

64
207



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

TRASNDUCTOR CAPACITIVO PARA UNA MAQUINA DE MEDIR POR TRES COORDENADAS

T E S I S

Que para Obtener el Título de:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A

JOAQUIN REYMUNDO HERNANDEZ MORALES

Director de Tesis

ING. JOSE SANCHEZ VIZCAINO

México, D. F.

1989

FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

INDICE GENERAL DE LA TESIS:
TRANSDUCTOR CAPACITIVO PARA UNA
MAQUINA DE MEDIR POR TRES
COORDENADAS.

1.- INTRODUCCION.	
EL PORQUE DE UNA MAQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS.	2
1.1.- DEFINICION DE TERMINOS.	5
1.2.- LA METROLOGIA EN UNA, DOS Y TRES DIMENSIONES.	5
2.- ARQUITECTURA DE UNA MAQUINA DE MEDICION POR COORDENADAS.	12
2.1.- INFRAESTRUCTURA MECANICA.	12
2.2.- INFRAESTRUCTURA ELECTRONICA.	15
2.3.- LAS MICROCOMPUTADORAS COMO SOPORTE DE LAS HMC.	22
2.3.1.- NIVELES DE AUTOMATIZACION.	30
3.- DESARROLLO DE UNA CABEZA DE PALPACION DE TRES DIMENSIONES. SEIS DIRECCIONES.	33
3.1.- CARACTERISTICAS DE LAS CABEZAS TRANSDUCTORAS SOBRE LAS DISPARADORAS.	34
3.2.- TRANSDUCTORES DE UNA, DOS Y TRES DIMENSIONES.	36
3.3.- ARQUITECTURA DEL DESARROLLO DE ESTA TESIS.	40
3.3.1.- VENTAJAS CONSTRUCTIVAS DE LOS TRANSDUCTORES CAPACITIVOS.	52
3.3.2.- POSIBILIDAD MECANICA DE SEIS GRADOS DE LIBERTAD.	55
3.3.3.- SISTEMAS DE MEDICION POR VARIACION DE CAPACITANCIA.	57
3.3.3.1.- FORMA Y FUNCIONAMIENTO DEL CAPACITOR.	59
3.3.3.2.- CIRCUITOS MEDIDORES DE LA VARIACION DE CAPACITANCIA: CIRCUITO PUENTE.	76
3.3.3.3.- MEDICION DE CAPACITANCIA POR MEDIO DE OSCILADORES DE CAPACITANCIA VARIABLE.	78
3.3.3.4.- MEDICION DIRECTA DE $f_0 + \Delta f$ COMO FUNCION DE ΔL .	80
3.3.3.5.- MEDICION DIFERENCIAL A PARTIR DE OSCILADOR PATRON CONTRA OSCILADOR DE CAPACITANCIA VARIABLE.	84
3.3.3.6.- DISPOSITIVOS DE SALIDA.	101
4.- CONCLUSIONES: EXPECTATIVAS QUE OFRECEN LOS TRANSDUCTORES CAPACITIVOS DE TRES DIMENSIONES.	105
BIBLIOGRAFIA GENERAL.	108

1.- INTRODUCCION: EL PORQUE DE UNA MAQUINA DE MEDICION POR COORDENADAS

Dentro de la industria existen laboratorios de Metrología. El uso de estos laboratorios es el de hacer las mediciones para el control de calidad de las piezas que se hacen en estas industrias. El otro uso de estos centros es la calibración de patrones que se requieren para tales mediciones.

El trabajo que se realiza en los laboratorios de metrología dimensional o de longitud es la medición de las dimensiones de las piezas, de la circularidad de piezas cilíndricas, la rectitud, del pandeo de las flechas, de la distancia entre centros de dos o más barrenos, la del grosor de los elementos a medir; la medición de diámetros internos, externos, la profundidad del barrenos, la inclinación de las perforaciones, la diferencia entre dos barrenos concéntricos, el paralelismo entre varias superficies, la medición de ángulos. Existe también la necesidad de medir piezas de geometría más complicada como pueden ser las levas, álabes de una turbina, engranes, en fin, elementos con superficie y volúmenes especiales. La medición de engranes es muy compleja, en especial la medición del engrane hipocíclo que posee una geometría muy compleja.

Para realizar estas mediciones se emplean instrumentos especiales tales como los micrómetros, el vernier, calibradores pasa no pasa, estos instrumentos se usan para medir distancias entre superficies paralelas. Los hay que miden barrenos internos. Se usan reglas plano paralelas para ver como está el paralelismo y la rectitud en los ejes de la máquina. En fin, hay aparatos especiales para cada medición específica.

De esta forma se tiene un aparato de medición diferente para cada parte a medir. Pero cuando se quiere medir piezas muy complejas, por ejemplo un engrane hipocíclo, un álabes, o una hélice de avión, el aparato y la técnica de medición se complican también.

Las mediciones en la industria actual requieren de tolerancias muy críticas, del orden de las micras algunas veces. Si tenemos que medir los álabes de una turbina, debemos de resolver varios problemas. Primero, la geometría de la pieza nos obliga a disponer de aparatos especiales. Estos aparatos, a su vez, darán pauta para la utilización de técnicas especiales para la medición. Luego, tenemos las tolerancias, que en este caso son muy críticas. Otro ejemplo de medición crítica lo tenemos en las cajas de velocidades de automóviles. Tenemos aquí barrenos que son puntos de apoyo a engranes con piñones a 90° y que tienen que ser rigurosamente medidos.

Por los anterior, tendremos un instrumento que nos verifique las tolerancias pedidas, a fin de cumplir con los controles de calidad que se exigen en la actualidad.

Podemos realizar la medición con aparatos comunes como el micrómetro, el vernier, etc. Pero la exactitud, cuando se habla de micras, no se consigue con estos aparatos. Tendremos problemas, si el tiempo empleado para la medición es más lento que la velocidad de la línea de producción. Esto se debe a que no se dispone de tiempo suficiente para un control adecuado. Las piezas por lo general se

montan en soportes que cambian de orientación para medir otras superficies de la pieza. Tendremos que cambiar a otros instrumentos que permitan hacer la medición de partes complejas. Todo esto es una limitante para hacer una medición rápida.

Se hace necesario, reducir o eliminar los siguientes problemas:

- Los tiempos de lectura de las mediciones.
- El frecuente cambio de posición de la pieza para medir otros lados del mismo.
- La falta de exactitud.
- Errores humanos y los propios del equipo.

La necesidad de simplificar estos y otros puntos, originó la creación de las "Máquinas de Medición por Coordenadas" (MMC). Por su concepción es uno de los aparatos de medición más útiles en la actualidad. Su principio de funcionamiento se basa en conocer el lugar en donde está una punta de prueba o palpador según uno, dos o tres ejes coordenados (x, y, z). En el año de 1950 se presentó una máquina de dos ejes en la Exhibición de Máquinas de Bruselas, Bélgica. Con esta máquina se obtenía una precisión de ± 0.005 pulgadas (12.70 μm).

Desde 1961 estas máquinas han sido mejoradas año con año, constantemente. Muchos fabricantes ofrecen equipos muy completos, con diseños que se han ido modernizando. Con el advenimiento de las computadoras se mejoró considerablemente la potencia de la máquina. Fueron posibles métodos de control muy confiables y también permitió el desarrollo de programas para la medición de piezas complejas.

En sus principios la máquina daba sus lecturas por medio de una consola. Con esta consola se tenía la limitante de que ésta consola daba sus lecturas únicamente en pulgadas o en milímetros. Actualmente el despliegue se realiza en el monitor de un computadora, más la opción de un impresora o de una graficadora. Las lecturas pueden darse en pulgadas o en milímetros, según sean las necesidades del operador. Se mantiene una comunicación continua entre la máquina y el operador, esto permite un uso más confiable del equipo. Es posible el ajuste a cero de una manera rápida, por programa, o por la consola de control, es también posible el consultar el punto de origen en cualquier parte de la medición. Con esta máquina es posible la medición de cualquier geometría, con la única limitante de que el palpador pueda tocar su superficie; sin mover la pieza de su lugar.

Las ventajas de usar una máquina de medición por coordenadas son:

- a).- El personal que mide no necesita leer sólo en una dimensión, puede leer las tres dimensiones si así lo desea.
- b).- El proceso de medición no es dependiente de la experiencia del que mide.
- c).- Con esta máquina es posible la repetibilidad de la medida en cualquier momento.

- d).- Ya que la pieza no se mueve, es posible hacer la medición muy rápidamente.
- e).- La medición se realiza con una resolución de micras.
- f).- Se puede programar la medición repetida de una misma pieza o de piezas diferentes.

Con estas ventajas es posible tener las piezas de trabajo dentro de las tolerancias de los diseños.

Empezamos esta tesis con esta explicación somera de lo que es la aplicación de una MMC. Después daremos una visión en detalle de las partes que contiene para su uso en los laboratorios y en la industria.

1.1 - DEFINICION DE TERMINOS.

Para poder hablar y entenderse es necesario un lenguaje común. Si no entendemos o no sabemos lo que dice alguien o lo que se dice acerca de algo no podremos comunicarnos bien. Pretenderemos dar algunos significados de términos más comunes usados a lo largo de esta tesis.

Uno de los términos más comúnmente ocupados en el campo de la metrología es el que se refiere a la "magnitud" que definimos como el atributo de un fenómeno, de un cuerpo o de una sustancia que se puede distinguir cualitativamente y determinar cuantitativamente.

El valor de una magnitud es una expresión, en unidades de medida, de las características geométricas de un cuerpo con las cuales se puede conocer su forma y su tamaño. Comúnmente a este concepto se le conoce como Dimensión.

Unidad es el valor de una magnitud para la cual se admite, por convención, que su valor numérico es igual a 1.

Se llama Patrón al instrumento de medición destinado a definir o materializar, conservar o reproducir la medida de una magnitud o un múltiplo o submúltiplo de esta unidad para reproducirlo por comparación a otros instrumentos de medición.

La máquina, objeto de esta tesis, está destinada a medir longitudes, superficies y volúmenes. La unidad de la magnitud longitud es el metro, la mayoría de las medidas que usamos en la metrología son submúltiplos del metro, por lo general milímetros o micrómetro, que por economía en el lenguaje, se conoce como micra. El Patrón metro se puede definir del modo siguiente:

La unidad de longitud es el trayecto recorrido en el vacío por la luz durante una duración de

$\frac{1}{299\,792\,458}$ de un segundo.

1.2 LA METROLOGIA EN UNA, DOS Y TRES DIMENSIONES.

La metrología es el campo de los conocimientos relativos a las mediciones.

Los principales campos de la metrología atañen a las unidades de medida y sus patrones (su establecimiento, reproducción, conservación y diseminación). La lista que sigue es la forma en que se dividen los diferentes campos de las mediciones.

Los mediciones (sus métodos, su ejecución, la estimación de su precisión, etc.)

Los instrumentos de medición (sus propiedades encaminadas desde el punto de vista de su utilidad final).

Los observadores (sus cualidades referidas a la ejecución de mediciones, por ejemplo la lectura de indicaciones de instrumentos de medición).

La metrología abarca todos los problemas tanto teóricos como prácticos relacionados con las mediciones y a la precisión de las mismas.

Según la magnitud considerada, la metrología se divide en: metrología dimensional (de longitud o geométrica), metrología de tiempo, etc. Según el campo de aplicación, en Metrología Legal, Metrología Industrial y Metrología Científica.

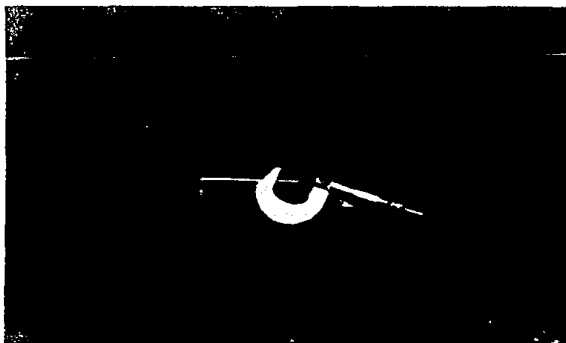
La metrología dimensional o de longitud se puede realizar en una dimensión, en dos dimensiones o en tres dimensiones. En cada una de estas aplicaciones se utilizan aparatos diferentes. Veremos brevemente, los aparatos y su uso para cada una de las dimensiones a medir.

METROLOGIA EN UNA DIMENSION.

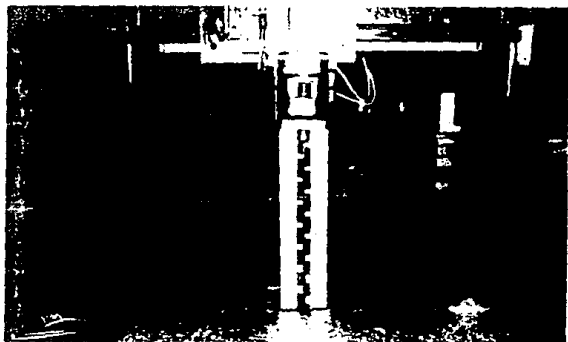
Para medir en una dimensión, se pueden utilizar desde una simple regla con una incertidumbre de ± 1 mm; un vernier cuya incertidumbre puede llegar a ± 0.1 mm; un micrómetro con ± 0.015 mm de incertidumbre. El más exacto patrón de altura cuyo error límite es de ± 2 μ m y los bloques patrón con una incertidumbre de ± 0.15 μ m. Los bloques patrón son útiles para diseminar la exactitud.



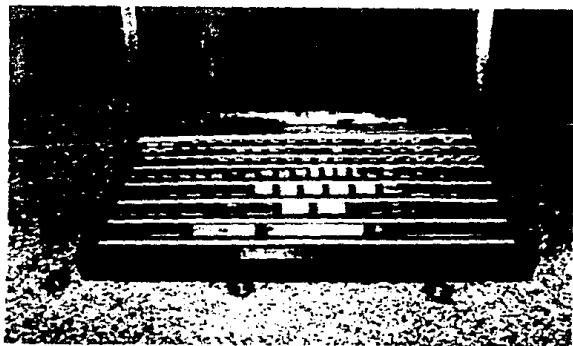
VERNIER



MICROMETRO.



PATRON DE ALTURAS



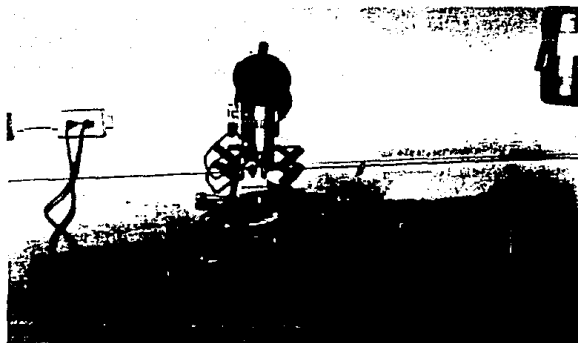
BLOQUES PATRON.

METROLOGIA DE DOS DIMENSIONES.

Para medir contornos y superficies de todo tipo de piezas se utilizan dos aparatos: el comparador óptico y el microscopio. El comparador óptico se utiliza con piezas iluminadas ya sea por la parte inferior o por la parte lateral. Se proyecta la imagen en una pantalla y se compara con una plantilla graduada o con un dibujo muy bien definido de la pieza que se desea medir. Para medir con el microscopio ponemos la pieza que se va a medir en la mesa, la cual tiene unos tornos micrométricos; por medio del ocular con retícula vemos en dónde empieza la medida y la terminación de la misma.



COMPARADOR OPTICO



MICROSCOPIO DE DOS DIMENSIONES

METROLOGIA EN TRES DIMENSIONES.

Para realizar la medición en tres coordenadas se utiliza una Máquina de Medición por Coordenadas (MMC). Las mediciones que principalmente se pueden realizar en esta máquina, es la medición de cuerpos que ocupan un espacio de tres dimensiones, o un volumen, como una superficie espiral o una superficie cónica entre otras. Esta medición es muy necesaria en el control de calidad de algunos procesos industriales. Otra medición que se puede llevar a cabo es la medición de longitudes y de superficies. Con esta máquina podemos hacer las funciones que realizan los instrumentos para medir en una o en dos dimensiones.

Para medir con esta máquina movemos una referencia. Esta referencia se llama punta de palpación o simplemente palpador. El palpador se mueve en el campo de una mesa de granito. Esta mesa constituye un plano o nivel de referencia, con un error de planitud del orden de 1 a 2 micras en toda la superficie. La mesa es también muy rígida, en ella se monta la pieza que se ha de medir, el palpador se pone en un punto de la pieza a medir que se define como origen. De este origen se comienza con las lecturas de puntos ya definidos o se procede a hacer un barrido o a scanning con trayectorias (frecuentemente en planos paralelos) previamente definidos. Las lecturas van a una computadora que toma los datos y los procesa según las necesidades del operador. Con las lecturas es posible hacer una reproducción gráfica de la pieza. Con esto podemos comparar el trazado de la máquina con un trazado teórico, lo que permite comprobar la tolerancia para el control de calidad.



MESA DE MEDICION POR COORDENADAS

2. ARQUITECTURA DE MÁQUINAS DE MEDICIÓN POR COORDENADAS.

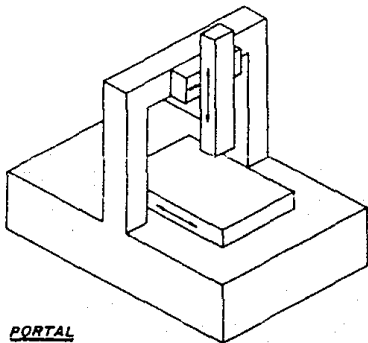
2.1 INFRAESTRUCTURA MECÁNICA.

En esta sección veremos los diferentes tipos de máquinas de medición por coordenadas. Estos tipos son los más comunes y que se ven más a menudo en el mercado, en los talleres, en las industrias y en los laboratorios de metrología. Cabe señalar que las definiciones que a continuación se dan, son de la norma: American National Standard ANSI/ASME B89.1.12M-1985: Methods for Performance Evaluation of Coordinate Measuring Machines, esta norma es aceptada casi a nivel mundial y muchas de las especificaciones de máquinas comerciales son referidas a ella.

Existen muchos tipos de MMC, sólo veremos algunos de los principales tipos como son: la de Portal, la de Puente, Brazo en Cantilever y después veremos la forma de desplazamiento.

TIPO DE PORTAL:

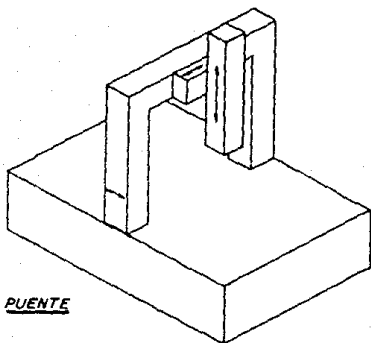
Esta máquina emplea tres componentes móviles a lo largo de tres guías mutuamente perpendiculares, la prueba se realiza con el primer componente moviéndose verticalmente con respecto al segundo. El segundo componente se mueve horizontalmente a lo largo de la estructura del puente, los ejes primero y segundo están unidos entre sí por la parte superior y por el puente a la base de la máquina. El tercer componente tiene un movimiento relativo horizontal a la base de la máquina; la pieza de trabajo es montada en el tercer componente. La figura siguiente es una imagen típica de este tipo de máquina.



PORTAL

TIPO PUENTE

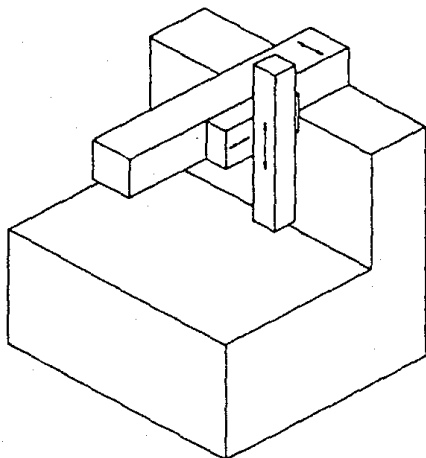
Esta máquina emplea tres componentes móviles a lo largo de guías mutuamente perpendiculares. La medición se realiza con el primer componente moviéndose verticalmente al segundo; el segundo componente se mueve horizontalmente al tercero; el tercer componente es sujetado a los lados de la base y se mueve horizontalmente a la misma; la pieza de trabajo se pone igualmente en la base. Una máquina típica es mostrada en la siguiente figura:



PUENTE

TIPO DE BRAZO EN CANTILIVER:

Con este tipo de máquina la prueba se realiza con el primer componente moviéndose verticalmente al segundo; el segundo componente se mueve horizontalmente con respecto al tercero; el tercer componente está unido por un solo lado en forma de viga en cantiliver o en voladizo, y se mueve horizontalmente con relación a la base. La siguiente figura muestra una máquina de este tipo.



BRAZO DEL CANTILIVER

TIPOS DE MOVIMIENTO

Para mover cada eje existen varios tipos:

Rodamientos Mecánicos

Desplazamiento sobre

Cojinete Neumático

Y por su manera de desplazarse:

Manual

Desplazamiento

Por servomotores

Cada tipo de máquina posee problemas de tipo mecánico. En todos los casos el movimiento se realiza desplazando gran masa. El movimiento de gran masa provoca problemas con la inercia de la máquina. A su vez la inercia provoca problemas para arrancar y parar el eje que se está moviendo. Con inercia existirá la posibilidad de que el frenado no ocurra cuando uno desea. También puede suceder que el arranque ocurra después de que se empezaron a mover otras partes de la máquina. Esto puede causar flexiones en diferentes partes de la misma. Si la deformación ocurre en un eje que tiene un transductor de longitud se entregará una lectura de medición errónea, ya sea en exceso o también en falta, esto afecta gravemente a la exactitud de la máquina.

La forma en que se desplace la máquina puede ayudar a minimizar estas lecturas erróneas. No es lo mismo que un eje se deslice a que ruede o se sostenga por aire a presión. Si la máquina se deslizará tendremos muchos problemas con la inercia. El uso de rodamientos mecánicos evita, por mucho, la fricción; lo mismo sucede con los cojines de aire. La principal ventaja del cojin de aire contra el rodamiento de tipo mecánico es que no se requiere de una fuerza que contrarreste a la fricción estática de la máquina. Con el cojinete de aire se tienen desventajas, una de ellas es que las guías que sirven para mover la máquina son muy pesadas, se hacen así para evitar las flexiones, por lo general estas guías son hechas de granito. Otra desventaja del cojin de aire es el espesor que debe de tener la capa de aire; este espesor tiene que ser controlado rigurosamente para no afectar las lecturas de los otros ejes. Las ventajas del rodamiento mecánico es que nos da una fricción residual del orden de 0.000 veces el peso del dispositivo. Esto provoca que la deformación sea pequeña y a la vez repetible en arreglos estructurales rígidos, ligeros y robustos. Todo esto es con el fin de tener bajo control la inercia de la máquina.

TIPOS DE MOVIMIENTO

Para mover cada eje existen varios tipos:

Rodamientos Mecánicos

Desplazamiento sobre

Cojinete Neumático

Y por su manera de desplazarse:

Manual

Desplazamiento

Por servomotoras

Cada tipo de máquina posee problemas de tipo mecánico. En todos los casos el movimiento se realiza desplazando gran masa. El movimiento de gran masa provoca problemas con la inercia de la máquina. A su vez la inercia provoca problemas para arrancar y parar el eje que se está moviendo. Con inercia existirá la posibilidad de que al frenado no ocurra cuando uno desea. También puede suceder que el arranque ocurra después de que se empezaron a mover otras partes de la máquina. Esto puede causar flexiones en diferentes partes de la misma. Si la deformación ocurre en un eje que tiene un transductor de longitud se entregará una lectura de medición errónea, ya sea en exceso o también en falta, esto afecta gravemente a la exactitud de la máquina.

La forma en que se desplace la máquina puede ayudar a minimizar estas lecturas erróneas. No es lo mismo que un eje se deslice a que ruede o se sostenga por aire a presión. Si la máquina se deslizara tendríamos muchos problemas con la inercia. El uso de rodamientos mecánicos evitan, con mucho, la fricción; lo mismo sucede con los cojines de aire. La principal ventaja del cojín de aire contra el rodamiento de tipo mecánico es que no se requiere de una fuerza que contrarreste a la fricción estática de la máquina. Con el cojinete de aire se tienen desventajas, una de ellas es que las guías que sirven para mover la máquina son muy pesadas, se hacen así para evitar las flexiones, por lo general estas guías son hechas de granito. Otra desventaja del cojín de aire es el espesor que debe de tener la capa de aire; este espesor tiene que ser controlado rigurosamente para no afectar las lecturas de los otros ejes. Las ventajas del rodamiento mecánico es que nos da una fricción residual del orden de 0.003 veces el peso del dispositivo. Esto provoca que la deformación sea pequeña y a la vez repetible en arreglos estructurales rígidos, ligeros y robustos. Todo esto es con el fin de tener bajo control la inercia de la máquina.

2.2.- INFRAESTRUCTURA ELECTRONICA.

TRANSDUCTORES DE LONGITUD.

Para que un elemento de máquina pueda colocarse en posición con una exactitud aceptable con respecto a un determinado conjunto de requerimientos, es necesario establecer la magnitud de la zona muerta u holgura de los dispositivos de posicionamiento.

En las máquinas MMC es el transductor de longitud el que dicta la holgura (o backlash) que se debe incluir en el sistema de control. Esto implica que tendremos que seleccionar un elemento posicionador que esté dentro de los límites de la holgura del transductor.

Existen otras características de la máquina que influyen notablemente en la selección de un transductor de posición para su uso en una máquina de medición específica. Entre otras están las siguientes:

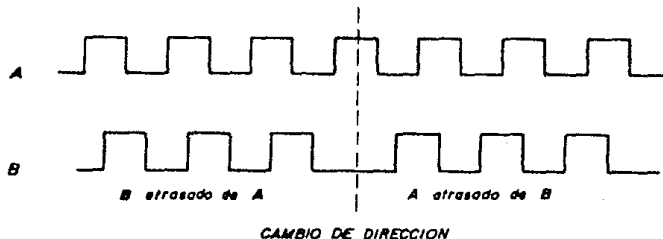
- 1.- El elemento regulado puede tener un movimiento indeseable con respecto a la base de la máquina en una dirección transversal al eje regulado de movimiento.
- 2.- Las vibraciones de la máquina pueden inducir al transductor una serie de componentes no involucrados con los datos verdaderos.
- 3.- Las contaminaciones pueden interferir con la operación del transductor. Por ejemplo el polvo o viruta de hierro pueden penetrar en la región de aire de los transductores del tipo magnético o del tipo óptico y ésta puede quedar parcialmente bloqueado.

Las características eléctricas y mecánicas individuales de los transductores que se emplean en las máquinas en la actualidad, pueden estudiarse con respecto a la exactitud propia del transductor en factores tales como la dispersión, repetibilidad, estabilidad y precisión de funcionamiento. La evaluación apropiada de estos factores conduce a los diseñadores de máquinas al empleo de transductores sobre la base de sus características de funcionamiento. Los transductores permiten establecer "diálogos de control" para mantener bajo control los efectos inerciales de los componentes de movimiento y control de la máquina, en cuanto que estos efectos disminuyen la exactitud de la máquina.

TRANSDUCTORES OPTICOS.

Los transductores de longitud del tipo óptico utilizan el principio de Moiré. Dentro del principio mencionado se hace uso de una escala marcada con bandas transparentes y oscuras. Estas marcas irán con un espaciamento que permita distinguir fácilmente las transiciones de transparente a oscura. La detección se realiza por medio de una fuente de luz y un fotodetector, la fuente de luz puede ser un foco o un led; como fotodetector usamos un fototransistor o un fotodiodo. Se pone la regla con las marcas entre la fuente de luz y el fotodetector. Cuando pase la luz por una marca transparente se tendrá una transición para que encienda el fotodetector. Al pasar por una marca oscura el fotodetector se apagará.

Existen otros tipos de transductores que usan el principio de Moiré. En este otro tipo de transductores se usan dos reglas en lugar de una. La forma de las marcas es igual. Se tendrá una regla fija y otra móvil. La detección se realiza del mismo modo que en el caso anterior. Pero tendremos una resolución mayor. Esto se debe a que se tienen las dos reglas con marcas a 90° de separación una de la otra. Esto permite leer con una resolución del doble al de una regla simple. Además se puede determinar el sentido de movimiento.



TRANSDUCTORES INDUCTIVOS.

El dispositivo de detección por medios inductivos es lo que se conoce como un LVDT (siglas en inglés de Linear Variable Differential Transformer). Se trata básicamente de un transductor electromecánico que produce una salida de voltaje de A.C. que será proporcional al desplazamiento de un centro ferromagnético. En su forma más simple son tres embobinados. El primario consiste en una bobina central. Los secundarios serán embobinados simétricos a esta bobina central. El centro se moverá libremente en forma axial dentro de la bobina central. Ver la Figura 2.2.1.

Para explicar su operación diremos que el primario es excitado por un voltaje de A.C. y los dos secundarios estarán conectados en serie pero con los sentidos de enrollamiento contrarios. El centro se mueve dentro del enrollamiento del primario, éste inducirá un voltaje en cada uno de los secundarios; los voltajes inducidos tendrán la misma magnitud pero la fase contraria. En esta posición central los dos voltajes se cancelarán excepto por un componente de cuadratura residual. En este punto el voltaje de salida es mínimo, y define el punto cero.

Cuando se desplaza el centro de su posición de punto cero se incrementa el voltaje de la bobina hacia el cual el centro se mueve así como el voltaje que queda contrario al sentido de movimiento se decrementa. (Fig. 2.2.2). De este modo un voltaje de forma diferencial a través de los embobinados secundarios se produce proporcionalmente al desplazamiento del centro. El desplazamiento en dirección opuesta producirá una salida con un corrimiento de 180° .

La figura 2.2.3 ilustra en forma vectorial los voltajes de salida. Como una referencia el voltaje P es el voltaje aplicado al primario. El voltaje Q es amplificado para dar claridad. El vector de salida S_{x1} o el vector S_{x2} , para la posición del centro y en los límites superior e inferior será la resultante Q del vector S_{x1} y del vector S_{x2} .

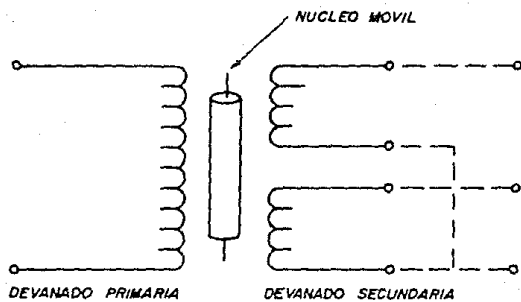


FIG. 2.2.1

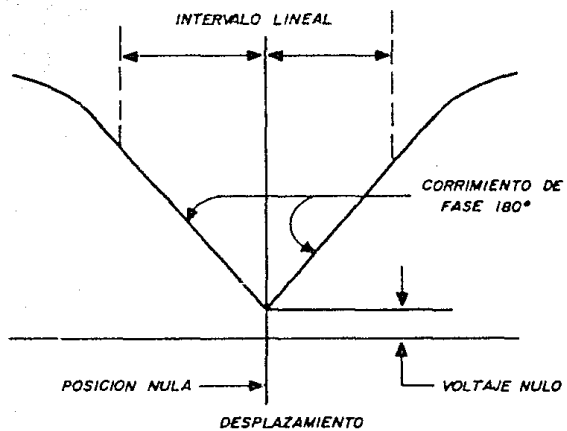


FIG. 2.2.2

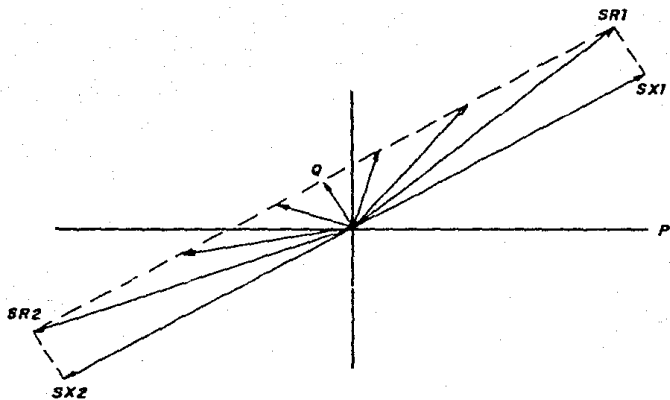


FIG. 2.2.3

CABEZAS DE PALPACION.

Tipo: Cabezas disparadoras.

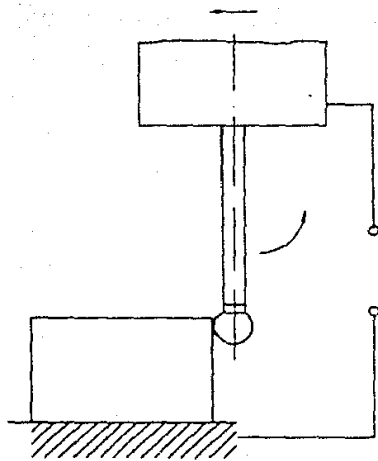
Un sistema de palpación por disparo da un medio económico para medir en máquinas herramientas, así como también en las máquinas de medición por coordenadas. En este sistema obtenemos un medio barato para obtener precisión y repetibilidad.

Existen tres tipos principales de cabezas disparadoras con un amplio rango de estilos de puntas para diferentes aplicaciones. Dependiendo de su uso, estas puntas las podemos dividir en: las de contacto eléctrico, y las de contacto en piezas no conductoras, las que a su vez se dividen en: las de transmisión de señal inductiva y las de transmisión de señal óptica.

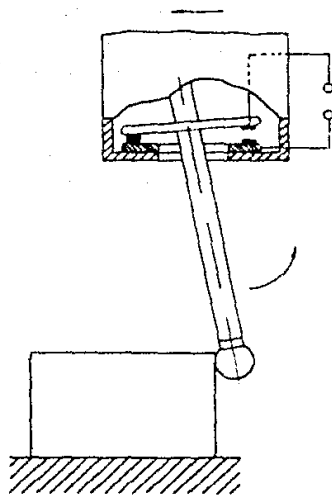
Las de contacto eléctrico son usadas, principalmente para la medición de piezas metálicas. Cuando se montan en la mesa de medición, la superficie de dicha mesa es un medio de retorno, o línea de tierra. La punta se monta en posición fija sobre el eje principal de la máquina, es puesta así para que la punta abra o cierre un circuito cuando esta toque la pieza. Es válido decir que la punta se comporta como un interruptor, este operará cuando toque o deje de tocar a la pieza.

Las puntas de disparo para piezas no conductoras se utilizan para medir piezas que son aislantes eléctricos. Por esto no podemos utilizar la superficie como un retorno de tierra. La interrupción se realiza cuando la punta toque o deje de tocar la pieza. Para la salida utilizamos un led o cualquier tipo de señal de salida. A menudo se utiliza la salida para alimentar a una computadora, con esta señal parará o en su caso arrancará la cuenta de las reglas transductoras de longitud.

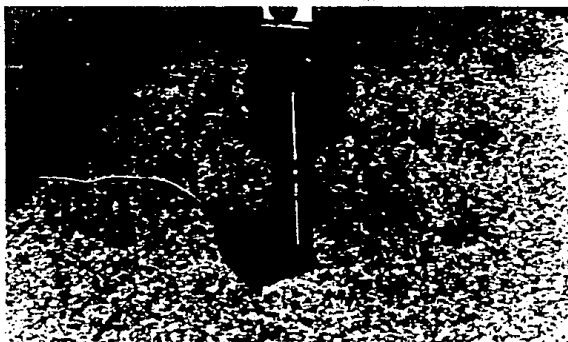
En la cabeza disparadora el palpador está puesto en la carcasa por un mecanismo de resorte sellado (spring-back). Este mecanismo protege al palpador y a sus aditamentos contra daños cuando el contacto se hace. Va montado sobre un resorte con dos apoyos en tres puntos de contacto sobre una base amplia que garantiza una excelente repetibilidad. Un sensor electrónico graba los contactos del palpador con la pieza de trabajo y estos datos son transferidos a la computadora.



CABEZAS DISPARADORAS DE CONTACTO EXTERNO



CABEZAS DISPARADORAS DE CONTACTO INTERNO

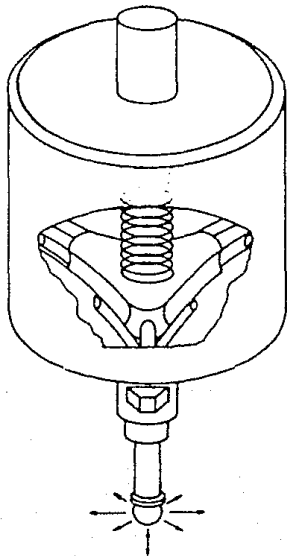


CABEZA DISPARADORA POR CONTACTO EXTERNO.

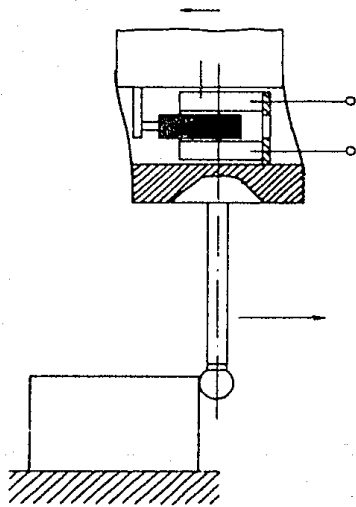
Tipo: Cabezas transductoras.

Las cabezas de palpación transductoras emplean el principio de un cambio en las características de un dispositivo elemental. Tal dispositivo puede ser un inductor, un resistor o un capacitor, los que a su vez hacen uso de las variaciones de su inductancia, resistencia y su capacitancia para representar un cambio en la longitud. Se pueden usar muchos tipos de transductores que se deforman mecánicamente, que representan ese movimiento como un cambio en el voltaje, en la frecuencia o en la fase de la señal. Las cabezas transductoras de longitud más usadas son los de tipo inductivo, más recientemente los de tipo capacitivo. Usaremos el cambio de la inductancia o de la capacitancia para hacer variar un circuito eléctrico o un circuito electrónico.

Una cabeza de prueba tridimensional es una máquina de medición por coordenadas en miniatura. Se compone de tres ejes mutuamente ortogonales, unidos con resortes para dar un intervalo de deflexión de más o menos tres milímetros en los tres ejes. La medida de la posición es obtenida por medios inductivos lineales; actualmente tienen una repetibilidad menor a 0,1 micras.



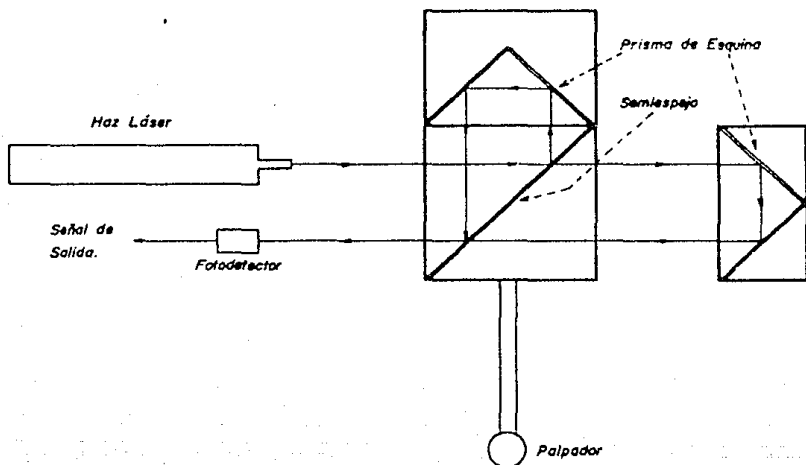
CABEZA TRANSDUCTORA.



CABEZAS TRANSDUCTORAS
MEDICION INDUCTIVA

Tipo: Ópticas con fuente láser.

La ventaja de usar una fuente láser como cabeza de detección es que permite una alta precisión en la medida. Opera con un láser que emite desde la fuente, llega al interferómetro y regresa a la fuente láser. La medición la conoceremos si vemos el movimiento interferométrico de las franjas de luz a la salida y a la llegada de la fuente de luz. Se tienen fuentes de láser que dan 50 lecturas por segundo con altas intensidades de detección. El siguiente dibujo muestra un arreglo elemental de cabeza interferómetro, en el cual se ve lo anterior. El nivel de precisión es muy alto ya que por interferometría se llega a saber la medida exacta hasta más allá de la micra de incertidumbre (0.3 μm o menos).



CABEZA-INTERFEROMETRO.

Existe otra cabeza que utiliza la fuente laser y que parece ser que funciona utilizando el principio de máxima densidad de luz en el punto focal (máximo contraste) aprovechando la coherencia de luz de las fuentes laser (como la que se muestra en la figura de esta página). Esto hace que se puedan medir formas de superficies blandas. Se tiene, además, un nivel de luz realimentada que permite detectar de una manera precisa el borde de las piezas.



CABEZA OPTICA CON FUENTE LASER

2.3.- LAS MICROCOMPUTADORAS COMO SOPORTE DE LAS MMC.

El proceso desde el punto de vista mecánico y desde el punto de vista del manejo de datos sólo es posible si la velocidad de procesamiento es lo suficientemente alta. Hablamos que los datos tendrán que ir desde y hacia la máquina con velocidades de 0.1 μ s. para que las reglas, el palpador, y los motores puedan tener una operación uniforme y no entren a destiempo ninguno de los mecanismos de la MMC.

Las reglas transductoras darán la medida de desplazamiento como una serie de pulsos que serán procesados por una interface. Dicha interface entregará datos a la computadora que a su vez los desplegará en una pantalla o los almacenará en su memoria para un análisis posterior.

El palpador entrega una serie de datos de cómo se flexionó la punta al momento de hacer o dejar de hacer contacto con la pieza a medir. La información que sale del palpador puede ser un tren de pulsos o puede ser una palabra de algunos bits de longitud. Cualquiera que sea la información del palpador al sistema que procese los datos, ésta deberá fluir de una forma rápida y confiable.

Los motores en algunas máquinas son opcionales, en otras son indispensables para el buen funcionamiento de todo el conjunto. Los motores en los ejes de la máquina, se tendrán para que el movimiento sea uniforme. Son indeseables cambios en la velocidad ya que esto ocasiona una función errónea en el flujo de datos. Es indeseable también que las aproximaciones a la pieza a medir sean bruscas, ya que esto daña al palpador y a las reglas que están en los ejes. Para que los motores se muevan con la velocidad apropiada, se tengan aproximaciones controladas, los motores tendrán un sistema de control tipo posicional-integral-derivativo.

Este tipo de control no es posible si la máquina no posee una velocidad de procesamiento bastante rápida. Una máquina con estas condiciones requiere de una microcomputadora con la suficiente capacidad de procesamiento de datos. La computadora hace posible el operar adecuadamente la máquina, y hace posible una serie de aplicaciones que de otra manera serían muy difíciles de implementar como son los controles realimentados, la implementación de una capa de aire de espesor constante que sustituya a los cojinetes, etc.

2.3.1.- NIVELES DE AUTOMATIZACION.

Con el uso de la computadora podremos tener un amplio rango de aplicaciones y de aditamentos. Existieron máquinas que no fueron tan sofisticadas. En un principio la MMC entregaba la lectura de medición en unos tambores, la máquina en su conjunto se movía en forma manual, carecía de motores y su exactitud era del orden de las milésimas de pulgada (es decir de 25 a 75 μ m). Estos fueron los primeros tipos de MMC que se usaron en la industria y en los laboratorios.

La siguiente etapa en el desarrollo de las MMC fué la implementación de dos condiciones que permitían obtener una mayor precisión: la lectura de la medición por medio de reglas inductivas, la implementación de motores para el movimiento de la máquina. Con estas mejoras la precisión de la máquina alcanzó por el orden de las decenas de micra en exactitud. Estas máquinas todavía tenían una gran incertidumbre y una repetibilidad no muy alta.

Con la introducción de la computadora para el control de procesos la exactitud y la repetibilidad mejoraron a los niveles que tiene actualmente. La exactitud actual es del orden de las micras o de las décimas de micra. Todos los modos de lectura son posibles, en pulgadas o en milímetros o en las dos unidades si así se desea.

Otra ventaja que se tiene con el uso de la computadora es que el proceso de medición es totalmente automático, la posición de los ejes es rigurosamente controlada, el operador no tiene porque ni para qué meter las manos. Sólomente tiene que poner la pieza en la mesa de granito y un programa ejecuta todos los movimientos necesarios para medir una superficie o un volumen dado.

Las guías de la maquina forman un sistema coordenado cartesiano, que se mueve con respecto a la cabeza de prueba tridimensional. Los contornos son medidos por medio de un sistema digital de alta resolución y precisión. Para la cabeza de prueba un punto de referencia espacial adimensional es definido. La figura 2.3.1.1. ilustra el sistema de coordenadas de la maquina XM, YM, ZM y el sistema coordenado de la pieza de trabajo XW, YW, ZW. La pieza de trabajo puede ser colocada en cualquier posición sobre la mesa de la máquina. Los dos sistemas coordenados no están normalmente coincidentes. La posición exacta del sistema de coordenadas de la pieza de trabajo es definido al obtener puntos de la superficie. En el ejemplo de la figura 2.3.1.1. la superficie es medida con tres puntos: un punto para la dirección ZW; con dos puntos se define la dirección XW y con tres puntos cualesquiera definimos el origen del sistema coordenado de la pieza de trabajo. De esta forma la pieza de trabajo es definida matemáticamente. Los puntos a ser medidos van a ser referidos al sistema coordenado de la pieza de trabajo.

El control de posicionamiento electrónico es activado automáticamente cuando se hace contacto con la pieza de trabajo, los corrimientos en el eje de prueba de la máquina y los corrimientos dentro de la cabeza de medición son puestos en la computadora. La computadora o consola de medición harán una suma algebraica entre la medida del eje y la medida que entrega la cabeza de medición, este dato es el que se almacena o se despliega. Ver figura 2.3.1.2.

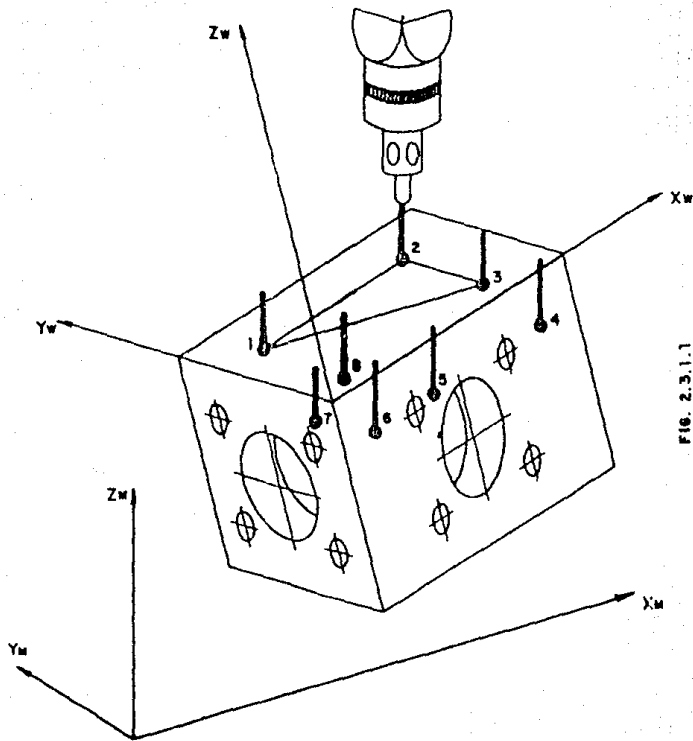


FIG. 2.3.1.1

Existe una función que se puede realizar con una MMC, que necesita una computadora, unas reglas que entreguen lecturas digitales, una cabeza transductora digital, motores realimentados en las guías y un programa bastante especial. La función que hablamos es un barrido (o scanning) de los contornos de una pieza en los tres ejes coordenados. El modo de operar es dejar un eje fijo con los otros dos en movimiento. Existen máquinas que pueden realizar ésta labor, una de estas máquinas es la de la compañía Decca Oberkochen, la cual realiza la función de barrido en tres ejes con una exactitud y una repetibilidad del orden de las décimas de milímetro.

3. - DESARROLLO DE UNA CABENA DE Y SEIS DIRECCIONES.

El tema de esta tesis es el medir el desplazamiento de una punta de prueba que se mueve en una mesa de medición por coordenadas. La punta va a detectar una variación del orden de las micras. No es parte del trabajo el medir la fuerza o la presión con la punta de prueba. Sólomente queremos medir la deformación de la punta de prueba al tocar alguna superficie.

Al finalizar la tesis tendremos un dispositivo que sea capaz de detectar un movimiento muy pequeño, del orden de las micras. El desplazamiento será en tres coordenadas y tendrá seis posibles direcciones de movimiento. También será parte del trabajo la discusión de las posibles formas de hacer este dispositivo.

Para imaginarnos todo el conjunto podemos decir que tendremos una parte mecánica y una parte electrónica. La parte mecánica estará formada por la punta de prueba, que se conoce como palpador, y por el soporte de toda la electrónica y las diferentes partes del palpador. La parte electrónica está compuesta por un circuito que convierte la señal que sale del palpador a una señal medible por algún medio convencional (galvanómetro, despliegue digital, etc.).

Con el dispositivo escogido veremos la teoría del método usado para convertir el movimiento de deformación en una señal medible electrónicamente.

Analizaremos la parte sensible del transductor. Después vamos a estudiar los circuitos que utilizamos para convertir la deformación de la membrana en una señal medible electrónicamente. Como parte del trabajo haremos pruebas de calibración del transductor para que opere dentro de la máquina de medición por coordenadas, también se discutirá la teoría y la práctica de las técnicas usadas para el manejo de la señal.

3.1.- CARACTERISTICAS DE LAS CABEZAS TRANSDUCTORAS SOBRE LAS DISPARADORAS.

En un capítulo anterior se mencionaron las características de los dos tipos de cabezas de palpación más usadas en la industria y en los laboratorios de metrología. En el presente capítulo se mencionarán sólo las diferencias que hacen preferibles las cabezas transductoras sobre las disparadoras.

El principio de operación de las cabezas disparadoras es el hacer uso de un cambio de estado de un interruptor. El interruptor puede estar en posición de normalmente abierto o en la posición de normalmente cerrado. Al tocar la pieza se hará el cambio de estado al contrario de como está normalmente.

El principio de operación de las cabezas transductoras es un cambio en las características físicas, químicas, eléctricas, mecánicas para entregar una salida que será, por lo general, una señal eléctrica o medible por algún aparato eléctrico.

Es deseable, por lo visto en la parte que se habló de las microcomputadoras, contar con la posibilidad de medir a la pieza mediante un barrido. Los puntos así encontrados se podrán trabajar para generar una figura que será el perfil de la pieza. Las cabezas disparadoras no darán lecturas con las cuales obtengamos la silueta de la pieza.

Existe otra condición que una cabeza disparadora no puede cumplir y una transductora sí y es la cualidad de medir una deformación aplicada. La cabeza disparadora sólo puede decir que en un momento dado se tocó o se dejó de tocar una superficie. La cabeza transductora entregará una medición siempre que se active la punta de contacto. un instante antes la cabeza no entregará ninguna lectura. Al momento del contacto se activa el inicio de las mediciones dentro de la cabeza, podemos cuantificar la deformación que sufrió el palpador de la cabeza y así tendremos una referencia de medidas que no son válidas por el impulso de la inercia de la máquina.

Una cabeza transductora puede entregar lo anterior por que está "sintiendo" cuando la punta toque la pieza a medir. Los datos que salen de las reglas y los datos que salen de la cabeza transductora van a la computadora para su almacenamiento o para su análisis. El vector velocidad de desplazamiento de la máquina y el vector deformación de la cabeza palpadora se pueden correlacionar y así conocer de que lado tocó la esfera de la cabeza palpadora. La figura de la página siguiente, en su parte superior muestra la forma en que la computadora de la máquina recibe los datos en forma estática, esto quiere decir que no tiene movimiento la cabeza de palpación de la máquina. En la parte de abajo se ilustra la recepción de datos cuando la máquina se mueve y se tiene un contacto con la pieza a medir. Como la cabeza es sensible a la deformación, ocurre que cuando toca la pieza a medir, se manda la orden de detener la máquina parando la lectura de las reglas, o se inicia la lectura, según sea el caso. En ambos casos se suma o se resta, el valor de las reglas a la medida que entrega la cabeza.

3.2.-TRANSDUCTORES DE UNA, DOS Y TRES DIMENSIONES.

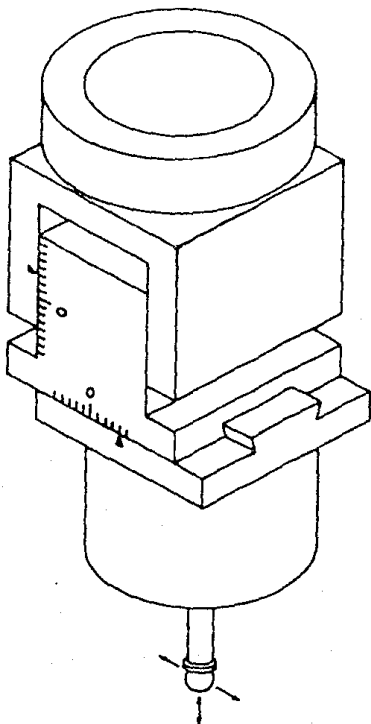
Una definición de diccionario acerca de lo que es un transductor nos dirá que es un dispositivo que entrega una salida diferente a la excitación aplicada.

En esta tesis hablamos de transductores compuestos con variación de sus propiedades en tres dimensiones. Existen otros tipos de transductores los cuales entregarán variaciones en una o dos dimensiones. Para hablar con rigor diremos que los transductores siempre entregarán una señal cuando ocurra una modificación de sus principios activos. Los principios activos que pueden ser modificados dependerán del tipo de transductor de que se trate. Como vimos anteriormente pueden ser eléctricos, magnéticos, o mecánicos en general y pueden modificar algún efecto físico o químico, o algún efecto neumático o hidráulico. Nos ocuparemos en este capítulo de investigar a los transductores, que, como un efecto a la acción de deformación mecánica, se tenga una variación de sus características eléctricas. Esto se hace para que se mida el movimiento mecánico como si fuera una señal eléctrica.

El transductor que se use deberá ser un dispositivo que convierta un movimiento mecánico, como lo es la deflexión de una punta de prueba, en una cantidad eléctrica medible por medios eléctricos. Es posible dar la salida en forma de una señal analógica a un galvanómetro. La manera deseable de salir es por medio de un tren de pulsos que haga funcionar a un contador, la salida puede ser de dos formas: un tren de pulsos o una palabra digital de "n" bits.

TRANSDUCTORES DE DOS DIMENSIONES.

Este tipo de transductores tendrán dos dimensiones para medir y cuatro direcciones de movimiento. Estos dispositivos emplean dos transductores de una dimensión para reflejar el movimiento en dos dimensiones. Se emplean dos transductores que se colocan a 90° uno del otro para obtener la salida de dos dimensiones.

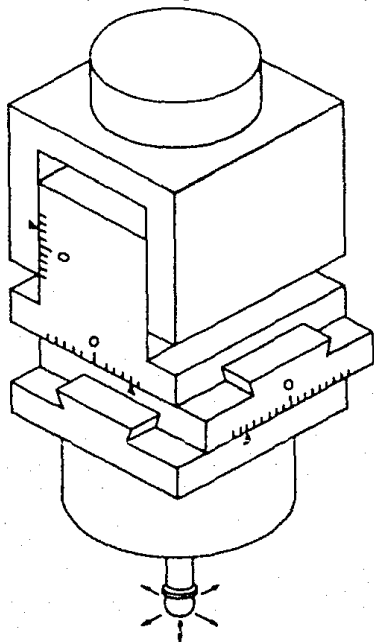


TRANSDUCTOR DE DOS DIMENSIONES CUATRO DIRECCIONES.

TRANSDUCTORES DE TRES DIMENSIONES.

Para detectar el movimiento en tres dimensiones podremos emplear tres transductores de una dimensión.

Si usamos transductores inductivos tendremos que poner a éstos en posición mutuamente ortogonal. Lo mismo ocurre si pretendemos utilizar resistencias para medir la variación en los tres ejes. En el caso de capacitores tendremos que utilizar dos capacitores y transformar la lectura de dos dimensiones a una lectura de tres utilizando electrónica. Si pretendemos utilizar un transductor capacitivo de tres dimensiones, será la manera de procesar las señales la que nos dé la lectura en tres dimensiones. En el caso de usar inductores o resistencias la lectura será directa sin necesidad de electrónica asociada, pero existen otras condiciones que deben cumplir los transductores para escoger la solución óptima.



TRANSDUCTOR DE TRES DIMENSIONES SEIS DIRECCIONES

3.3.- ARQUITECTURA DEL DESARROLLO DE ESTA TESIS.

Lo que nos interesa en esta tesis es un medio para medir la deformación originada por un desplazamiento. Tenemos varios medios para medir esta deformación. Analizaremos los que más se prestan para nuestro trabajo. Pensamos que la cabeza detectora, tema de esta tesis, debería de reunir las siguientes condiciones mecánicas:

- a).- De poco peso.
- b).- Tamaño pequeño.
- c).- Fácil de armar.
- d).- Que en la misma cabeza se realice la conversión deflexión-señal.
- e).- La medida a entregar sea de forma diferencial.

Los primeros cuatro puntos son de naturaleza mecánica y se estudiarán en la parte 3.3.3 y siguientes. El último inciso de las condiciones se refiere a la manera de realizar la medición dentro de la cabeza detectora. Los métodos metroológicos generalmente aceptados para efectuar una medición son: la medición absoluta y la medición diferencial.

La medición absoluta es la manera común de medición. Esta forma de medición consiste en tomar la lectura de medición desde el principio de la pieza a medir hasta el final de la misma. El instrumento de medición debe ser suficientemente grande para abrirla. Existe la posibilidad de que el instrumento de medida sufra una deformación que altera la exactitud del mismo. Aunque es ampliamente usado en la industria no lo consideramos como adecuado para nuestra investigación.

El método de medición diferencial es la forma donde se mide a intervalos. Estos intervalos son más pequeños que la pieza a medir. Para realizar la medida tenemos un patrón al cual se le conoce bastante bien su calibración. También es muy posible que el patrón sea más pequeño que la pieza a medir, la diferencia entre la pieza a medir y el instrumento de medición es la que nos es útil. Esta diferencia la mediremos con otros aparatos más exactos que el anterior.

El principio utilizado en la cabeza, debe de ser diferencial ya que el uso al que se destina la cabeza es medir pequeños desplazamientos, por periodos cortos. Una medición de tipo absoluto supone que mientras la salida no sea cero, permanece la deformación independientemente del tiempo que dure este estado. Ahora bien, los expertos en metrología dimensional (geométrica) aseguran que una máquina de coordenadas típica difícilmente conservan su dimensión con una variación menor de $5 \mu\text{m}/\text{día}/^\circ\text{C}$, es decir que siempre se está "reacomodando". La cabeza de tipo diferencial nace la diferencia entre la cota ó posición de referencia (la del estado no excitado), y la cota ó posición del estado excitado es la que permite medir el desplazamiento. La medición diferencial se vuelve inmune a cambios de estado lentos, por el envejecimiento o por sobreexcitación.

BASE MATEMATICA DE LA MEDICION.

La técnica a usar para medir la deflexión del palpador es la medición diferencial. Para realizar una medición diferencial es necesario que tengamos dos señales: una que funcionará como patrón y que será una señal estable, sin corrimiento y que podremos ajustar previamente a cualquier protocolo de medición. La otra será una señal cualquiera que le mediremos su desviación con respecto a la señal patrón. Hablamos de señales sin meternos en el origen de éstas.

Las señales que salen de un transductor de A.C. cualquiera pueden ser representadas por medio del siguiente modelo matemático:

$$f(t) = A \sin(\omega t + \phi)$$

en donde:

A: amplitud de la señal.

ω : frecuencia de la señal.

ϕ : fase. Es el ángulo de la señal cuando pasa por el origen.

A esta señal la podemos hacer variar si modificamos alguno de los tres parámetros anteriores. Si la hacemos variar por un cambio en la amplitud, la conoceremos como una "señal modulada en amplitud". Cuando la variación es por frecuencia se dice que se tiene una modulación en frecuencia o una "frecuencia modulada". Si lo que cambia es la fase de la señal decimos que tenemos una "fase modulada".

Para obtener una medición diferencial a partir de dos señales de la forma $f(t)$, podremos sumar las señales y obtener el siguiente desarrollo.

La señal $f(t)$ tendrá un valor en la fase igual a cero,

$$\phi = 0$$

nuestra señal quedará así:

$$f(t) = A \sin(\omega t)$$

Si sumamos dos señales

$$f_1(t) = A_1 \sin(\omega_1 t) \quad \text{y} \quad f_2(t) = A_2 \sin(\omega_2 t)$$

obtenemos,

$$f(t) = f_1(t) + f_2(t) = A_1 \sin(\omega_1 t) + A_2 \sin(\omega_2 t) =$$

$$f(t) = (A_1 + A_2) \sin \frac{(\omega_1 + \omega_2)}{2} t + \cos \frac{(\omega_1 - \omega_2)}{2} t \quad 1$$

La señal resultante $f(t)$, que es el resultado de una suma de señales sencidales, es una combinación de dos señales una que es:

$$\text{sen } \frac{(w_1 + w_2)t}{2},$$

a la cual llamaremos portadora, y la señal:

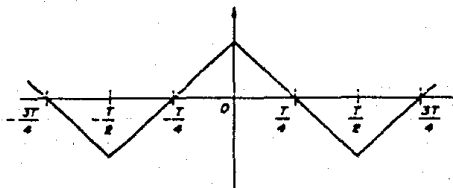
$$\text{cos } \frac{(w_1 - w_2)t}{2},$$

que le llamaremos moduladora. La señal moduladora es la medida diferencial de las dos señales. Existe la posibilidad de que las señales no sean totalmente sencidales. Por causas extrañas podremos tener señales triangulares o de diente de sierra.

Vamos a analizar el caso de que sean señales triangulares las que tengamos que sumar. Es posible la realización del análisis por medio de la serie de Fourier.

Una señal triangular puede ser representada por:

$$f(t) = \begin{cases} 1 + \frac{4t}{T}, & -\frac{T}{2} \leq t \leq 0 \\ 1 - \frac{4t}{T}, & 0 \leq t < \frac{T}{2} \end{cases}$$



SERIAL TRIANGULAR.

aplicando Fourier tenemos:

$$f_0(t) = \frac{3}{\pi^2} (\cos \omega_0 t + \frac{1}{3^2} \cos 3\omega_0 t + \frac{1}{5^2} \cos 5\omega_0 t + \dots)$$

$$f_1(t) = \frac{3}{\pi^2} (\cos \omega_1 t + \frac{1}{3^2} \cos 3\omega_1 t + \frac{1}{5^2} \cos 5\omega_1 t + \dots)$$

Si sumamos las funciones $f_0(t)$ y $f_1(t)$ tenemos,

$$f_0(t) + f_1(t) = \frac{6}{\pi^2} (\cos \omega_0 t + \cos \omega_1 t) +$$

$$+ \frac{1}{3^2} (\cos 3\omega_0 t + \cos 3\omega_1 t) + \frac{1}{5^2} (\cos 5\omega_0 t + \cos 5\omega_1 t) + \dots$$

por trigonometría plana sabemos que:

$$\cos A + \cos B = 2 \cos \frac{A+B}{2} \cos \frac{A-B}{2}$$

la suma quedará

$$f_0(t) + f_1(t) = \frac{6}{\pi^2} \left(\left[2 \cos \frac{(\omega_0 + \omega_1)t}{2} \cos \frac{(\omega_0 - \omega_1)t}{2} \right] + \right. \\ \left. + \frac{1}{3^2} \left[2 \cos \frac{3(\omega_0 + \omega_1)t}{2} \cos \frac{3(\omega_0 - \omega_1)t}{2} \right] + \right. \\ \left. + \frac{1}{5^2} \left[2 \cos \frac{5(\omega_0 + \omega_1)t}{2} \cos \frac{5(\omega_0 - \omega_1)t}{2} \right] + \dots \right)$$

Los términos de alta frecuencia, como:

$$\frac{3(\omega_0 + \omega_1)t}{2},$$

$$\frac{5(\omega_0 + \omega_1)t}{2}, \dots$$

y los de baja frecuencia, como:

$$\frac{3(\omega_0 - \omega_1)t}{2} \text{ y}$$

$$\frac{5(\omega_0 - \omega_1)t}{2}$$

tienen poca importancia ya que se pueden filtrar; estos términos hacen que la función a la salida se comporte como una señal triangular, diente de sierra. Podemos decir, sin perder generalidad que,

$$f_0(t) + f_1(t) = \frac{B}{\pi^2} \left(2 \cos \frac{\omega_0 + \omega_1}{2} t * \cos \frac{\omega_0 - \omega_1}{2} t \right)$$

considerando que $f_0(t)$ tiene una amplitud A y que $f_1(t)$ tiene una amplitud B, llegamos:

$$f_0(t) + f_1(t) = \frac{16(A+B)}{\pi^2} \left(\cos \frac{\omega_0 + \omega_1}{2} t * \cos \frac{\omega_0 - \omega_1}{2} t \right) \quad 2$$

La función 2 es de la misma forma que la función 1. Hemos obtenido una señal portadora

$$\cos \frac{(\omega_0 + \omega_1)}{2} t$$

con un señal moduladora:

$$\cos \frac{\omega_0 - \omega_1}{2} t,$$

es esta señal la que necesitamos para obtener la medición diferencial. El valor del coseno es la diferencia entre un valor de frecuencia ω_0 bien conocido, y además estable y el valor de una frecuencia ω_1 que, o es desconocida, o tiene un corrimiento muy fuerte.

Resulta que hemos encontrado muchas cosas útiles. En primer término, el estudio de las señales dió por resultado que teníamos que trabajar con la frecuencia de la señal. No tenemos que trabajar ni con la amplitud ni con la fase de la misma. La frecuencia que se obtiene de la suma es de un valor muy pequeño del orden de los Hertz. Las frecuencias que se generen pueden ser del orden de los kilohertz, teniendo las frecuencias del patrón y la del dispositivo con el transductor, un valor muy cercano entre sí, podremos encontrar el valor de la diferencia.

Se puede visualizar esto diciendo que si queremos medir la frecuencia de una señal desconocida la cual varía unos pocos hertz, y sabemos que la señal tiene una frecuencia que anda por el orden de los kilohertz o megahertz, midiendo la variación en forma directa se tendrá mucha incertidumbre. Si el corrimiento de frecuencia es de algunos hertz se perderá la variación en la gama de los kilohertz o los megahertz, en cambio si obtenemos la diferencia de las frecuencias de las señales los cambios son más notables.

Los osciladores que podemos hacer pueden entregar señales que no son del todo senoidales. Pueden entregar señales triangulares. Es posible saber el comportamiento de la suma de dos señales triangulares por medio de análisis numérico. El siguiente programa da la forma de onda que tendrá tal suma de señales triangulares. Las amplitudes las damos en valor absoluto y los periodos en radianes.

```

1 LIST
10 CLS: KEY OFF: SCREEN 2
20 DIM Y1(650),Y2(650),A1(650),A2(650),A3(650)
30 PRINT " SUMA DE SEÑALES TRIANGULARES "
40 PRINT
50 INPUT "AMPLITUD EN Y1 Y EN Y2": DY1,DY2
60 INPUT "PERIODOS 1 Y 2": T1,T2
70 DY1=DY1/T1
80 DY2=DY2/T2
90 Y1(0)=0
100 Y2(0)=0
110 J=0
120 LINE (600,150)-(0,150)
130 FOR I=J+1 TO J+1+T1
140 Y1(I)=Y1(I-1)+DY1
150 A1(J)=Y1(I)
160 J=J+1
170 IF J=600 THEN GOTO 210
180 NEXT I
190 DY1=-1*DY1
200 GOTO 130
210 J=0
220 FOR I=J+1 TO J+1+T2
230 Y2(I)=Y2(I-1)+DY2
240 A2(J)=Y2(I)
250 J=J+1
260 IF J=600 THEN GOTO 300
270 NEXT I
280 DY2=-1*DY2
290 GOTO 220
300 FOR I=1 TO 630
310 A3(I)=-A1(I)-A2(I)+150
320 LINE-(I,A3(I))
330 NEXT
340 BEEP

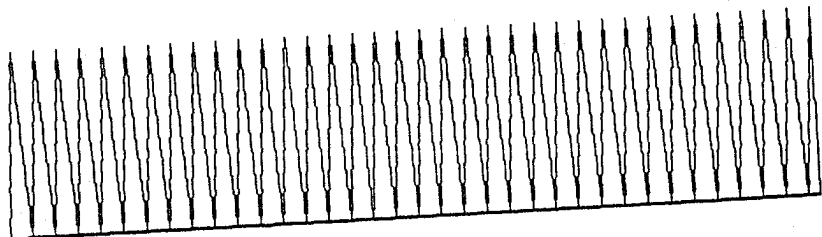
```

Como vemos en las gráficas resultantes las formas de onda que entregan las señales triangulares son de la misma forma que las señales senoidales. Por esto decimos que es lo mismo trabajar con una señal triangular que con una senoidal.

SUMA DE SEÑALES TRIANGULARES

AMPLITUD EN Y1 Y EN Y2? 30,30
PERIODOS 1 Y 2? 0,8

OK

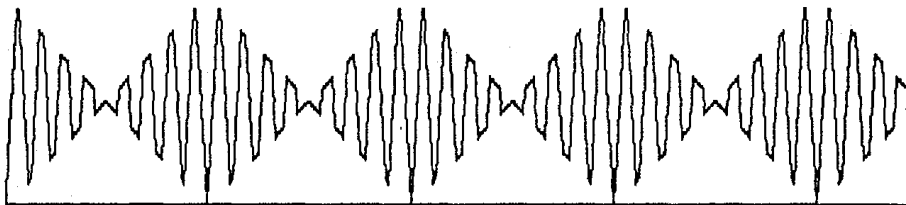


SUMA DE SEÑALES TRIANGULARES

AMPLITUD EN Y1 Y EN Y2? 30,30

PERIODOS 1 Y 2? 8,7

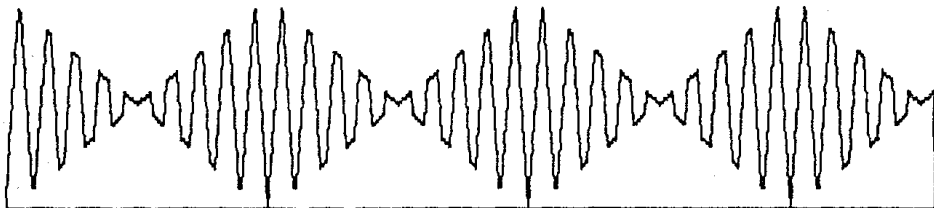
Ok



SUMA DE SEÑALES TRIANGULARES

AMPLITUD EN Y1 Y EN Y2? 30,30
PERIODOS 1 Y 2? 8,9

Ok



SUMA DE SEÑALES TRIANGULARES

AMPLITUD EN Y1 Y EN Y2? 20,30
PERIODOS 1 Y 2? 8,9

Ok

■



SUMA DE SEÑALES TRIANGULARES

AMPLITUD EN Y1 Y EN Y2? 10,30
PERIODOS 1 Y 2? 8,9

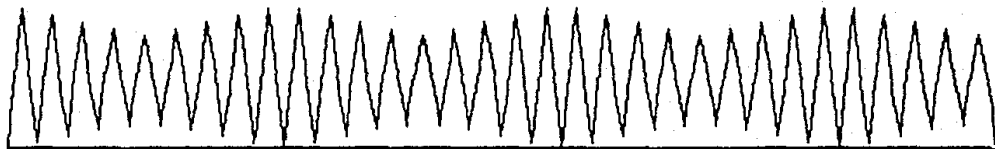
OK



SUMA DE SEÑALES TRIANGULARES

AMPLITUD EN Y1 Y EN Y2? 7.5, 30
PERIODOS 1 Y 2? 8, 9

Ok
■



3.3.1.- VENTAJAS CONSTRUCTIVAS DE LOS TRANSDUCTORES CAPACITIVOS.

Existen muchos tipos de transductores que al ser excitados varían sus características, cada uno de ellos tendrá una respuesta diferente a diferentes tipos de entrada. La respuesta dependerá del tipo de transductor de que se trate.

Existen transductores de tipo eléctrico, mecánico, los que varían sus propiedades físicas como pueden ser el efecto hall, el efecto piezoeléctrico, etc. Aunque los transductores con respuesta física son buenos y pueden prestar ayuda en la solución del problema que nos ocupa, tienen el inconveniente de que no los podemos conseguir con facilidad. Los transductores mecánicos son muy grandes para el uso que les queremos dar; son un buen método de solución cuando el peso, el tamaño y los efectos de flexiones no representan un problema.

Para este estudio tomaremos los transductores con respuesta eléctrica. Esto lo hacemos porque con las señales eléctricas que salen de los transductores se prestan fácilmente para interactuar con una computadora. El método de análisis es menos complicado y riguroso. Son, con mucho, la forma de trabajo más dócil para las condiciones impuestas.

Dentro del campo de los transductores eléctricos tenemos dos tipos principales:

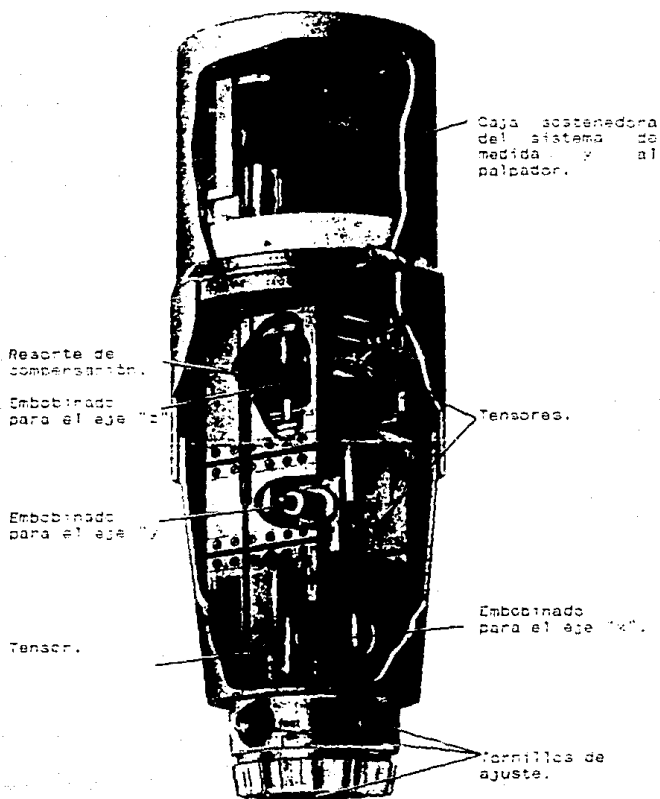
- a).- Los transductores de reactancia variable.
- b).- Los transductores de resistencia variable.

Necesitamos un transductor que pueda medir en el rango de las micras. Los transductores eléctricos que pueden dar una lectura confiable en el rango de las micras son los de reactancia variable.

Los transductores de reactancia variable se dividen en dos grupos:

- a).- Los transductores inductivos.
- b).- Los transductores capacitivos.

El transductor inductivo se presta bien para el sistema de medición diferencial. Las bobinas pueden ser trabajadas con gran facilidad. Podemos realizar los circuitos para la medición diferencial con electrónica de circuitos integrados operacionales. Pero presentan la gran desventaja de su tamaño. Por su construcción son dispositivos de mucho volumen. Las bobinas, por muy pequeñas que sean, son grandes en relación con el tamaño de un circuito integrado normal de 14 o 16 patas. Desde el punto de vista mecánico el sistema que soportan las bobinas es también especial. Se compone de mecanismos de resorte que permiten la deflexión del palpador y, con el palpador varía también la inductancia que modifica a los circuitos de medición.



CABEZA DE PALPACION DE LA CASA ZEISS OBERKOCHEH

La MMC de la casa Carl Zeiss, Oberkochen tiene una cabeza transductora que utiliza el principio del transductor inductivo. Esta cabeza es una MMC en miniatura. Su construcción consiste en tres paralelogramos unidos con resortes con un movimiento de ± 3 mm en todos los ejes. Para la medida de la posición se utiliza un sistema inductivo lineal en cada eje. Cada uno de las guías individuales pueden ser amarradas en alguna posición por medio de un seguro de precisión, con una repetibilidad menor que $0.1 \mu\text{m}$ en el punto cero del sistema de medida. La generación de la señal para la medición se aplica por medio de un sistema de bobinas de fuerza que activan elementos de transferencia de momento-libre. El peso se balancea automáticamente cuando se le aplican las diferentes puntas de palpación que pueden llegar a pesar hasta 600 gramos.

Tiene un gran inconveniente el transductor de la Zeiss y es que es muy grande y solamente se puede usar en las máquinas fabricadas por esta marca. No admite ser puesto en otras máquinas. Las otras condiciones las cumple y son insuperables por la alta tecnología que se emplea en estas cabezas detectoras.

Los transductores capacitivos son los que mejor se prestan a nuestras expectativas de resolución, tamaño, peso y simplicidad electrónica así como también a las condiciones impuestas por el método de medición que se va a usar.

Las condiciones que se pidieron para el trabajo de tesis las reunía un transductor capacitivo bajo el siguiente diseño:

- a).- Una separación de aire, mica, acetato o de cualquier otro material.
- b).- Una lámina fija de material conductor.
- c).- Una lámina móvil resistente a la deformación elástica y que esté a tierra.
- d).- Se le dió un tamaño de 60 mm de diámetro interior, con rosca. Un diámetro exterior de 66 mm y una altura de 70 mm.
- e).- Los materiales son: nylamid y aluminio. Su peso sin electrónica de 100 gramos.
- f).- Con la electrónica la cabeza pesa 250 gramos.

Para nuestras exigencias de la tesis es el transductor capacitivo el que usaremos para la medición de la desviación del palpador. Los transductores inductivos son buenos pero no se hacen con facilidad ya que la nechura del mismo es costosa y no se puede conseguir un buen elemento de medición con lo que tenemos para hacer transductores.

3.3.2.- POSIBILIDAD MACANICA DE SEIS GRADOS DE LIBERTAD.

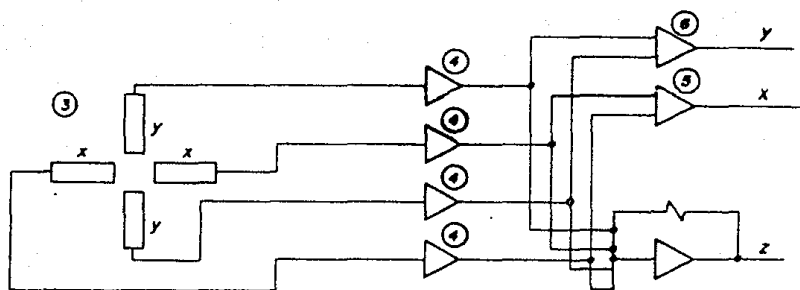
Una de las objeciones que se le pueden hacer a los transductores de capacitancia variable es que a lo más pueden medir en dos dimensiones. Usando un capacitor, operaremos al transductor como si tuviéramos una sola dimensión con dos direcciones de movimiento. La placa de que hemos hablado solo nos medirá en dos dimensiones. Para implementar esto tendremos que dividir la placa en cuatro partes. Estas cuatro partes serán los sensores de dirección. Dichos sensores nos darán la medida en dos dimensiones. Queremos usar el dispositivo como un transductor de tres dimensiones con seis direcciones de movimiento. Con un arreglo electrónico podremos hacer que un transductor capacitivo de dos dimensiones trabaje como si fuera de tres dimensiones.

Por las condiciones en las cuales se va a usar el palpador es necesario que el transductor entregue las lecturas en tres coordenadas. La condición puede ser satisfecha de acuerdo con el circuito de la página siguiente (55).

La discusión que sigue se tomó de la referencia: Method and Apparatus for Three-Dimensional Position Measurement; IBM Technical Disclosure Bulletin, Vol. 27 No. 2 July 1984 pag. 1071, 1072. En la referencia los sensores son fotoceldas que se indican con el número (2). Algún movimiento en el eje "y" causará una iluminación desbalanceada para el sensor "x" y esto da una medida que también desbalancea la salida del amplificador diferencial (5). Lo mismo ocurre con la salida "y". Si hay una modificación en este sensor se desbalancea la salida del amplificador diferencial (5). El movimiento en "z" lo obtendremos por el desbalance de los sensores "x" y "y". La diferencia entre las lecturas del eje "x" y la del eje "y", se efectúa en el sumador, este sumador nos dará la medida en el eje "z"; este eje tendrá su salida por el amplificador diferencial (7).

Vamos a modificar el circuito de la referencia anterior. Las fotoceldas serán los capacitores. Los amplificadores (4) serán los detectores de la señal. El detector entregará una diferencia entre la frecuencia de la señal del detector en la cabeza y otra señal con una frecuencia fija. Esta salida irá a los amplificadores diferenciales (6), (5) que para este caso se quedarán igual que en la referencia. Lo mismo sucede con el sumador para el desplazamiento en el eje "z".

Podemos concluir este punto diciendo que el palpador consiste en un transductor de cuatro capacitores que modifican la frecuencia de cuatro detectores que, después de pasar por unos circuitos, entregarán la medida del desplazamiento en tres ejes coordenados.



PRINCIPIO DE MEDICION DE DOS DIMENSIONES
ENTREGA TRES DIMENSIONES.

3.3.3.- SISTEMAS DE MEDICION POR VARIACION DE CAPACITANCIA.

De los capitulos anteriores hemos visto que será un capacitor lo que tendremos que hacer variar para medir el desplazamiento en dos ejes coordenados. Para medir en los tres ejes coordenados hacemos uso de los circuitos electrónicos. El método del inciso 3.3.2 es bastante adecuado para saber las mediciones de tres ejes, cuando se conocen solamente dos.

En este capítulo tendremos que explicar cómo se obtuvieron los circuitos que se usaron para medir la deformación del palpador.

El primer punto de la investigación será la deformación de la membrana del capacitor, si se presenta una deflexión en el palpador, su recuperación y el modo en que se deformó la membrana.

El segundo punto que tendremos que saber es cuál es el comportamiento del capacitor en un circuito oscilador. Si se tiene un contacto y el palpador se deforma una cantidad conocida, investigaremos cuál es la variación de frecuencia del circuito oscilador.

En tercer lugar haremos una estimación de la precisión del transductor en general, esta estimación la haremos tomando en cuenta todos los factores que intervienen en la deformación y en la variación del oscilador como son: la membrana, el dieléctrico, la placa fija, la conexión del capacitor con el oscilador y el circuito oscilador.

3.3.3.1.- FORMA Y FUNCIONAMIENTO DEL CAPACITOR.

La manera que se pidió para que trabaje el transductor reunía muchas condiciones. Entre ellas la condición más importante era que realizara la medición en forma diferencial. La siguiente era que cumpliera con ciertas características como lo era el volumen, peso, etc. Esto se analizó en el punto 3.3. La forma que tendrá el capacitor se mencionó en el punto 3.3.1.

Para conocer el comportamiento del capacitor haremos un estudio de la geometría del mismo, después veremos un análisis de la membrana.

Utilizamos un capacitor de dos placas paralelas con un dieléctrico de aire y mica. La placa superior es un conductor rígido donde van los electrodos, la placa inferior es una membrana de acero inoxidable templado; esta placa tiene puesto el mamelón que soporta la punta del palpador, como dieléctrico usamos dos materiales, un anillo de mica y una capa de aire.

Las terminales del capacitor trabajan de dos maneras: una es formar un capacitor con las dos terminales para que a partir de las variaciones de la distancia entre las placas se obtenga la modificación de la capacitancia; la otra es poner una terminal a tierra y con la restante medir la capacitancia.

Por las condiciones impuestas y por lo visto en el punto 3.3.2 la placa fija tiene cuatro capacitores. La placa móvil, como es una membrana, no la podemos modificar ni fragmentar. La placa fija se hace de fibra de vidrio, o baquelita con una capa de cobre. Para imprimir el dibujo que deseamos en el cobre, utilizamos las técnicas comunes para la hechura de circuitos impresos. Necesitamos primero hacer un dibujo de lo que queremos tenga cobre, se le toma un negativo fotográfico al dibujo, luego se limpia la placa de cobre y se le pone sensibilizador fotográfico, se pone el negativo en la placa sensibilizada y se expone a una fuente de rayos ultravioleta por unos 30 minutos, la retiramos de la fuente y le agregamos fotoresist. En una solución de agua caliente y cloruro férrico metemos la placa hasta que desaparezca lo no deseado del cobre.

El dibujo lo hacemos de la forma siguiente: dividimos una circunferencia de radio r_1 , igual al tamaño pedido en cuatro cuadrantes con una separación de 3 mm, con esto, se tienen cuatro capacitores. A continuación, dibujamos otra circunferencia de radio r_2 , ésta será la que permita el movimiento del palpador por estar alojada la membrana con un mamelón.

La figura de la página siguiente muestra la disposición propuesta, en ella, todo lo que está achurado será lo que queremos que tenga cobre, lo demás lo quitaremos con la técnica antes expuesta. La forma de obtención de los capacitores nos pareció la más práctica y menos complicada para fabricarlos.

La placa móvil o membrana quedará completa y solamente tendremos que ponerle el mamelón para sujetar al palpador.

BANDELA
CABLE
MEMBRANA

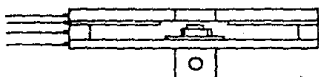
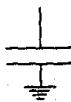
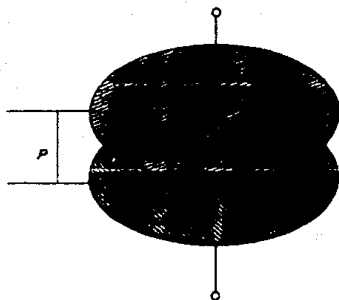


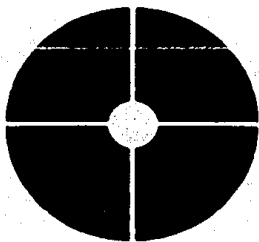
DIAGRAMA DEL CAPACITOR.



CAPACITOR A TIERRA.



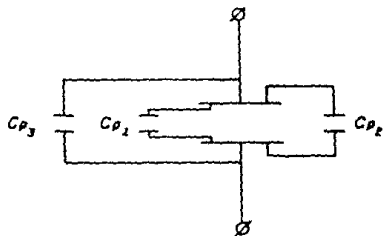
CAPACITOR DE DOS PLACAS PARALELAS.



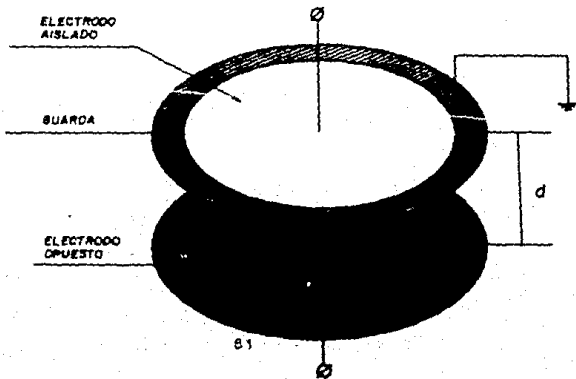
PARTE FIJA DEL CAPACITOR CON CUATRO SECTORES.

La membrana tiene que ser resistente a la deformación. En mecánica se le llama membrana resiliente, entendiéndose por resiliente a la acción que se presenta cuando a un cuerpo se le quita la fuerza aplicada con anterioridad y éste regresa a su estado original sin alteración de sus formas. La membrana también tiene que ser homogénea con el fin de que la deformación sea simétrica; su espesor deberá ser el mismo en toda la placa, si ocurre lo contrario tendremos diferencias en las lecturas de la capacitancia y por lo tanto en la frecuencia de salida del oscilador.

Un problema que tenemos que ver es el referente a las capacitancias parásitas entre las placas de un capacitor sensible. En "Basic principles in desing highly reliable multiterminal capacitor sensor and performance of some laboratory test models", William Chr. Meerens, publicado en Sensor and Actuator #3 de 1982-1983, pag 127-140, se habla de las capacitancias parásitas que existen entre las placas de un capacitor sensible. En el artículo se dice que la forma de eliminar estas capacitancias es poner una guarda de tierra rodeando a todo el capacitor sensible.



Se pueden suprimir las capacitancias parásitas con ayuda de una guarda de Kelvin:



La capacidad se calcula por la fórmula:

$$C = E_0 * E_r \frac{A}{d}$$

En donde:

E_0 = permitividad del vacío ($8.8541872 \times 10^{-12} \frac{f}{m}$)

E_r = permitividad del medio (aire = 1).

A = Area de la placa.

d = distancia entre las placas.

En nuestro proyecto de transductor es necesario no tener capacitancias parásitas, su presencia origina falta de precisión en el circuito de trabajo y duda en la estabilidad del mismo. Esto se debe a que las capacitancias parásitas se suman o se combinan en paralelo con el capacitor sensible. Como algunas de estas capacitancias son de naturaleza aleatoria es muy difícil conocer su valor y por lo tanto determinar el comportamiento del circuito oscilador.

La geometría con la que hemos definido al capacitor requiere de una consideración para mejorar su confiabilidad. Esta consideración consiste en ponerle una guarda de tierra. Para realizar esto necesitamos hablar de las conexiones que tendrá cada cuadrante con el fin de especificar el lugar en donde irá colocada la guarda.

En el inicio de este capítulo mencionamos la forma que tendrá la placa fija del capacitor y dijimos que la haremos de cuatro cuadrantes. La parte central de cada uno se tomará como punto de unión entre el capacitor y el oscilador. Así cada cuadrante será un capacitor. La capacitancia variará con respecto a dos terminales que se conectarán una, en la placa fija y la otra en la membrana que será la que tenga el muelle para sujetar al palpador.

Para evitar en lo posible las capacitancias parásitas pondremos al electrodo de la membrana a tierra, según lo marca el artículo antes citado. Con esto cumplimos con dos aspectos: el primero consiste en la uniformidad que tendrán los capacitores, ya que todos estarán a tierra; el segundo es la protección que tendrá el circuito y toda la máquina por tener todas sus piezas a tierra. Recomendamos ver sobre tierras eléctricas la referencia "Recommended Power and Signal Grounding For Control and Computer Rooms" de Warren Lewis. Copyright Material IEEE, paper No. PCIC-84-13.

En el punto 3.3.3.2, hablaremos de una forma de medición en la cual es posible utilizar las dos terminales.

Por lo visto anteriormente podremos decir que el capacitor quedará físicamente según el dibujo de la página siguiente. La geometría anterior es estable y se puede armar fácilmente quedando rígida; podemos decir que la mica está entre dos paredes: a un lado la membrana y al otro la placa de cobre con fibra de vidrio. La

manera de sujetar todo el conjunto es con dos anillos roscados, uno a cada lado.

En forma de resumen diremos que la geometría del capacitor quedará de la siguiente forma:

- a).- Una placa fija con cuatro sectores, que serán cuatro capacitores.
- b).- Un anillo de mica natural. En la parte central del anillo existirá aire.
- c).- Una membrana con un mamelón. Esta última pieza se utiliza con el fin de sujetar a las piezas del palpador. Esta placa estará a tierra.
- d).- Dos anillos para sujetar a todo el conjunto. Estos anillos son de material plástico para evitar en lo posible contactos a tierra.
- e).- La carcasa del conjunto la haremos de material plástico, roscado en la parte interna.



PROTOTIPO DE LA CABEZA DE MEDICION.

DEFORMACION Y RECUPERACION DE LA MEMBRANA.

Como apuntamos anteriormente, la membrana es la parte más importante y la que determina el funcionamiento del capacitor. Tendremos que hacer un experimento para averiguar cuál es la recuperación de la membrana a una deformación. La deflexión la podremos conocer pues será una variable a controlar. Mediremos la deformación en puntos bien conocidos y veremos cuál es la variación del espacio entre las placas. Es importante conocer la modificación de la distancia ya que es lo único que podremos variar, según la fórmula que nos da el valor de la capacitancia:

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d}$$

Para realizar el experimento tendremos que tomar puntos de prueba para medir la deformación. Con ellos determinamos la variación total de la membrana. Para calcular el área de cada capacitor dividiremos al cuadrante que nos define un capacitor en nueve áreas que no serán iguales. El centro de cada área será el punto de medición.

Ver la figura de la página siguiente. La división de cada cuadrante la tendremos en el dibujo inferior de la página siguiente.

En el dibujo hemos localizado cada uno de los puntos de prueba. Inseguida calcularemos el área de cada una de las nueve "áreas" definidas. En cualquier manual de fórmulas matemáticas viene una fórmula que define el área de un sector de circunferencia, la cual está dada por la expresión:

$$A = \frac{\pi \cdot r^2 \cdot n}{360}$$

aquí "n" es el valor de la fracción de circunferencia que dividimos al sector. Para calcular el área de cada "área" del sector se procede de la forma siguiente:

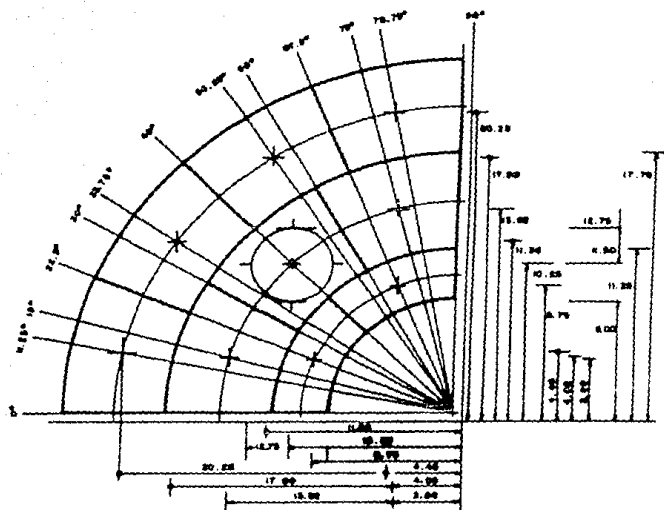
- 1).- Se calcula el área de los sectores que están entre R_3 y R_4 con ayuda de la siguiente fórmula:

$$A_1 = \frac{\pi \cdot r_4^2 \cdot n}{360}$$

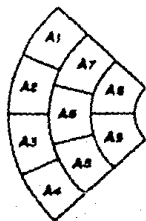
en donde "n" es el número de grados de la división.

- 2).- Se calcula el área del sector entre R_3 y el centro de la membrana utilizando la misma fórmula.

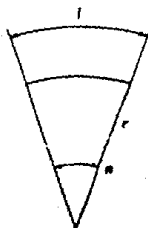
$$A_2 = \frac{\pi \cdot r_3^2 \cdot n}{360}$$



MEDIDAS DE UN SECTOR DEL CAPACITOR.



LOS NUEVE SECTORES



UN SECTOR DE CIRCUNFERENCIA

3).- Se restan las áreas:

$$\begin{aligned}
 A_{aa} &= A_1 - A_2 = \frac{\pi * r_4^2 * n}{360} - \frac{\pi * r_3^2 * n}{360} \\
 &= \frac{\pi * n}{360} (r_4^2 - r_3^2) = \\
 &= \frac{\pi * (22.5)}{360} [(24.5 \times 10^{-3})^2 - (17.7 \times 10^{-3})^2] = \\
 &= \frac{\pi}{16} (2.0696 \times 10^{-4}) = \\
 A_{aa} &= 5.6344464 \times 10^{-6} \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

Para las demás áreas se procede de la misma forma.

$$\begin{aligned}
 A_{ab} &= \frac{\pi * (30)}{360} [(17.7 \times 10^{-3})^2 - (10.8 \times 10^{-3})^2] = \\
 &= \frac{\pi}{12} (1.0665 \times 10^{-4}) = \\
 A_{ab} &= 5.148205 \times 10^{-6} \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

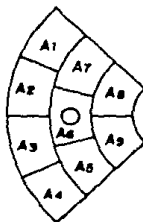
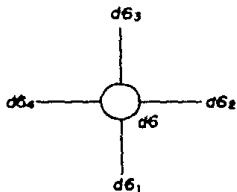
$$\begin{aligned}
 A_{ac} &= \frac{\pi * (45)}{360} [(10.8 \times 10^{-3})^2 - (4 \times 10^{-3})^2] = \\
 &= \frac{\pi}{8} (1.0064 \times 10^{-4}) = \\
 A_{ac} &= 3.9521236 \times 10^{-6} \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

El área total del sector es:

$$\begin{aligned}
 A_{T_s} &= \frac{\pi * (90)}{360} [(24.5 \times 10^{-3})^2 - (4 \times 10^{-3})^2] = \\
 &= \frac{\pi}{4} (5.8425 \times 10^{-4}) = \\
 A_{T_s} &= 4.5886808 \times 10^{-6} \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

Existe un detalle en el área A_{ab} . En este lugar la membrana tendrá un barrenado con el fin de que la soldadura del electrodo en el capacitor no haga corto circuito. La medición del punto cuatro será la media aritmética de cuatro medidas.

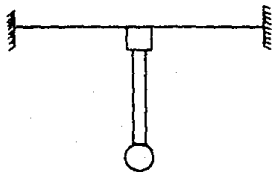
$$d_6 = \frac{d_{61} + d_{62} + d_{63} + d_{64}}{4}$$

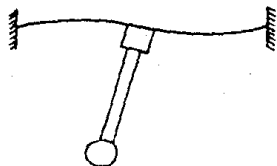


PARTE CENTRAL DE UN SECTOR

ARREGLO DE LOS SECTORES
PARA LA MEDICIÓN.

Para ilustrar en forma teórica cómo varía la membrana diremos que en el primer estado la membrana no tiene variación, está sin excitar, la forma que tiene es recta con el mamelón en posición perpendicular a la membrana. En el dibujo de esta página se muestra la membrana sin excitar. En el dibujo de la página siguiente se muestra cuando dicha membrana tiene una deformación originada por una fuerza aplicada. Es este resultado el que debemos encontrar en el experimento de medición de la membrana.

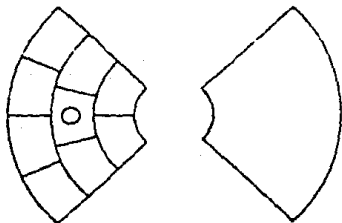




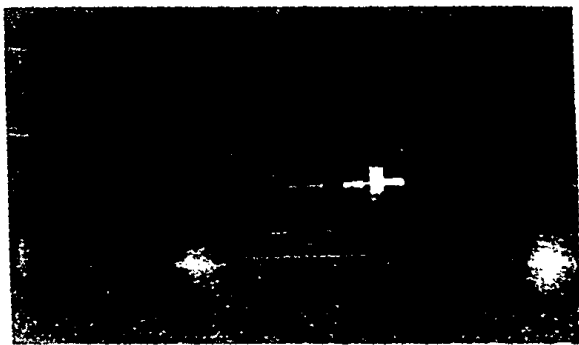
Para efectuar la medición pondremos la membrana en la posición que se muestra en la figura de abajo. La línea de los 45° quedará en la línea de 0°. Esto se hace para que la máxima deformación ocurra en la parte más central de la membrana. La punta la movemos hacia el sector a medir, el cual tendrá el trazado de las áreas.

Para obtener las mediciones del experimento de la distancia y la deformación realizamos unas tablas que a continuación damos. También incluimos una lista del equipo empleado:

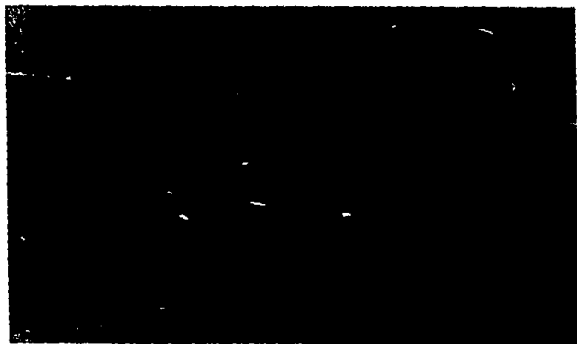
- a).- El capacitor montado sobre una base para aparatos de medición.
- b).- Un micrómetro.
- c).- Un palpador electrónico con su consola.



FORMA DE PONER LOS SECTORES PARA LA MEDICION.



MICROMETRO

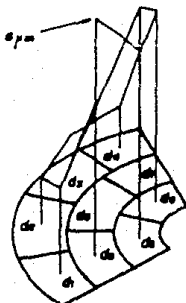


MEDICION DE LA DEFORMACION

Con el montaje mostrado en la última fotografía, medimos la deflexión de la punta de prueba de $100 \mu\text{m}$. Para obtener la medición con una precisión aceptable se usó al micrómetro como instrumento de medición y además de movimiento, pues será el que mueva la punta del palpador. En la membrana usamos al palpador electrónico en la escala de máxima resolución para medir la deformación producida. La tabla de resultados es:

	L ₁	L ₂	L ₃	PROMEDIO	RESULTADO
d ₁	1.1	1.1	1.1	1.1	d ₁ = 1.1
d ₂	1.0	1.0	1.0	1.0	d ₂ = 1.0
d ₃	1.2	1.2	1.2	1.2	d ₃ = 1.2
d ₄	2.2	2.2	2.2	2.2	d ₄ = 2.2
d ₅	4.0	4.0	4.0	4.0	d ₅ = 4.0
d ₆	d ₆₁	5.0	5.0	5.0	d ₆ = 4.0
	d ₆₂	6.0	6.0	6.0	
	d ₆₃	4.0	4.8	4.8	
	d ₆₄	4.0	4.0	4.0	
d ₇	3.2	3.2	3.2	3.2	d ₇ = 3.2
d ₈	5.0	5.0	5.0	5.0	d ₈ = 5.0
d ₉	6.0	6.0	6.0	6.0	d ₉ = 6.0

En el siguiente dibujo hemos graficado los puntos en la deformación de $100 \mu\text{m}$.



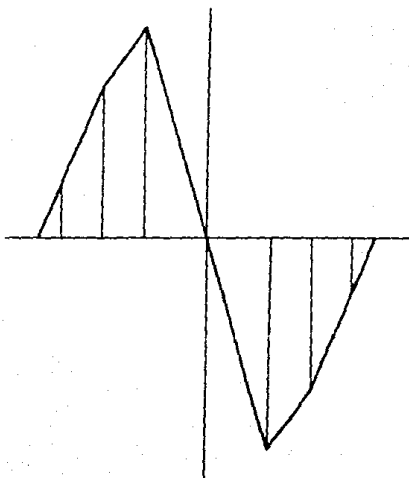
GRAFICA DE LA DEFORMACION DE LA MEMBRANA.

Lo anterior nos permite ver que la deformación es más acentuada en el centro de la membrana en donde está el mamelón que en las orillas. Si hacemos una media aritmética de los resultados en cada sector y después los graficamos tendremos la curva de deformación cuando existe una fuerza aplicada. Vemos con esto que el comportamiento de la deformación en la realidad es muy parecido al teórico.

$$\frac{1.1 + 1.0 + 1.2 + 3.2}{4} = 1.4 \mu\text{m}$$

$$\frac{3.2 + 4.9 + 4.0}{3} = 4.0 \mu\text{m}$$

$$\frac{5.0 + 5.0}{2} = 5.5 \mu\text{m}$$



GRAFICA DE LA DEFORMACION DE LA MEMBRANA. REAL.

CALCULO DE LAS CAPACITANCIA.

Hemos visto que la capacitancia para dos placas paralelas en forma teórica es:

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d}$$

esta fórmula la tomamos de la referencia de Willem Chr. Beerens, "Basic Principles in Designing ..." vista en el punto anterior. "A" representa el área total del sector, el valor d es la distancia que separa las dos placas. Por las especificaciones que le dimos al capacitor tendremos entre las dos placas un anillo de mica natural que tendrá un grosor de 80 μm . Este anillo de mica tiene un radio interior de 24.5 mm. y un radio exterior de 29.5 mm. Para calcular la capacitancia total del sector tenemos:

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r = 0.9541872 \times 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}}$$

$$d = 80 \times 10^{-6} \text{ m}$$

$$A = 4.5886888 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

La capacitancia total del sector es:

$$C = \frac{(0.9541872 \times 10^{-12}) \cdot (4.5886888 \times 10^{-4})}{80 \times 10^{-6}}$$

$$C = 50.70800705 \text{ pf.}$$

Este es el valor de la capacitancia en estado estable. lo que sigue es el cálculo de la capacitancia cuando tenemos una variación en la distancia de las placas. Para realizar este cálculo haremos uso de la siguiente expresión:

$$C = \left[\frac{A_1}{\epsilon_1} + \frac{A_2}{\epsilon_2} + \dots + \frac{A_n}{\epsilon_n} \right] \cdot \epsilon$$

en donde:

$$\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n = D \pm d_1, D \pm d_2, \dots, D \pm d_n;$$

A₁ = Área más grande dentro del sector.

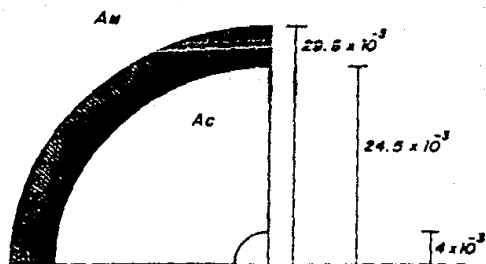
A₂ = Segunda área más grande.

...

A_n = Área más pequeña dentro del sector.

ϵ = permeabilidad del medio = $\epsilon_0 \cdot \epsilon_r$

$$A_1 = A_2 = A_3 = A_4 = A_{\text{total}} = 5.6344464 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$



MEDIDAS DE UN SECTOR DEL CAPACITOR.

$$A_5 = A_6 = A_7 = A_{8b} = 5.148285 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A_8 = A_9 = A_{9c} = 3.9521236 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$C = \left[\frac{A_1}{D \pm d_1} + \frac{A_2}{D \pm d_2} + \frac{A_3}{D \pm d_3} + \frac{A_4}{D \pm d_4} + \frac{A_5}{D \pm d_5} + \frac{A_6}{D \pm d_6} + \frac{A_7}{D \pm d_7} + \frac{A_8}{D \pm d_8} + \frac{A_9}{D \pm d_9} \right] \times \epsilon$$

Se puede hacer una tabla con tres columnas; una con las "d_n", la segunda con D + d_n y una tercera con D - d_n.

d _n	D + d _n	D - d _n
d ₁ = 1.1	81.1	79.9
d ₂ = 1.0	81.0	79.0
d ₃ = 1.2	81.2	78.8
d ₄ = 2.2	82.2	77.8
d ₅ = 4.0	84.0	76.0
d ₆ = 4.0	84.0	75.1
d ₇ = 3.2	83.2	76.8
d ₈ = 5.0	85.0	75.0
d ₉ = 5.0	85.0	74.0

Cuando tenemos el valor de D + d_n el valor de la capacitancia es:

$$C = \left[5.6344464 \times 10^{-4} \left\{ \frac{1}{81.1 \times 10^{-6}} + \frac{1}{81.0 \times 10^{-6}} + \frac{1}{81.2 \times 10^{-6}} + \frac{1}{82.2 \times 10^{-6}} \right\} + 5.148285 \times 10^{-4} \left\{ \frac{1}{84.0 \times 10^{-6}} + \frac{1}{84.0 \times 10^{-6}} + \frac{1}{84.0 \times 10^{-6}} + \frac{1}{84.0 \times 10^{-6}} + \frac{1}{83.2 \times 10^{-6}} \right\} + 3.9521236 \times 10^{-4} \left\{ \frac{1}{85.0 \times 10^{-6}} + \frac{1}{85.0 \times 10^{-6}} \right\} \right] \times 8.8541872 \times 10^{-12} =$$

$$\begin{aligned}
&= [(5.6344464 \times 10^{-8}) (4.9156856 \times 10^{-4}) + \\
&\quad + (5.148285 \times 10^{-8}) (3.5702556 \times 10^{-4}) + \\
&\quad + (3.9521236 \times 10^{-8}) (2.9392513 \times 10^{-4})] * 8.854187 \times 10^{-12} = \\
&= [2.7607167 + 1.8383600 + .02480497] * 8.854187 \times 10^{-12} = \\
&= [5.532291] [8.8541872 \times 10^{-12}] = \\
C &= 48.98394016 \text{ pf}
\end{aligned}$$

A la capacitancia D - d_n la obtenemos por medio del cálculo del modo siguiente:

$$\begin{aligned}
C &= [5.6344464 \times 10^{-8} \left\{ \frac{1}{78.9 \times 10^{-6}} + \frac{1}{73 \times 10^{-6}} \right. \\
&\quad \left. + \frac{1}{73.8 \times 10^{-6}} + \frac{1}{77.8 \times 10^{-6}} \right\} + \\
&\quad + 5.148285 \times 10^{-8} \left\{ \frac{1}{76 \times 10^{-6}} + \frac{1}{75.1 \times 10^{-6}} + \frac{1}{76.8 \times 10^{-6}} \right\} + \\
&\quad + 3.9521236 \times 10^{-8} \left\{ \frac{1}{75 \times 10^{-6}} + \frac{1}{74 \times 10^{-6}} \right\}] \\
&\quad] 8.8541872 \times 10^{-12} = \\
&= [(5.6344464 \times 10^{-8}) (5.0876325 \times 10^{-4}) + \\
&\quad + (5.148285 \times 10^{-8}) (3.9994307 \times 10^{-4}) + \\
&\quad + (3.9521236 \times 10^{-8}) (2.8846847 \times 10^{-4})] \\
&\quad] 8.8541872 \times 10^{-12} = \\
&= [5.06099376] [8.8541872 \times 10^{-12}] = \\
C &= 52.77891896 \text{ pf}
\end{aligned}$$

de una manera teórico-práctica podemos decir que el capacitor en estudio tendrá una capacitancia en estado estable de :

$$C = 50.78638705 \text{ pf}$$

la variación de la capacitancia entre los valores de máxima deflexión son :

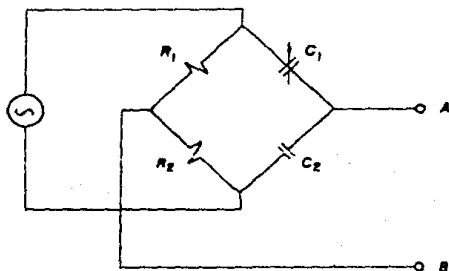
$$48.98394016 \leq C \leq 52.77891896 \text{ pf}$$

3.3.3.2 CIRCUITOS MEDIDORES DE VARIACION DE CAPACITANCIA: CIRCUITOS PUENTE.

Como se mencionó en el capítulo anterior la capacitancia variará con respecto a dos terminales que se conectarán una en la placa fija, la otra en la membrana que será la que tenga el mamelón para sujetar al palpador. En este capítulo hablaremos de la forma de medición en la cual es posible utilizar las dos terminales.

Lo que se pide en esta tesis es un medio para medir la deformación de una membrana que será parte de un capacitor variable. El capacitor tiene dos terminales las cuales podemos hacer parte de un circuito puente. Los circuitos puente son ampliamente empleados no solo por su capacidad de medir resistencias de una manera muy precisa, sino también por su capacidad de medir cantidades físicas como temperatura, presión, intensidad de luz, posición, velocidad y deformación mecánica. En un puente de medición de resistencia se tienen cuatro ramas, dos de ellas son resistencias fijas, la tercera es por lo general un reóstato de precisión graduado, el cual usamos para compensar el valor del puente cuando se le conecta una resistencia desconocida en la cuarta rama. La compensación la obtenemos al ver la deflexión del indicador de un galvanómetro.

Para medir un capacitor variable es posible utilizar el circuito puente. Empleamos dos resistencias R_1 y R_2 las que uniremos, esta unión es la terminal B. La tercera rama es un capacitor fijo, C_2 una de sus terminales la conectamos a un nodo al cual llegan la otra terminal de R_2 y una terminal de un oscilador. La cuarta rama es para el capacitor variable. Este lo conectamos a un nodo al cual llega la otra terminal de R_1 y la otra terminal del oscilador. La unión de las terminales de las ramas tres y cuatro forman el nodo de salida A. Hacimos un arreglo de circuito puente que se muestra en el diagrama siguiente.



CIRCUITO PUENTE

Los valores que les dimos a las ramas de éste circuito puente son:

$$R_1 = 470 \Omega$$

$$R_2 = 500 \Omega$$

$$C_2 = 30 \text{ pf.}$$

$$C_1 = \text{El capacitor sensible}$$

La señal que le suministramos fué una senoidal de 1 kHz y de 10 volts pico-a-pico (V_{p-p}). La salida es una señal senoidal en fase de 1 kHz y de 2 V_{p-p}. La variación del palpador en la escala completa es de 0.5 V_p en cualquier sentido que movamos al palpador. Es decir que la variación en escala completa es 1 V_{p-p}.

El montaje que empleamos fué bastante especial ya que los problemas de ruido eran muy críticos. Una de las condiciones más importantes fué la de aislar al capacitor sensible de cualquier señal de voltaje. Lo conseguimos por medio de una malla de Faraday. Lo anterior se debe a que las capacitancias que estamos manejando son del orden de los picofaradios. Con la capacitancia del orden de los picofaradios es muy difícil manejar al capacitor en mediciones industriales en donde los niveles de ruido son bastante importantes.

Del trabajo con el circuito puente sacamos como conclusión la manera de operar al capacitor sensible. La primera conclusión es que entre el capacitor y el oscilador, no debe existir mucha distancia. De ser posible debemos efectuar la conversión de la señal en el mismo lugar y enviar la señal con una frecuencia muy alta para que el ruido no la afecte. La otra conclusión es usar una buena referencia de tierra en todo el circuito y conectar a tierra toda la máquina. Esto es con el fin de no tener una fuente de ruido entre la máquina y el circuito que detecta el movimiento del capacitor sensible.

3.3.3.3.- MEDICION DE CAPACITANCIA POR MEDIO DE OSCILADORES DE CAPACITANCIA VARIABLE.

En este capítulo estudiaremos las formas para medir la capacitancia haciendo uso de osciladores como un medio indirecto para determinar el valor de dicha capacitancia. Para realizarlo hacemos uso de los transductores capacitivos en circuitos osciladores. El transductor hará variar la frecuencia del circuito oscilador, por medio del osciloscopio y un frecuencímetro mediremos las variaciones de frecuencia de dicho circuito.

Para saber cuál es la capacitancia del transductor se procederá como sigue:

- Pondremos al transductor capacitivo a funcionar en un oscilador hecho con un LM555.
- A partir de la frecuencia que se lee en el frecuencímetro y de la forma de onda que se vea en el osciloscopio, además de la ecuación que rige el comportamiento del oscilador obtendremos el valor de la capacitancia.

Hicimos un oscilador con un circuito integrado LM555. Los valores de las resistencias fijas fueron de 120 k Ω de 1/4 de watt. El transductor se conectó en la pata dos del LM555. El valor de la frecuencia fué medida con el frecuencímetro y con el osciloscopio y dió 76.327 kHz. La forma de onda es cuadrada con poco serramiento. Para calcular el valor de la capacitancia usamos la fórmula dada en el manual para el LM555; la ecuación sirve para calcular la frecuencia a partir de los componentes que intervienen en el circuito.

$$f = \frac{1.44}{(R_a + 2R_b) C}$$

despejando la capacitancia tenemos:

$$C = \frac{1.44}{(R_a + 2R_b) f}$$

resolviendo obtenemos:

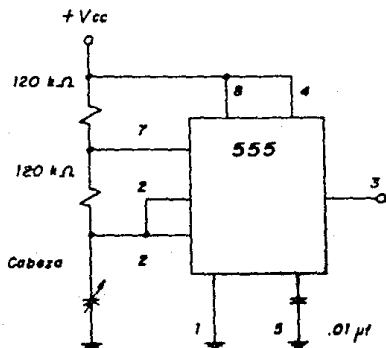
$$C = \frac{1.44}{(120 \times 10^3 + 2 [120 \times 10^3]) 76.327 \times 10^3} =$$

$$C = \frac{1.44}{(360) 76.327 \times 10^3}$$

$$C = \frac{1.44}{27477.72 \times 10^3} =$$

$$C = 52.40600483 \text{ pf.}$$

Por este medio podemos determinar el valor de cualquier transductor sin recurrir al empleo de medidores especiales. No es necesario que los osciladores sean muy estables lo que necesitamos es un aparato que nos mida la frecuencia con exactitud y que le podamos ver la forma de onda que entrega. Necesitamos para esto un frecuencímetro y un osciloscopio. En esta página damos el diagrama y mostramos el montaje que empleamos para medir la capacitancia.



OSCILADOR CON LM555

3.3.3.4.- MEDICION DIRECTA DE $f_0 + 5f$ COMO FUNCION DE δL .

Un conocimiento importante de todo transductor es saber qué tanto se deforma y qué respuesta entrega de esta deformación. Para el transductor capacitivo en estudio vamos a realizar un experimento por medio del cual obtengamos la respuesta de un corrimiento de frecuencia debido a un movimiento bien conocido del palpador. La frecuencia del oscilador debe ser estable pues de lo contrario lo que mediríamos sería el corrimiento de frecuencia del oscilador, no la variación de frecuencia como función del desplazamiento del palpador.

Usaremos un oscilador con un circuito LM741. Este circuito lo estudiaremos en detalle en los siguientes capítulos. Lo que requerimos será que el circuito sea estable, sin corrimiento en la frecuencia de trabajo. Para saber cuál es la desviación de frecuencia del transductor como función del movimiento del palpador se procederá como sigue:

- a).- Pondremos al transductor capacitivo a funcionar en el oscilador y lo dejaremos encendido un tiempo razonable para que se estabilice térmicamente.
- b).- A partir de la frecuencia que se lea en un frecuencímetro digital y de la forma de onda que se vea en el osciloscopio mediremos la frecuencia que entregue el oscilador.
- c).- Con este arreglo del oscilador mediremos la frecuencia para diferentes valores de deflexión de la punta.
- d).- Con los valores obtenidos del experimento determinamos la variación Hz por micra.
- e).- Sabremos cuál es su repetibilidad y su incertidumbre.

Para obtener el valor de la frecuencia para diferentes valores de deflexión de la punta usamos el equipo siguiente:

Un patrón de alturas

Un frecuencímetro digital

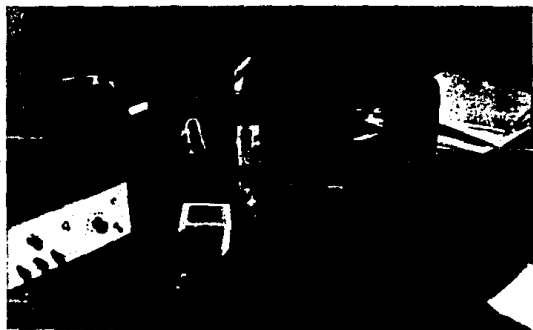
Un osciloscopio de doble trazo.

Las fotografías muestran el montaje y los aparatos utilizados, también se da el diagrama del circuito oscilador empleado.

La técnica fue la siguiente: con el oscilador funcionando acoplado a su base ponemos el patrón de alturas con escalón de medida apenas tocando la punta de palpación. Después aumentamos la medida desde 0 a 10 micras, medimos la frecuencia, damos otras 10 micras, de 10 a 20, volvemos a medir. Seguimos de este modo hasta las 50 micras y después regresamos a 0 micras de 10 en 10. Damos en forma de tabla los resultados de la medición.



MESA DE TRABAJO



MEDICION DIRECTA DE LA FRECUENCIA.



MEDICION CON EXITACION.
ENTREGA UNA SENAL CON VARIACION DE FRECUENCIA

deflex. μm	L1 kHz	L2 kHz	L3 kHz	L4 kHz	Prom. kHz	Dif. kHz
0	76.327	76.277	76.309	76.389	76.333	.200
10	76.543	76.409	76.540	76.565	76.503	.328
20	76.785	76.729	76.753	76.804	76.761	.325
30	77.004	76.951	76.979	77.009	76.935	.333
40	77.259	77.169	77.205	77.243	77.219	.331
50	77.471	77.402	77.435	77.490	77.450	.350
40	77.319	77.247	77.286	77.309	77.290	.319
30	77.131	77.057	77.091	77.121	77.100	.322
20	76.909	76.829	76.862	76.908	76.863	.309
10	76.655	76.608	76.635	76.651	76.638	.307
0	76.412	76.380	76.401	76.412	76.401	

El último valor al que llamamos diferencia es el que resulta de la resta entre los valores promedio de las lecturas anterior y presente cuando ocurre una deflexión. El promedio de la diferencia es de .217 kHz. Para obtener la resolución del dispositivo dividimos este promedio de diferencia entre el número de micras desplazadas, obtenemos:

$$\frac{.217 \times 10^3 \text{ Hz}}{10} = 21.7 \frac{\text{Hz}}{\mu\text{m}}$$

el valor que acabamos de obtener nos dice que por cada micra que se mueva el palpador, el oscilador variará en promedio 21.7 Hz.

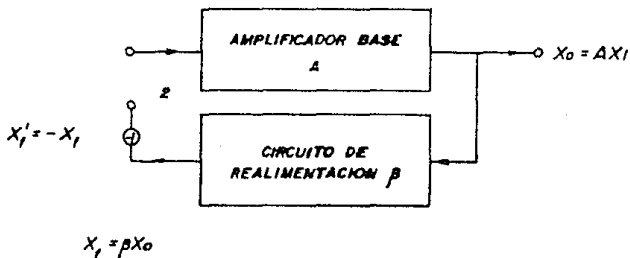
Las lecturas L1 y L2 las tomamos con una diferencia de tres horas. Para tomar la lectura L3 transcurrió un día. Entre la lectura L3 y la L4 transcurrieron ocho horas, en todo este tiempo estuvo funcionando el oscilador.

También notamos que no repite la lectura de frecuencia cuando regresa el patrón de alturas a cero. Como valor promedio la diferencia entre las dos lecturas de cero es de 42.5 Hertz. Lo anterior nos dice que tendremos una incertidumbre de dos micras en cada lectura que se haga con este oscilador.

3.3.3.5.- MEDICION DIFERENCIAL A PARTIR DE OSCILADOR PATRON CONTRA OSCILADOR DE CAPACITANCIA VARIABLE.

La siguiente etapa de estudio es la que comprende al oscilador. La importancia de este circuito estriba en que es la parte fundamental para la medición diferencial. Se estudiarán los osciladores sin tomar en cuenta si varían su frecuencia de trabajo.

Para comenzar imaginemos un amplificador, a la entrada existe un circuito de realimentación con un circuito mezclador que no lo conectamos al amplificador para no cerrar la malla. Ver la siguiente figura.



Si en la entrada uno damos una señal X_1 , a la salida obtendremos una señal X_0 que es igual a:

$$X_0 = A X_1$$

La salida del circuito de realimentación tendrá una señal:

$$X_r = \beta X_0 = A \beta X_1$$

en el borne de la señal será:

$$X_1' = -X_r = A \beta X_1$$

Por la teoría de control sabemos que la ganancia de malla es:

$$\frac{X_1'}{X_1} = - \frac{X_r}{X_1} = - A \beta X_1$$

cuando la ganancia de malla sea igual a uno tendremos la condición para la cual haremos la salida del amplificador idéntica, en todo tiempo, a la entrada. Hacer $X_i = X_r$ equivale a tener $\beta = 1$. La ganancia de malla es igual a la unidad.

Para que tengamos un oscilador senoidal se debe cumplir la ecuación $X = X_i$. Para que esta ecuación se cumpla tanto la amplitud, frecuencia y la fase de X_i como de X_r deben ser iguales. El criterio de Barkhausen dice:

"La frecuencia de oscilación no se va a mantener si la magnitud del producto de la ganancia de transferencia del amplificador por la magnitud del factor del circuito de realimentación (la magnitud de la ganancia de la malla) es menor que la unidad."

también dice que la frecuencia de un oscilador senoidal es determinada por la condición de que el corrimiento de fase y la ganancia de malla sean cero.

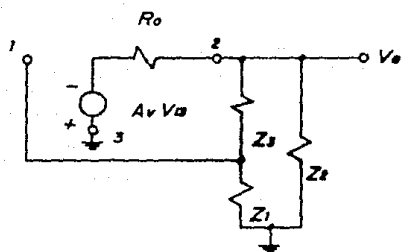
Las dos condiciones anteriores son consistentes con la fórmula de realimentación:

$$A_r = \frac{A}{1 + \beta A}$$

cuando $A = 1$ implica que A_r tiende a infinito. Esto quiere decir que obtendremos un voltaje a la salida a pesar de no tener una señal externa aplicada al amplificador.

Para los osciladores prácticos la ganancia de malla es sensiblemente más grande que la unidad y la amplitud de la oscilación es limitada por el voltaje de alimentación del circuito.

Una gran cantidad de osciladores caen en la forma general que se muestra en la figura. En este circuito tenemos una amplificación con una gran ganancia de circuito abierto negativo A y una resistencia de salida R_s . La realimentación es del tipo voltaje - serie.



MODELO DEL CIRCUITO.

Para obtener el valor de $-A$ consideramos la señal de salida entre las terminales 2 y 3 del amplificador realimentado y la entrada entre las terminales 1 y 3. La impedancia de carga Z_1 es una combinación serie-paralelo entre Z_2 , Z_3 y Z_4 . La ganancia sin realimentación es:

$$A = \frac{A_v Z_1}{Z_1 + R_o}$$

El factor de realimentación es:

$$\beta = \frac{V_o}{V_i} = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_3}$$

La ganancia de malla se calcula:

$$-A\beta = \frac{A_v Z_1 Z_3}{R_o (Z_1 + Z_2 + Z_3) + Z_2 (Z_1 + Z_3)}$$

Si las impedancias son reactancias puras (ya sean inductivas o capacitivas), tenemos que $Z_1 = jX_1$, $Z_2 = jX_2$ y $Z_3 = jX_3$. Para un inductor $X = \omega L$ y para un capacitor $X = \frac{-1}{\omega C}$ tenemos:

$$-A\beta = \frac{A_v X_1 X_2}{j R_o (X_1 + X_2 + X_3) - X_2 (X_1 + X_3)}$$

para que la ganancia de malla sea real el conmutamiento de fase debe ser cero,

$$X_1 + X_2 + X_3 = 0 \dots 1$$

lo que nos queda:

$$-A\beta = \frac{A_v X_1 X_2}{X_2 (X_1 + X_3)} = \frac{A_v X_1}{X_1 + X_3} \dots 2$$

De la ecuación 1 vemos que el circuito puede oscilar a la frecuencia resonante de la combinación de X_1 , X_2 , X_3 .

Si de la ecuación 1 despejamos X_2 :

$$X_2 = -(X_1 + X_3)$$

la ecuación 2 quedará:

$$-A\beta = \frac{A_v X_1}{-X_2}$$

para que $-A \beta$ sea positivo y menor que la unidad, tanto X_1 como X_2 deben tener el mismo signo (puesto que A es positivo). Las cantidades X_1 y X_2 serán del mismo tipo de reactancia, o ambas inductivas o ambas capacitivas.

Existen circuitos osciladores los cuales usan un nodo balanceado como circuito de realimentación. Uno de estos osciladores es el "Oscilador de Puente de Wien". Los brazos del puente son Z_1 , Z_2 , R_1 y R_2 . La entrada al puente es la salida V_0 .

El oscilador puente de Wien tiene dos partes de realimentación: una realimentación positiva a través de Z_1 y Z_2 , cuyas componentes determinan la frecuencia de oscilación, y una realimentación negativa por R_1 y R_2 cuyos elementos afectan la amplitud de la oscilación, la ganancia de malla está dada por $- \beta A$ donde:

$$\beta = \frac{V_1}{V_0} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

$$A = 1 + \frac{R_1}{R_2}$$

el valor de $- \beta A$ es:

$$- \beta A = \frac{\alpha}{\alpha - j(1 - \alpha^2)} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right)$$

en donde $\alpha = \omega RC$.

Para que se cumpla el criterio de Barkhausen debemos cumplir con $- \beta A = 1$. Para esto requerimos que $\alpha = j$ y que además:

$$\frac{1}{\alpha} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) = 1$$

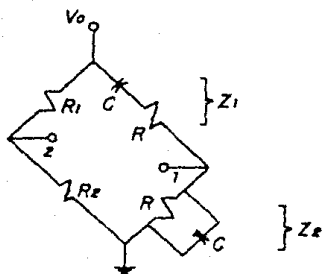
de esto tenemos:

$$f = \frac{1}{2\pi RC}$$

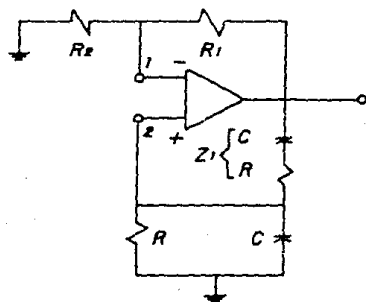
$$R_1 = 2R_2$$

la máxima frecuencia de oscilación es limitada por el Slew rate del amplificador operacional. Las variaciones simultáneas en los capacitores darán cambios en la frecuencia en primer orden. Cambios en rangos de orden superior de frecuencia son dados por cambios en los valores de las resistencias.

Con la teoría anterior hicimos un "Oscilador Puente de Wien". El diagrama lo mostramos en la figura.



CALCULO DEL VALOR DE LOS COMPONENTES PASIVOS



EL PUEBTE DE WIEN.

Es importante analizar la elección de los componentes. Nuestra forma de pensar acerca de esto es la siguiente: los componentes deben ser populares para que se puedan conseguir en cualquier parte; sin querer decir con esto que sean circuitos "baratos y de mala calidad". La fabricación de integrados ha tomado un nivel tal que es muy difícil que salga un circuito de calidad deficiente. Otra de las cosas que se toman en cuenta para diseñar un circuito es el mantenimiento. Si en el circuito existen componentes que, por especiales, son muy difíciles de conseguir, el mantenimiento es muy largo y además costoso.

Las características que pedimos son:

- a).- Que tenga una impedancia de entrada alta, como la que tiene un Opamp JFET.
- b).- El Slew rate o "la razón de subida" será alta, pues un Slew rate bajo limita la frecuencia de oscilación.
- c).- Que trabaje con voltaje dual, con el fin de tener una señal que pase por cero (voltaje positivo, negativo y tierra).
- d).- Con el fin de que el mantenimiento sea fácil requerimos que el Opamp se pueda tocar y no sufra cortos internos.

Para el "Fuente de Wien" en la cabeza hemos diseñado los osciladores con el integrado LM747. Este integrado contiene dos amplificadores operacionales del tipo LM741. Este amplificador es muy estudiado, tiene muy buena respuesta entrada-salida y otras características que lo hacen atractivo a nuestro diseño.

Es bien sabido que los componentes pasivos son los que determinan la polarización, la estabilidad y en este caso la oscilación o la no oscilación de un circuito. La tolerancia de los componentes pasivos es del 5% la que es muy usada dentro de la electrónica. Los capacitores que empleamos son de punto de cerámicas y de poliéster.

El potenciómetro que ponemos a tierra es con el fin de poder ajustar la frecuencia a un valor dado. Por esto la frecuencia puede tener gamas diferentes.

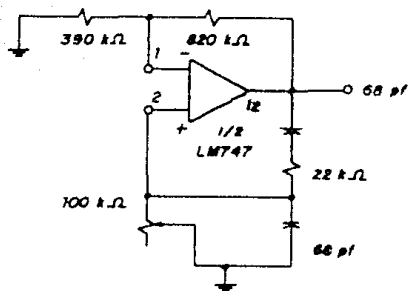
Recordemos que tendremos dos osciladores, uno fijo y el otro variable. La frecuencia del oscilador variable la comparamos con la frecuencia del oscilador fijo por medio de la ecuación :

$$A \operatorname{sen} w_1 t + B \operatorname{sen} w_2 t = 2 (A + B) \left[\operatorname{sen} \frac{1}{2} (w_1 + w_2) t * \right.$$

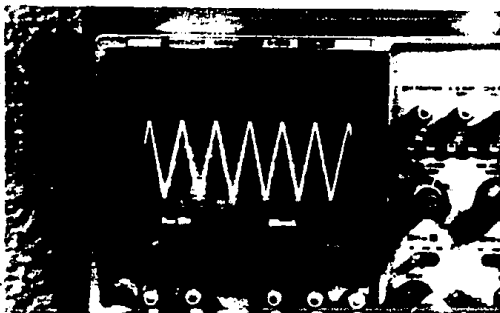
$$\left. * \cos \frac{1}{2} (w_1 - w_2) t \right]$$

trataremos de obtener las frecuencias iguales $w_1 = w_2$. En éste caso:

$$A \operatorname{sen} w_1 t = B \operatorname{sen} w_2 t$$



PUENTE DE WIEN CON VALORES.



SERIAL QUE ENTREGA EL PUENTE DE WIEN.

$$2(A + B) \sin wt = 2(A + B) \sin \frac{1}{2} \omega t \cos \frac{1}{2} \omega t$$

La salida, con amplitud unitaria, será:

$$\sin \omega t = \sin \omega t$$

Si deseamos medir un desplazamiento en cualquier sentido aparecerá el coseno y esto se verá como una señal modulante a una señal portadora. Es con el coseno con el que trabajaremos después.

Tendremos en los osciladores potenciómetros que hagan cero la diferencia de señales. Los potenciómetros estarán para asegurar que la frecuencia del oscilador variable, la frecuencia del oscilador fijo sean iguales. Cuando ocurra una deflexión en la membrana se variará la capacitancia y esto hará variar la frecuencia del oscilador variable lo que se traducirá en una presencia de la señal coseno, dentro de nuestra ecuación base. Armamos el circuito, lo probamos, dándonos los siguientes resultados.

La frecuencia es de 27 KHz con una señal triangular. El voltaje utilizado es de 12 V. con referencia a tierra. Para hacer una cuantificación de la variación de la frecuencia con el tiempo, hicimos unas mediciones de la hora, frecuencia, el voltaje y la corriente de circuito. El circuito se encendió hora y media antes del experimento para estabilidad del mismo. Se procuró que no hubiera personas alrededor del circuito con el fin de no transferir calor.

Hora	Frecuencia KHz	Voltaje V	Corriente A
10:46	27.030	24.0	0.65
10:47	28.312	24.1	0.62
10:48	28.538	24.1	0.60
10:50	28.558	24.1	0.60
10:54	28.716	24.1	0.59
10:56	28.780	24.1	0.59
10:58	28.825	24.1	0.59
11:00	28.865	24.2	0.60
11:02	28.854	24.2	0.60
11:04	28.980	24.2	0.58
11:06	28.995	24.2	0.59
11:08	28.980	24.2	0.59
11:10	29.010	24.2	0.59
11:12	29.047	24.3	0.58
11:14	29.064	24.3	0.59
11:16	29.050	24.3	0.59
11:18	29.071	24.3	0.59
11:20	29.095	24.3	0.59
11:22	29.093	24.3	0.59
11:26	29.126	24.3	0.59
11:36	29.182	24.3	0.59
11:46	29.248	24.2	0.59
11:56	29.295	24.2	0.58
12:06	29.333	24.3	0.59
12:16	29.294	24.3	0.59

Podemos graficar esto: la hora se graficará en la abscisa, las demás variables quedarán:

Frecuencia - - - - -
Voltaje - - - - -
Corriente - - - - -

La gráfica se muestra en la página siguiente.

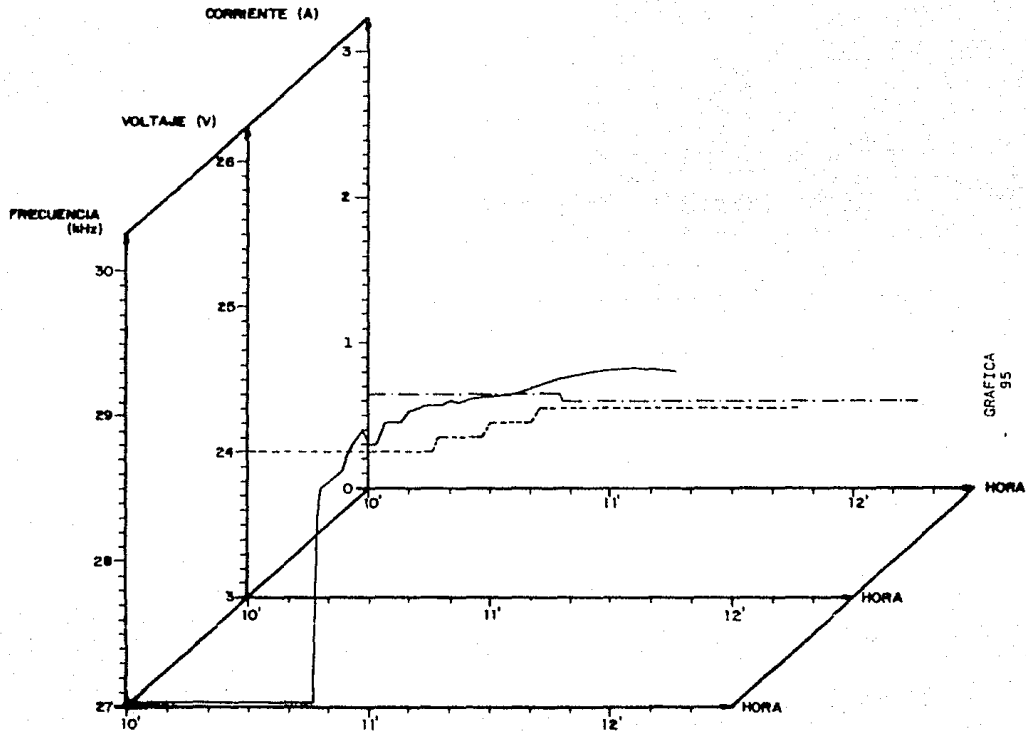
En una hora treinta minutos la diferencia de frecuencias fué de 2.24 KHz, la diferencia de voltaje es de 0.2 V. y de la corriente de 70 mA. Vemos que existe una dependencia entre la corriente de la fuente y la frecuencia del oscilador. El voltaje varió 1.25%. La corriente 10.77% y la frecuencia 8.10%. Tendremos que hacer una fuente que sea estable tanto en voltaje como en corriente.

La fuente que nos dió buen resultado es la que se muestra en el diagrama siguiente. La regulación de voltaje la efectúan integrados del tipo 7812 y 7912. La regulación de estos integrados es bastante buena alrededor del 0.1%.

Con esta fuente la frecuencia del oscilador fué de 27 KHz con una variación del 1%. Esta fuente será la que usaremos para todo el dispositivo ya que la corriente que entrega está dentro de los límites de las necesidades del circuito.

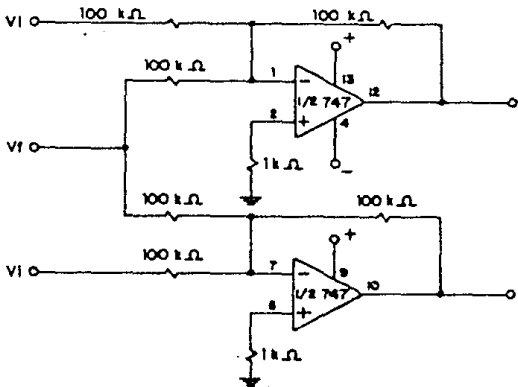
Siendo congruentes con nuestras definiciones la tierra irá a la masa de la máquina. Esto se hace con el fin de eliminar, lo más posible, las funciones erróneas por falta de una buena referencia.

Se hicieron pruebas sobre los dos osciladores. Estos osciladores entregan señales triangulares a una frecuencia muy cercana. Fotografiamos las señales del osciloscopio producidas por los osciladores.



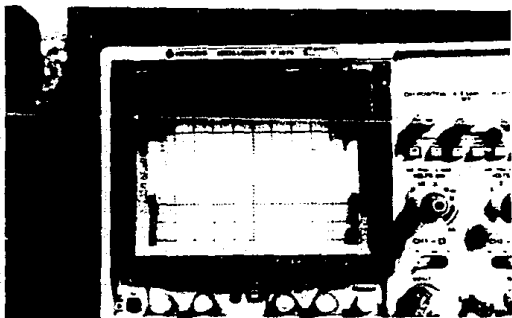
GRAFICA 95

Como vimos en la parte teórica debemos sumar las señales. Para realizar la suma usamos un sumador analógico con amplificador operacional. Damos a continuación el diagrama del sumador utilizado.



La salida de este sumador es una señal modulada en amplitud del tipo:

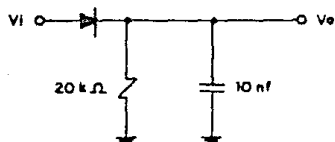
$$S(A + B) \left[\cos \frac{1}{2} (\omega_0 + \omega_1) t \cos \frac{1}{2} (\omega_0 - \omega_1) t \right]$$



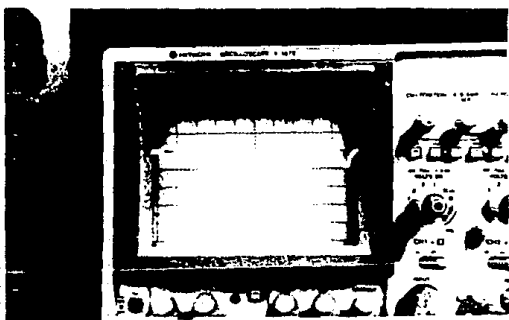
SERIAL QUE SALE DEL SUMADOR.

en donde la señal portadora es $\cos \frac{1}{2} (\omega_c + \omega_m) t$ y la señal moduladora es $\cos \frac{1}{2} (\omega_c - \omega_m) t$.

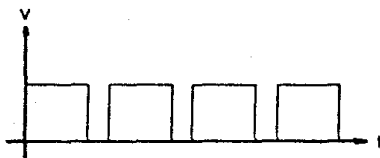
Según vimos en la teoría la señal moduladora es la que nos interesa. Para obtenerla utilizamos un circuito de tipo detector de AM. Este circuito se muestra en el diagrama siguiente.



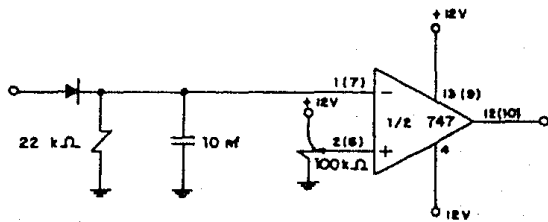
El voltaje V_o a la salida del circuito detector es:



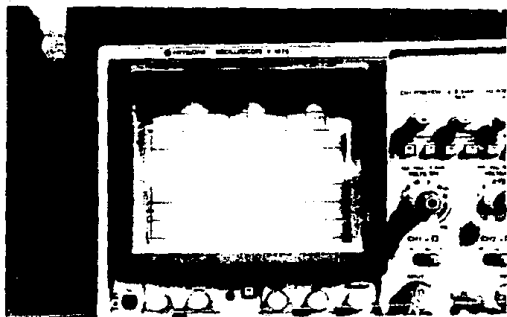
Necesitamos una salida de la siguiente forma:



Esta señal la podemos obtener haciendo uso de un amplificador diferencial que se muestra en el siguiente diagrama.



Este circuito dió una señal del siguiente tipo.



La señal anterior es la que se desea para la medición.

3.3.3.6 DISPOSITIVOS DE SALIDA.

Una vez que se tiene el tren de pulsos como una manifestación de la variación de la diferencia de frecuencia entre dos señales, como vimos en los capítulos anteriores, queda por hacer un dispositivo que nos dé de una manera medible esa diferencia. La señal a la salida podrá ser medida en forma analógica, en forma digital, o de ambas formas, es decir entregará las dos formas de tratamiento de la señal.

Pero para que esto sea posible tenemos que convertir al tren de pulsos en una señal analógica para representar como niveles de voltaje los distintos valores de frecuencia.

En el estudio del capacitor encontramos que la resolución del capacitor era de 21.7 Hertz de variación del oscilador por cada micra de desplazamiento. Esta resolución nos indica que cuando el palpador en la membrana se mueva una micra, el oscilador habrá variado 21.7 Hz su valor original. El problema a resolver es obtener como un nivel de voltaje esos 21.7 Hz. Es deseable obtener un nivel de voltaje lo suficientemente amplio para dar a la resolución obtenida en el capacitor un representación más ampliada.

Encontramos que la mejor manera de hacer esta función sería obtener un circuito que convierta la frecuencia a voltaje. En electrónica se llaman convertidores frecuencia-voltaje. Básicamente el convertidor produce un voltaje de salida por el tiempo promedio de los pulsos desarrollados con cada ciclo de la señal. En el diagrama 3.3.3.6.1 mostramos un convertidor de este estilo.

La operación de este circuito es la siguiente: el amplificador A_1 opera como un comparador que convierte la señal de entrada en una señal cuadrada controlada en amplitud. Si la señal de entrada tiene intervalos de tiempo diferentes arriba y abajo del nivel cero, el comparador dará una señal con las mismas desigualdades, esto no afecta al voltaje de salida. Después del comparador, la señal es diferenciada, rectificadora y el promedio es el que leemos como una salida de D.C. La diferenciación y rectificación son ejecutadas por A_2 . Por los rápidos tiempos de caídas y levantas de la señal de voltaje a la salida del comparador, el capacitor de diferenciación C_1 produce pulsos de corriente que son aplicados a los transistores y al diodo por A_2 . Una sola polaridad de los pulsos de corriente es conducido por los transistores al amplificador de salida A_3 . Por esta acción de rectificación un solo pulso de corriente por ciclo es conducido a A_3 no importando las caídas y levantas de la señal. Como un resultado, el tiempo promedio de los pulsos que van a A_3 es independiente de la simetría de la señal.

El promedio es ejecutado por C_2 . El promedio de la corriente es determinado por el cambio en la carga del capacitor y por el tiempo entre los pulsos. Esto es expresado por:

$$dQ = 2V_2C = Idt \quad \text{para } R_2C_1 \ll dt$$

el término dt es el tiempo entre pulsos, que se conoce como el período de la señal o el inverso de la frecuencia. Así, el promedio del voltaje generado por el flujo de i en R_2 es referido a la señal de entrada por:

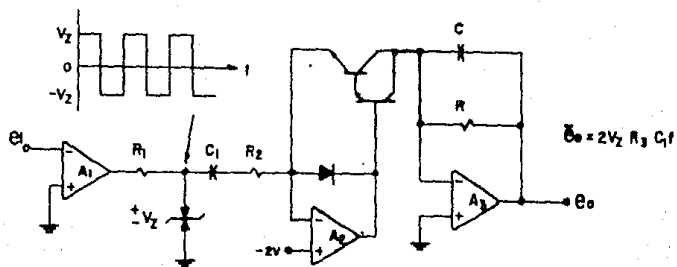


FIG. 3.3.3.6.1

$$e_0 = 2V_R3C1f$$

Gran parte del ruido en la salida es filtrado por el amortiguamiento del voltmetro usado para leer la salida. En bajas frecuencias la precisión del convertidor frecuencia-voltaje está determinada por los componentes de la expresión de arriba. Tendremos que hacer que el convertidor frecuencia-voltaje entregue cero volts cuando la frecuencia sea cero Hz, ya que en este momento no hay desplazamiento en la membrana.

Esta es la base de la lectura de la medición. El siguiente punto es el relacionado con la forma de dar la lectura.

Podemos entregar la lectura en forma analógica y leer el resultado de la medición en un galvanómetro que lo hacemos trabajar como voltmetro. Pero la forma deseable de entregar las lecturas es por un medio digital. Es preferible por dos motivos. El primero es que podemos leer la medición en despliegue de siete segmentos. La segunda es que tenemos los datos de lectura en forma que resulta clara para que una computadora pueda aceptar y almacenar los datos. La medición en forma analógica la podremos convertir en una medición digital por medio de un circuito analógico-digital. Con esto hacemos que la lectura de la medición sea un palabra de ocho, dieciséis o más bits.

Existen muchos circuitos que realizan la conversión de una señal analógica a una palabra digital, pero la configuración que mejor se presta para los tiempos de la computadora es el mostrado en diagrama de bloques de la figura 3.3.3.2. En este diagrama utilizamos un contador de ocho bits que va a la entrada del convertidor digital-analógico (DAC 00), este circuito entrega una señal analógica que es una entrada a un comparador; la otra entrada es la señal analógica que viene del convertidor frecuencia-voltaje; si la salida del comparador tiene algún valor lógico (se usa un comparador Schmitt-Trigger) el contador incrementará su salida en un bit. Cuando se usan convertidores, éstos tendrán una incertidumbre en el bit menos significativo. Con este circuito estamos restringidos para obtener 256 valores diferentes no importando el signo ya que éste nos lo da el circuito con el que obtenemos la lectura en tres ejes. Ver el inciso 3.3.2.- Posibilidad Mecánica De Seis Grados de Libertad. Estos circuitos solamente se mencionan sin que fuera posible su implementación práctica.

4.- CONCLUSIONES: EXPECTATIVAS QUE OFRECEN LOS TRANSDUCTORES CAPACITIVOS DE TRES DIMENSIONES.

Como se ha visto a lo largo de esta tesis que los transductores capacitivos son de mucha utilidad para el campo de las mediciones. Esto se debe a que no tienen las desventajas de los transductores inductivos, en cuanto a peso y tamaño. Pero sobre todo no tienen el inconveniente del costo. Las cabezas de medición del tipo inductivas tienen la ventaja de ser muy precisas del orden de las micras o menos, como la cabeza de la casa Zeiss, pero tiene el inconveniente de ser muy grandes, muy costosas, difícil su mantenimiento y de tener un costo muy alto. Otro inconveniente es que sólo se puede usar en máquinas Zeiss.

Para realizar la presente tesis nos movimos en los siguientes puntos que son de fundamental importancia a la hora de sacar una conclusión.

- a).- Que la cabeza fuera, funcionalmente, idéntica a las cabezas del tipo inductivo de la casa Zeiss.
- b).- Los componentes que la hacen funcional se puedan conseguir en cualquier parte del país.

Para el punto a).- Es nuestro sentir que lo hemos realizado a entera satisfacción pues aunque la precisión no es igual a la de una Zeiss, es suficiente para mediciones de tipo industrial y permite añadirle funciones a la MHC mencionada en el inciso 3.2.1. La parte en que pensamos que superamos a ésta es en lo que respecta al peso y al tamaño. El peso es de solamente 250 gramos con todo y los circuitos. El tamaño es de 60 mm por 72 mm, nos parece muy pequeña.

El punto b).- Lo planteamos con el fin de que su mantenimiento no fuera costoso. Como consecuencia los circuitos no son complejos pero son muy confiables. La cuestión de la compra de materiales electrónicos en el país es de particular importancia para operar una máquina con cierta tecnología que tenga automatización. Es posible diseñar un circuito con un componente de importación, digamos un circuito integrado especial o un elemento pasivo con un valor poco conocido. Si el componente falla, lo cual es muy factible, ya no sirve el circuito y por consiguiente, la máquina que lo contiene.

Para operar un transductor capacitivo no es necesario tener las grandes instalaciones y los conocimientos de un sabio. Lo que requerimos es de unos pocos conocimientos básicos y unas cuantas herramientas y lo hacemos sin ningún problema. Los circuitos, como ya lo dijimos, no son complicados ni costosos. Como resultado estos serán muy confiables y muy baja la probabilidad de un mal funcionamiento.

En cuanto a los ajustes que debemos dar a la cabeza capacitiva son mínimos al momento de inicializarlos, después son prácticamente nulos en lo que a la parte mecánica se refiere. La electrónica requiere de ajustes muy escasos, una vez ajustados los osciladores ya no hay que tocarlos, si se tocan hay que ponerlos a punto con ayuda de un osciloscopio o un frecuencímetro.

En la actualidad los transductores capacitivos se están utilizando con mayor interés por parte de los metrológicos e instrumentistas. Los capacitores se pueden poner a medir en cualquier medio ya que la capacitancia es, por definición, una cuantificación de carga eléctrica entre dos superficies conductoras. La parte central es por lo general un dieléctrico del cual se conocen sus características. Si no se conocen las características de un dieléctrico podremos hacer un capacitor de placas paralelas y con él hacemos un oscilador, un vez que está funcionando lo medimos su frecuencia. Como conocemos la ecuación que rige el comportamiento del oscilador despejamos de dicha ecuación el valor de la capacitancia. Por medio de la ecuación de la capacitancia entre dos placas paralelas obtenemos el valor del dieléctrico.

Este principio es el inicio de la técnica de medición por medio de capacitores de gap variable. Es interesante señalar que la variación de la capacitancia es un medio muy preciso y repetible. Es posible realizar una medición con el incremento de carga entre las placas para que aumente la corriente conforme disminuye la distancia entre las placas. Esta corriente de salida permite el control de posicionamiento o la medición del desplazamiento.

En forma de conclusión diremos que los capacitores son el medio más barato, simple y práctico para realizar una medición de gran precisión, repetibilidad en lugares en donde los recursos no son muy altos pero hay necesidad de un control de calidad riguroso.



DIAGRAMA DE BLOQUES DE UNA MAQUINA DE MEDIR POR TRES COORDENADAS.



CABEZA DE MEDICION INSTALADA EN LA MAQUINA.

BIBLIOGRAFIA GENERAL.

Damos las referencias de la información que se consultó para los diferentes capítulos de la presente tesis. La lista es completa y se dan las referencias como una guía de todo lo consultado y leído para el desarrollo de este trabajo.

- Revista Mitutoyo, Marzo 1988.
Segundo principio de la Geometría Analítica
pag. 3-4.
- Sykes M. Wotton-under-edge, Great Britain.
Application of Touch Trigger Probe Systems in Manufacturing.
Industrial & Production Engineering 3-195
pag. 42-45.
- Schott H., Herberg H.
Microcomputer Controlled Position Sensitive Measurement System.
Academie of Science of the GDR,
Central Institute of Nuclear Research Rossendorf,
DDR-8051 Dresden,
DDR.
- Knapp, J.
Einfacher Anpasser für Kapazitive Sensoren.
Technisches Messen tm, 54
Jahrgang, Heft 3/1987.
- Smith, G.M.
Method and Apparatus for three-dimensional Position Measurement.
IBM Technical Disclosure Bulletin Vol. 27, No. 3, July, 1984.
- Pallás Areny, Ramón.
Interfases para Transductores. 5. Interfases para transductores
capacitivos e inductivos: puentes de alterna.
Regulación y Mando Automático, Julio 1984
pag. 121-124.
- Willem Chr. Heerens.
Basic Principles in designing Highly Reliable Multiterminal
Capacitive Sensors and Performance of Some Laboratory Test
Models.
Sensors and Actuators, 3 (1982/83),
pag. 137-142.
- Neuman M. R., Berec A., O'Connor E.
Capacitive sensor for measuring finger and thumb tip forces.
IEEE Frontiers of Engineering and Computing in Health Care 1984
pag. 436-439.
- Peters L., Rodolfo, Tatto C., Ricardo, Legaria M., Gerardo.
Medidor electrónico de nivel por variación de capacitancia.
Memoria del Simposium del Instituto de Ingeniería.
Ponencia 4.

- Sullivan, John J.
Development of variable capacitive pressure transducer for vacuum application.
Journal Vacuum Sci. Technology, A.C. (3)
May/June 1985.
pag. 1721-1730.
- Barnett T. George.
Monolithic timer form transducer to recorder interface.
Electronics.
September 1, 1977
- Horne K. E., Francis J.H.
High performance variable inductance position sensor.
I. Mech. E., 1985
pag 331-336.
- IBM Corp. 1985.
Robot manipulator force/displacement sensor.
IBM Technical Disclosure Bulletin.
Vol. 28, No.5, October 1985.
pag. 1820-1822.
- Ma, W.H.; Shao B.X.; Fung, C.D.; Chen, W.J.; Yeh, G.J.
Capacitive pressure transducers with integrated circuits.
Sensor and Actuators, 4, 1983.
pag. 403-411.
- Hertzog, Klaus.
Zeiss multi-coordinate metrology. Hardware- Software application.
Produktbereich Industrielle Messtechnik.
Reprint form Zeiss Information 01.
- Robinson, Ivan E.
Predicting LVDT performance.
Robinson-Halpern Co.
Plymouth Meeting, Pa.
pag. 175-185.
- Zeiss, Carl.
Zeiss CNC coordinate measuring machines of industrial quality assurance.
- Lewis, Warren.
Recommended power and signal grounding for control and computer rooms.
Copyright material IEEE.
Paper No. PCIC-84-13.
pag. 63-76.
- Cotta-Ramusino, Francesco.
Modular system for Horizontal and Vertical machining centers.
Industrial & Production Engineering, 3-1985.
pag. 27-30.

Hull, Greg.
Sensing pressure electronically.
The industrial and process magazine. Feb. 1986.
pag 51-55.

Smith, M.J.C.; Price, Margaret A.; Shott, J.D.; Meindl J.D.
Integrated circuits for a capacitive pressure transducer. IEEE
Frontiers of Engineering and Computing in Health Care. 1984
pag. 440-443.

¿Minino de Chester, comenzó ella algo tímida, me podrías decir qué camino debo tomar para irme de aquí?

-Eso depende mucho a dónde quieras ir. Respondió el gato.

-Poco me preocupa a dónde ir.

-Entonces, no importa qué camino tomas.

-Con tal que lleve a alguna parte.

-Llevará siempre y cuando camines lo suficiente.

Lewis Carroll.