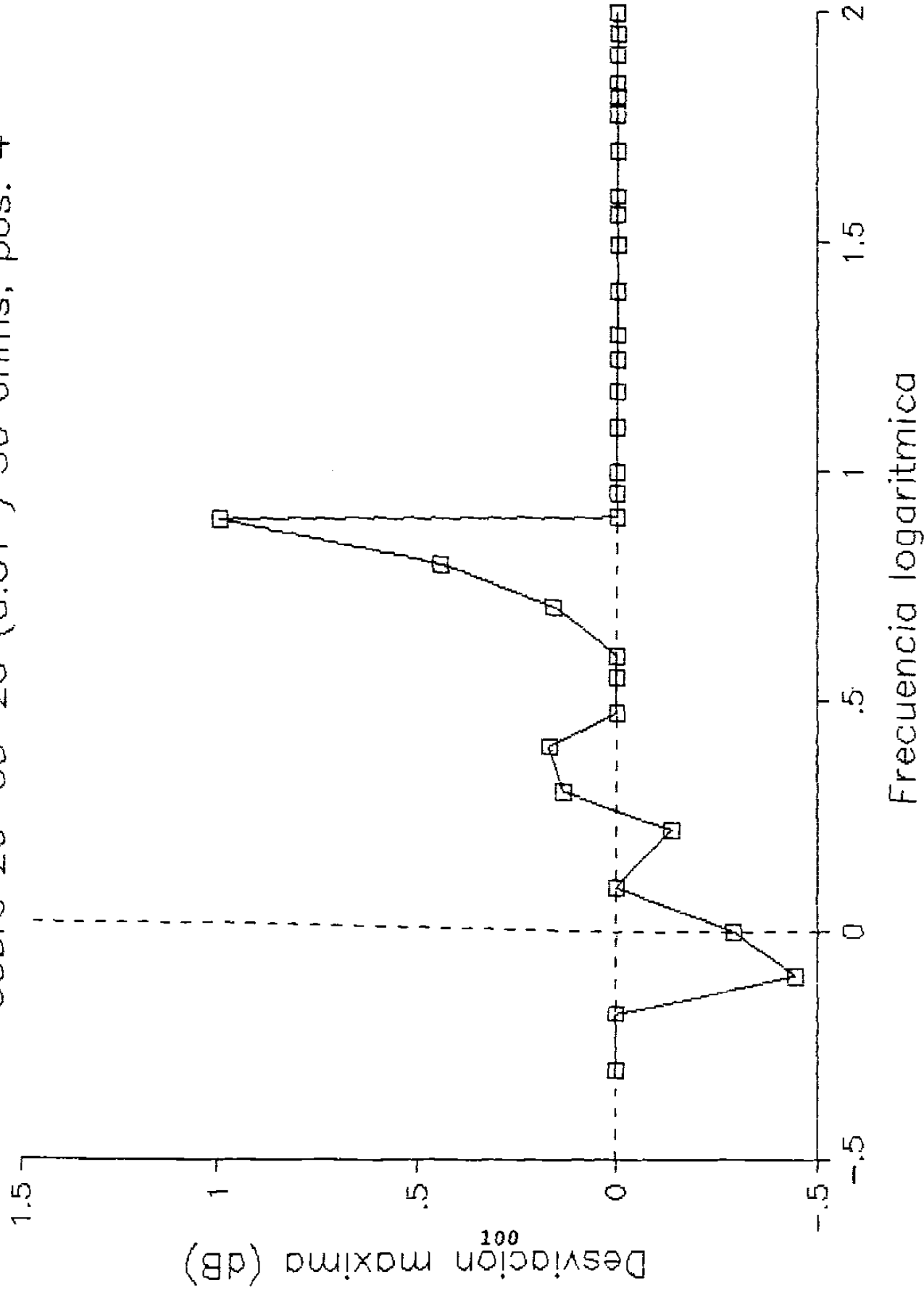


# Blindaje y Reciprocidad

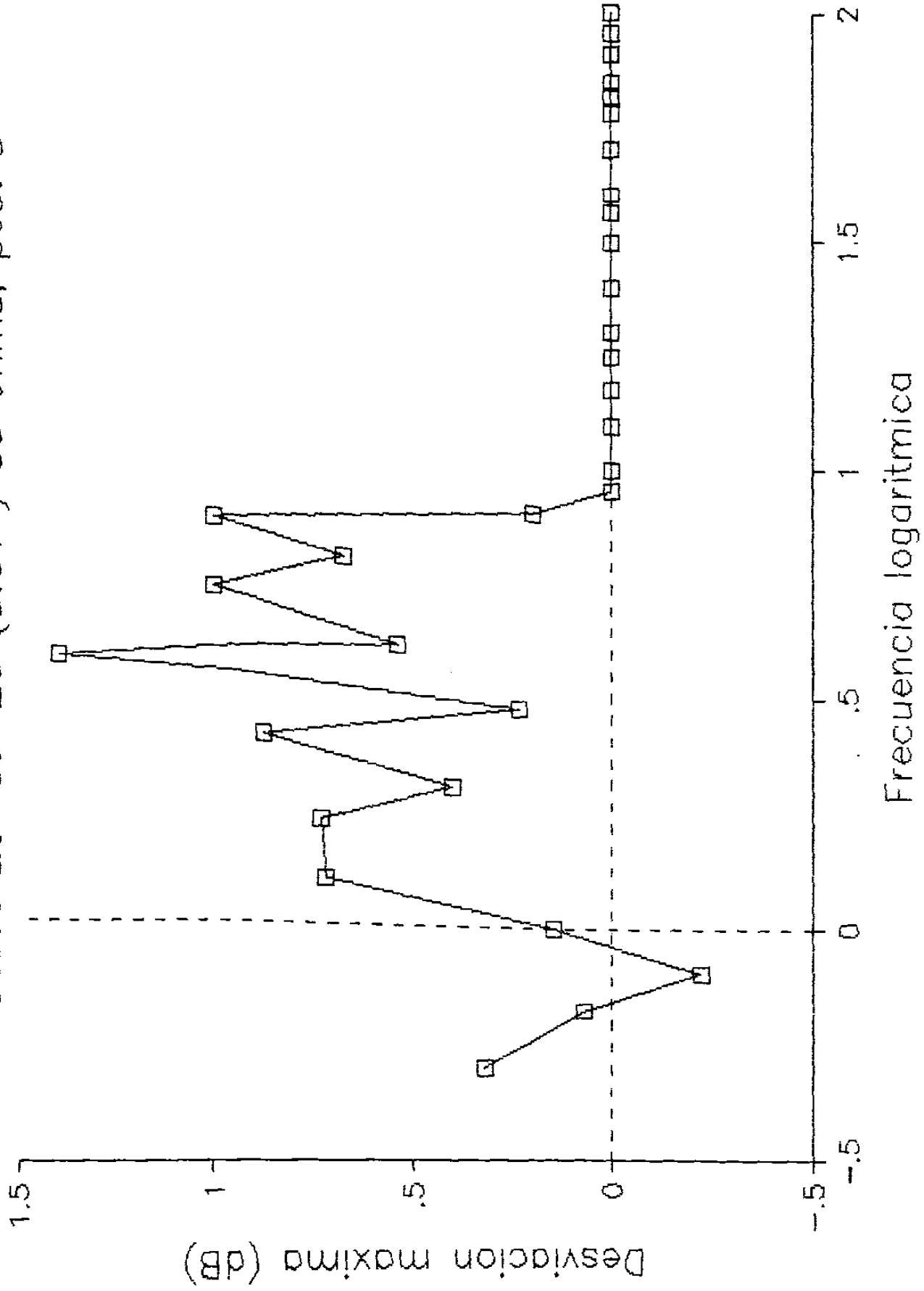
Cobre 20-60-20 (0.01") 50 ohms, pos. 2



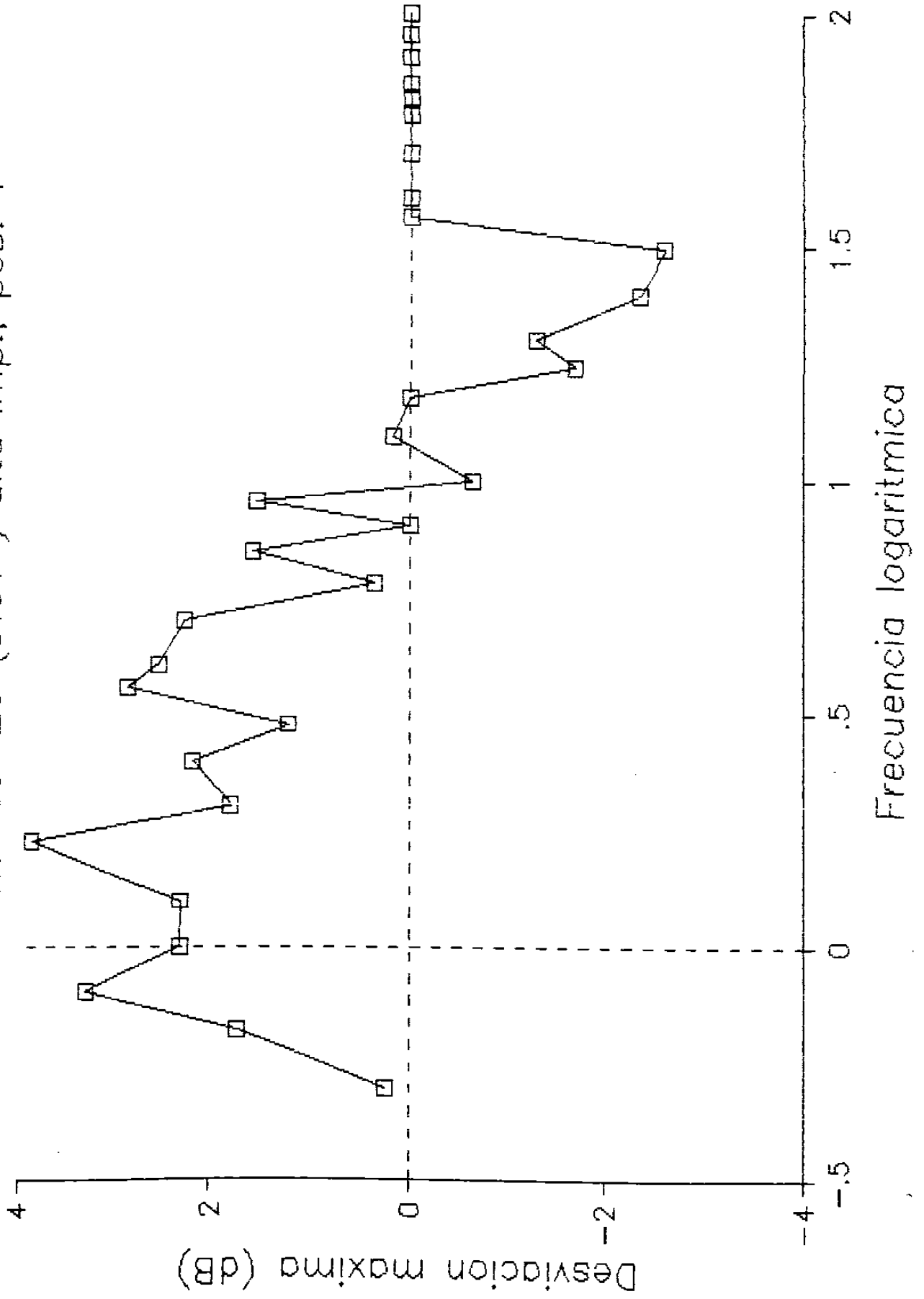
Blindaje y Reciprocidad  
Cobre 20-60-20 (0.01") 50 ohms, pos. 4



Blindaje y Reciprocidad  
 Cobre 20-60-20 (0.01") 50 ohms, pos. 5

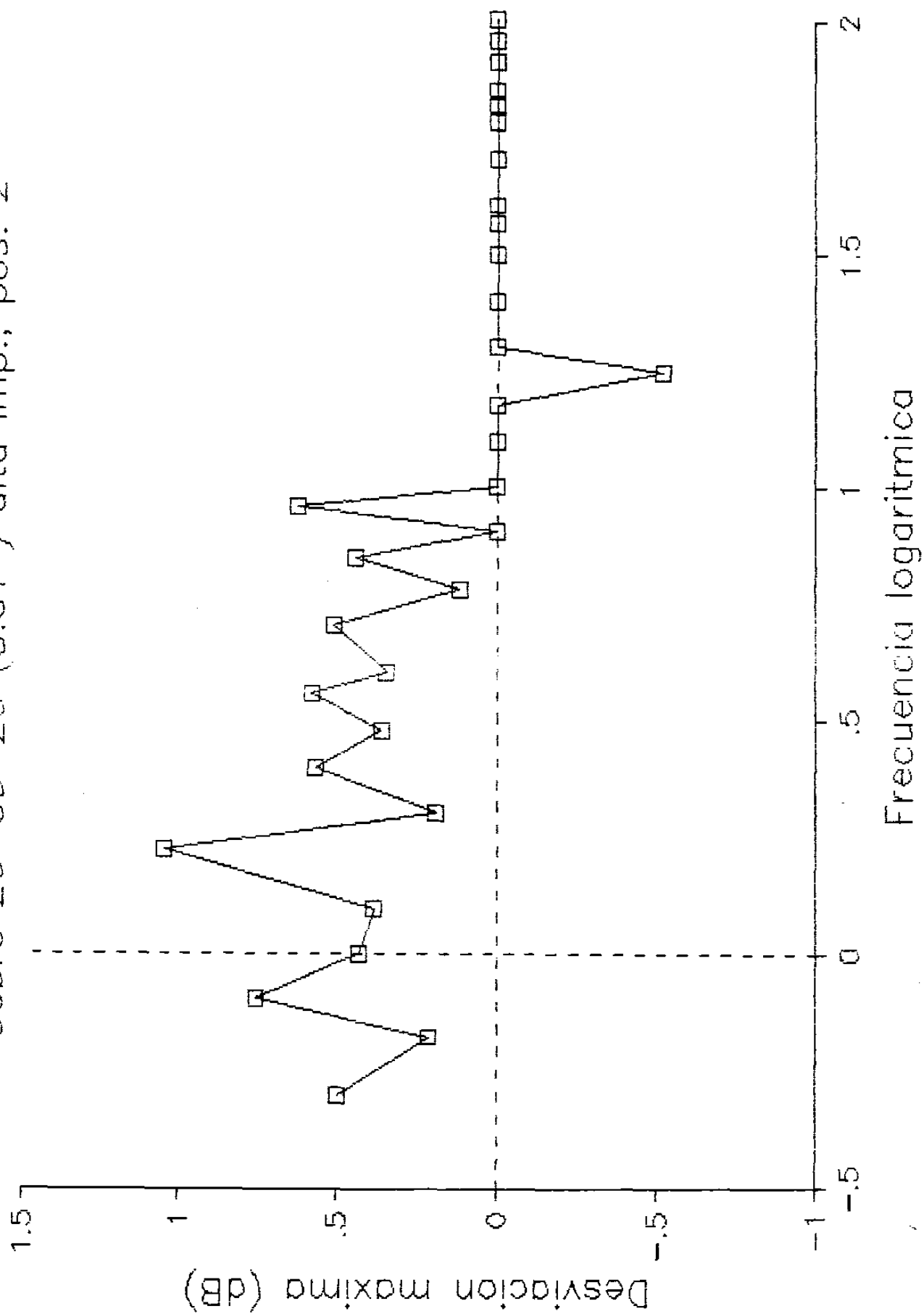


Blindaje y Reciprocidad  
 Cobre 20-60-20 (0.01") alta imp., pos. 1

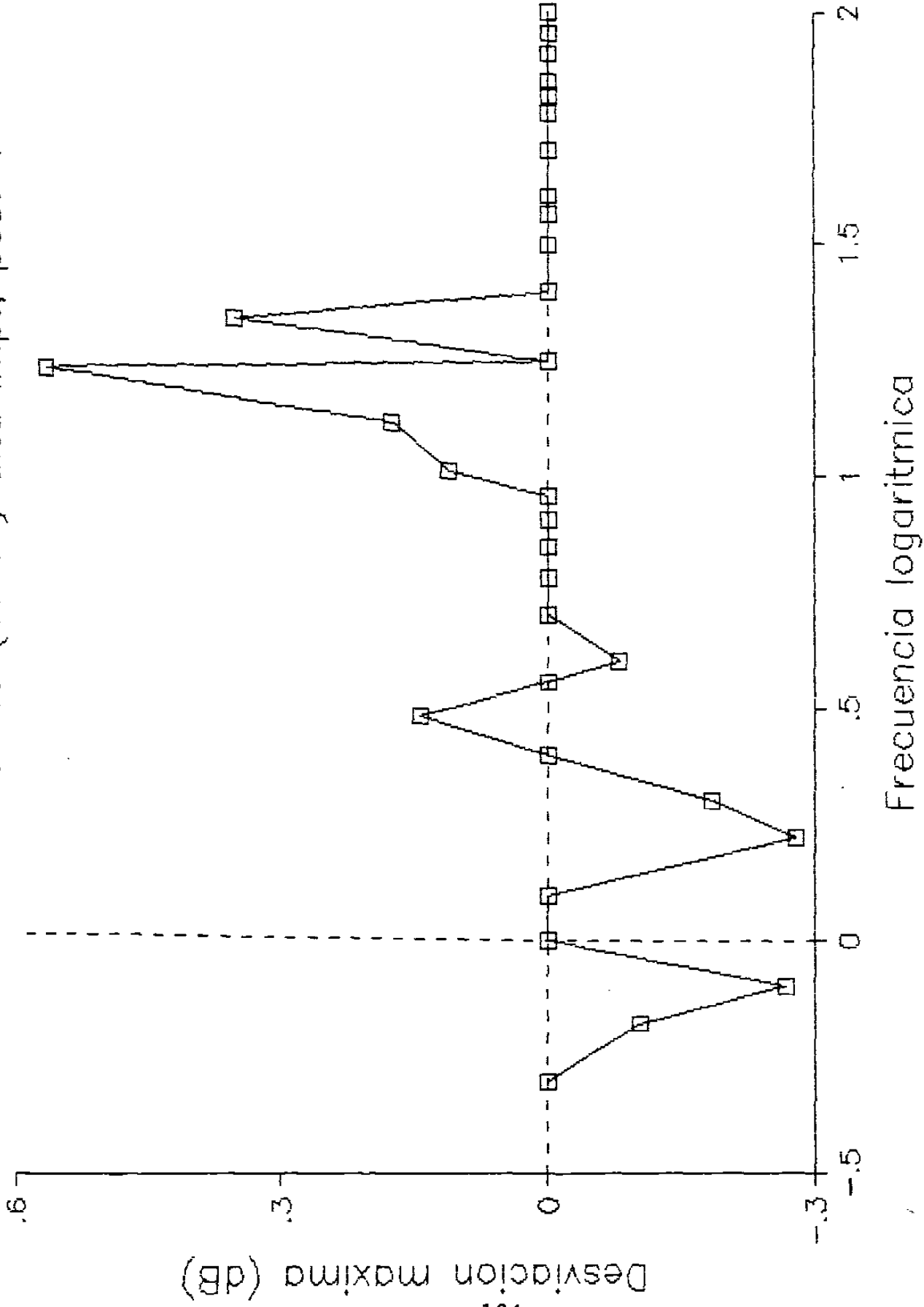




Blindaje y Reciprocidad  
 Cobre 20-60-20 (0.01") alta imp., pos. 2

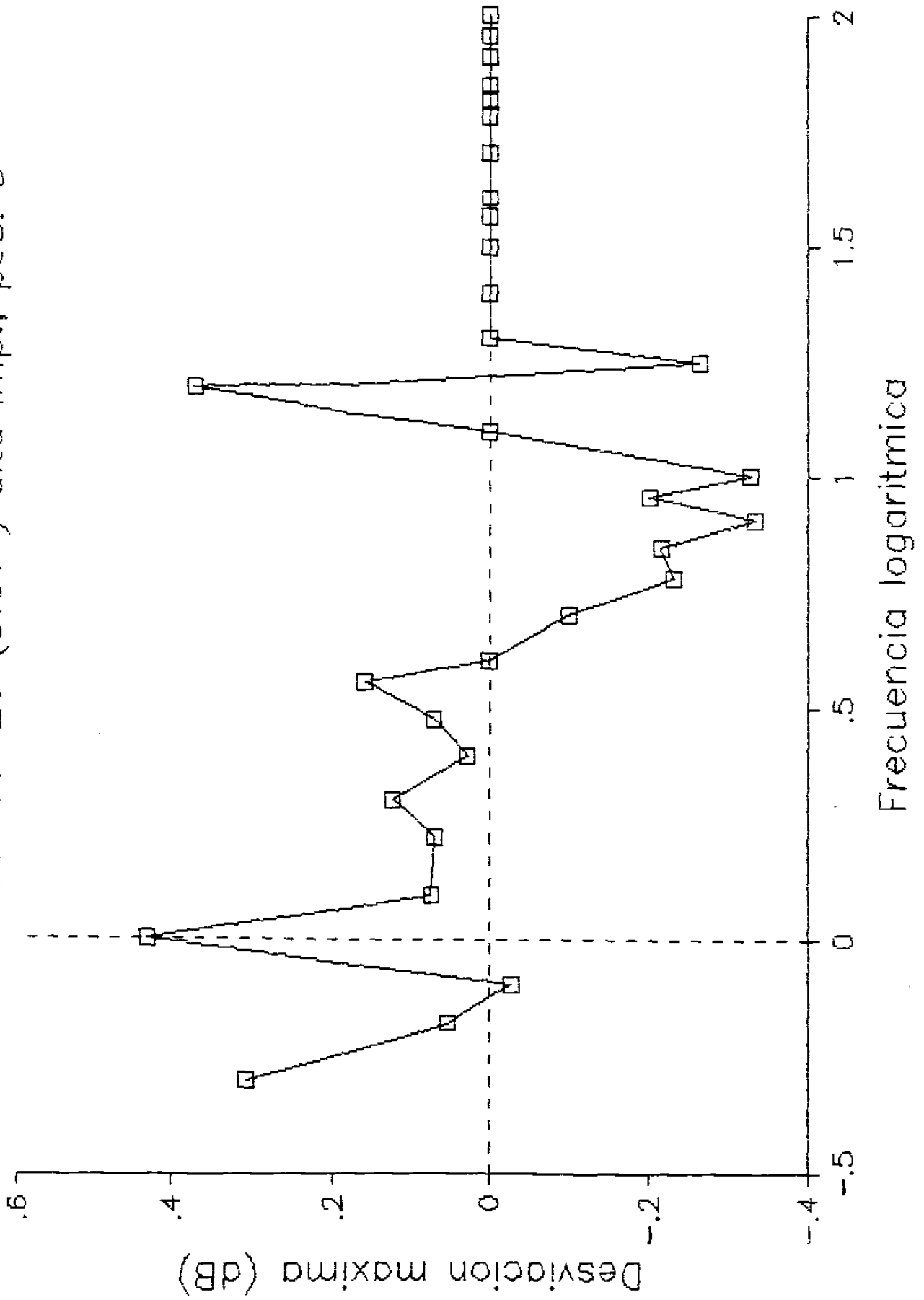


Blindaje y Reciprocidad  
 Cobre 20-60-20 (0.01") alta imp., pos. 4



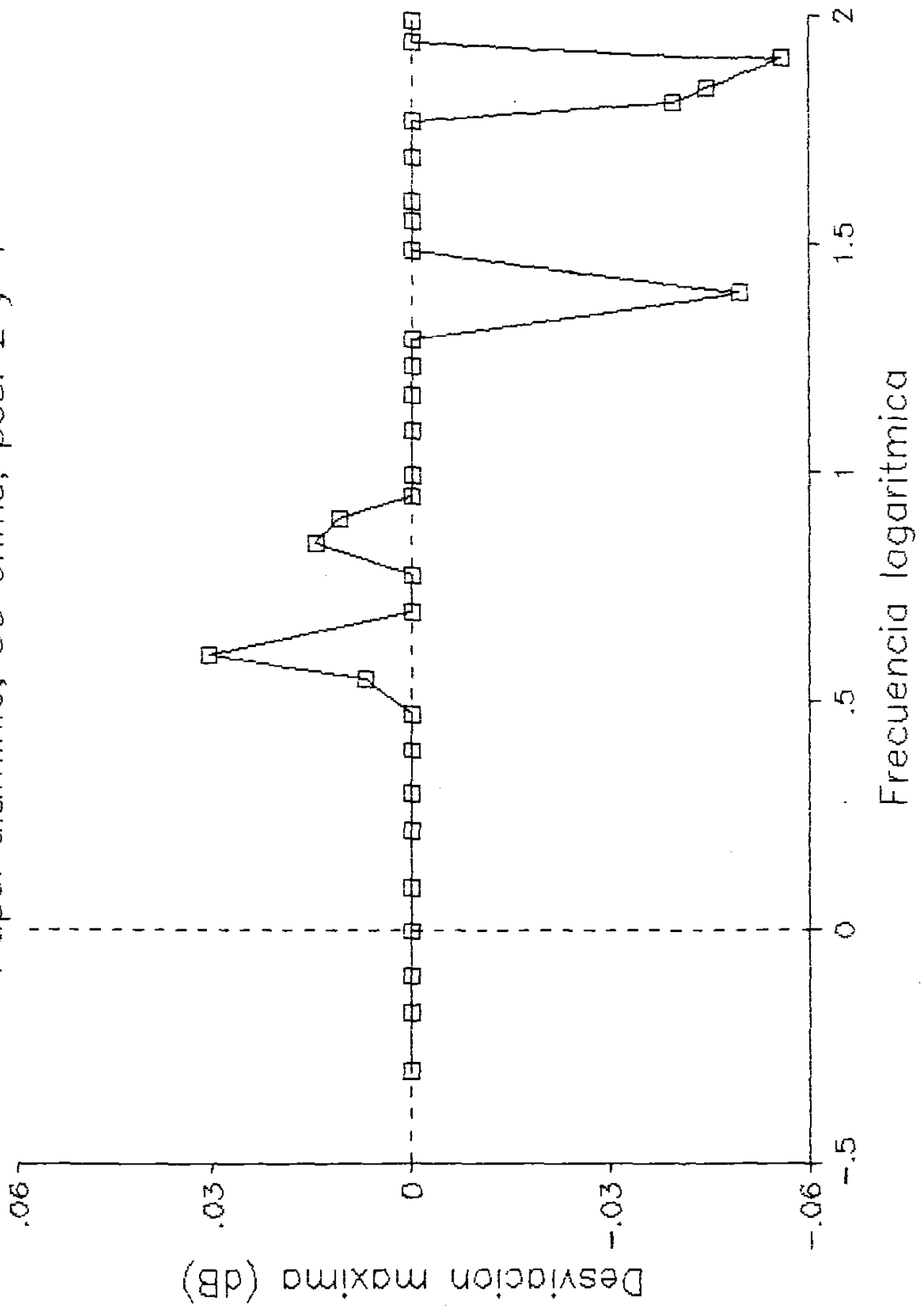
# Blindaje y Reciprocidad

Cable 20-60-20 (0.01") alta imp., pos. 5



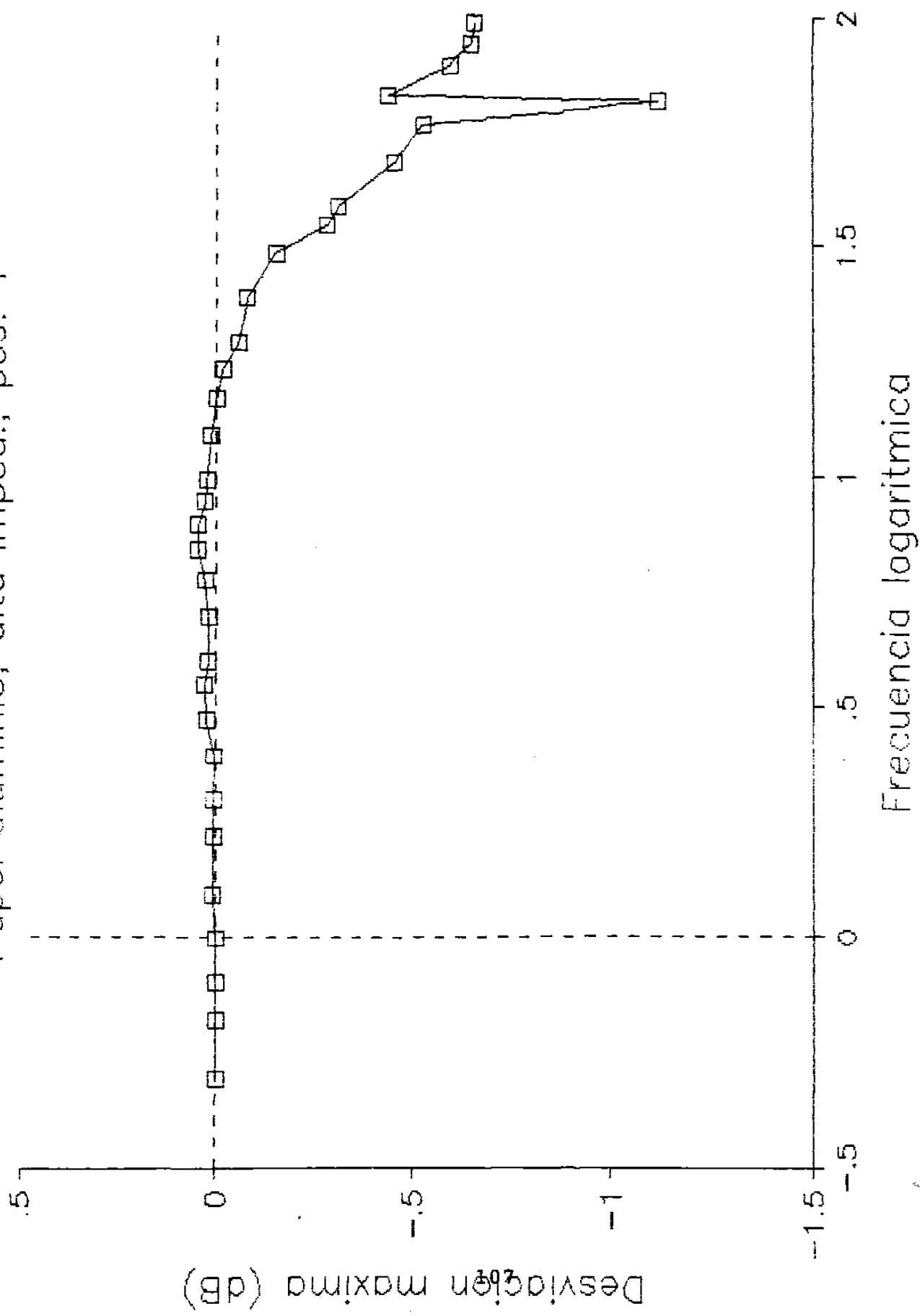
# Blindaje y Reciprocidad

Papel aluminio, 50 ohms, pos. 2 y 4



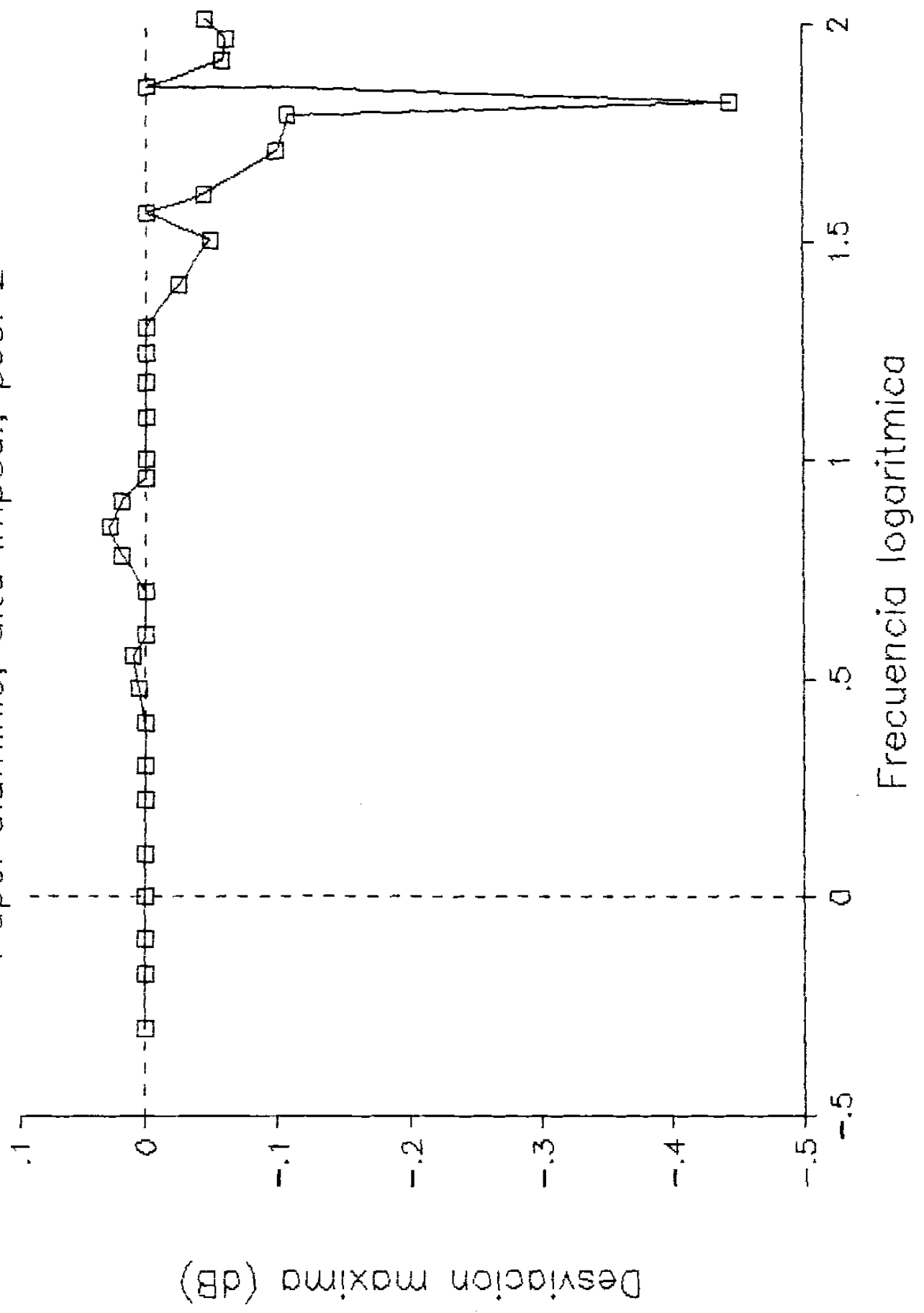
# Blindaje y Reciprocidad

Papel aluminio, alta imped., pas. 1



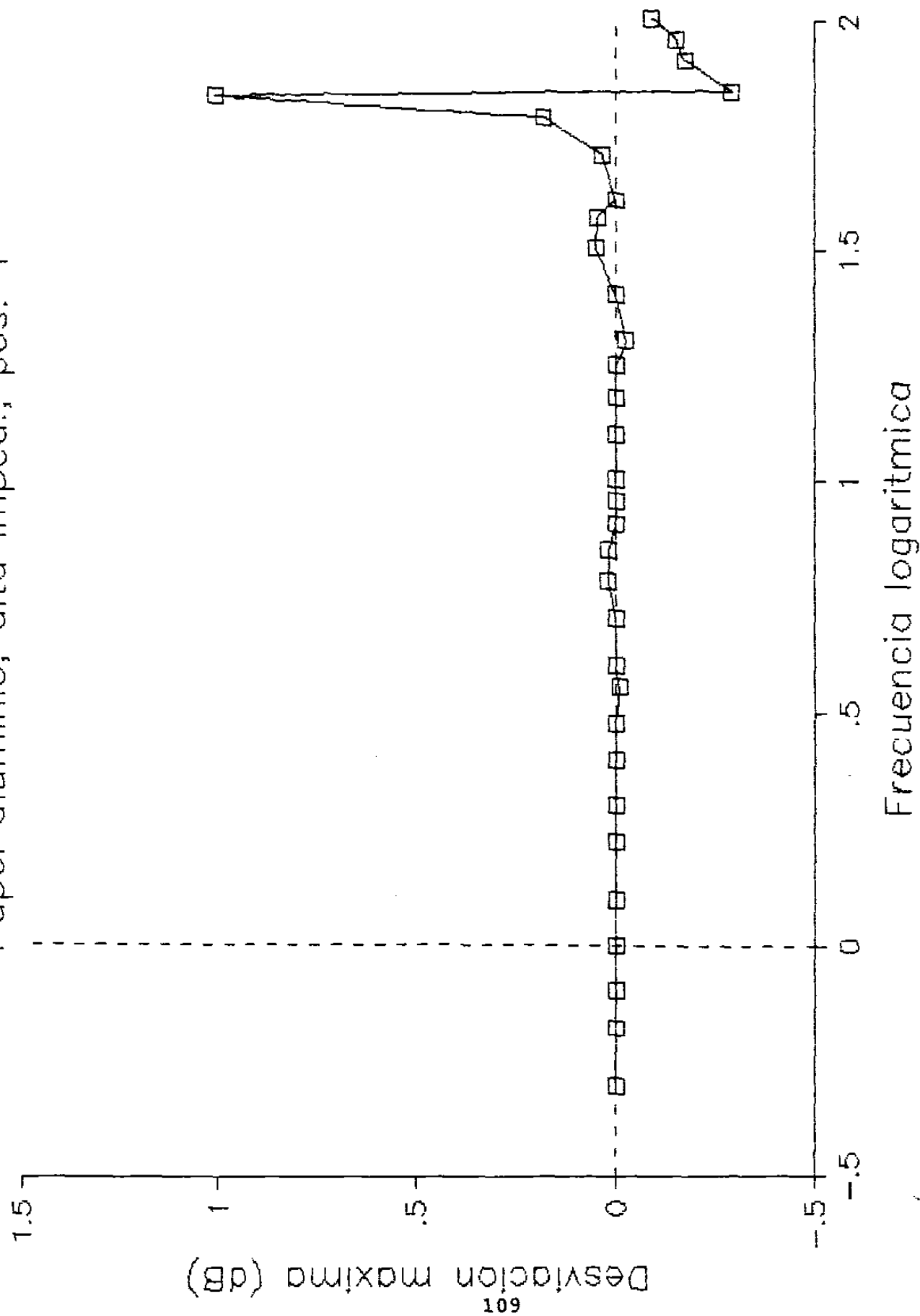
# Blindaje y Reciprocidad

Papel aluminio, alta imped., pos. 2



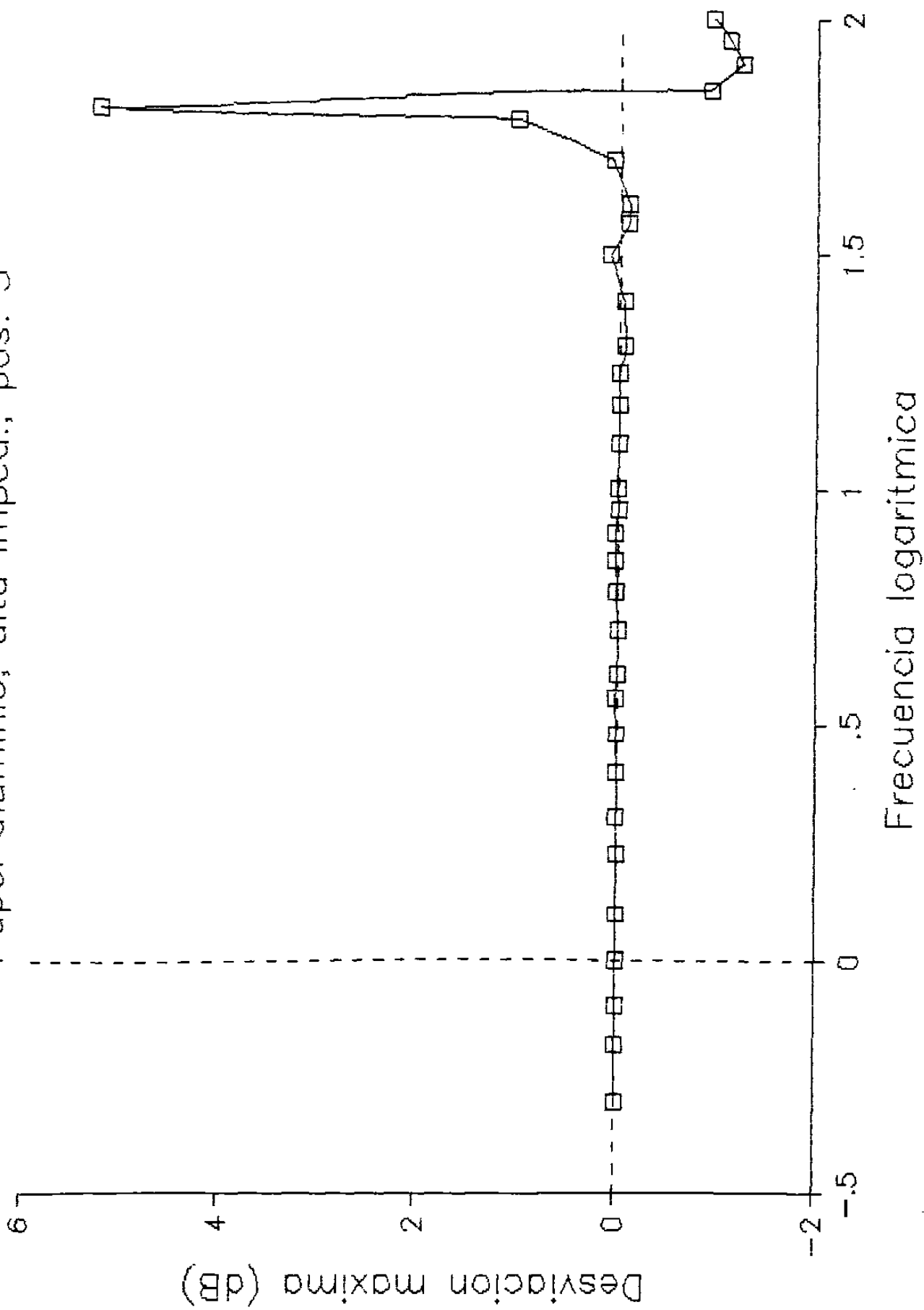
# Blindaje y Reciprocidad

Papel aluminio, alta imped., pos. 4



# Blindaje y Reciprocidad

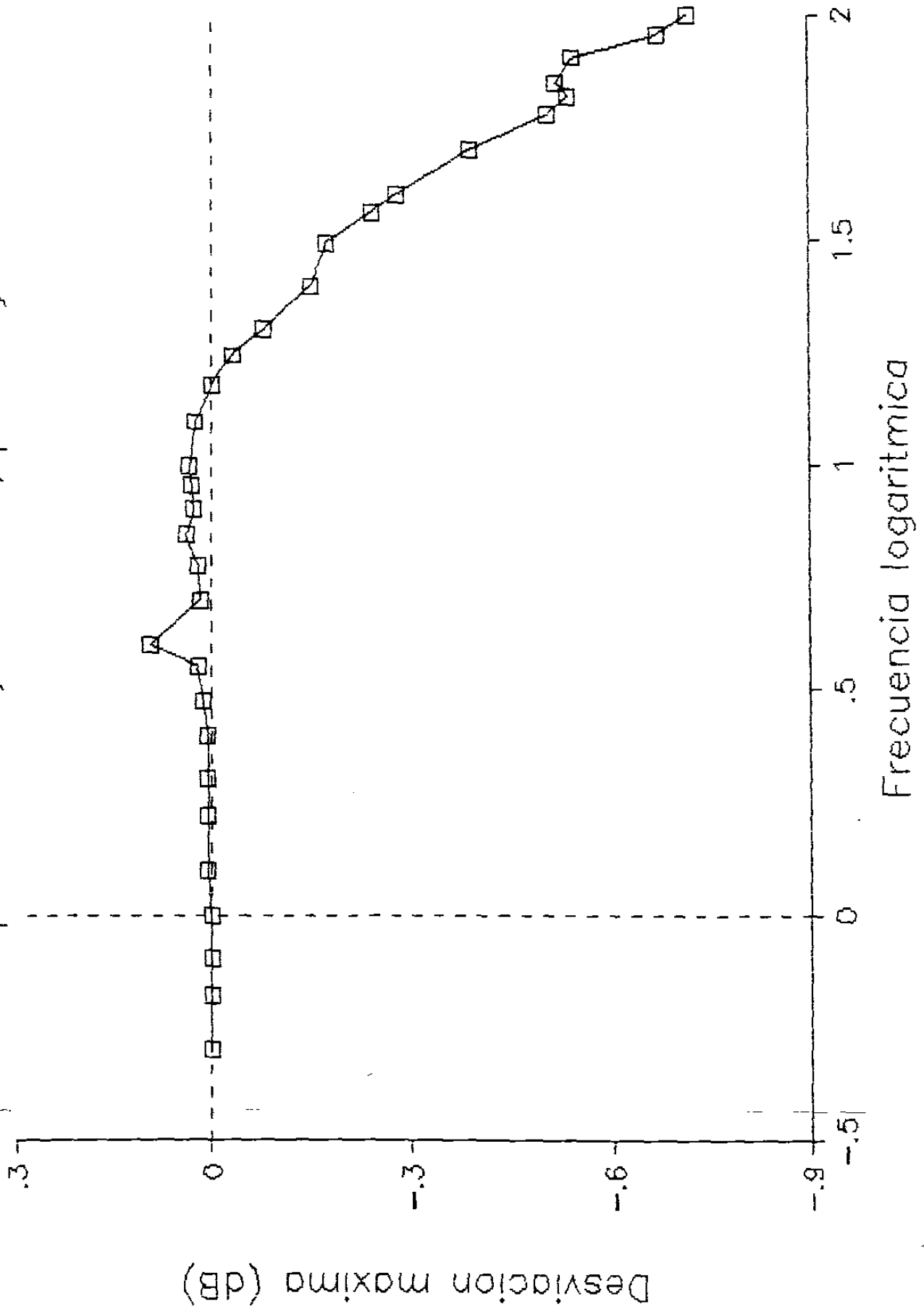
Papel aluminio, alta imped., pos. 5





# Blindaje y Reciprocidad

Papel aluminio, 50 ohms, pos. 1 y 5



## APENDICE E

### TABLAS COMPLEMENTARIAS

TABLA E.1 CONDUCTIVIDAD Y PERMEABILIDAD DE VARIOS MATERIALES

MATERIAL	CONDUCTIVIDAD (Mmhos/mt.)	CONDUCTIVIDAD RELATIVA ( $\sigma_r$ )	PERMEABILIDAD RELATIVA ( $\mu_r$ )
Plata	61.11	1.05	1
Cobre	58.2	1.00	1
Oro	40.74	0.7	1
Cromo	38.64	0.664	1
Aluminio suave	35.50	0.61	1
Aluminio temp.	23.28	0.4	1
Zinc	18.62	0.32	1
Berilio	16.29	0.28	1
Bronce	10.47	0.18	1
Cadmio	13.38	0.23	1
Niquel	11.64	0.20	100
Platino	10.47	0.18	1
Estaño	8.73	0.15	1
Acero (SAE 1045)	5.82	0.10	1000
Plomo	4.65	0.08	1
Monel	2.32	0.04	1
Conetic	1.74	0.03	25 000
Mumetal	1.74	0.03	20 000
Acero inoxidable (430)	1.16	0.02	500

**TABLA E.2 PROFUNDIDAD DE PENETRACION DE VARIOS MATERIALES**

PRECUENCIA	COBRE (Pulg.)	ALUMINIO (Pulg.)	ACERO (Pulg.)	MUMETAL (Pulg.)
60 Hz.	0.335	0.429	0.034	0.019
100 Hz.	0.260	0.333	0.026	0.011
1000 Hz.	0.082	0.105	0.008	0.003
10 KHz.	0.026	0.033	0.003	-
100 KHz.	0.008	0.011	0.0008	-
1000 KHz.	0.003	0.003	0.0003	-
10 MHz.	0.0008	0.001	0.0001	-
100 MHz.	0.00026	0.0003	0.00008	-
100 MHz.	0.00008	0.0001	0.00004	-

**TABLA E.3 FACTOR DE CORRECCION DE PERDIDAS POR REFLEXION  
(B) PARA BLINDAJES MUY DELGADOS.**

$t/\delta$	B (dB)
0.001	-54
0.002	-48
0.004	-42
0.006	-38
0.008	-36
0.01	-34
0.05	-20

## APENDICE F

### TERMINOS Y DEFINICIONES DE DECIBELES

Uno de los términos más comunmente empleados, pero frecuentemente malinterpretado en el campo de la Ingeniería eléctrica, es el decibel. Se entiende por Bel al logaritmo de la división de dos unidades de potencia:

$$\text{Número de Beles} = \log_{10} \left( \frac{P_2}{P_1} \right) \quad \dots \text{Ec. (F.1)}$$

Esta unidad se puede emplear para expresar una ganancia de potencia ( $P_2 > P_1$ ), o una pérdida ( $P_2 < P_1$ ).

Ya que el Bel resulta ser un resultado muy grande, para mediciones más finas se emplea el decibel:

$$\text{Número de decibeles} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_2}{P_1} \right) \quad \dots \text{Ec. (F.1)}$$

Como la definición de decibel involucra a los logaritmos, es adecuado, recordar algunas de sus propiedades. El logaritmo común Y de un número X, es la potencia a la cual debe elevarse el 10 para que resulte tal número. Por tanto

$$Y = \log_{10} X \quad \dots \text{Ec. (F.2)}$$

entonces:

$$X = 10^Y \quad \dots \text{Ec. (F.3)}$$

Algunas de las identidades útiles empleadas en los logaritmos son:

### USO DEL DECIBEL EN OTRAS UNIDADES DIFERENTES A LAS DE POTENCIA

Ha sido común expresar también al voltaje y a la corriente en términos de decibeles. Las expresiones para el voltaje y la corriente son:

$$\log_{10} AB = \log_{10} A + \log_{10} B$$

$$\log_{10} \frac{A}{B} = \log_{10} A - \log_{10} B$$

$$\log_{10} A^n = n \log_{10} A$$

$$\text{Ganacia de voltaje en dB} = 20 \log \frac{V_2}{V_1} \quad \dots \text{Ec. (F.4)}$$

Dichas ecuaciones son válidas únicamente cuando los voltajes y las corrientes son medidas a través de impedancias iguales. Sin embargo se han utilizado, incorrectamente, sin considerar los niveles de impedancia. La relación entre la ganancia de voltaje y la ganancia de potencia se puede determinar refiriéndose a la Fig. F.1.

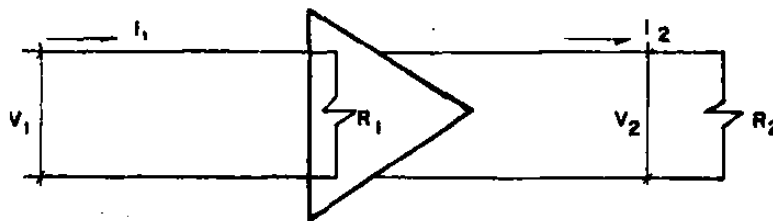


FIG. F.1 Circuito para comparación de ganancia de potencia y ganancia de voltaje.

La potencia dentro del amplificador es:

$$P_1 = \frac{V_1^2}{R_1} \quad \dots \text{Ec. (F.5)}$$

La potencia fuera del amplificador es:

$$P_2 = \frac{V_2^2}{R_2} \quad \dots \text{Ec. (F.6)}$$

La ganancia de potencia  $G$  del amplificador, expresado en decibelios es:

$$G = 10 \log_{10} \left( \frac{P_2}{P_1} \right) = 10 \log_{10} \left[ \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^2 \frac{R_1}{R_2} \right] \quad \dots Ec. (F.7)$$

Usando las identidades anteriores, (F.7) se puede expresar:

$$G = 20 \log_{10} \left( \frac{V_2}{V_1} \right) + 10 \log_{10} \left( \frac{R_1}{R_2} \right) \quad \dots Ec. (F.8)$$

Si se comparan (F.8) y (F.4) se muestra que el primer término de la ganancia de potencia es la ganancia de voltaje, como se definió en (F.4) si la  $R_1 = R_2$ ; entonces, tanto la ganancia de voltaje como la ganancia de potencia, expresados en decibelios, son numéricamente iguales. Sin embargo, se deben conocer los valores de  $R_1$  y  $R_2$  para determinar la ganancia de potencia de la ganancia de voltaje dada.

De manera similar, la ganancia de potencia del circuito de la Fig. F.1 se puede expresar en términos de la corriente.

$$G = 20 \log_{10} \left( \frac{I_2}{I_1} \right) + 10 \log_{10} \left( \frac{R_2}{R_1} \right) \quad \dots Ec. (F.9)$$

#### PERDIDA DE POTENCIA O GANANCIA DE POTENCIA NEGATIVA.

Si se calcula la ganancia de potencia de un punto 1 a un punto 2 para el caso donde la potencia en el punto 2 es menor que la potencia en el punto 1, se tiene:

$$G = 10 \log_{10} \left( \frac{P_2}{P_1} \right) \quad \dots Ec. (F.10)$$

Para expresar la relación de potencias  $P_2 / P_1$  como un número más grande que 1, se puede reescribir la ecuación anterior como:

$$G = 10 \log_{10} \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{-1} \quad \dots \text{Ec. (F.11)}$$

*sustituyendo la identidad:  $\log_{10} A^n = n \log_{10} A$  se tiene*

$$G = -10 \log_{10} \left( \frac{P_1}{P_2} \right) \quad \dots \text{Ec. (F.12)}$$

Por tanto, la pérdida de potencia se indica como una ganancia negativa de potencia en decibeles.

## REFERENCIAS

- [1]. S.A. Schelkunoff, "THE ELECTROMAGNETIC THEORY OF COAXIAL TRANSMISSION LINES AND CYLINDRICAL SHIELDS", Bell System Technical Journal, 13, pp. 532- 579, 1934.
- [2]. H. W. Ott, "NOISE REDUCTION TECHNIQUES IN ELECTRONIC SYSTEMS" 2da. Edition. New York: John Wiley and Sons, 1988.
- [3]. Yury Trenkler, Lyle E. McBride. "CHARACTERIZATION OF METALS AS EMC SHIELDS", IEEE Instrum. and Meas. Tech. Conf. Record, 1986. (Revised version also published, IEEE Trans. on Instru. and Meas., Sept., 1987.
- [4]. Lyle E. McBride, "SOLVE EMI PROBLEMS WITH A PERSONAL COMPUTER SPREADSHEET", EMC technology, May-June, 1987.
- [5]. Lyle E. McBride, "A BASIC PROGRAM FOR DETERMINING THE EFFECTIVENESS OF METAL SHIELDS", EMC Technology, Jan- Feb., 1989.
- [6]. Lyle E McBride, Yury Trenkler, Richard G. Delagi, "SHIELDING EFFECTIVENESS OF COMPOSITE METALS AT VOICE AND CARRIER FREQUENCIES", Proc., 31st Int. Wire and Cable Symp., 1982.
- [7]. Lyle E. McBride., Yury Trenkler, "CLAD METALS. PERMEABILITY PLUS CONDUCTIVITY FOR EFFECTIVE SHIELDING", Proc. IEEE Natl. Symp. on EMC, 1984.
- [8]. Lyle E. McBride, "COMPOSITE METAL SHIELDS FOR ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE", Interference Technology Engineers Master, 1987
- [9]. Peter R. Bannister, "NEW THEORETICAL EXPRESSIONS FOR PREDICTING SHIELDING EFFECTIVENESS FOR THE PLANE SHIELD CASE", IEEE Trans., on Electromagnetic Compatibility, Vol., EMC-10, No. 1, march 1968.
- [10]. J. Ronald Moser, "AN EMPIRICAL STUDY OF ELF AND VLF SHIELD CANS", IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, Vol. EMC-10, No. 1, march 1968, pp. 112-125.
- [11]. W.H. Hayt, Jr. "ENGINEERING ELECTROMAGNETICS", 3rd. ed., McGraw-Hill, New York, 1974.



