

120  
2 Gen.

DESARROLLO DE TECNOLOGIA BASICA PARA LA  
FABRICACION EN MEXICO DE TRANSFORMADORES  
DIFERENCIALES DE VARIACION LINEAL

JOSE LUIS RODRIGUEZ PEREZ



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## INTRODUCCION

Las técnicas experimentales han mostrado importantes cambios debido al desarrollo de equipo electrónico encaminado a detectar parámetros físicos. Estos nuevos dispositivos facilitan la medición bajo ciertas condiciones inherentes a la variable medida.

Por ejemplo, si pretendemos conocer una distancia cercana a un centímetro basta emplear un micrómetro con escala adecuada y tomar la lectura correspondiente, sin embargo, estamos suponiendo que la distancia medida permanecerá constante, cosa que no necesariamente sucede. Si la variación es muy pequeña en relación a la distancia medida o tan lenta que nos permita hacer la medición sin alterarse en forma significativa, simplemente la consideramos como un elemento adicional en la incertidumbre de la medida o podemos llegar a despreciarla.

Cuando la longitud medida está variando continuamente y en magnitudes considerables, el instrumento anterior se vuelve inadecuado y podemos determinarla mediante el empleo de un captador electrónico de desplazamientos conectado a un equipo medidor de voltaje previamente calibrado para este fin.

En el presente trabajo buscamos conocer y controlar aquellos factores más significativos para lograr la fabricación de dichos captadores de desplazamiento enfocados a ciertas aplicaciones y con características predeterminadas.

En el capítulo uno se describe al dispositivo captador de desplazamientos, algunas de sus aplicaciones, principios de operación y la función de sus tres partes esenciales, la excitadora, la demoduladora y el transformador. El segundo capítulo menciona el camino seguido durante el diseño enfocándose a cada una de las tres partes mencionadas, proponiendo varios circuitos con diferentes características. Los aspectos relacionados con la construcción de los prototipos, pruebas y calibraciones los encontramos en el capítulo tercero, en donde además se compara la respuesta de los transductores con la de uno comercial.

## 1. DESCRIPCION DEL L.V.D.T.

Al generalizar los sistemas de medición, en la mayoría de ellos podemos reconocer tres partes:

La primera consiste en una etapa detectora-transductora, que capta a la variable y efectúa una transformación de la señal a una forma más manejable. Podemos decir que un transductor es un dispositivo capaz de cambiar un efecto físico en otro y es común encontrar que sea a una señal eléctrica, ya que por el momento el campo de la electrónica por su gran desarrollo es el más adecuado en la mayoría de los casos.

En la siguiente etapa la variable es procesada para poder tenerla en la forma deseada por medio de filtros, amplificadores u otros equipos adecuados.

En la tercera y última parte del sistema se indica, registra o controla a la variable medida.

Un transductor empleado en las áreas industrial, militar y científica, es el transformador diferencial de variación lineal o L.V.D.T. (Linear Variable Differential Transformer), en la cual se convierte el la variable física desplazamiento en una diferencia de potencial eléctrico, es decir, es un captador de desplazamientos. Sin embargo, en forma indirecta es posible leer otros tipos de variables.

físicas agregando a nuestro transductor, uno que responda a una forma de energía diferente y la transforme en desplazamiento, como se muestra en las figuras 1A y 1B respectivamente.

De manera análoga a la medición de presión se puede detectar también temperatura (termómetro), humedad (higrómetro), fuerza (dinamómetro), etcétera. Convirtiendo al transductor particularmente útil en sistemas de control, en la verificación de rugosidades superficiales, en la medida de excentricidad en piezas giratorias y muchas otras aplicaciones. Esta versatilidad se debe también a la alta confiabilidad de su operación. Entre sus principales características se encuentran una excelente respuesta ante los fenómenos dinámicos y estáticos. Su resolución es virtualmente infinita, entendiendo por ésta, el mínimo cambio en la posición del núcleo que puede ser observado en la salida del transductor. La repetibilidad es la habilidad de un transductor para reproducir una misma señal de salida ante las mismas condiciones de entrada y del medio ambiente, en los L.V.D.T. es excelente y los principales factores que intervienen cuando el transductor ha alcanzado una temperatura estable de funcionamiento son mecánicos, es decir, deformaciones en sus partes. La histéresis en un transductor es la diferencia en la respuesta ante un mismo valor de excitación y debido únicamente al sentido de aproximación de la misma, en nuestro caso podemos despreciarla.

Por otra parte, la sensibilidad del dispositivo ante vibraciones y efectos del medio ambiente es muy baja, al igual que los efectos causados por el movimiento radial del núcleo, este último en un dispositivo comercial como es el PHILIPS GM 5537, altera el valor de la señal de salida aproximadamente en 0,2 %, considerando un desplazamiento radial de 0.1 mm. En cuanto al efecto ocasionado por campos magnéticos externos, podemos asegurar que no tienen efectos.

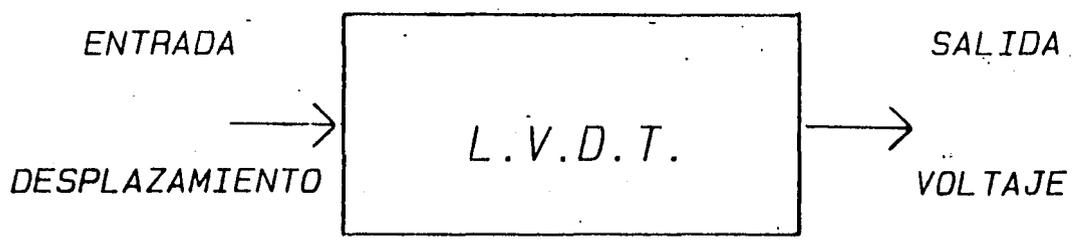


FIG. 1A APLICACION SIMPLE DE UN L.V.D.T.

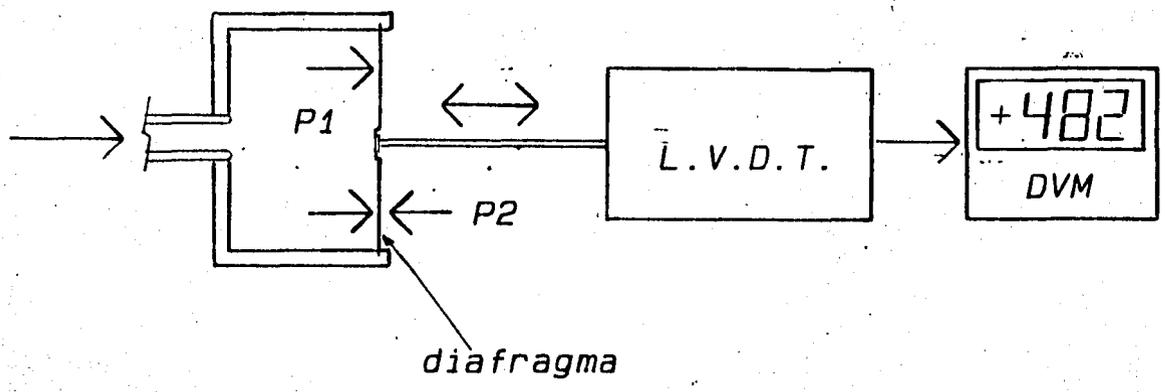
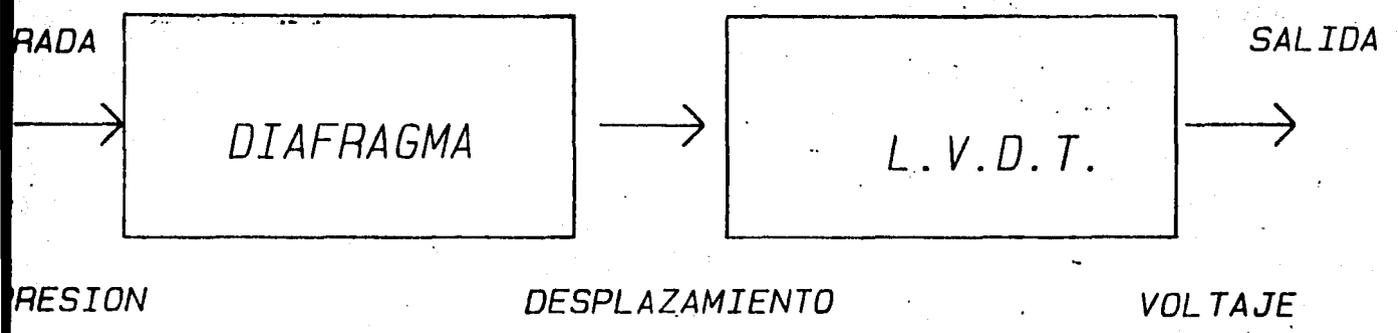


FIG 1B. EJEMPLO DE UNA MEDICION INDIRECTA. CON UN L.V.D.T. EMPLEADO PARA LEER EN EN DESPLEGADO DIGITAL UNA DIFERENCIA DE PRESIONES  $P_1-P_2$ .

sobre la precisión de las medidas, siendo el efecto para el mismo transductor sometido a un campo magnético alterno de 50 Hz y 40 Oerstedt de intensidad, una modulación correspondiente a 0.02 % de la escala completa y considerando que en la práctica es muy difícil que se presenten campos magnéticos tan intensos, podemos considerar despreciable el efecto de dichos campos en la lectura obtenida.

La sensibilidad del transductor a las variaciones de temperatura es también muy baja en cuanto a la parte electrónica y se puede considerar compensada. Respecto a la parte mecánica existe un ligero efecto que es inferior a 1 % por cada 10 °C de variación para el transductor comercial mencionado,

Otra característica importante en los transductores es la linealidad. Se considera un sistema lineal si para incrementos iguales en la amplitud de la señal de entrada obtenemos una respuesta directamente proporcional en la señal de salida. En el caso del transformador diferencial existe una desviación ante este comportamiento y se conoce como alinealidad. La alinealidad en los L.V.D.T. para el mejor de los casos debe ser cero y se expresa en porcentaje.

Sabemos que la señal de alimentación a un transformador debe ser de corriente alterna, al igual que lo es el voltaje inducido en los bobinados secundarios, sin embargo, es común encontrar transformadores diferenciales comerciales que se abastecen con corriente directa y que también entregan un voltaje de corriente directa, a estos transductores se les conoce como D.C.D.T. (Direct Current Differential Transformer), en su interior se convierte la corriente directa de alimentación en una señal de corriente alterna que excita al transformador. Con el voltaje inducido se hace la operación inversa para obtener nuevamente corriente directa. Algunos au-

tores aplican las iniciales L.V.D.T, como nombre genérico, especificando además si se trata de corriente directa o alterna, en nuestro caso empleamos esta convención, En la presente investigación nuestro objetivo es desarrollar la tecnología para fabricar los transformadores diferenciales alimentados con corriente directa.

### 1.1 ELEMENTOS QUE INTEGRAN AL L.V,D,T.

El L.V,D,T, de corriente alterna mostrado en la figura 2, consta de un transformador cilíndrico con tres bobinas, una primaria y dos secundarias; Las dos bobinas secundarias tienen las mismas características eléctricas (mismo número de vueltas, tamaño, resistencia, etcétera). Su única diferencia es la posición entre sí, ya que están en forma simétrica respecto al primario.

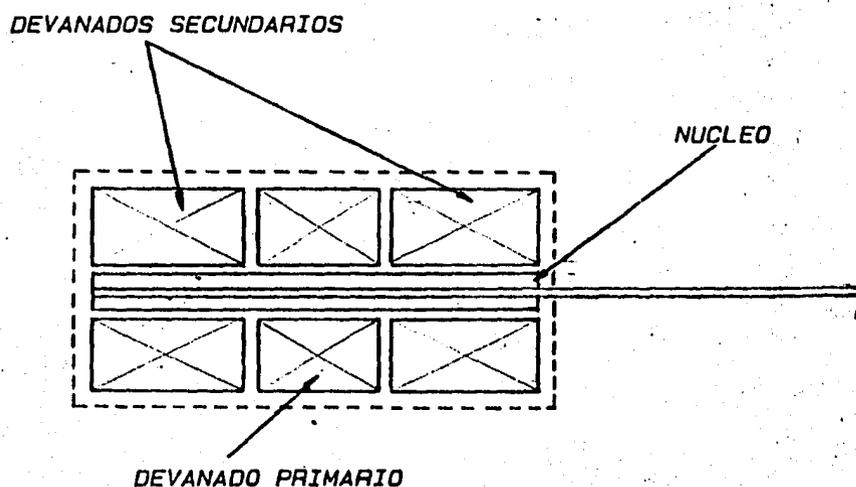


FIG.2 CORTE LONGITUDINAL DE UN TRANSFORMADOR DIFERENCIAL

Se tiene además un núcleo magnético que se puede mover libremente en el interior de las bobinas y por medio de un vástago no magnético está acoplado al sistema mecánico externo que interesa analizar.

En el caso de transformadores diferenciales de corriente directa, el transformador en sí se vuelve más complicado pero más versátil, pues externamente emplea sólo señales de corriente directa, lo que simplifica su manejo. El incremento de complejidad se debe a la necesidad de incorporarle un oscilador o generador de corriente alterna como excitador del primario del transformador y un circuito demodulador, figura 3.

## 1.2 FUNCION DE LAS PARTES

Un voltaje alterno generado por el circuito excitador es aplicado a la bobina primaria del transformador. Esto genera en las bobinas secundarias un voltaje también alterno cuyos parámetros dependen de la posición del núcleo. Así, al determinar la magnitud y ángulo de fase entre el voltaje de los secundarios y el del primario, podemos conocer con precisión la posición del núcleo. El circuito demodulador facilita esta tarea permitiéndonos manejar voltajes de directa en la salida del transductor (aunque existen configuraciones confiables que manejan señales alternas, que se describen en demoduladores).

Sintetizando, la parte esencial del transductor es un transformador, en cuyos secundarios se inducen voltajes. Cuando el núcleo se encuentra en la posición central estos voltajes

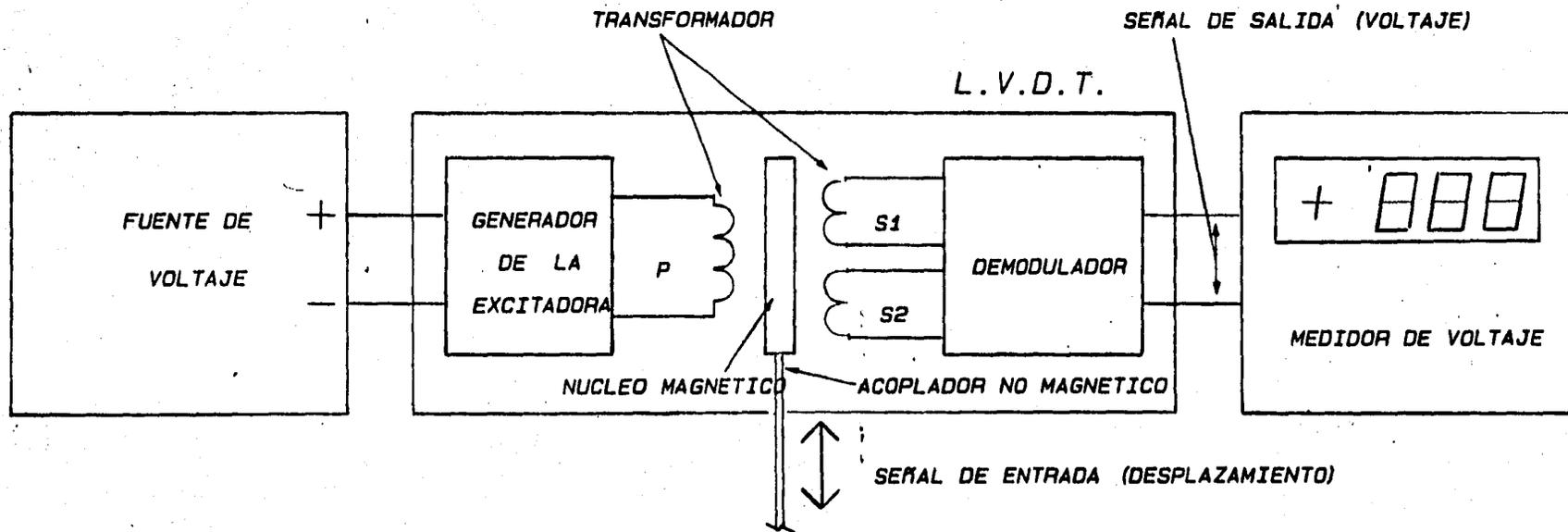


FIG.3 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL L.V.D.T. CON SUS ELEMENTOS EXTERNOS.

son iguales y su diferencia (voltaje de salida) es cero, al mover el núcleo al extremo "A", el voltaje de salida se hace diferente de cero y al desplazar el núcleo hacia el otro extremo "B", también es diferente de cero y de polaridad opuesta, como se ve en la figura 4.

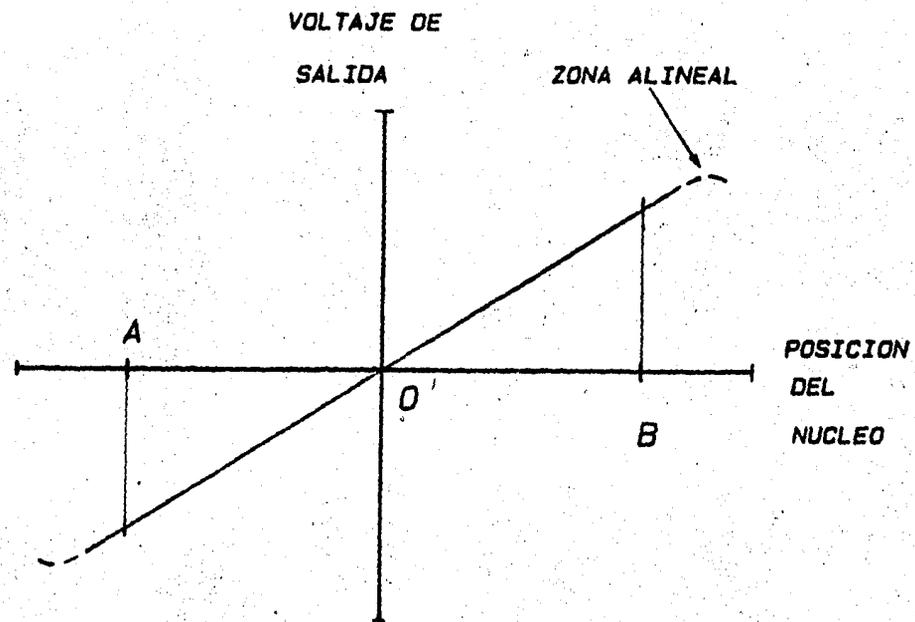
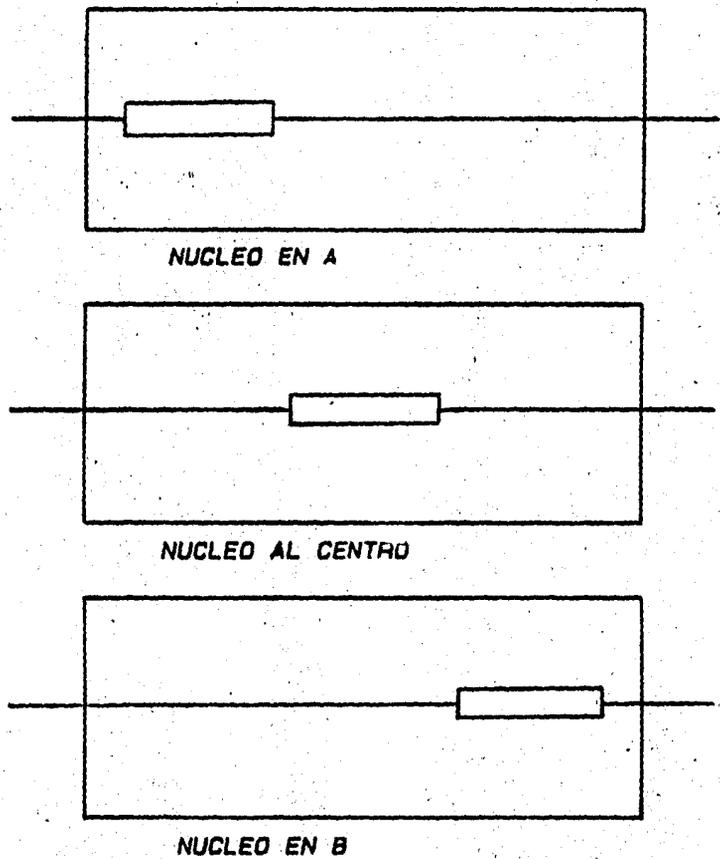


FIG. 4 CARACTERISTICAS DE TRANSFERENCIA DEL TRANSDUCTOR.

## 2. NORMADO DEL DISEÑO

La variedad de alternativas que se presentan al realizar un diseño es tan amplia, que debemos hacer un análisis previo para enfocarnos adecuadamente a la solución. En este estudio necesitamos encontrar cuál es la necesidad, sus características, constantes, variables, así como los recursos disponibles y limitaciones que tenemos para su desarrollo.

Así mismo, es necesario definir el plan de trabajo empleado que consiste en el desarrollo de varios circuitos electrónicos para las etapas excitadora y demoduladora, además de varios transformadores. Dichos circuitos deben cumplir con las especificaciones requeridas por el transductor y que describimos adelante. La razón de establecer varias alternativas es poder conocer la importancia de cada uno de los parámetros más significativos y con base en las pruebas realizadas poder seleccionar las alternativas con características más adecuadas y modificarlas si es necesario. De esta manera pudimos obtener algunas conclusiones interesantes sobre el diseño y la construcción de estos dispositivos.

Para lograrlo nos hemos basado en gran medida en el método experimental y debemos considerar que un gran número de pruebas no han sido realizadas o únicamente en forma parcial debido a la gran com-

plejidad que representan o a la necesidad de equipo fuera de nuestro alcance, como sería el estudio del transductor ante agentes químicos, efectos originados por la humedad, por campos magnéticos y eléctricos, vibraciones mecánicas, pruebas de duración, etcétera.

Se consideró adecuado enfocar el diseño a un transformador diferencial experimental, el cual empleamos como laboratorio y cuyas características se describen en seguida:

La tensión nominal de alimentación es de 12 voltios, aunque este valor no es crítico ya que el transductor operó adecuadamente con tensiones inferiores a 5 voltios y superiores a 16, teniendo como único efecto importante un cambio proporcional en el voltaje de salida, esto significa la necesidad de que la fuente de alimentación externa sea regulada, pero si además es variable tenemos la ventaja de poder calibrar la tensión de salida a una cierta escala sin la necesidad de controles de ajuste en el transductor, ya que un aspecto importante que simplifica el manejo del dispositivo, es que la cantidad de controles al usuario y ajustes internos sean mínimos.

El consumo de potencia debe ser bajo, menor a 3 watts es un valor adecuado, aunque no es un parámetro crítico, en el caso del primer prototipo este consumo fue aproximadamente de 0.5 watts (45 mA a 12 VCD). Los intervalos de medición adecuados de los L.V.D.T. son muy variados, entre los comerciales existen algunos cuya carrera es tan pequeña como  $\pm 3$  micras, en otros es mayor a  $\pm 3$  pulgadas para escala completa según sea su aplicación, en nuestro prototipo este intervalo es de  $\pm 15$  mm para facilitarnos su estudio. La sensibilidad de medida debe de ser tal que en escala completa obtengamos entre 1 y 5 voltios aproximadamente, es decir, de 0.067 V/mm a 0.335 V/mm. Existen otros parámetros como la estabilidad

ante variaciones térmicas, alinealidad, impedancia de salida, etcétera, que aún no es posible definir pero debemos hacerlos tan pequeños como sea posible.

## 2.1 ETAPA EXCITADORA

La primera parte del transductor es la etapa excitadora y su función es proveer una señal de voltaje alterno y amplitud suficiente a la bobina primaria del transformador, partiendo de un voltaje de directa alimentado desde el exterior, en otras palabras, requerimos un oscilador con una etapa de potencia para manejar la corriente demandada por el transformador y cuyas características las definimos a partir de las siguientes consideraciones sobre la señal excitadora:

Es un voltaje de alterna y sus parámetros son amplitud, frecuencia y forma de onda.

El voltaje inducido en las bobinas secundarias del transformador depende de la relación de transformación, posición del núcleo y voltaje de excitación. Como la relación de transformación es constante, la amplitud del voltaje de excitación también debe serlo para lograr que la tensión inducida represente la posición del núcleo.

El estudio de los efectos causados por la frecuencia o por su variación resulta más elaborado que en el caso de la amplitud. Como se ve en el diagrama de la figura 3, el transformador tiene dos señales de entrada, una mecánica que es el desplazamiento del núcleo y otra eléctrica que es suministrada por el generador de

corriente alterna (excitador), a la primera la denominamos señal mecánica, mientras que a la segunda, señal excitadora.

Para que la señal a la salida del transductor contenga adecuadamente la información de la posición del núcleo, la señal excitadora debe tener una frecuencia al menos diez veces mayor que la de la señal mecánica, es decir, si excitamos por ejemplo con una frecuencia de 400 Hz, la máxima frecuencia que podemos apreciar en la señal mecánica es de 40 Hz aproximadamente. Otro factor afectado por la frecuencia es el consumo de corriente en el transformador y debido a la componente inductiva que presenta, la impedancia aumenta proporcionalmente con la frecuencia de excitación, disminuyendo el consumo de corriente, sin embargo, tiene también un límite superior debido a que en frecuencias altas se hace importante el efecto de las capacitancias en las bobinas, alambrados, transistores y demás partes electrónicas.

La gama de frecuencias útil se encuentra aproximadamente entre 400 Hz hasta menos de 10 KHz por varias razones: por una parte, necesitamos que la amplitud de la señal de salida dentro de las frecuencias empleadas, sea constante y así disminuimos la sensibilidad del transductor a las variaciones en dicha frecuencia, además los osciladores se comportan en forma más inestable si se les incrementa la frecuencia de operación a menos que se empleen configuraciones más complejas como en el caso de los sistemas de radiocomunicación. Por otra parte, si el circuito opera dentro de la gama de frecuencias mencionada, simplificamos su estudio al evitar el problema de medición en alta frecuencia.

A continuación tenemos tres configuraciones distintas del circuito excitador, las dos primeras generan una señal senoidal con características más o menos similares, mientras que el tercero presenta una configuración más simple y genera una señal no senoidal.

### 2.1.1 CIRCUITO EXCITADOR SENOIDAL I

Este circuito tiene la finalidad de excitar al transformador con una señal de frecuencia prácticamente única, es decir de forma senoidal para poder realizar un estudio de su comportamiento en varias frecuencias individualmente.

Según pudimos observar el sistema se comportó adecuadamente en las frecuencias entre 500 Hz hasta 4 KHz, en donde la linealidad y la sensibilidad de medida se mantuvieron constantes. Así, un corrimiento en la frecuencia del oscilador dentro de esta gama prácticamente carece de importancia, excepto cuando se emplee un voltímetro de corriente alterna para leer la posición del núcleo, en cuyo caso dependemos principalmente de sus características, como está descrito en demoduladores.

Otra característica consiste en que la fuente de poder externa debe ser doble, de  $\pm 6$  voltios y regulada ya que sus fluctuaciones afectan de manera proporcional el voltaje de salida del transductor, además el consumo de corriente del propio transductor no es constante, su variación es de 15 % aproximadamente y depende de la posición instantánea del núcleo y si el voltaje no se regula se manifiesta como un incremento de alinealidad en la curva de transferencia.

El diagrama completo de esta configuración se representa en la figura 5 en donde se aprecian dos etapas, la osciladora y la de salida.

La etapa osciladora emplea dos amplificadores operacionales encapsulados en un circuito integrado y dentro de los componentes electrónicos empleados es el más complejo, requiriendo de alta tecnología para su fabricación.

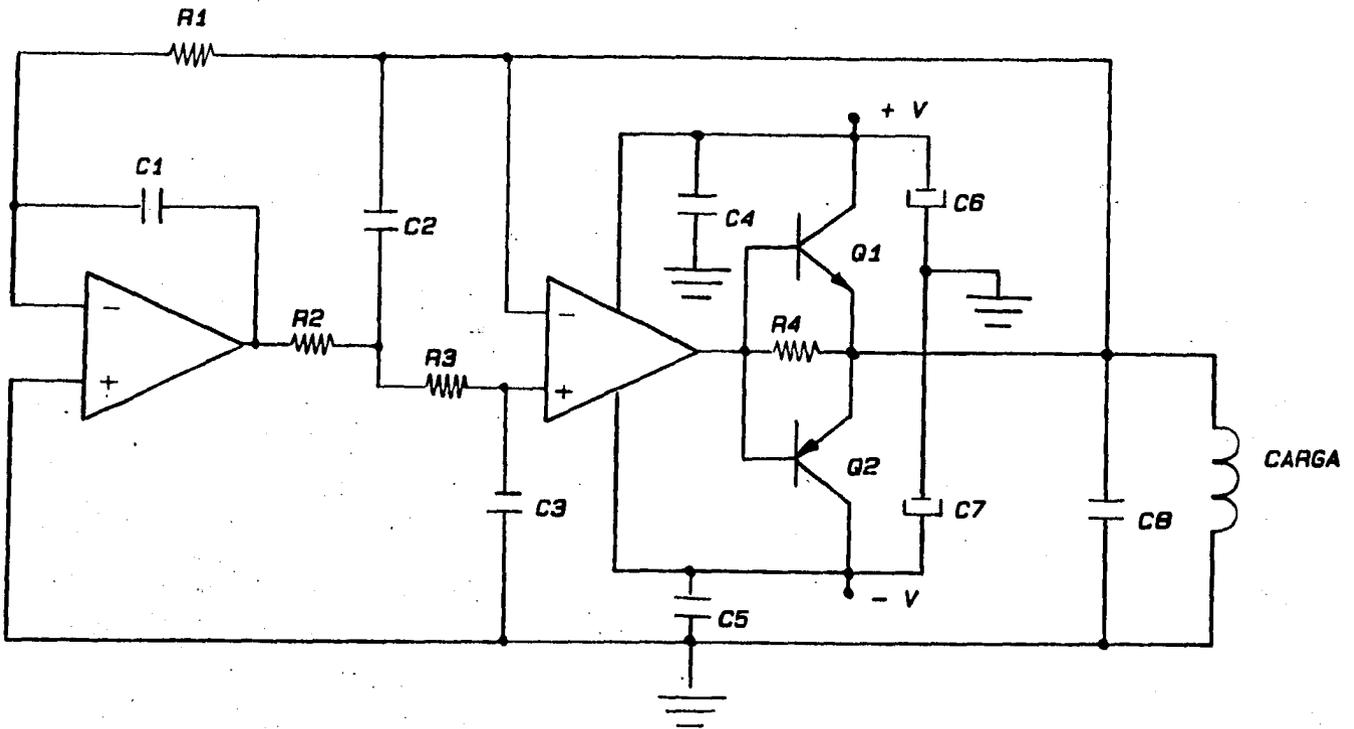


FIG. 5 CIRCUITO EXCITADOR SENOIDAL

La frecuencia de oscilación es determinada seleccionando los valores de las resistencias  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  y de los capacitores  $C_1$ ,  $C_2$  y  $C_3$  que forman la malla de realimentación.

El par de transistores  $Q_1$  y  $Q_2$  forman una etapa de potencia en clase B, con la finalidad de poder manejar a la salida del amplificador la corriente demandada por el transformador.

La resistencia  $R_4$  evita que el amplificador operacional se quede sin carga en el intervalo  $-0.7 < V_{sao} < 0.7$  voltios ( $V_{sao}$  = voltaje de salida del amplificador operacional), pues se ocasionaría un

cambio brusco en la corriente de salida del amplificador operacional en los extremos de dicho intervalo, manifestándose como una notable distorsión de cruce.

Notese que la realimentación del oscilador la tomamos después de los transistores de salida para disminuir la distorsión de la etapa, además, el capacitor C8 en la salida del amplificador atenúa en la señal, las componentes de alta frecuencia que se pudieron originar en el circuito oscilador y en los transistores de salida con el mismo propósito, disminuir la distorsión armónica.

Los capacitores C4 a C7 atenúan las variaciones de voltaje en las líneas de alimentación y evitan realimentaciones parásitas a través de ellas.

### 2.1.2 CIRCUITO EXCITADOR SENOIDAL II

Como alternativa al circuito anterior, utilizamos la configuración que se muestra en la figura 6. A este circuito se le conoce como OSCILADOR DE PUENTE DE WIEN y se emplea para generar senoides de gran precisión, tiene características excelentes de estabilidad, tanto en la frecuencia, como en la forma y amplitud de la señal.

La parte derecha del circuito no presenta ninguna diferencia en relación al caso anterior. En ella, están la etapa de potencia, los capacitores para estabilizar la alimentación y el capacitor en la salida. Lo interesante del circuito radica en su gran estabilidad de amplitud en la señal de salida aún cuando existan al-

gunas variaciones en la alimentación de  $\pm 6$  voltios, esto se debe a que existe una continua compensación ante las variaciones de amplitud que presente dicha señal.

En la figura 6 podemos apreciar dos mallas de realimentación entre la salida del amplificador y tierra, conectadas respectivamente a las entradas positiva y negativa del amplificador operacional. La primera determina la frecuencia de oscilación que como en el caso anterior depende de los valores de las constantes RC, mientras que la segunda controla la amplitud de la señal.

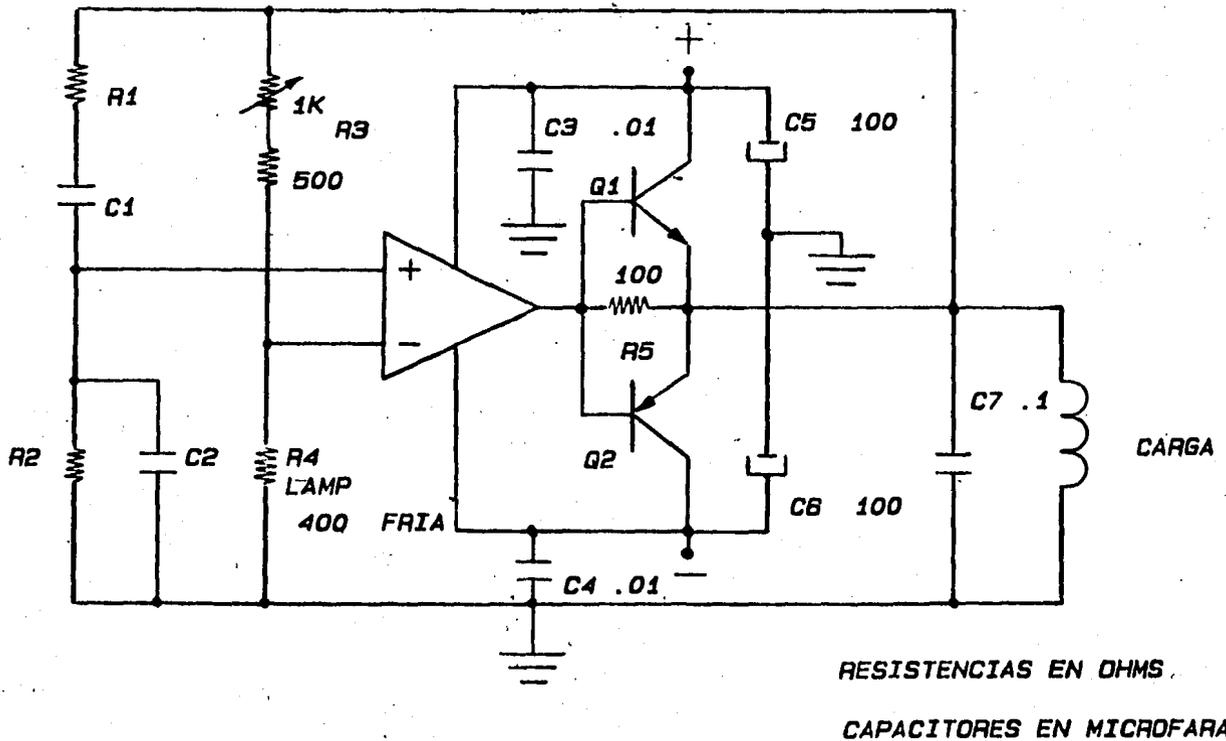


FIG. 6 CIRCUITO EXCITADOR SENOIDAL

La malla de realimentación positiva formada por el puente de Wien tiene una atenuación de tres en la frecuencia de resonancia  $F_0$ , figura 7. Esta condición se debe de cumplir también en la malla de realimentación negativa para poder mantener las oscilaciones, es decir, el cociente  $R_3/R_4$  no es constante, debe de ser mayor a dos para empezar a oscilar y posteriormente igual a dos para mantenerse oscilando, esto se logra de una manera muy precisa si  $R_4$  aumenta su resistencia al aumentarle el voltaje en sus terminales, este fenómeno ocurre en el filamento de una lámpara de tungsteno, debido al gran cambio de temperatura que en él existe. La amplitud de salida se hace constante cuando la resistencia de la lámpara  $R_4$ , alcanza el valor de  $2(R_3)$ , es decir,  $R_4'$ .

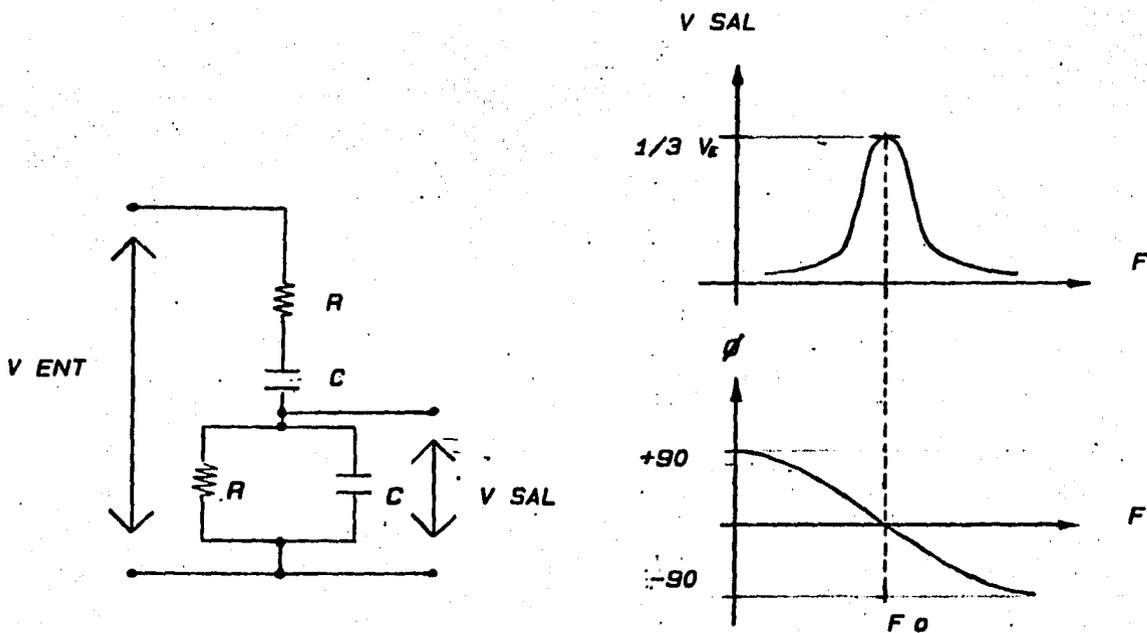


FIG.7 LA RED DE REALIMENTACION (IZQUIERDA) PRESENTA UNA ATENUACION DE 3. CUANDO EL CORRIMIENTO DE FASE ES IGUAL A CERO, LA SALIDA SE HACE MAXIMA (DERECHA).

Este valor lo alcanza después de unos cuantos minutos de encendido el circuito y posteriormente mantiene una extraordinaria estabilidad aun cuando existan cambios en la temperatura ambiente, ya que éstos prácticamente no afectan la temperatura del filamento de la lámpara, por encontrarse al vacío.

La lámpara de tungsteno de 10 watts a 127 voltios, tiene una resistencia aproximada de 380 a 400 ohms a 1.2 VCD, la resistencia  $R_3$  es el doble que  $R_4$ , o sea unos 760 a 800 ohms y se puede ajustar a su valor exacto, funcionando además como un control de amplitud.

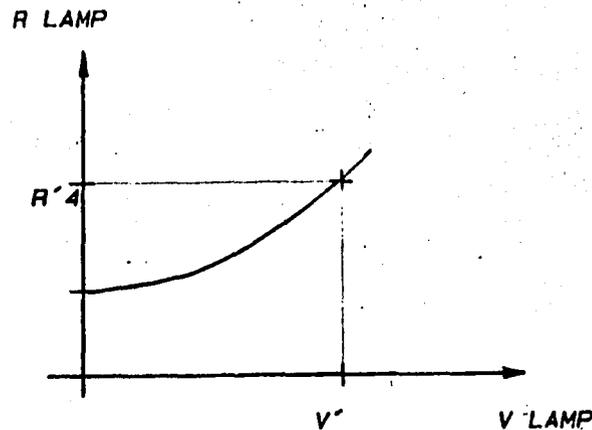


FIG.8 VARIACION DE LA RESISTENCIA DE UNA LAMPARA COMO FUNCION DEL VOLTAJE.

### 2.1.3 CIRCUITO EXCITADOR MULTIVIBRADOR

La tercera versión del circuito excitador corresponde a un oscilador conocido como MULTIVIBRADOR ASTABLE y sus características difieren notablemente a las presentadas por las otras configuraciones.

La señal de salida consiste en una forma de onda no senoidal rica en frecuencias armónicas, cuya frecuencia fundamental de oscilación se ajustó a unos 1000 Hz y presenta una variación de  $\pm 250$  Hz aproximadamente dependiendo de la posición en que se encuentre el núcleo del transformador. Cuando se emplea este circuito junto con los demoduladores de corriente directa descritos adelante, los aspectos anteriores prácticamente carecen de importancia.

Como sucede en el primer circuito excitador senoidal que describimos, la amplitud de la señal de salida depende entre otras cosas de la magnitud del voltaje de alimentación y del mismo modo, esto lo podemos aprovechar como control de amplitud, es decir, para ajustar la pendiente de la curva de transferencia.

Además, en los casos anteriores requeríamos una fuente de alimentación externa doble de  $\pm 6$  voltios, mientras que para este circuito una sencilla de 12 voltios es suficiente.

Como podemos apreciar en el diagrama de la figura 9, en esta configuración no se requiere de circuitos integrados como elementos activos, sino únicamente de dos transistores que funcionan como etapas osciladora y de salida simultáneamente. Su reducida cantidad de elementos hace que el armado sea más simple y que el espacio requerido sea pequeño.

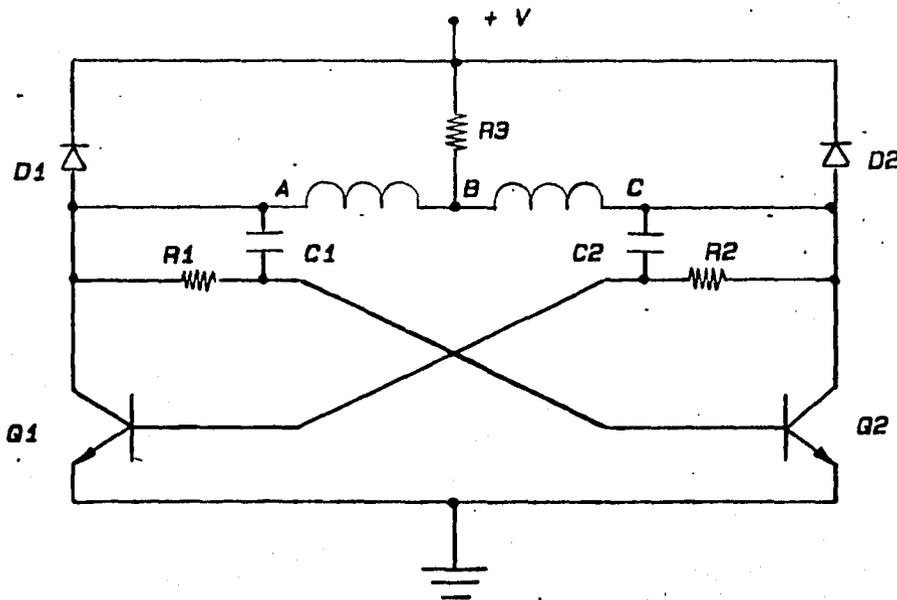


FIG.9 CIRCUITO EXCITADOR MULTIVIBRADOR.

La forma en que el circuito opera también es diferente a las anteriores. Al observar el diagrama podemos notar que presenta simetría la parte izquierda con la derecha y que los transistores Q1 y Q2 se comportan como interruptores, energizando alternadamente a los extremos A y C de la bobina primaria del transformador. La duración del ciclo es determinada por los elementos R, L y C por esta razón la posición del núcleo que interviene en el valor de la inductancia afecta el comportamiento del oscilador, la resistencia R3 limita la corriente del transformador y transistores a un valor seguro, mientras que los diodos D1 y D2 aseguran que el voltaje en los colectores no sobrepase más de 0.7 voltios la tensión de alimentación.

En este circuito hemos encontrado resultados prácticamente iguales a los anteriores, sin embargo, con menor complejidad en el armado y operación lo que representa una gran ventaja, es por esto que lo preferimos para incluirlo en los transductores fabricados.

## 2.2 DEMODULADORES

De los voltajes presentes en los devanados secundarios del transformador es necesario extraer la información y hacerla útil mediante un circuito apropiado que conocemos como DEMODULADOR. Aunque un L.V.D.T. de corriente directa requiere tener un circuito demodulador que maneje en su salida un voltaje de directa, mencionamos algunas formas de obtener la información de dicha señal cuando sea alterna, pues también puede ser de utilidad.

### 2.2.1 EMPLEANDO UN VOLTÍMETRO DE CORRIENTE ALTERNA

Como los voltajes en los embobinados secundarios del transformador varían de acuerdo con la posición del núcleo, si conectamos los dos secundarios en forma sustractiva a un voltímetro de alterna como se ve en la figura 10, podemos leer en dicho intrumento la magnitud del desplazamiento representada en el voltaje. De hecho, al emplear este método la verdadera demodulación se realiza dentro del voltímetro y por ello la calidad de la lectura depende en gran medida de sus propiedades particulares.

Al emplear este método podemos conocer la magnitud de un desplazamiento pero no su sentido, a menos que sea por medio de un circuito auxiliar para tal fin.

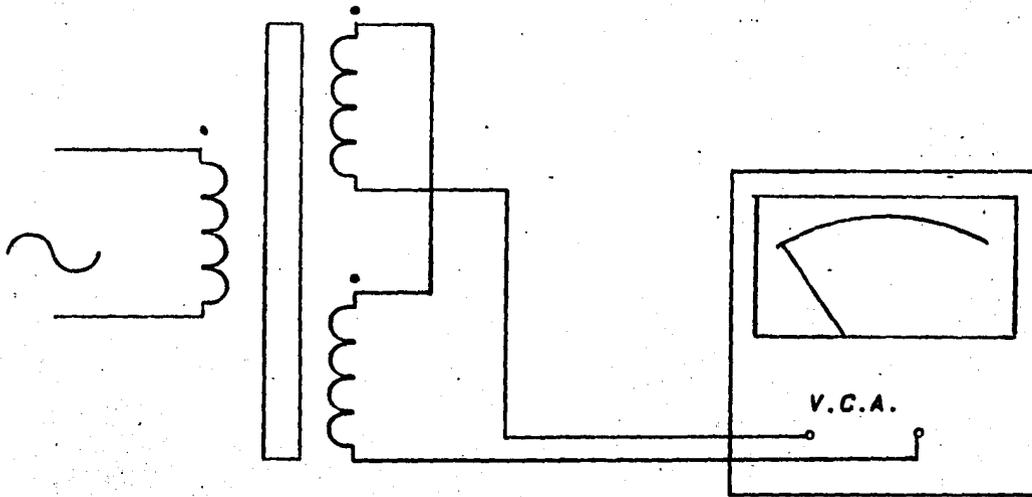


FIG.10 CONEXION DE UN VOLTÍMETRO DE CORRIENTE ALTERNADA PARA INDICAR LA MAGNITUD DEL DESPLAZAMIENTO.

### 2.2.2 POR MEDIO DE UN OSCILOSCOPIO

En forma similar al caso anterior, las terminales de los embobinados secundarios las conectamos en forma sustractiva y el lugar del voltímetro es sustituido por el amplificador vertical de un osciloscopio, mientras que el voltaje de la bobina primaria del transformador lo aplicamos a la entrada horizontal con el objeto de observar un patrón X-Y en la pantalla.

A diferencia del caso anterior en el que no se podía saber la dirección del desplazamiento, aquí podemos apreciar la amplitud del voltaje y el ángulo de fase entre el voltaje del primario en relación con el voltaje diferencial de salida y podemos interpretarlos respectivamente como cuanto y hacia donde se desplazó el núcleo.

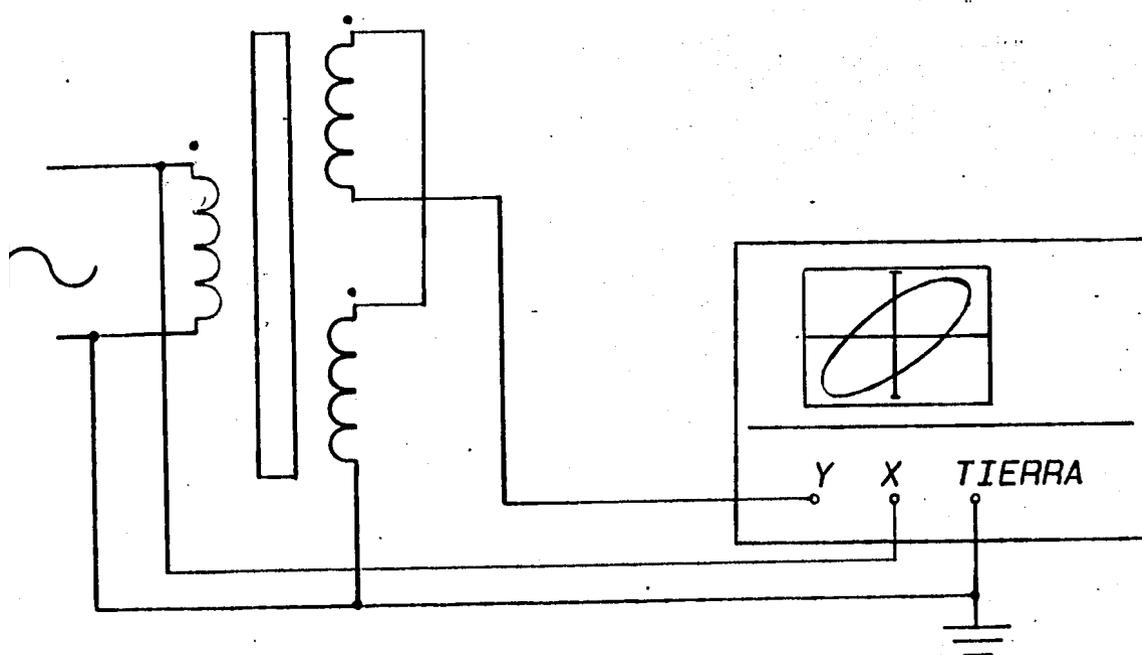


FIG.11 CONEXION DE LOS CANALES X-Y DE UN OSCILOSCOPIO.

Otra manera de conectarlo cuando se dispone de un osciloscopio de doble trazo, es aplicando el voltaje del devanado primario del transformador al canal Y2 del amplificador vertical; el canal Y1 permanece de la misma forma que se conectó para observar el patrón X-Y, y el amplificador horizontal lo excitamos con su propio generador de barrido.

La pantalla nos muestra las dos señales, la diferencial y la de excitación en forma independiente pero relacionadas en fase, de donde podemos obtener la información sobre la posición del núcleo.

### 2.2.3 DEMODULADOR DIFERENCIAL DE CORRIENTE DIRECTA

El circuito mostrado en la figura 12 representa una manera confiable de obtener un voltaje de directa a partir de la señal de salida de un transformador diferencial, es de hecho, el demodulador con mejores características entre los mostrados y por ello el que empleamos en los prototipos, ya que presenta simplicidad en su funcionamiento y armado, baja impedancia de salida, eléctricamente está aislado del circuito excitador, no tiene controles de ajuste en su configuración básica, aunque si se requieren, pueden agregarse y una de las características más importantes es que se encuentra térmicamente compensado.

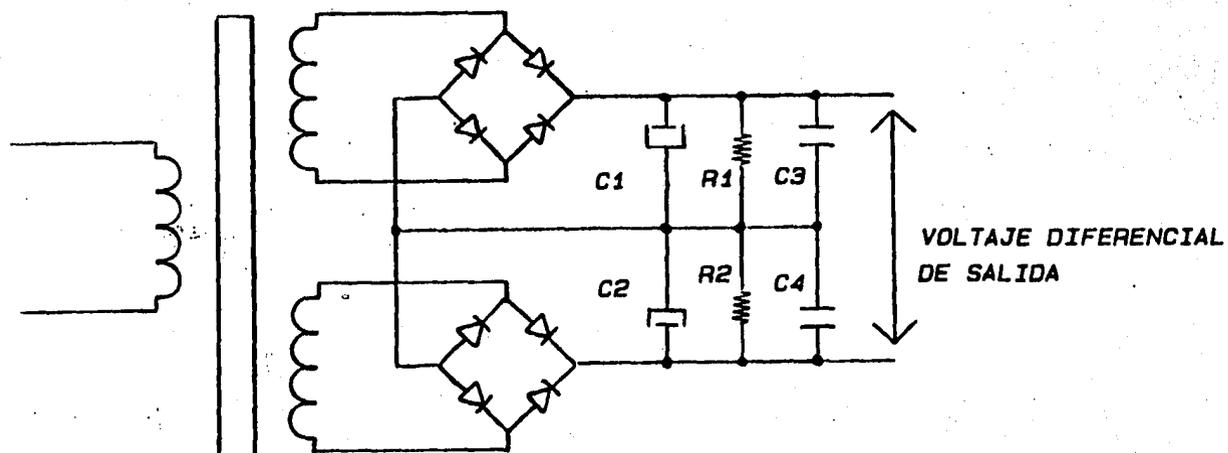


FIG. 12 DEMODULADOR CON PUENTES RECTIFICADORES.

En el diagrama podemos apreciar dos puentes rectificadores de onda completa que actúan en forma individual para cada secundario. En cada puente existe una caída de tensión de 1.3 voltios aproximadamente y varía como función de la temperatura. La compensación térmica se debe a la simetría que presentan los puentes rectificadores entre sí, en los cuales, sus respectivas variaciones de voltaje son similares y eliminadas después de la sustracción.

El voltaje resultante de la rectificación carga a los capacitores aproximadamente a su valor de pico durante la primera cuarta parte del ciclo y las resistencias los descargan en el segundo cuarto de ciclo, repitiéndose hasta completar el ciclo. Este fenómeno presenta en la carga como en la descarga una constante de tiempo determinada por los valores de R y C, y junto con el valor de la frecuencia de excitación, determina la gama de frecuencias de la señal mecánica en la que el transductor se comporta adecuadamente, para los prototipos desarrollados es desde cero hasta unos 70 Hz aproximadamente.

#### 2.2.4 DEMODULADOR SINCRONO

El demodulador síncrono mostrado en la figura 13, representa otra manera de obtener un voltaje de directa en la salida del transductor, como en el caso anterior la señal alterna es rectificada y filtrada, determinando una constante de tiempo por los valores de los capacitores C1 y C2, y de la resistencia R2, sin embargo, existen notables diferencias entre ellos. La sustracción se realiza en la señal alterna antes de la rectificación; los transistores Q1 y Q2 de polaridad opuesta junto con los capacitores

res C1 y C2, forman un circuito rectificador de media onda y duplicador de voltaje, entregando a la resistencia de carga R2 prácticamente la tensión de pico a pico de la señal diferencial, para esta operación se requiere un embobinado auxiliar que polarice la juntura base-emisor de los transistores y los sincronice, determinándoles alternadamente el tiempo de conducción a cada uno, así, durante la primera mitad del ciclo el transistor Q2 conduce permitiendo que el capacitor C1 se cargue al valor pico de la tensión diferencial, mientras que en la segunda parte del ciclo, el voltaje diferencial en el transformador cambia de polaridad y Q1 conduce, adicionando la tensión acumulada en C1 a la del transformador para aplicarlas a C2 y a la resistencia de carga R2. Por esta razón observamos una impedancia de salida mayor que en el caso anterior.

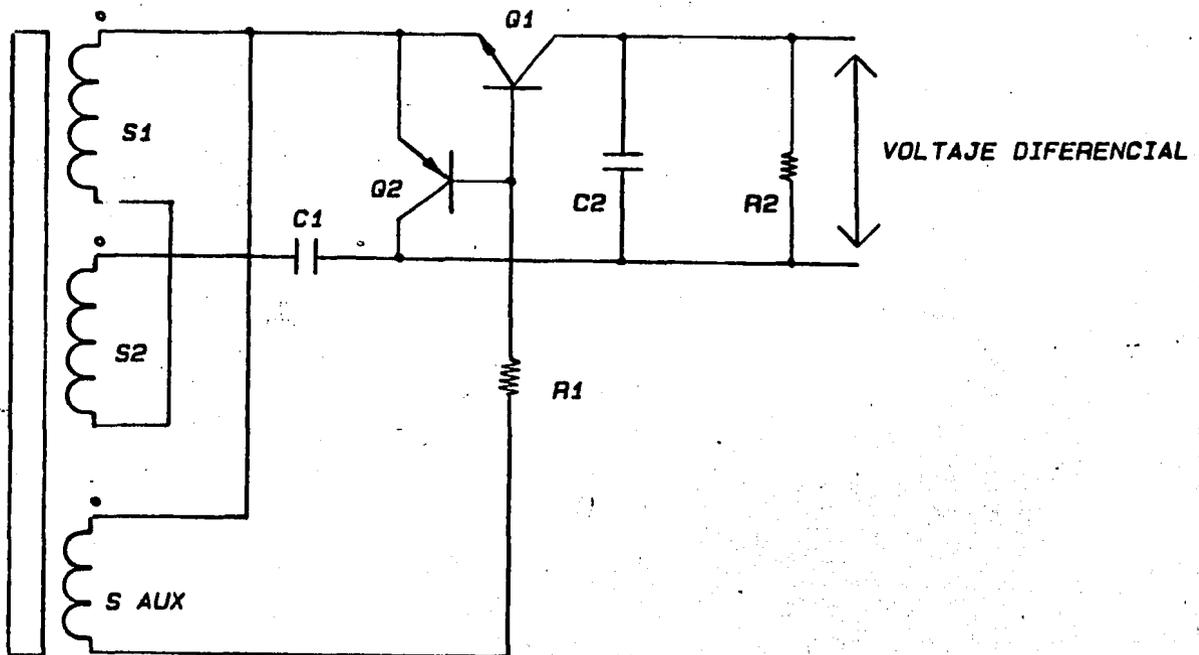


FIG. 13 CIRCUITO DEMODULADOR CON TRANSISTORES.

### 2.3 EL TRANSFORMADOR

Como se mencionó, el interior del transductor contiene un transformador cilíndrico formado por tres o cuatro bobinas y un núcleo móvil de material magnético.

La bobina primaria se encuentra en la parte central y en sus extremos las dos secundarias. Cuando se emplea un devanado auxiliar para polarización del demodulador lo colocamos concéntricamente sobre la bobina primaria.

La longitud de las bobinas secundarias debe ser igual a la distancia que se requiere medir con el transductor, entonces su diámetro queda determinado por el número de vueltas y calibre del alambre usado. Para la bobina primaria su longitud no es crítica, pero hay que considerar que el núcleo debe abarcar su longitud más la de las bobinas secundarias exactamente y que sobre ella se encuentra la bobina auxiliar. Como las bobinas están soportadas por un carrete debemos tomar en cuenta su espesor y que en el interior debe deslizarse libremente el núcleo, al determinar las dimensiones del transformador.

Un tubo de material conductor eléctrico y no magnético en la parte externa del transformador ayuda a darle resistencia mecánica contra impactos y mejora la linealidad en la curva de transferencia.

Para elaborar el carrete que soporta a las bobinas del transformador requerimos que el material empleado no sea conductor eléctrico para evitar corrientes inducidas en él y que tenga buena estabilidad físico-química, pues debido a las características propias del transductor, es particularmente sensible a los cambios de posición axiales entre bobinas y núcleo, por lo que las deformaciones en sus partes son indeseables. Estas pueden ser origina-

das por esfuerzos en los materiales, dilataciones por cambios de temperatura y por cambios químicos básicamente.

Las deformaciones por esfuerzos podemos hacerlas despreciables si apoyamos adecuadamente al transductor y sus materiales poseen la rigidez suficiente. Su estabilidad térmica depende del coeficiente de dilatación del material y puede ser parcial o totalmente compensado si se tiende a igualar las deformaciones del soporte de las bobinas con las del núcleo y su vástago. La actividad química entre los materiales y el medio ambiente debe ser muy baja para asegurar la duración y buen comportamiento del dispositivo.

La alúmina es un material que reúne estas propiedades y de hecho es empleada en muchos L.V.D.T. comerciales, la dificultad encontrada fue la alta temperatura requerida para su sinterización en el orden de 1400 a 1500 °C.

Existen otras sustancias que por sus características también son aptas en esta tarea, entre los termoplásticos encontramos al acrílico (polimetil metacrilato), en condiciones normales es un sólido cristalino, fácil de moldear y maquinar, podemos deformarlo a temperaturas mayores de 95 °C o a la temperatura ambiente por medio de algunos solventes orgánicos como el cloroformo que además nos permite pegar varias piezas entre sí. En la tabla I mencionamos algunas propiedades de estos materiales.

Un material alternativo a los anteriores para la construcción de los carretes es la madera. Como podemos apreciar en la tabla II presenta una gran estabilidad en sus dimensiones ante variaciones térmicas. El hinchamiento de la madera resulta de la variación del contenido de agua dentro de cada célula y debido a la naturaleza anisotrópica de la pared celular, sus variaciones dimensionales son diferentes para cada uno de sus ejes. En sentido longi

TABLA I

	ACRILICO	ALUMINA
Constante dieléctrica a 1 KHz	4.0	8-9
Resistencia volumétrica (ohm cm)	$10^{14}$	$10^{14}$ - $10^{15}$
Resistencia a la tensión (lb/pulg <sup>2</sup> )	11 000	8 000-30 000
Conductividad térmica (cal/seg cm °C)	0.0	0.007-0.05
Absorción de agua (%cm/24 hr)	0.4	0.0

tudinal a la fibra prácticamente podemos despreciarla, las variaciones importantes son en los sentidos radial y tangencial a la corteza, siendo el último un 40 a 50 % mayor que en el sentido radial. Sus propiedades eléctricas entre otras, también son alteradas por el contenido de humedad afectando el comportamiento del transductor, una manera de disminuir este fenómeno, es aplicándole a la madera seca hidrocarburos como el benceno, la gasolina, el tetracloruro de carbono o la creosota que hinchando la madera menos del 2 %, atenúan las variaciones en sus propiedades eléctricas y no causan variaciones en la resistencia mecánica. Agregándole varias capas de barniz y revistiendo completamente su superficie podemos obtener una eficiencia estabilizadora en sus dimensiones de hasta un 90 a 95 %.

TABLA II.

## PROPIEDADES DE LA MADERA

Contracción, desde su estado verde hasta secada en estufa, basado en las dimensiones en verde ( % ).

Longitudinal	0.1 a 0.3
Radial	3.4 a 7.3
Tangencial	4.5 a 10.6
Expansión lineal térmica ( %/°C )	de 0.000 003 1 a 0.000 004 5
Constante dieléctrica (1 KHz)	
Secada en estufa	4
Al 12 % de humedad	5 000
Resistencia volumétrica (ohms cm)	
Secada en estufa	$3 \times 10^{17}$ - $3 \times 10^{18}$
Al 16 % de humedad	$10^8$

Otras características interesantes como los esfuerzos permitidos en los diversos tipos de maderas pueden consultarse en Wood Handbook.

Para obtener los voltajes adecuados en los secundarios, es necesario determinar la relación de transformación entre los embobinados, la cual fue 3 para los secundarios y 0.4 para la bobina de polarización auxiliar, en el primer transformador.

### 3. CONSTRUCCION DE PROTOTIPOS

Con base en la información reunida y aplicándola a un transformador diferencial experimental que nos permitiese hacer una evaluación sobre su comportamiento, pudimos establecer algunos criterios sobre su diseño, Además se describe el procedimiento para realizar las calibraciones y algunos detalles de los prototipos de la segunda generación.

#### 3.1 EL PRIMER PROTOTIPO

Este transductor fue desarrollado en forma modular para facilitar la evaluación de las diversas combinaciones entre los circuitos excitadores con los dos demoduladores de corriente directa y con dos transformadores similares pero devanados en carretes de madera y de acrílico respectivamente. Como se mencionó, el circuito excitador multivibrador fue seleccionado por brindar resultados similares a los otros y por presentar el menor grado de complejidad y junto con el demodulador diferencial de corriente directa y con el transformador devanado en soporte acrílico, representa la alternativa con mejores características en su respuesta.

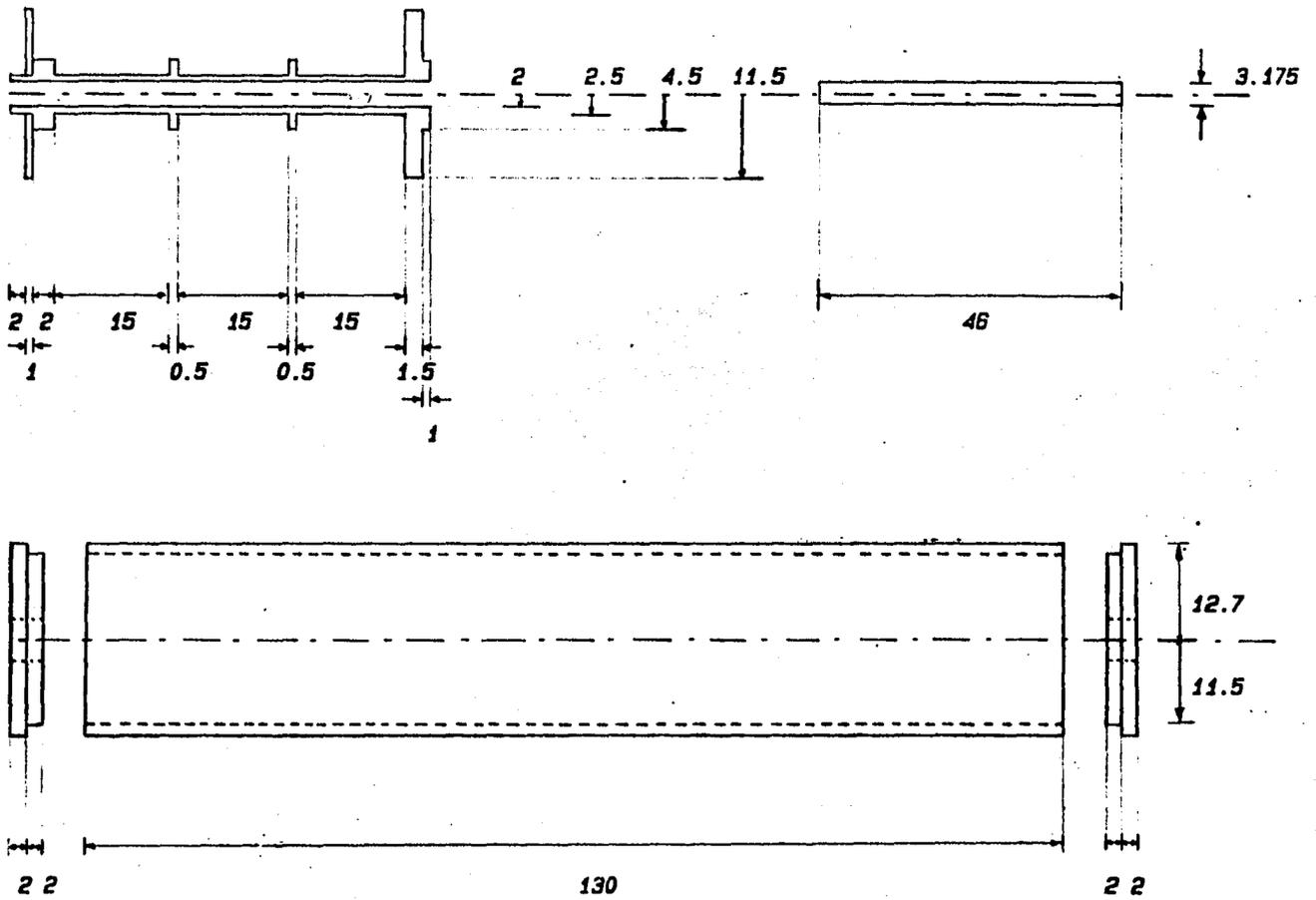
Las características para construir el transformador fueron las siguientes:

TABLA III

No. vueltas bobina primaria	2 000
No. vueltas bobinas secundarias	6 000
No. vueltas bobina de polarización de los transistores	800
Calibre del alambre	44 AWG
Tensión de alimentación	12 VCD
Intervalo lineal de medición	+ 15 mm
Frecuencia de excitación	1 000 $\pm$ 250 Hz

Como podemos observar, el transformador tiene un secundario auxiliar para polarización de las bases de los transistores con la finalidad de poder emplear cualquiera de los circuitos demoduladores. En la figura 14 podemos apreciar las dimensiones del transformador experimental mencionado.

Tanto la fabricación de las bobinas empleadas en los transductores como en aquellas creadas con la finalidad de experimentar, fue utilizado un dispositivo electromecánico embobinador creado por el Instituto de Ingeniería de esta Universidad, desarrollando además otro equipo que nos permite la obtención de las curvas de transferencia del transductor (desplazamiento vs. voltaje). Este calibrador puede ser apreciado en la figura 15 y consiste en una base acrílica que soporta al transductor en un extremo y



Acotaciones en mm.

FIG.14 DIMENSIONES DEL PRIMER L.V.D.T.

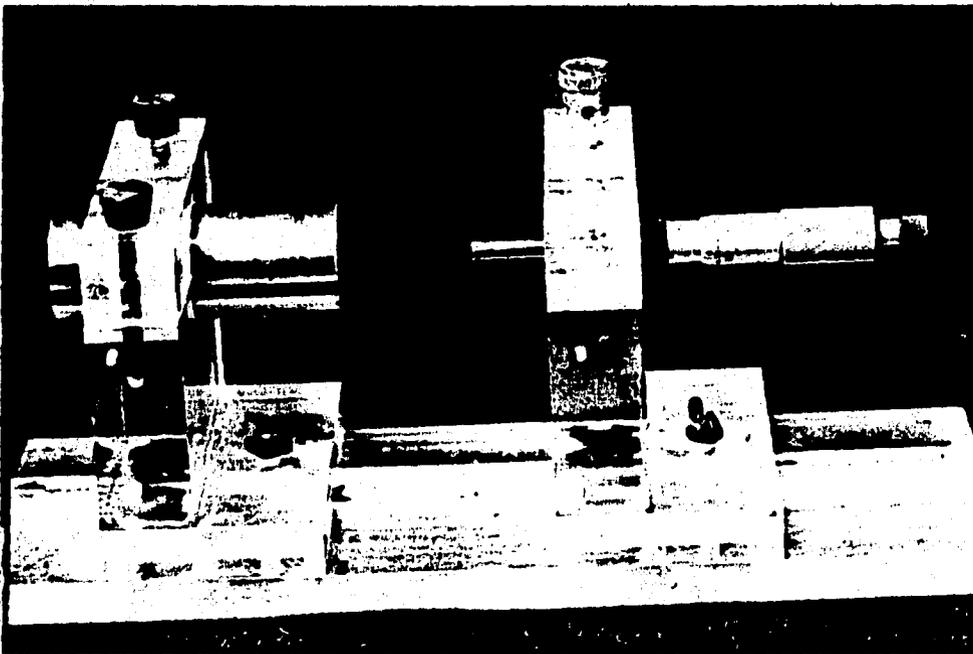
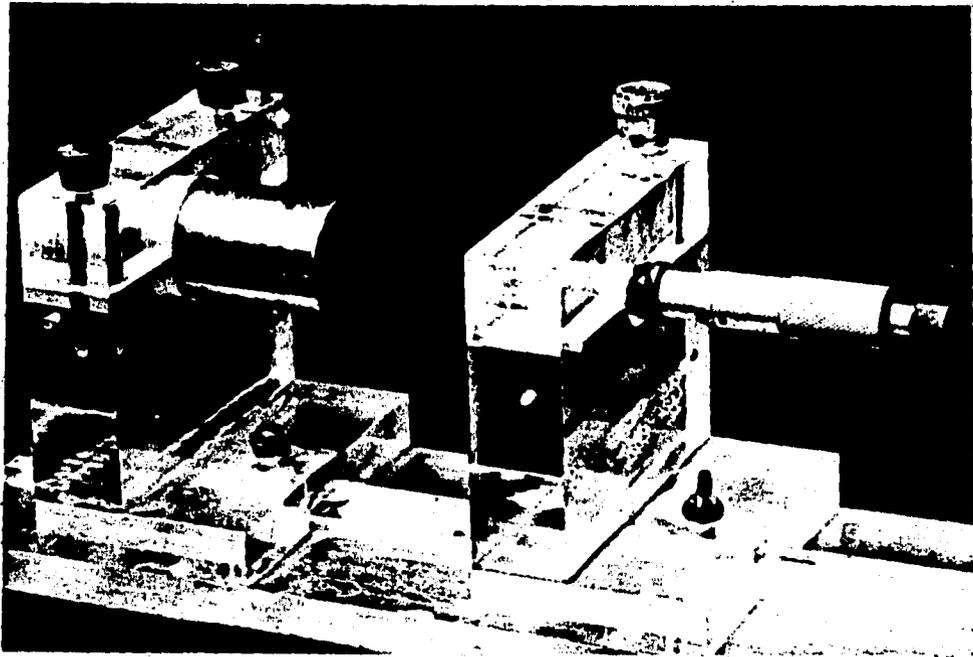


FIG. 15 FOTOGRAFÍAS DEL APARATO CALIBRADOR.

a un micrómetro acoplado al núcleo en el otro, también cuenta con tornillos que permiten hacer un ajuste en el desplazamiento para la obtención de cero.

### 3.2 CALIBRACION DE LOS L.V.D.T.

Un aspecto importante para usar adecuadamente al transductor, es conocer su comportamiento por medio de la curva de transferencia o curva de calibración. Esta curva expresa la respuesta del transductor para cada valor del desplazamiento del núcleo. El equipo requerido para la obtención de dicha curva es una fuente regulada de voltaje variable de corriente directa que cubra la gama de 6 a 18 voltios y capacidad de 150 mA aproximadamente, un voltímetro de directa, el calibrador y el transductor.

El procedimiento es el siguiente: Se fija en el transformador a la base del calibrador y el vástago del núcleo al micrómetro. La fuente de voltaje ajustada a 12 voltios se conecta a las líneas de alimentación del transductor y el voltímetro a las de salida como podemos observar en la figura 16. Se enciende el equipo de 15 a 30 minutos antes de hacer la calibración con la finalidad de que se estabilice y alcance su temperatura de operación. El micrómetro se fija en la posición cero, posteriormente deslizando cuidadosamente el cuerpo del transformador buscamos el cero con el voltímetro; fijamos estas condiciones y procedemos a deslizar el núcleo por medio del micrómetro, tomando nota de los valores leídos en el voltímetro a intervalos regulares de distancia. Este proceso se realiza para desplazamientos positivos y negativos, también en sentido ascendente y descendente para conocer su histéresis en caso de existir. Con el fin

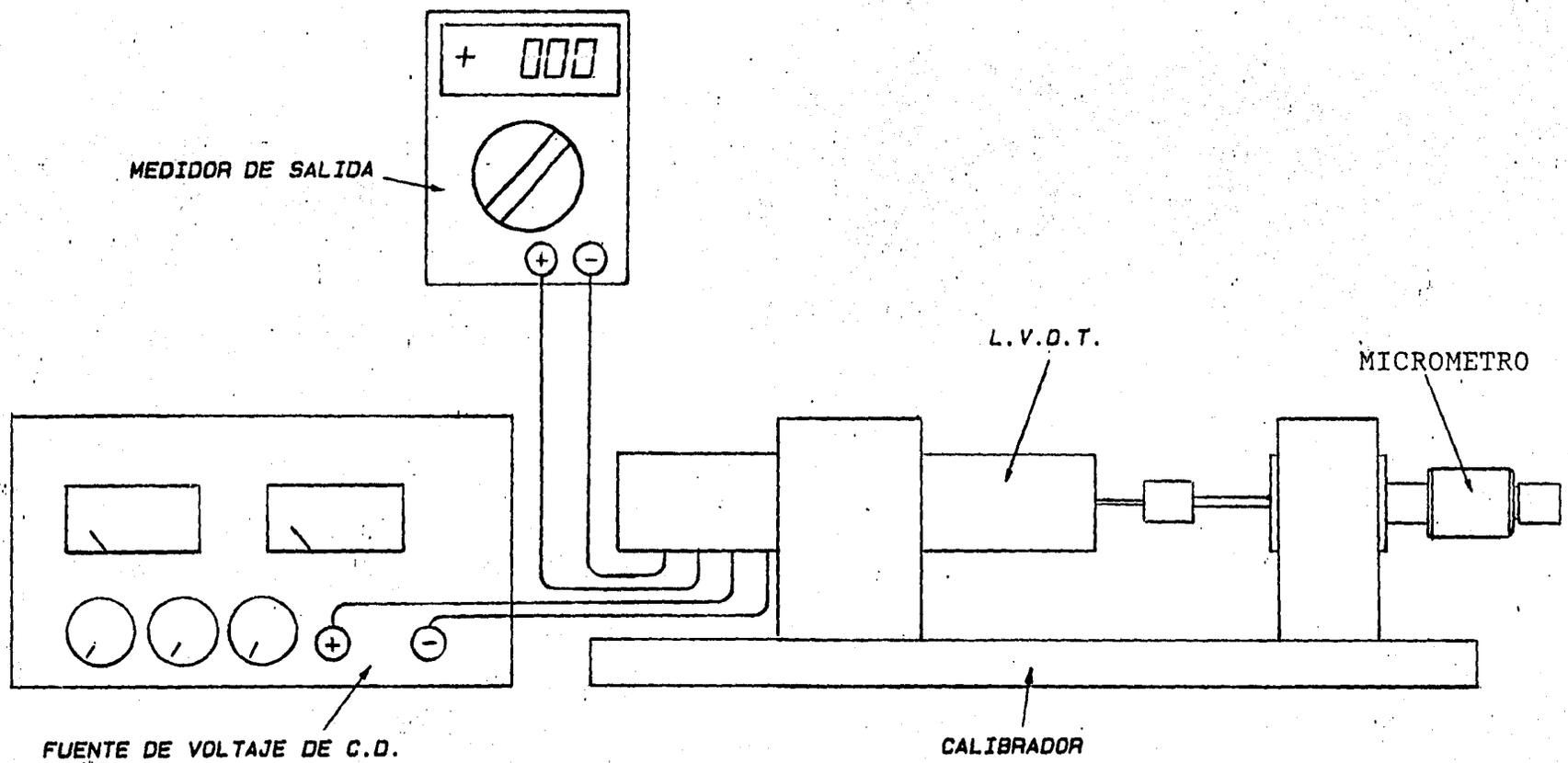


FIG. 16 EQUIPO Y CONEXIONES PARA REALIZAR UNA CALIBRACION.

de disminuir el error en la toma de datos podemos registrarlos varias veces y obtener un valor final promediado que representa el valor que tiene mayor probabilidad de ser reproducido con el instrumento bajo las mismas condiciones.

En la figura 17 tenemos la curva de respuesta del primer prototipo, se puede apreciar en sus extremos una deformación, pero el intervalo comprendido entre -13.5 y 13.5 mm puede considerarse lineal presentando una desviación máxima de 4.2 % (alinealidad).

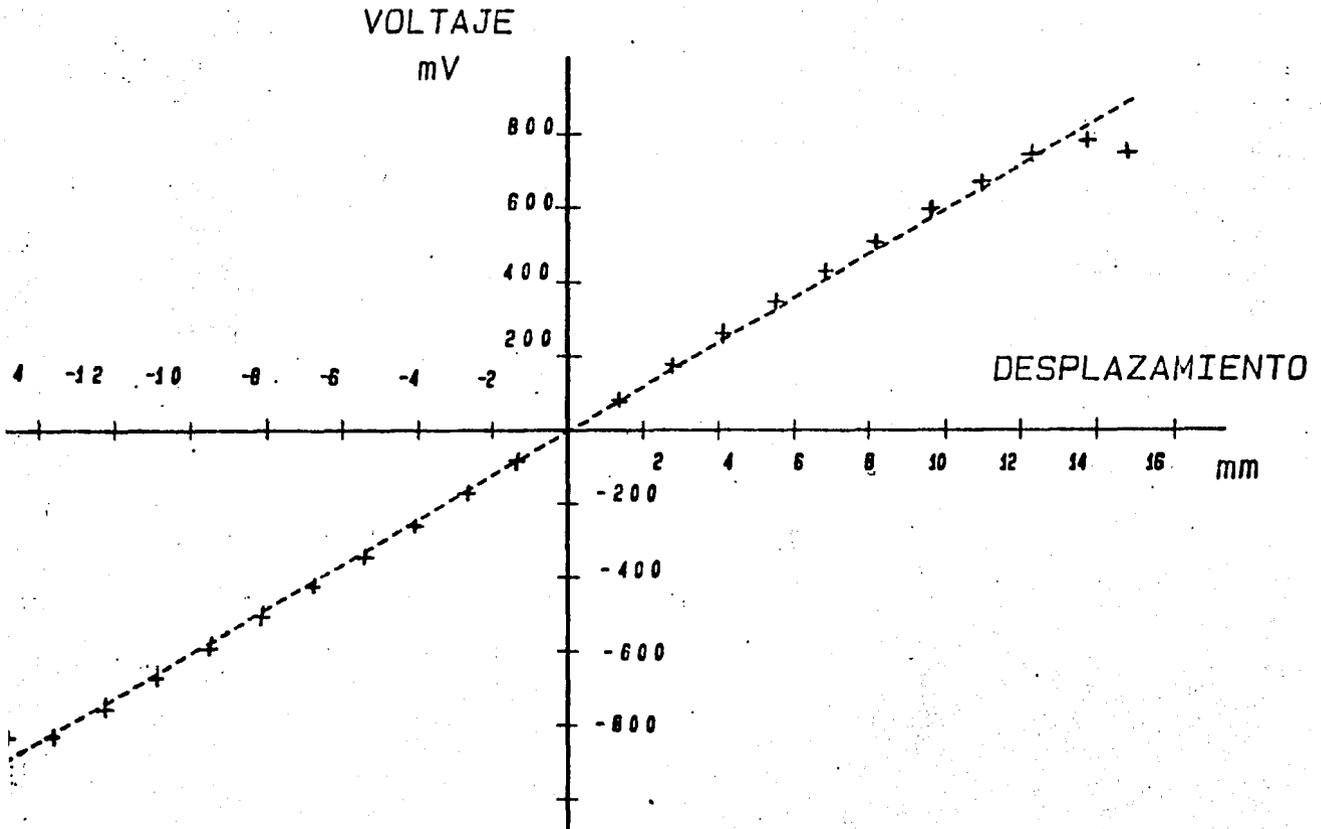


FIG.17 CURVA DE RESPUESTA DEL PRIMER PROTOTIPO.

Con el objeto de conocer la repetibilidad del transductor y su sensibilidad ante diversos parámetros, requerimos variarlos en forma individual y controlada. Sin embargo, dada la dificultad para realizar esta prueba, fue simplificada tomando registros frecuentes sobre su estabilidad durante periodos de 24 y 48 hr, eliminando en el proceso únicamente al aparato calibrador y dejando fijo el núcleo del transformador.

La variación obtenida en los registros representa la inestabilidad del transductor, voltímetro y fuente de alimentación juntos, ante variaciones de temperatura de 8 °C aproximadamente (temperatura ambiente de  $20 \pm 4$  °C) y condiciones de presión y humedad atmosféricas. La máxima variación encontrada fue de  $\pm 6$  mV/24 hr sobre una lectura de 800 mV y suponiendo el peor de los casos en que el equipo auxiliar fuera totalmente estable, la variación correspondiente al transductor por periodos de 24 y 48 hr sería de 0.75 % de la escala completa.

### 3.3 CONSTRUCCION DE NUEVOS PROTOTIPOS

Para la fabricación de los nuevos transductores se tomaron en cuenta algunos aspectos interesantes observados en el primero y que podemos resumir de la siguiente manera:

Inicialmente fue colocado un tubo de material conductor eléctrico y no magnético en el exterior del transformador con la finalidad de aumentar su resistencia mecánica contra impactos y mejorar la linealidad en su respuesta, se observó que al colocar uno más delgado con las mismas propiedades entre el transformador y el núcleo, el transductor se comporta aún más lineal. Un

aspecto significativo es que tanto el material magnético como el no magnético deben tener excelente homogeneidad como en el caso de los aceros inoxidables austeníticos (material no magnético) y ferríticos o perlíticos (material magnético).

Por otra parte, observamos un ligero calentamiento en el núcleo del transformador después de algún tiempo de encendido, si esto se hace excesivo podemos llegar a temperaturas que afecten el buen funcionamiento de los circuitos electrónicos o capaces de deformar el soporte acrílico. Este fenómeno se atribuye a corrientes parásitas en el núcleo y podemos disminuirlo considerablemente variando la frecuencia de excitación.

Estos prototipos se construyeron sobre carretes de acrílico y empleando circuitos electrónicos similares al anterior. Los transformadores difieren en sus dimensiones y en las bobinas de los secundarios y presentan las siguientes características:

TABLA IV

Tensión de alimentación (VCD)			12
Consumo de potencia (watts)			0.5
Consumo de corriente máx. (mA)			45
No. vueltas bobina primaria			2 000
No. vueltas bobina secundaria	600	3000	6 000
Intervalo de medición (mm)	0.5	5	25
No. vueltas bobina de polarización			300

En las figuras 18 y 19 podemos apreciar algunos detalles sobre los transductores terminados. Las curvas de transferencia y las características de operación obtenidas aparecen en las figuras 20, 21 y 22, y en la figura 23 la correspondiente a un dispositivo comercial.

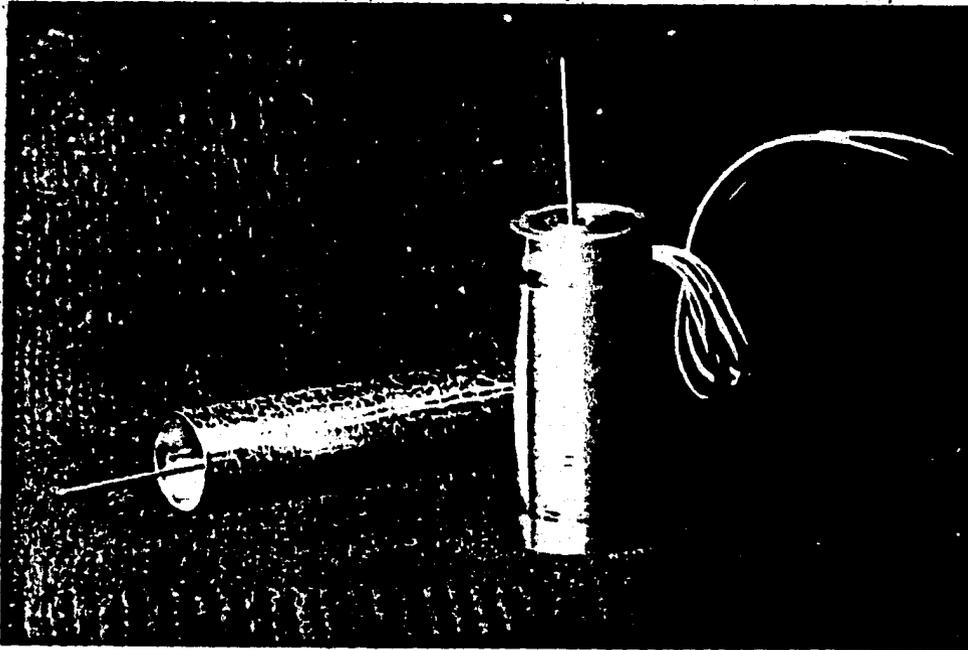


FIG. 18 FOTOGRAFIA DE DOS L.V.D.T.

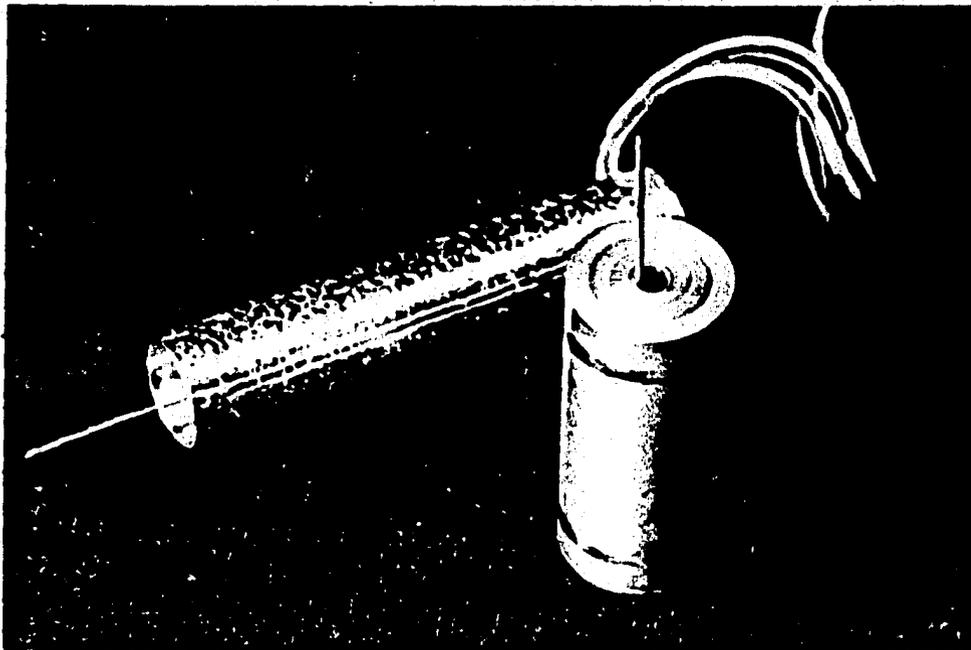
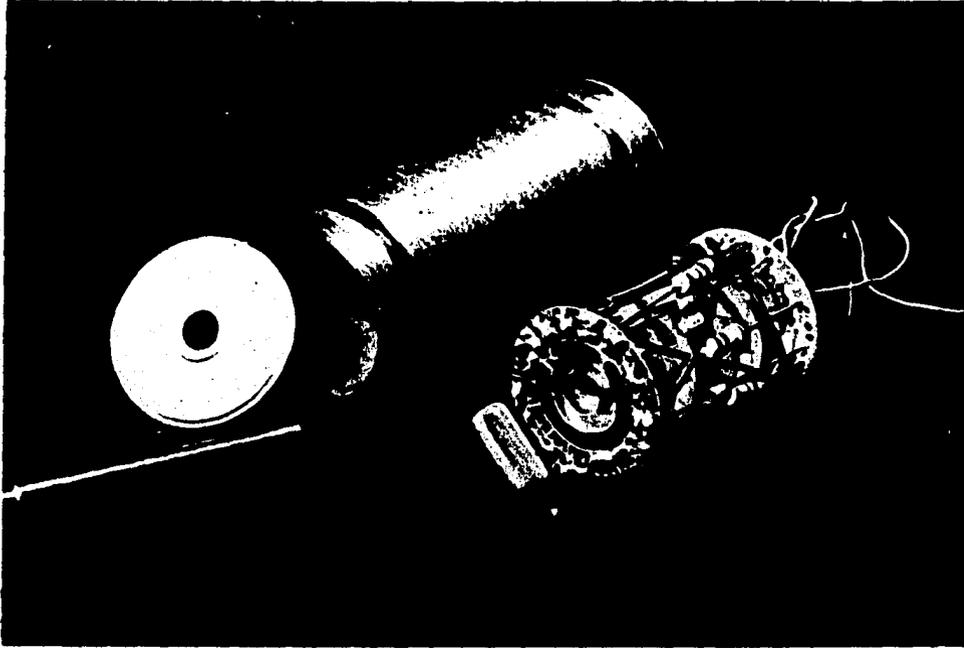
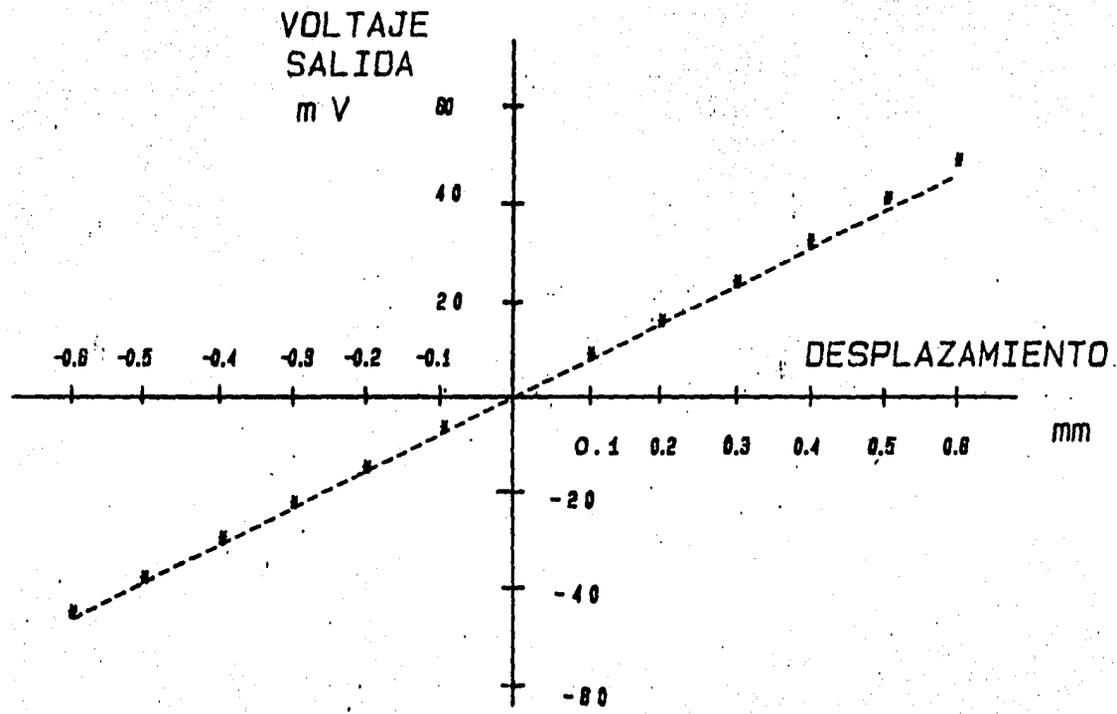


FIG. 19 FOTOGRAFÍAS DE LA PARTE INTERIOR Y EXTERIOR DE LOS TRANSDUCTORES.

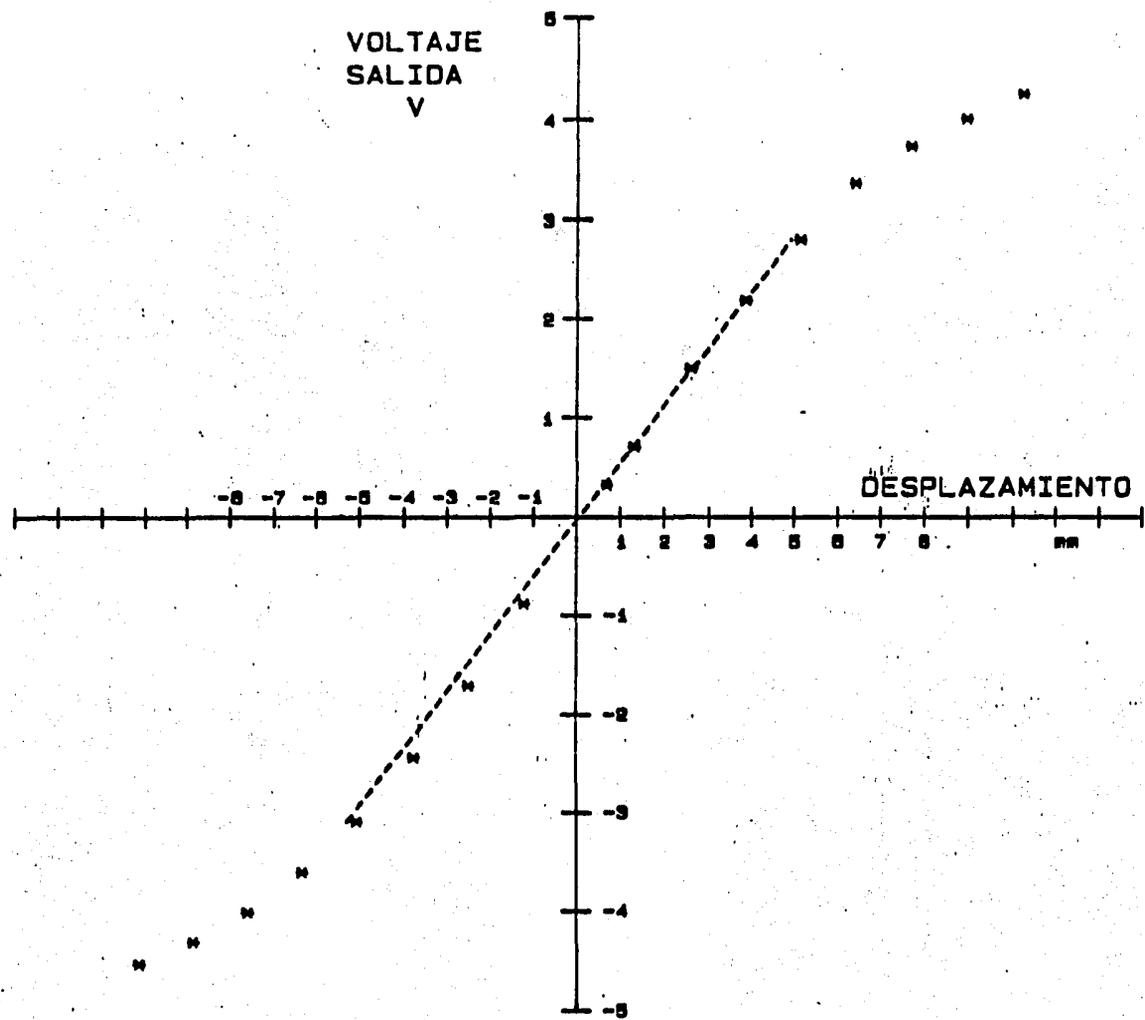


\*\*\*\*\* COMPORTAMIENTO REAL

----- COMPORTAMIENTO IDEAL

L.V.D.T. # 2	
Intervalo de medición	+ 0.5 mm
Longitud total	83 mm
Diámetro externo	32 mm
Núcleo # 2	
Longitud	22 mm
Diámetro	5 mm
Alinealidad	6.3 %

FIG.20 CURVA DE RESPUESTA DEL L.V.D.T. No. 2



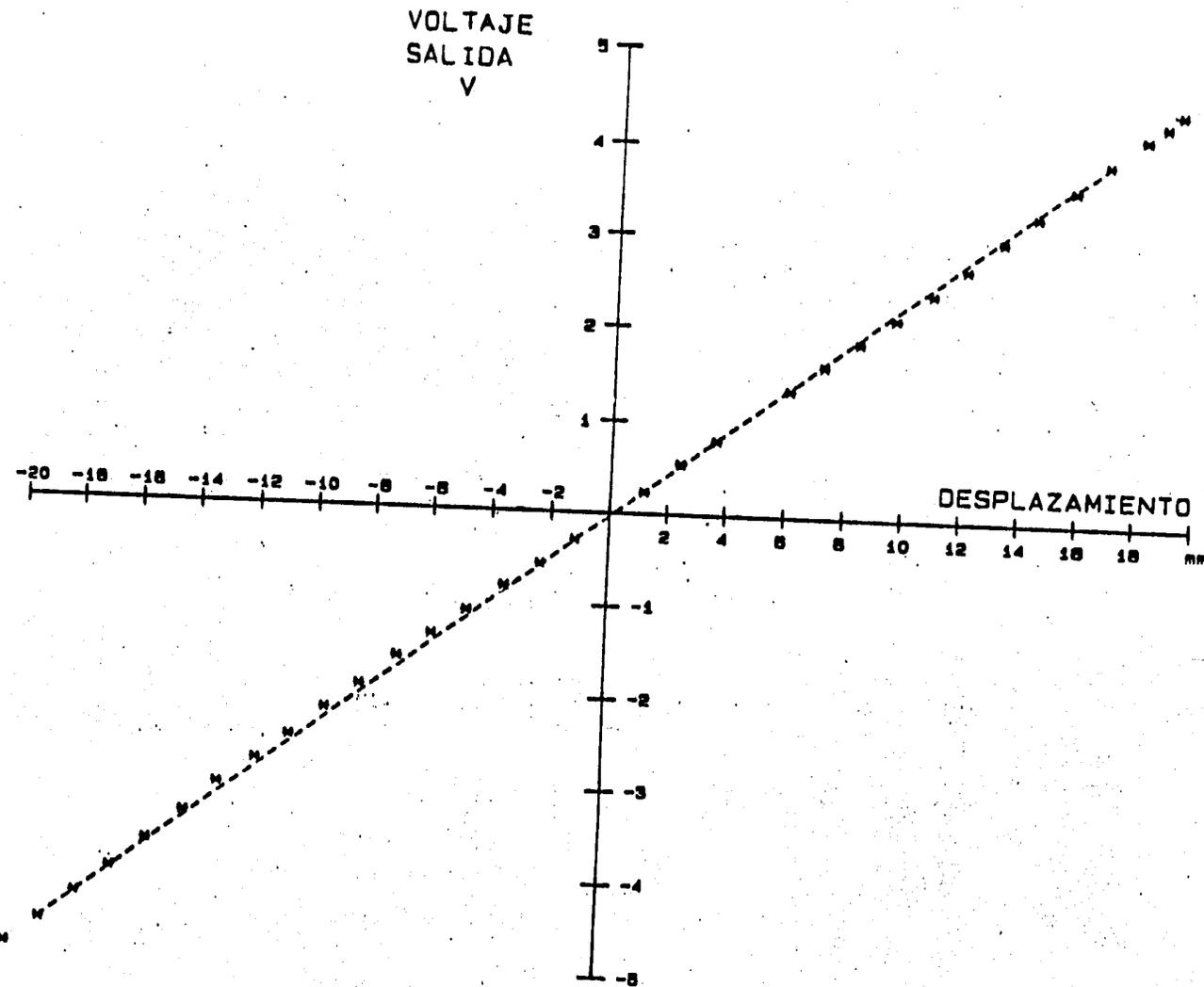
\*\*\*\*\* COMPORTAMIENTO REAL

----- COMPORTAMIENTO IDEAL

L.V.D.T. # 3  
 Intervalo de medición  $\pm 5$  mm  
 Longitud total 80 mm  
 Diámetro externo 32 mm  
 Núcleo # 3  
 Longitud 32 mm  
 Diámetro 5 mm  
 Alinealidad 3,9 %  
 Variación máxima\* 0.6 %/24 hr

\* medida en las mismas condiciones que en el primer prototipo.

FIG.21 CURVA DE RESPUESTA DEL L.V.D.T. No. 3



L.V.D.T. # 4

Intervalo de medición  $\pm 25$  mm

Longitud total 120 mm

Diámetro externo 32 mm

Núcleo # 4

Longitud 70 mm

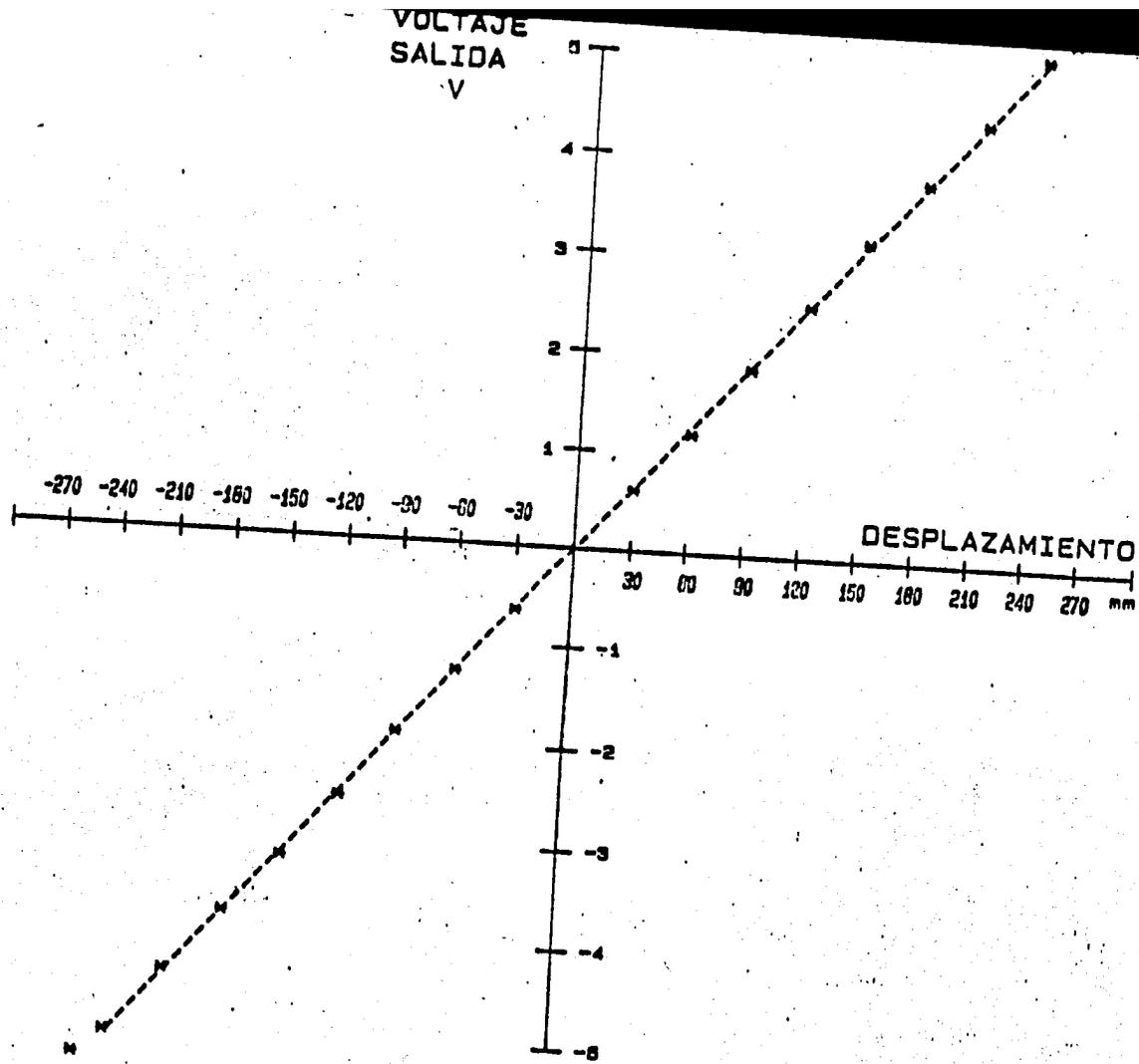
Diámetro 5 mm

Alinealidad 3.6 %

Variación máxima\* 0.4 %/24 hr

\* medida bajo las mismas condiciones que en el primer prototipo.

FIG.22 CURVA DE RESPUESTA DEL L.V.D.T. No. 4.



\*\*\*\*\* COMPORTAMIENTO REAL  
 ----- COMPORTAMIENTO IDEAL

L.V.D.T. comercial  
 Intervalo de medición  $\pm 1$  pulg  
 Longitud total 89 mm  
 Diámetro externo 18 mm  
 Alinealidad 4.3 %

FIG.23 CURVA DE RESPUESTA DE UN L.V.D.T. COMERCIAL.

## CONCLUSIONES

Al evaluar las características operativas de los transductores desarrollados, observamos que presentan un comportamiento adecuado-comparable al de dispositivos semejantes de importación.

Estos transformadores diferenciales son el resultado de una gran cantidad de información organizada y aplicada. Sin embargo, debemos ser conscientes que, aún cuando hemos obtenido buenos resultados, la investigación sólo podemos considerarla terminada a nivel básico, pues según hemos visto a lo largo del trabajo los experimentos realizados sólo son una parte de lo que se pudiera llegar a hacer.

Algunos de los aspectos más significativos que pueden ser de utilidad en la fabricación de nuevos transformadores diferenciales son los siguientes:

Las características de repetibilidad y linealidad en la transferencia del transductor dependen principalmente de la estabilidad de los circuitos electrónicos, de la simetría en las bobinas y de las propiedades de los materiales empleados en el transformador, como la homogeneidad,

Se observó que el empleo de tubos de material conductor eléctrico y no magnético en el interior y exterior del transformador mejoran la linealidad.

La forma de onda en la señal excitadora prácticamente no altera el valor de la linealidad del transductor cuando se emplea el circuito demodulador de corriente directa.

En la construcción del transformador las bobinas secundarias deben devanarse en los extremos de la primaria y tan parecidas como sea posible. Su separación no es crítica pero debe ser igual para ambas.

Cuando se emplee un devanado auxiliar debe colocarse concéntricamente sobre el primario.

La longitud de las bobinas secundarias debe ser igual a la distancia máxima que se desea medir.

El material del núcleo debe ser magnético y el del vástago que lo sujeta no magnético, ambos con gran homogeneidad al igual que todos los materiales restantes en el transformador.

Con base en las características evaluadas podemos suponer que los transformadores diferenciales desarrollados se comportan adecuadamente para la mayoría de las aplicaciones. Esperamos que con investigaciones subsecuentes se logre profundizar un poco más en el conocimiento de estos dispositivos de medición.

## LIBROS CONSULTADOS

Alloca, John A. y Stuart, Allen. Transducers theory and applications; Reston, Virginia, Reston Publishing Company Inc., 1984  
498 p.

Baumeister, Theodore. Manual del ingeniero mecánico de Marks, Traductor: Santiago Alonso, 1a Edición en español, 2 volúmenes, México, Unión Tipográfica Editorial Hispano Americana, 1980

Captador de desplazamientos GM 5537 y Captador de deformaciones GM 5538 Philips, s.p.i., 12 p.

Discrete Databook, Santa Clara, California, National Semiconductor Corporation, 1978

Holman, J.P. Métodos experimentales para ingenieros, Traductores: José de Jesús Vega Jiménez y Carlos Roberto Duarte Muñoz, México, Libros McGraw-Hill de México S.A. de C.V., 1979, 448 p.

Kaufman, Milton y Seidman, Arthur H. Manual para ingenieros y técnicos en electrónica. Diagramas, curvas, tablas y gráficas, Traductor: Agustín Contin Sanz, Revisión técnica: Francisco Hernández Rangel y Salvador Alvarez Ballesteros. México, Libros McGraw-Hill de México S.A. de C.V., 1982

Linear Databook, Santa Clara, California, National Semiconductor Corporation, 1982

Malvino, Albert Paul. Principios de electrónica, Traductor: Caupolicán Muñoz Gamboa, Revisión técnica: Salvador Alvarez Ballesteros, México, Libros McGraw-Hill de México S.A. de C.V., 1983, 782 p.

Markus, John. Modern electronic circuits reference manual, New York, McGraw-Hill Book Company, 1980, 1238 p.

Peters, Rodolfo. Desarrollo de tecnología básica para la fabricación de transformadores diferenciales de variación lineal, México, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 1984, 23 p.

Prensky, Sol D. Electronic Instrumentation, 2nd Edition, New Jersey, 1971, 536 p.

Van Der Ziel, Aldert. Electrónica física del estado sólido, Traductor: Juan L. Hernández Sánchez, México, Editorial Prentice, 1972

Wood handbook: wood as an engineering material, Washington D.C., Forest Products Laboratory Forest Service U.S. Department of Agriculture, 1974