

# Micrómetro electrónico de laboratorio para la determinación de espesores de capas delgadas conductoras

F.González-Quevedo Rodríguez, E.Vega Reyes, L.Finkelshtein, M.Pila Chacón.  
Departamento de Física Aplicada

## RESUMEN

---

En este artículo se presenta un micrómetro electrónico de laboratorio que posibilita la determinación rápida del espesor de una capa delgada conductora. El instrumento opera mediante la aplicación de un campo electromagnético de baja frecuencia a la superficie de la capa. El funcionamiento del equipo ha sido verificado midiendo capas de níquel depositadas electrolíticamente sobre latón. Se ha comprobado que permite medir el espesor de una capa de níquel sobre latón en un rango entre 10-60 micrones con un error menor del 10%. El instrumento es simple y versátil y permite ajustes que lo hacen aplicable a la medición de otros rangos de espesores, o ser utilizado con otros fines, como por ejemplo, la medición de la resistividad de las capas.

## ABSTRACT

---

In this paper, an electronic micrometer which provides fast thickness measurement of thin metallic layers, is shown. The instrument works by applying a low frequency electromagnetic field to the layer surface. The performance of this equipment has been checked by measuring galvanoplastic nickel layers in (laton) substrates. It was verified that this instrument is able to measure a nickel layer with characteristics mentioned before, in a range of about 10-60m, with accuracy no worse than 10%. The instrument may be adjusted to measure in other ranges, or be used, with a different purpose; i.e., in the measurement of layer resistivity.

Los métodos electrónicos sin contactos son frecuentemente aplicados en el laboratorio y en la industria para la investigación de las superficies, el control de las metalizaciones al vacío, de los revestimientos electrolíticos y para otros usos. En ocasiones ellos permiten una medición rápida del espesor de una capa superficial, o bien permiten la determinación de otra magnitud, como la resistividad de la misma o su permeabilidad.

De manera general, estos métodos utilizan el efecto de absorción y reflexión de una onda electromag-

nética en la superficie de separación de dos medios, descrito en (1) para el caso de estratos conductores.

En este artículo se presentan algunos detalles constructivos y las determinaciones realizadas con un micrómetro electrónico de construcción simple que permite la determinación rápida del espesor de una capa níquel depositado sobre latón, en un rango de 10-60 micras, con un error inferior al 10%. Este rango no es usual en los instrumentos comerciales.

## FUNDAMENTO TEÓRICO

Las mediciones electrónicas sin contactos de espesores o resistividad de capas delgadas metálicas, con frecuencias de excitación inferiores a los 10 MHz, pueden utilizarse dos tipos de acoplamiento, a saber, capacitivo o inductivo. El principio del acoplamiento capacitivo se representa en la figura 1a, donde A y B son dos electrodos. El acoplamiento inductivo, (ver figura 1b) forma un transformador cuyo "primario" es la bobina excitadora acoplada inductivamente a la capa delgada conductora. Las corrientes inducidas en la capa por la onda electromagnética generada en la bobina excitadora corresponden a las corrientes inducidas en el "secundario" de dicho transformador.

Para describir la distribución de corrientes en la capa es útil definir el parámetro,  $\delta$  llamado "profundidad de penetración". Este parámetro de la frecuencia ( $f$ ), de la conductividad del metal ( $g$ ) y de la permeabilidad ( $\mu$ ) de la forma:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi g f \mu}} \quad (1)$$

Considerando una onda electromagnética plana incidiendo normalmente sobre una superficie plana, conductora y semi-infinita, la densidad de la corriente inducida,  $j$ , cae exponencialmente con la distancia  $x$  a la superficie del conductor, de acuerdo con la siguiente expresión, donde  $j$  representa la unidad imaginaria y  $J_0$  la densidad de corriente en la superficie.

$$J = J_0 e^{-(1+j)x/\delta} \quad (2)$$

La Ecuación (2) se puede integrar sobre la profundidad del metal para encontrar la corriente total, y esta última se puede utilizar para determinar la impedancia interna del metal, tanto en el caso simple anterior, como en los casos más complejos de campos con simetría cilíndrica, o de varios estratos metálicos. Las variaciones de las características de la distribución de corrientes inducidas en la capa (secundario) se reflejan como una variación de las propiedades del transformador formado.

## MÉTODO DE DETECCIÓN

De acuerdo con la forma en que se detecta la variación mencionada anteriormente, los métodos induc-

tivos de medición de espesores se consideran como de "corrientes parásitas" o de "flujo magnético".

El método de las corrientes parásitas (2) utiliza una sola bobina de prueba; es utilizado en la determinación de espesores de capas metálicas con espesores inferiores a 5 micrones y, por lo general, trabaja con frecuencias del orden o superiores a 100 KHz.

Algunos equipos que utilizan dicho principio (3,4) utilizan una bobina de prueba acoplada a un oscilador y varían la frecuencia de oscilación, o la amplitud de las mismas, mientras que otros utilizan la medición de la constante de tiempo del amortiguamiento exponencial de una oscilación libre en la capa conductora (5), o utilizan un impulso que se refleja como un eco en la superficie de separación entre estratos con conductividad o permeabilidad diferentes (6).

El método de flujo magnético (7) utiliza un transformador diferencial, el cual es desbalanceado por las variaciones del espesor de la capa de recubrimiento o de otras características físicas de la capa conductora investigada.

Este método utiliza por lo general una bobina excitadora, una bobina detectora, y una bobina de

referencia. La bobina excitadora se coloca frente a la superficie investigada y la detectora recibe un campo magnético modificado por el sistema de corrientes parásitas en el material. Las variaciones de amplitud y fase de la señal en la bobina detectora se obtienen mediante comparación con la amplitud y fase de una bobina de referencia. El método del flujo magnético es utilizado en la medición de espesores de capas delgadas metálicas con espesores superiores a las 10 micras, y utiliza frecuencias sónicas o subsónicas, (10-20000 Hz).

En este caso, el interés consiste en la evaluación de espesores de recubrimientos electrolíticos de níquel y otros metales con espesores superiores a los 10 micrones. Suponiendo una capa de níquel y tomando para este material una resistividad, permeabilidad y demás características semejantes a las del material masivo, (8) encontramos que, de acuerdo con la relación (1), la profundidad de penetración del campo electromagnético es del orden de 100 micrones para frecuencia de 4 KHz, por lo que se consideró necesaria, en nuestro caso, la utilización del método de flujo.

## DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

El equipo construido (ver figura 2) utiliza una bobina excitadora, montada en un cabezal de forma especial representada en la figura 2 como  $L_1$ , la cual induce el sistema de corrientes parásitas en el material, y una bobina detectora, representada con  $L_2$ , cuya variación de impedancia se detecta.

La bobina excitadora tiene un diámetro de 8mm, una altura de 3 mm y está enrollada con alambre de cobre esmaltado calibre No.23. La bobina detectora, de las mismas dimensiones, está enrollada con alambre de cobre No.34 y se fija en la cara superior de la bobina excitadora. El sistema así formado se recubre con resina epoxídica y se blindo lateralmente de los campos parásitos. La bobina de referencia  $L_3$  está situada en el interior del micrómetro.

El bloque I constituye una unidad osciladora con frecuencia ajustable

entre 2 y 10 KHz, y potencia de salida regulable entre 0.2-1 W.

La oscilación es producida por un oscilador tipo puente de Wien, (9) formado por dos amplificadores operacionales, estando la frecuencia de oscilación dada por:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

El puente se coloca en la realimentación positiva del amplificador  $A_1$  y este montaje tiene la ventaja de poder variar la frecuencia de oscilación con la variación de un solo elemento ( $R_2$ ).

La frecuencia escogida fue de 3.9 KHz, la cual se mantiene con una estabilidad del orden de  $10^{-4}$ . La salida del oscilador se conecta a un amplificador de potencia clase B acoplado con transformador (10).

La salida de 0.5 W de dicho

amplificador se conecta al transformador de salida, Tr 2, el cual se conecta en serie a la bobina de campo  $L_1$  y el sistema se sintoniza con el condensador  $C_1$  a la frecuencia de trabajo, lo cual reduce considerablemente la distorsión. La señal de la bobina detectora  $L_2$ , excitada por la bobina de campo y la de la bobina de referencia  $L_3$ , se introducen en un discriminador balanceado (11) formado por los diodos  $D_4$  y  $D_5$  y

las resistencias  $R_{16}$ - $R_{18}$  (bloque III). La salida del discriminador tiene un nivel que depende de la amplitud de las tensiones suministradas a la entrada del mismo y del desfase entre ellas. El nivel de tensión a la salida del discriminador puede ser ajustado en un amplio rango mediante los potenciómetros de ajuste externo  $R_{20}$  y  $R_{21}$  para su lectura con un minivoltímetro tipo Ø 116 o similar.

## RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Para preparar al instrumento para la medición, el cabezal se oprime contra la superficie del material sin recubrimiento y se ajusta el "cero" mediante los potenciómetros  $R_{20}$  y  $R_{21}$ .

La calibración del equipo (ver figura 3) se realizó depositando electrolíticamente níquel y cobre sobre una placa de latón. El área de depósito era de  $10 \text{ cm}^2$  y los espesores fueron calculados por pesada simple mediante una balanza analítica, tomando una densidad de  $8,8 \text{ gm/cm}^3$  para el níquel y de  $8,9 \text{ gm/cm}^3$  para el Cu.

Se observa que la sensibilidad del equipo para el cobre es clara-

mente inferior que para el níquel, lo cual puede estar asociado a la mayor permeabilidad del primero.

El valor estimado del error resultó inferior al 10% en la medición de espesores de níquel sobre latón, en el rango de 20 - 60 micrones, y del 20% entre 5 y 10 micrones.

Mediante el ajuste de la frecuencia del oscilador y utilizando otros cabezales el equipo puede adaptarse a otros rangos de espesores o de materiales. Conocido el espesor, el equipo puede calibrarse en resistividad, o ser utilizado para la detección de imperfecciones en algunos materiales.

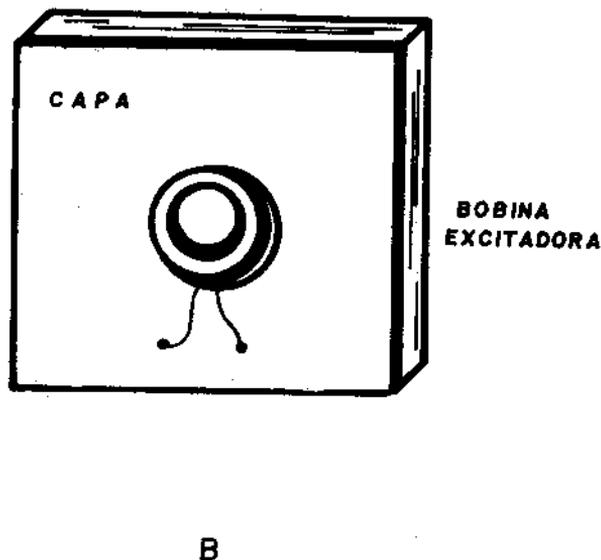
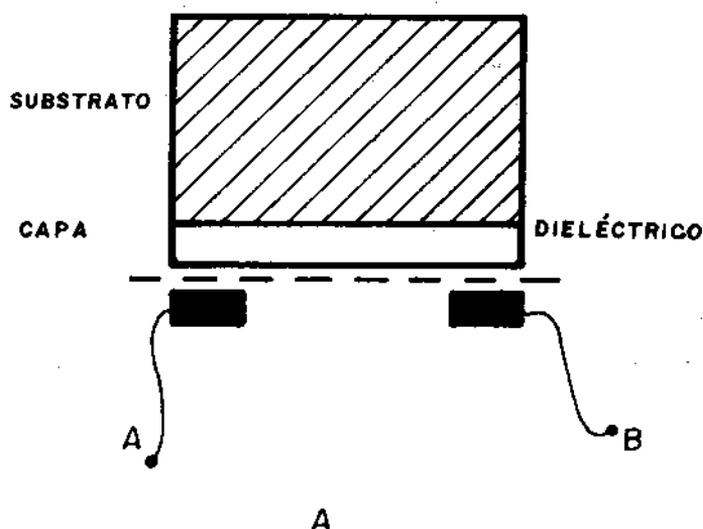


FIG. 1 - ACOPLAMIENTO CAPACITIVO (A) E INDUCTIVO (B)

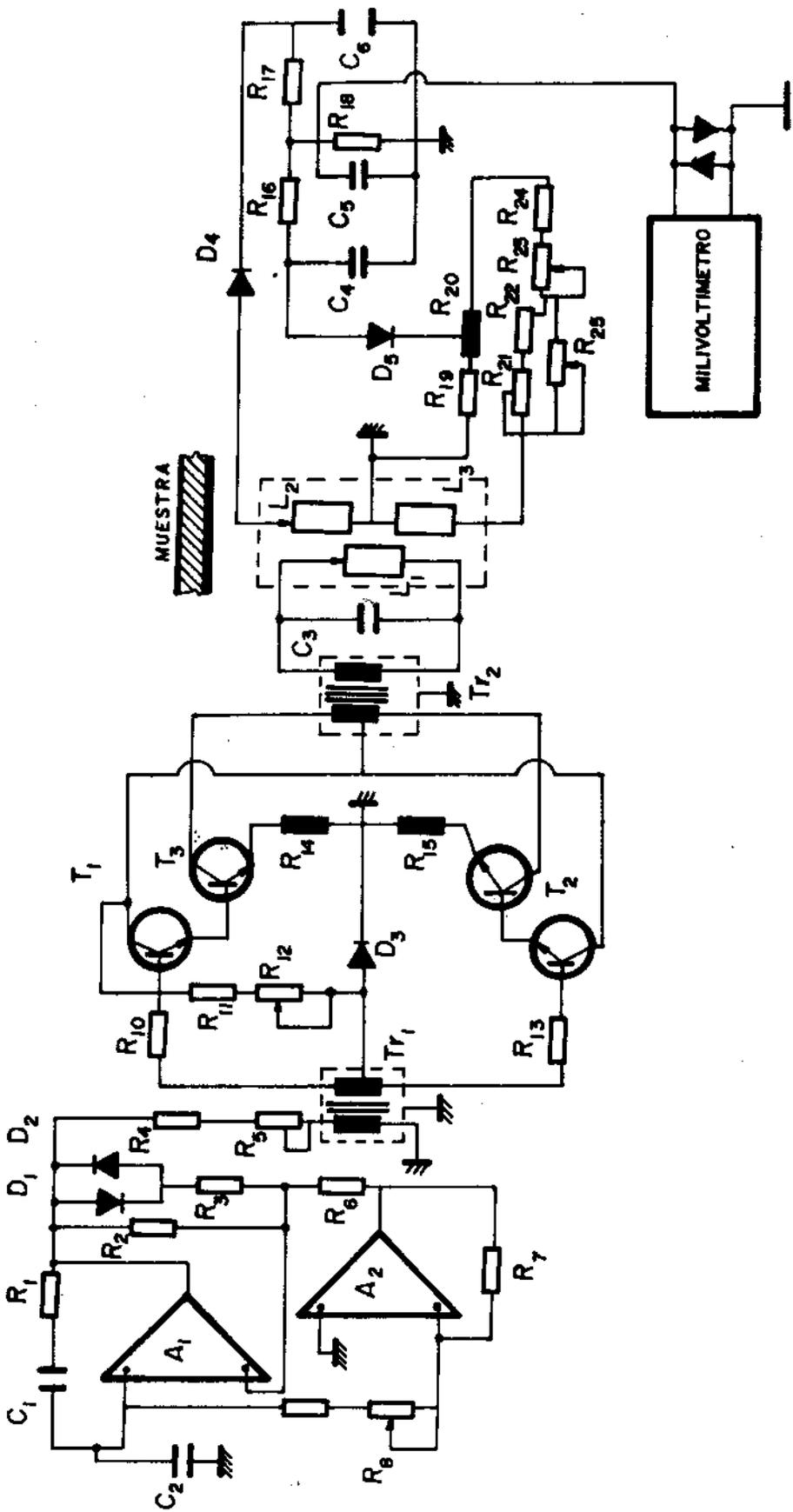


FIG. 2 — ESQUEMA CIRCUITAL DEL MICRÓMETRO ELECTRÓNICO

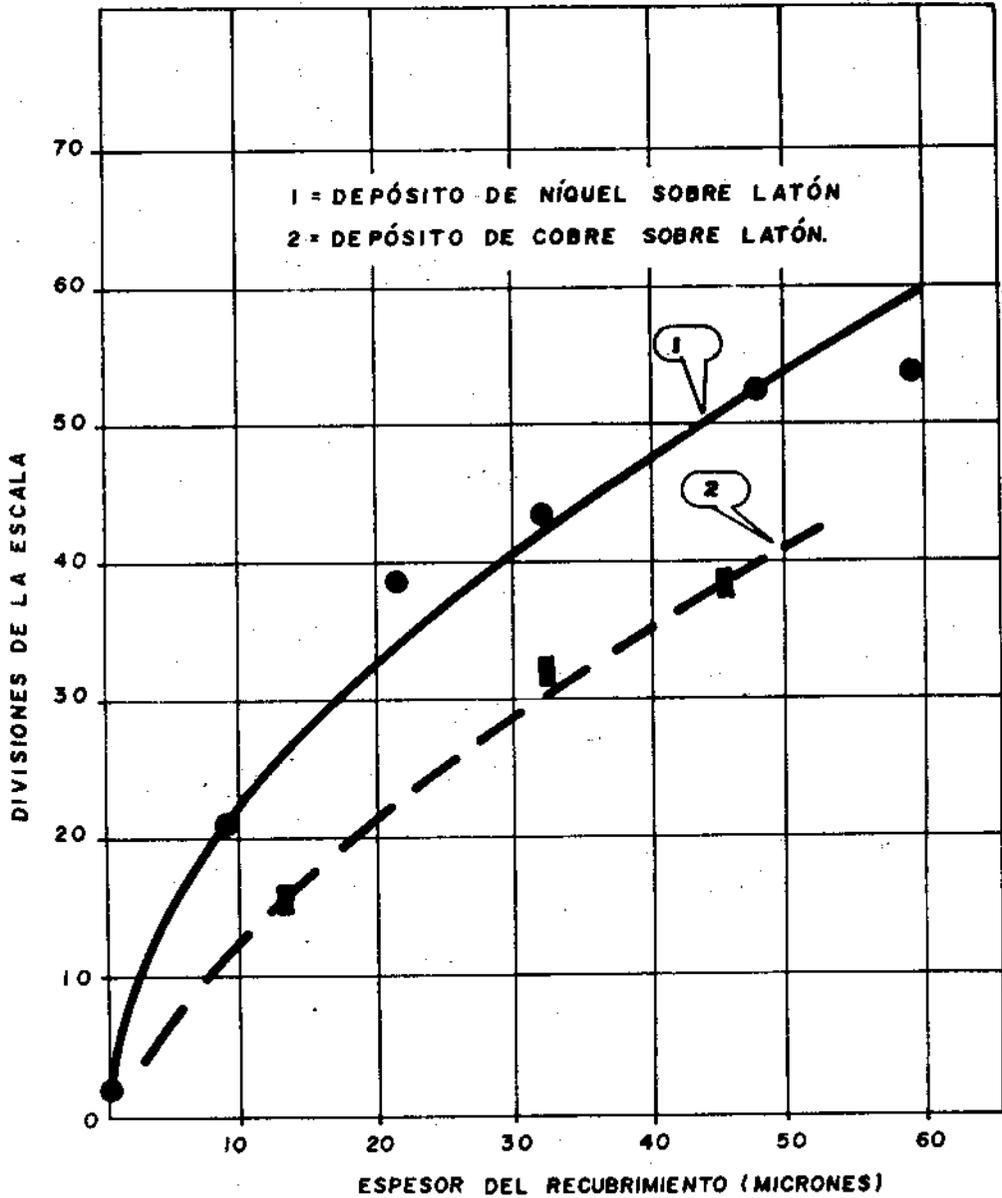


FIG. 3 \_ CURVA DE CALIBRACIÓN DEL MICRÓMETRO.

---

BIBLIOGRAFÍA

---

1. Ramos, S. y J.R. Whinnery  
Fields and Waves in Modera  
Radio p. 236-251 N.Y. (1953).  
Electronics, feb. 49 (1961).
2. Hadley C.P.  
Rev. Sci Instr. 3, 176 (1956).
3. Carniol, B.C.  
Nachrichtentechnik 9, 335  
(1962).
4. Commercon, J.C.; R. Gerber  
Congres International Cou-  
ches Minces, Cannes (1970).
5. Weidelich, D.  
Electronics nov. 146 (1955).
6. Patente G.B. no. 852.541.
7. Dich, P.
8. Soohoo, R.  
Magnetic thin films. N.Y.  
(1965).
9. Stout, D.F.  
Handbook of Operational  
Amplifier. Circuit Design.  
(1976).
10. Walston, J.A.; J.R. Miller  
Transistor Circuit Design  
(Texas Inst. Inc.) (1970).
11. Klapper, y, et al.  
Phase - Locked and Frequency  
Feedbaek Systems. Acad.  
Press N.Y. (1972).

Recibido: 11 de marzo de 1985