



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

DESARROLLO E IMPLEMENTACION DE UN PROCESO  
INDUSTRIAL AUTOMATIZADO DE PRESION

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
P R E S E N T A N :  
SR. ERICK R. FERNANDEZ ROMERO  
SR. CESAR GARDUÑO ROJAS  
SR. RAUL OLIVARES BONFIGLIO  
SR. MARCO YAÑEZ MARMOLEJO

DIRECTOR DE TESIS:  
ING. ALEJANDRO RAMIREZ LOZADA



MEXICO, D. F.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

ABRIL DE 1994



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.

A mis Padres:

Prof. Rodolfo Fernández Figueroa

Profra. Ma. Irma Romero Nava

Con todo mi cariño y agradecimiento, por todo lo que me han brindado en cada uno de los momentos de mi vida y que gracias a sus esfuerzos, amistad y amor, han hecho posible que alcance una de mis metas.

Gracias por todo.

A mis hermanos:

Lic. Rodolfo Fernández Romero

Profra. Adriana Fernandez Romero

Profra. Irma Fernández Romero

agradeciendoles el cariño y el apoyo que me han brindado siempre, no solo como hermanos sino como verdaderos amigos.

A mis sobrinos:

Cristian Omar Ramírez Fernández

Jair de Jesús Ramírez Fernández

Yafé Ramírez Fernández

para que este trabajo represente un estímulo en su vida futura y nunca cesen en su lucha por las metas que se fijen, deseandoles tengan éxito en la vida.

A mis queridos Abuelitos:  
Sr. Gregorio Romero Buendía  
Sra. Marina Nava de Romero  
Sr. Manuel Fernández Castrejón †  
Sra. Isabel Figueroa de Fernandez †

A la Doctora en Ciencias Josefina Avila Nava  
por el apoyo brindado a todo lo largo de mi  
carrera.  
Por su amistad y amor.

A mis tíos y primos  
con cariño

Al Instituto " Villa del Sur"

A mis amigos y compañeros  
Marco A. Yañez Marmolejo  
Victor Reyes Vera  
Fernando de Santiago  
José Avila Gómez  
Marco A. Equihua Pérez

A mis Amigos

Erick Ricardo

A mi Madre:

Por su gran esfuerzo, preocupación, y todo ese cariño que me han brindado para terminar mi carrera con éxito.

A mi Padre:

Que dió su vida para logramos una buena educación y un gran ejemplo como hombre.

A mis hermanos:

Por lo que de ellos he aprendido a lo largo de mi vida

A mi novia y amigos:

Por su ayuda, impulso, compañía e invaluable amistad

Cesár

A mis Padres Sarita y Raúl

Por su amor y su paciencia, por tener fé en mí y en mis ideales.

A Patricia

Por su amor y su ejemplo, por permitirme acompañarle en la vida.

A mis Hermanos Lilia, María Elena, y Fernando

Por su cariño, apoyo irrestricto y por su ejemplo.

A Ricardo Tatto y Ricardo Wong, mis amigos

Por esa entrañable amistad, y por guiarme en alcanzar mis sueños.

A Juan Manuel Wong Urrea

Por su amistad y todo el soporte que ha permitido que esta tesis sea una realidad.

Raúl

Dedico esta tesis

A Lurditas, mi Madre que en ella ve realizado uno de sus sueños.

Y en gratitud de toda una vida.

A Manuelita por su amor y cariño.

A mis hermanos

Saulo

Omar

Adriana

Mauricio.

A mis sobrinas.

A mis tíos y primos Marmolejo Alvarez.

A mis amigos de facultad en especial

Martín Villavicencio Cisneros

Tomás Tomé Vidal

Margarita Lara Gúzman.

En memoria de

Rafael Marmolejo Chavez †

Roberto Marmolejo Alvarez †

Rafael Marmolejo Alvarez †.

**A nuestra Universidad**

**A nuestra Facultad**

**A nuestros Profesores**

**Un reconocimiento especial para los señores**

**Ing. Francisco Javier García Osorio**  
Asesor de diseño mecánico del Transductor

**Ing. Alejandro Ramírez Lozada**  
Director de Tesis

**Ing. Martín Villavicencio Cisneros**  
Ing. de Proyectos de AEEC, S.A.

**por su invaluable orientación, paciencia, y amistad.**



# CONTENIDO

## I. INTRODUCCION

### 1. INTRODUCCION A LOS TRANSDUCTORES DE PRESION

- A. Antecedentes
- B. Transductores de Presión
  - B.1 Tipo y clasificación
  - B.2 Tubos de Bourdon
  - B.3 Presión e indicadores de Presión
  - B.4 Tipos de indicadores de Deformación

### 2. TRANSDUCTORES DE PRESION EN EL MERCADO NACIONAL

### 3. CONSIDERACIONES DE DISEÑO DEL TRANSDUCTOR DE PRESION

- A. Cálculo de la taina
- B. Conformado de materiales y accesorios

### 4. FABRICACION Y PRUEBAS DE LA ETAPA ELECTRONICA

- A. Desarrollo y alternativas
- B. Implementación

### 5. CONTROLADORES LOGICOS PROGRAMABLES EN PROCESOS INDUSTRIALES

- A. Principios de operación
- B. Aplicaciones
- C. Situación actual de los PLC's en el mercado

### 6. IMPLEMENTACION DEL LAZO DE CONTROL UTILIZANDO UN CONTROLADOR LOGICO PROGRAMABLE

- 6.1 Selección
- 6.2 Diseño
- 6.3 Instalación y cableado
- 6.4 Operación
- 6.5 Mantenimiento

### 7. CONCLUSIONES

### BIBLIOGRAFIA

## INTRODUCCION

## **INTRODUCCION**

En la industria petrolera existen depósitos de derivados líquidos y gaseosos. Debido a la explosividad de los productos, el manejo del almacenaje podría pensarse que es complejo, preciso y delicado.

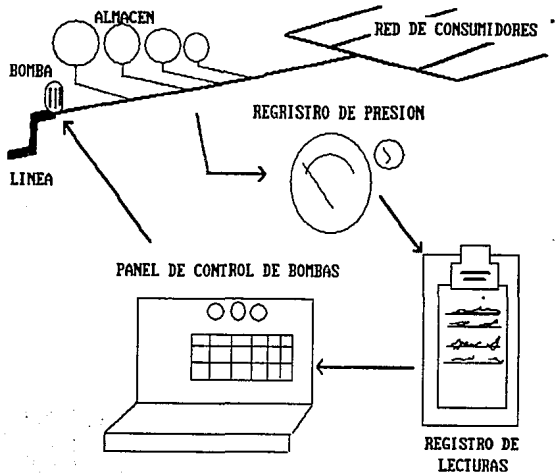
Sin embargo, y particularizando en el proceso de regulación de presión, esto no es así, ya que se realiza a intervalos de tiempo muy grandes y a través de las lecturas de presión en los depósitos realizado por personal de la planta.

Después de tomada la lectura, esta es anotada en una tabla con mediciones históricas, y es posteriormente cuando un supervisor de producción las revisa, que se hace un análisis de la demanda y se toman acciones de control sobre los compresores o unidades de bombeo y las válvulas, a fin de recuperar la presión del sistema a condiciones de operación estables.

Lo anterior describe un proceso de control en donde las acciones correctivas se ejecutan con un gran retardo dando lugar a que las posibilidades de un siniestro crezcan. Lo anterior es debido a que el análisis de la decisión tomada es valorada hasta el siguiente de ciclo de lectura de los valores de presión.

Las lecturas de presión se realizan a través de dispositivos de medición que no tienen capacidad de registro.

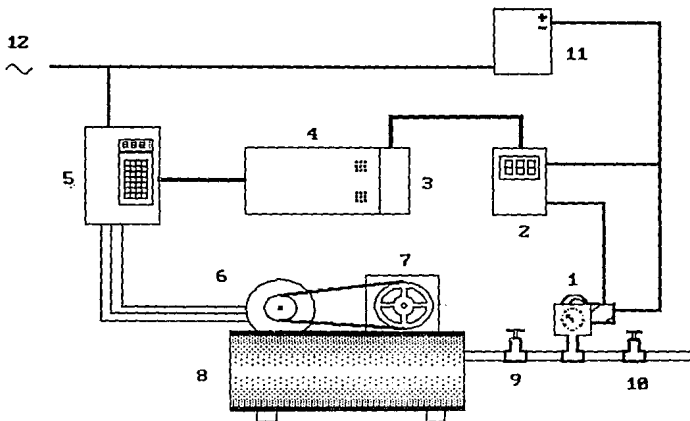
Se carece por completo de un equipo que procese y registre el comportamiento del sistema de almacenamiento de productos petroquímicos.



Es intención del presente trabajo, ofrecer una opción de funcionamiento al sistema descrito, de manera tal que las acciones de control puedan ser inmediatas y automáticas, dejando abierta la posibilidad de que un operador accione en un panel de control de forma manual al sistema, y permitir a su consideración que el lazo de control pase a una operación automática.

Se pretende desarrollar un transductor de bajo costo y con características comerciales de eficiencia y funcionamiento tal que permita emitir señales proporcionales a la presión medida y estas sean procesadas a través de un controlador lógico programable (PLC), de modo tal que se puedan implementar procesos de medición de bajo costo, y aprovechar la disponibilidad, seguridad, economía y confiabilidad de los PLC's en procesos industriales.

A fin de poder generar una opción en términos reproducibles en un laboratorio, que nos permitiera evitar la situación de trabajar directamente en las líneas presurizadas de conducción de petroquímicos, se requirió hacer un modelado del sistema de regulación de presión (ver figura 1).



**DIAGRAMA DE PROCESO DE REGULACION DE PRESION**

1	Transductor	6	Motor Trifásico	11	Fuente de DC
2	Digitalizador	7	Compresor	12	Señal de AC
3	Interfase	8	Tanque Presurizado		
4	PLC	9	Uálvula de Mtto.		
5	Inversor	10	Uálvula de Paso		

## **CAPITULO 1**

### **INTRODUCCION A LOS TRANSDUCTORES DE PRESION**

**A. Antecedentes**

**B. Transductores de Presión**

**B.1 Tipo y clasificación**

**B.2 Tubos de Bourdon**

**B.3 Presión e indicadores de Presión**

**B.4 Tipos de indicadores de Deformación**

## A . ANTECEDENTES

Por muchos años el lenguaje relacionado con transductores fue muy confuso y sólo unos cuantos ingenieros y científicos tenían un claro entendimiento de el tamaño de la variedad en sus operaciones principales y su comportamiento bajo operaciones y condiciones ambientales diferentes.

En mayo 5 de 1960, la Sociedad de Instrumentos de América organizó un comité, para estudiar las necesidades de estandarización en el campo de transductores aeroespaciales. Diversas prácticas recomendables y documentos estándar, fueron desarrolladas por este comité. Los estándares básicos, primero desarrollados fueron una práctica recomendable para la nomenclatura y terminología de transductores.

No fue hasta 1960 cuando se hicieron esfuerzos para probar una simplificada pero exacta clasificación de tipos de transductores y sus características generales.

En los últimos decenios con los grandes avances de la electrónica y las ventajas que ofrece trabajar con señales eléctricas, se tiene una tendencia a reemplazar los instrumentos de medición tradicionales por sistemas electrónicos.

El transductor ha tenido una variedad de definiciones tales como el de un instrumento capaz de transferir energía entre dos o más sistemas, estados físicos, sistemas de información o sistemas de transmisión. Estas son definiciones que muestran amplios usos prácticos y que nos llevarían a considerar muchos instrumentos como transductores bajo esta definición general. Por lo tanto, deberemos limitarnos al campo de la medición y control de instrumentación.

Una definición de transductor usada en el campo de la medición es mencionada a continuación:

Un transductor es un dispositivo designado para sensar una cantidad física, propiedad o condición, proporcionando una salida con mayor facilidad de manejo para poder ser cuantificada. Es decir, transforma el impulso proporcionado por la variable que se desea medir a una señal eléctrica.

En algunos casos, otras mediciones pueden ser calculadas a través de ecuaciones que describen el comportamiento de su función correspondientes a lo que el transductor este sensando ( ej.: la velocidad es un cambio del desplazamiento por unidad de tiempo ) .

Con excepción de algunos transductores, se requiere una excitación eléctrica para su operación. La excitación se establece usualmente en términos de voltaje D-C o A-C , o de una corriente aplicada al transductor.



La salida es una cantidad eléctrica producida por el transductor la cual es usualmente una función continua en términos de corriente, variación de voltaje, o amplitud de voltaje o una variación de otros parámetros como capacitancia o inductancia. Las salidas analógicas pueden estar en función de la frecuencia. Algunos transductores producen una salida que representa la magnitud de la " variable " en función de una cantidad discreta.

Para que la lectura que indique el instrumento represente la variable, es imprescindible que el transductor proporcione una señal eléctrica que sea un fiel reflejo de la cantidad original. Es decir, debe tener ciertas características que den una confiabilidad y seguridad del buen funcionamiento, que por lo regular, son difíciles de conjuntar, si se mejora alguna de ellas notablemente es probable que la otra se haga deficiente. Así pues, hay que considerar cómo contribuyen los factores individuales para observar la respuesta de nuestro sistema y que cumpla con los requerimientos que éste necesite.

Podemos clasificar las propiedades y características de los transductores en estáticas y dinámicas. Las características del transductor las cuales usualmente son determinadas durante la calibración en condiciones adecuadas para la aplicación de la medición en intervalos de amplitud discretos, se conocen como características estáticas de un transductor. Cuando un transductor es usado para medir una variable donde ocurran cambios para realizar dicho proceso o cuando el procedimiento cambie para obtener los niveles de medición para ser monitoreados, las características dinámicas del transductor deben ser establecidas.

A continuación se describirán de una manera general algunos factores y características recomendables en sus propiedades para lograr un buen funcionamiento del transductor a utilizar.

### **Adecuada Sensibilidad y Rango**

Sensibilidad es la relación de la señal de salida o respuesta del instrumento a un cambio de la entrada o variable a ser medida.

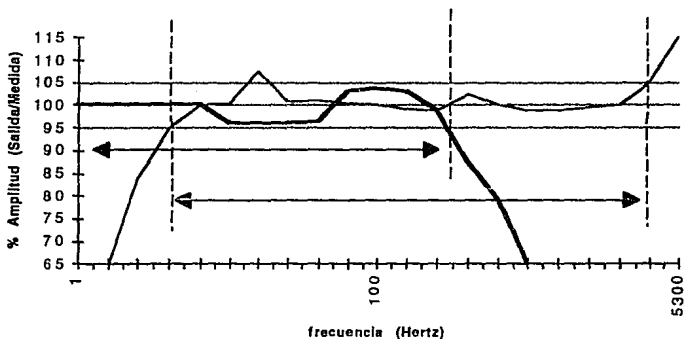
El rango es la diferencia entre la mínima y la máxima lectura del instrumento, la cual debe ser adecuada para la magnitud de la medición de la variable física que se trate.

Es raro para un transductor de cualquier tipo tener un alto rango dinámico junto con una alta sensibilidad, siendo estas por lo general proporcionales, es decir, para rangos mayores la sensibilidad no será tanta como para un instrumento de rango menor.

## - Adecuada Respuesta en Frecuencia

Cuando la variable aplicada al transductor varía sinusoidalmente sobre un rango de frecuencia establecido, el cambio con frecuencia de la relación de amplitud de la medida de salida se conoce como Respuesta en Frecuencia de el transductor. Es usualmente especificada como " dentro  $\pm \dots$  % de  $\dots$  a  $\dots$  Hz. " y debe ser referida a una frecuencia de referencia dentro del rango ( frecuencia de referencia ) y a un específico nivel de amplitud ( amplitud de referencia ) . Un ejemplo se muestra en la figura 1 . Representa la típica curva de respuesta de un transductor para mediciones estáticas y dinámicas ( curva A ) y un transductor para medidas únicamente dinámicas ( curva B ) . Lo anterior tiene una respuesta en frecuencia dentro  $\pm 5\%$  de 0 a 800 Hz referido a 10 Hz. La respuesta en frecuencia de la posterior es dentro de  $\pm 5\%$  de 10 a 3500 Hz., referido a 100 Hz. La amplitud de referencia no es establecida para estos ejemplos generales.

Una diferencia de tiempo siempre existe entre la salida y las variaciones de medición. El retardo de la salida detrás de la medida. Si este cambio de fase es significativo para la medición; la respuesta en frecuencia puede adicionalmente ser establecida en términos de la fase de diferencia entre la salida y la medida.



### **- Libre de Influencias Externas**

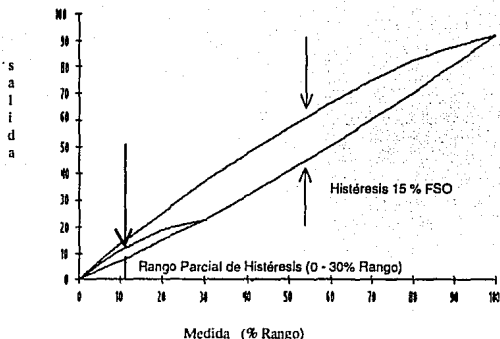
Cuando las condiciones bajo las cuales un transductor opera difiere de condiciones aisladas u otras condiciones estáticas, un número de errores pueden aparecer en la salida del transductor los cuales pueden ser considerados por separado. Las condiciones externas específicas ( temperatura, choques, vibraciones, etc. ) para cada transductor que pueden ser expuestas durante el envío, almacenaje, manejo y operación constituyen las condiciones ambientales para cualquier transductor.

En el funcionamiento de un transductor, a la combinación de la temperatura ambiental de  $25 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$  (  $77 \pm 18 \text{ }^\circ\text{F}$  ), una relativa humedad ambiental de 90% o menos y una presión ambiental de 26 a 32 plg. de Hg. (mercurio) constituyen el ambiente conocido como condiciones ambientales adecuadas de funcionamiento. Controlar el ambiente dentro de estos límites es adecuado para las pruebas estáticas en la mayoría de los transductores. Algunos tipos son muy sensibles a cambios ambientales, porque por su rango o su diseño, ese control ambiental debe estar dentro de sus estrechos límites de funcionamiento.

### **- Libre de Efecto de Histéresis**

Cuando un nivel dado de medida es accedido, primero incrementando sus valores y después decrementándolos, ambas salidas obtienen lecturas usualmente diferentes una de otra, primeramente por una cierta acumulación de retrasos durante la acción del elemento sensor. La máxima diferencia entre la pareja de las salidas registradas aún obtenida durante cualquier ciclo de calibración se conoce como histéresis del transductor. La histéresis es expresada comúnmente en porcentaje de la escala completa de salida.

## Histéresis



### - Facilidad de Calibración

Es una costumbre el describir las características de error en términos de sus efectos en la salida. Las características pueden ser determinadas por una prueba durante ciertos valores conocidos de medidas que son aplicadas al transductor y que corresponden a las lecturas de salida que son registradas (calibración).

Una ejecución de esta prueba en el rango entero del transductor, una en forma ascendente y otra en forma descendente se conoce como ciclo de calibración. Una calibración comprende usualmente dos o más ciclos de calibración.

Una calibración estática es efectuada bajo condiciones adecuadas, es decir, en ausencia de aceleración, choques o vibración en intervalos discretos.

Una calibración dinámica es una calibración durante la cual la medición es hecha en variación con el tiempo de una manera específica, y la salida es registrada en función del tiempo.

El registro de prueba obtenido de la calibración es conocida como registro de calibración con lo que obtenemos la curva de calibración que es una representación gráfica de este.

## **- Exactitud y Error del Transductor**

Existe una estrecha relación entre la salida teórica o ideal y su medición. Si el transductor fuera hecho con materiales, diseño, métodos y condiciones ideales el valor de la medida podría ser exacto y podría tener una respuesta que fuera descrita por un modelo matemático, una gráfica o una tabla con valores ideales y el transductor sólo respondería por la medición. La salida de los transductores actuales es afectada por causas no ideales que provocan una desviación en el valor verdadero a medir. La diferencia entre un valor ideal y el valor indicado por la medición se conoce como error del transductor, siendo expresado usualmente en porcentaje de la escala total.

Exactitud es definido como la relación de error de la escala total de salida y puede ser expresado en  $\pm \dots \% \text{ ECS}$  (de la escala completa de salida).

El conocimiento de los errores individuales pueden en ocasiones ser usados para corregir los datos finales y así incrementar la exactitud de medición.

### **REPETIBILIDAD:**

Es la habilidad de un transductor para reproducir las lecturas de salida cuando una misma medida es aplicada consecutivamente, bajo las mismas condiciones y en la misma dirección.

### **LINEALIDAD:**

En la mayoría de los tipos de los transductores, su uso común está designado para proveer una relación lineal entre la salida y la variable a medir, principalmente porque esto tiende a facilitar el manejo de los datos.

## B . TRANSDUCTORES DE PRESIÓN

### B.1 TIPO Y CLASIFICACIÓN

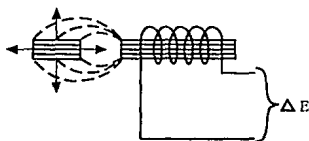
Los diferentes tipos de transductores son agrupados primeramente sobre las bases de sus principios de transducción. Los transductores más comúnmente usados se describen a continuación.

#### - Transductores Electromagnéticos

La generación electrodinámica de transductores está basada directamente en las Leyes de Inducción de Faraday. La medida es convertida en una fuerza electromotora ( voltaje de salida ) inducida en un conductor por un cambio en el flujo magnético en la ausencia de excitación. Este transductor por lo tanto es auto-generador .

Si un enrollamiento de un material conductor eléctrico atravesado por líneas de flujo magnético está en movimiento relativo a este flujo, o si el flujo que atraviesa el enrollamiento cambia con el tiempo, entonces una corriente eléctrica circulará por el enrollamiento.

El cambio en el flujo magnético es normalmente causado por el movimiento relativo entre un imán o una pieza de material magnético y un electroimán ( enrollamiento de material ferroso ) .



Transducción Electromagnética

#### - Transductores Capacitivos

En un transductor capacitivo la medida es convertida en un cambio de capacitancia.

Un capacitor consiste esencialmente en dos conductores ( platos ) separados por un aislante ( dieléctrico ), el cambio de capacitancia ocurre típicamente cuando un desplazamiento del elemento sensor causa un movimiento en la superficie conductora acercándose o alejándose de una superficie conductora estática. En otros casos ambos platos están estáticos y el cambio ocurre en el dieléctrico, tal como en una relativa proporción de un líquido y un gas en el espacio entre las superficies.

El principio de transducción capacitiva es utilizado en transductores de presión en cualquiera de los siguientes diseños básicos.

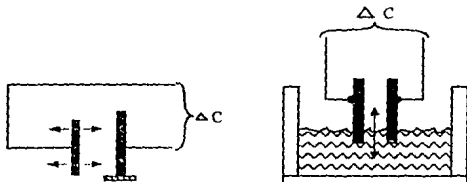
- 1) En donde la presión es aplicada por un diafragma el cual se mueve de y hacia un electrodo estacionario ( estator ).
- 2) En donde la presión es aplicada en un diafragma soportado entre dos electrodos estacionarios ( estatores ).

**Diseño Estator - Dual.** Ya que la versión del estator - dual provee de 2 a 4 ramas en un circuito puente A-C, mientras que le estator-singular está provisto de una sola rama, su uso es mayor en los transductores capacitivos. El elemento sensor es un delgado, metálico y plano diafragma. Aplicando y manteniendo una tensión se incrementa la frecuencia de resonancia del diafragma por encima de los valores usuales encontrados en vehículos y maquinaria reduciendo así errores de vibración en el transductor.

Desde que el fluido es admitido directamente por la abertura entre el estator y el diafragma, la constante dieléctrica de dicho fluido viene a ser significativa para las características de calibración de el transductor, especialmente cuando se trata de líquidos. En la mayoría de los gases puros, se tienen en la constante dieléctrica diferencias que pueden pasarse por alto.

En un transductor estator - dual, el diafragma es soportado de un extremo por una angosta y delgada pared cilíndrica y en cuyo lado opuesto se encuentra la montura donde se aloja el otro extremo.

Este método de soporte tiende a aislar el diafragma de las posibles deformaciones que pueda tener la carcaza. Los errores por temperaturas se reducen por la relativa resistencia a la corrosión por las aleaciones de material de níquel que se usa en el diafragma y la carcaza .



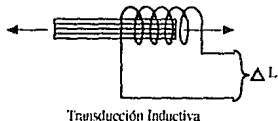
Transducción Capacitiva

## - Transductores de Presión Inductivos

En un transductor inductivo la medida es convertida a un cambio de la auto-inductancia de una bobina simple. Esto es usualmente efectuado por el desplazamiento del corazón de la bobina, el cual está ligado o atado a un elemento de sensibilidad mecánico.

En un transductor de presión inductivo, la autoinducción de una bobina simple es variada por los cambios de presión inducida en el desplazamiento de un miembro magnético en una cerrada proximidad con la bobina. El movimiento del diafragma hacia y desde el corazón de hierro cambia la inductancia de la bobina.

En otros diseños los cambios de inductancia son producidos por el desplazamiento del corazón de hierro dentro de una bobina. El desplazamiento puede ser creado por el movimiento de un fuelle o del viaje del extremo sellado de un tubo de bourdon . Este tipo de transductor es generalmente difícil de compensar por los efectos ambientales, temperatura especial, y los requerimientos extensivos del circuito externo. Así, éste es frecuentemente mucho menos usado que el transductor reluctivo.



### -Transductores de Presión Piezoeléctricos

En un transductor piezoeléctrico la medida es transformada en un cambio en la carga electrostática (  $Q$  ) o voltaje (  $E$  ) generado por ciertos cristales cuando son mecánicamente presionados.

Esta presión es llevada a cabo por compresión o fuerzas de tensión o por fuerzas de doblez ejecutadas directamente sobre el cristal por medio de un elemento de sensibilidad o por un miembro mecánico ligado a un elemento de sensibilidad.

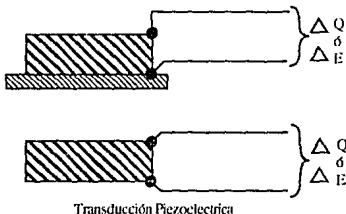
Los transductores de presión que contienen un elemento de transducción piezoeléctrico, son usados para presiones de alta frecuencia y mediciones de sonido-presión. La mayoría de los diseños de transductores usan un diafragma plano el cual dentro de la superficie está directamente en contacto con el cristal o el elemento de cerámica. Otros usan un disco, un columna o algo similar a una cadena mecánica para transmitir fuerza de deflexión al elemento. El movimiento de diafragma puede causar tensión / compresión, doblamiento o fuerza de corte en el elemento, dependiendo del diseño.

Algunos modelos usan un diafragma anular con un largo tornillo central. Los elementos de una sola pieza, son mayormente comunes. Los diferentes elementos de construcción incluyendo a un elemento semicilíndrico dual, ha sido usado en algunos diseños.



Los efectos de temperatura en los transductores de presión piezoeléctricos pueden ser minimizados por medio de la selección de materiales de cristal propios. La cristalina estructura de la mayoría de los elementos es afectada por la temperatura. A muy bajas temperaturas el cristal permanece aún polarizado pero su sensibilidad puede ser sustancialmente diferente del lugar en el que se encuentra. Los cristales de cuarzo están usualmente limitados a un rango de  $- 65\text{ }^{\circ}\text{F}$  a  $+ 200\text{ }^{\circ}\text{F}$ . Varias mezclas de cerámica que han sido más recientemente desarrolladas extiende el rango de temperatura de operación en ambas direcciones.

Los efectos de aceleración pueden ser minimizados por el diseño mecánico adecuado reduciendo tanto como sea posible la acción del diafragma y la cadena mecánica así como la masa sísmica. Un diseño de transductor de elemento cerámico incorpora un acelerómetro piezoeléctrico el cual compensa la salida de la presión de la porción del transductor por efectos de aceleración a un grado considerable. Este tipo de transductor es útil para medir las variaciones en las presiones en el ambiente y los niveles de sonido de presión y alta intensidad en la presencia de vibraciones.



**Cristales.** Nos referimos comunmente al elemento piezoeléctrico como a un cristal no importando su origen ya sea natural o artificial. Una variedad de materiales de cristales es usado. Algunos de los que se utilizan en su estado natural son el cuarzo y la turmalina. Los cristales de sales de Rochelle y ADP ( fosfato dihidrogenado de amonio ) son desarrollados artificialmente con soluciones acuosas bajo condiciones controladas. Los elementos de cerámica son hechos de un fino material pulverizado.

#### - Transductores de Presión Potenciométricos

En un transductor potenciométrico, la medida es convertida a un cambio en la posición de un contacto movable a un elemento de resistencia. El desplazamiento del contacto movable cuasa un cambio en el radio entre la resistencia de un elemento de salida al contacto movable y el total de la resistencia del elemento. En su aplicación usual el elemento potenciométrico es exitado por una fuente de voltaje A-C o D-C y la salida es el radio del voltaje.

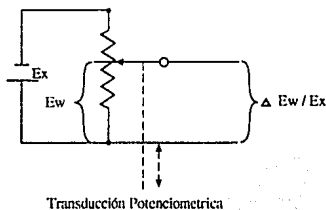
Los transductores de presión con elementos de transducción potenciométrica, son ampliamente usados por la industria debido a que su operación simple selecciona una salida de alto nivel, tiene relativamente bajo costo y disponibilidad inmediata. Un gran número de diseños y configuraciones han sido desarrollados para conocer los diferentes requerimientos de medición.

Los elementos sensitivos más comunmente usados son cápsulas (simples o múltiples) y tubos de burdon. Las cápsulas son usualmente usadas para rangos de presión arriba de 0-300 psi, y los tubos de bourdon son asides para rangos por encima de los 0-500 psi. Cualquier tipo puede ser usado en la región de los 300 a 500 psi. Los tubos de burdon de forma U y torcido han sido usados para rangos tan bajos desde 0-100 psi.

Los elementos de resistencia potenciométrica varían en longitud desde 0.2 hasta 0.8 plgs. en la mayoría de los transductores debido a que la escala completa de una cápsula es aproximadamente de 0.04 plgs., el movimiento del elemento sensor debe ser amplificado mecánicamente para mover la palanca por arriba de la longitud completa del elemento de resistencia.

La mayoría de los transductores de presión están diseñados para resistir una limitada cantidad de sobrepresión sin dañar o crear un cambio excesivo en su ejecución.

Los transductores de presión potenciométricos son ampliamente usados en vehículos o maquinarias donde son expuestos altos niveles de vibración. En algunos transductores se hace rodeando el tubo con aceite de silicon y si es necesario con fluido compatible con oxígeno líquido. El aceite amortiguador es efectivo en temperaturas desde - 100 °F a + 500 °F .



## - Transductores Reluctivos

En un transductor reluctivo la medida es convertida a un cambio de voltaje A-C por un cambio de la vía de reluctancia entre dos o más bobinas con una excitación A-C aplicada al sistema de la bobina.

La categoría de los elementos de transducción reluctiva incluye aquellos circuitos frecuentemente referidos como circuitos de reluctancia variables " Puente de Inductancia " y " Transformador diferencial " debido a que sus salidas son cambios de voltaje A-C. El cambio de la vía de reluctancia es usualmente llevado a cabo por medio de un desplazamiento de un corazón magnético.

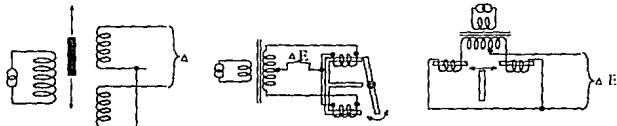
Los cambios de reluctancia en los circuitos magnéticos necesarios para producir cambios en la salida de voltaje en los transductores de presión reluctivos son comúnmente creados por alguno de los siguientes métodos:

1) La deflexión de un diafragma permeable magnético soportado entre dos bobina de corazón de hierro las cuales están conectadas como un puente de inductancia de dos brazos. El movimiento del diafragma decrementa el paso en la vía del flujo magnético de una bobina mientras que simultáneamente incrementa el paso en el otro camino del flujo en la bobina. El voltaje de salida es proporcional al radio entre las dos inductancias.

2) La rotación de un tubo de bourdon torcido con una tira de material permeable magnético fijado en su extremo sellado. La deflexión angular del extremo sellado del tubo causa deflexión en la armadura. El movimiento de la armadura decrementa el paso del flujo de una bobina e incrementa el paso de la otra bobina. Las dos bobinas están enrolladas alrededor de brazos opuestos de una coraza de hierro en forma de " E ". La conexión de la bobina y la producción de salida de voltaje, es el mismo que el anterior.

3) El movimiento de un corazón en un ensamble de triple bobina conectado como un transformador diferencial, el desplazamiento del corazón a cualquiera de las secundarias decrementa la vía de reluctancia e incrementa el acoplamiento magnético entre ese enrollamiento y el central localizado en el enrollamiento primario.

Eso produce un cambio en la salida de voltaje de una manera similar a la de circuitos de puente de inductancia. El movimiento de corazón es causado por la deflexión de los elementos sensitivos, cápsula, fuelles o tubo de bourdon. Frecuentemente con la asistencia de un engrane de amplificador mecánico.

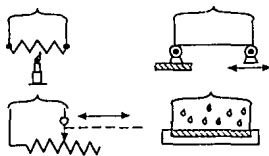


## - Transductores de Presión Resistivos

En un transductor resistivo, la medida es convertida en un cambio de resistencia. El cambio de resistencia en un conductor o semiconductor es realizado de varias formas, incluyendo el calentamiento o enfriamiento, aplicación de fuerzas mecánicas, secado o humedecimiento de cierto materiales tales como sales electrostáticas, o desplazamiento del contacto movable junto con el elemento de resistencia conectado al reóstato.

La compresión del polvo de carbón da lugar a un decremento de estos materiales de resistencia. Un diafragma, cápsula o fuelles puede proveer esta compresión. Los cambios de resistencia aparecen a través de dos superficies conductoras internas, una de las cuales puede ser el diafragma metálico.

Muchas de las pruebas que han sido satisfactorias fueron obtenidas con transductores cuyo elemento de sensibilidad consisten en dos resistores de carbón de un tipo disponible comúnmente conectado en dos brazos opuestos de un circuito de Puente de Wheatstone. Ya que los resistores de carbón incurren en una variación en su resistencia proporcional al ambiente de presión con resistores semejantes, el circuito puente produce un cambio en la salida de voltaje proporcional a la presión cuando el voltaje de excitación-puente es sostenido constantemente. El resistor activo constituye el elemento sensible junto con una porción de los elementos de transducción.



Transducción Resistiva

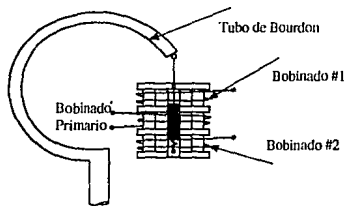
## B.2 TUBOS DE BOURDON

El tubo de Bourdon generalmente consiste de un tubo, un sección curva que gira en círculo, un extremo que esta conectado a la cuenca de aplicación (entrada) y el otro es la parte móvil que se conecta, con un sistema de engranaje a la aguja indicadora. La cuenca del tubo esta abierta para admitir el fluido mientras que el otro extremo esta sellado. El incremento de presión en el tubo, tiende a extenderlo moviendo así el extremo. El movimiento del extremo es transferido al sector, el cual mueve al piñón y al indicador.

El material del cual esta hecho y su tratamiento son de gran importancia. El movimiento que realiza el tubo proporcional a su diseño y el incremento de presión, determinarán el punto que señalará el indicador, la presión ejercida en el tubo.

El tubo de bourdon fue llamado así después de que el inventor francés Eugene Bourdon lo patentó en junio de 1849.

Dentro de sus diferentes formas encontramos el tubo curvo o torcido, oval o elíptico en su corte transversal.



### Tubo de Bourdon en Forma C

Tiene un ángulo total de curvatura de  $180^{\circ}$  a  $270^{\circ}$ . Variaciones en la configuración de forma C son: Tubo en forma U, el cual tiene la entrada de presión en el centro de su longitud en lugar de encontrarse en un extremo, así, esta aplicación de presión interna causa dos movimientos de deflexión; y el tubo en forma de J, el cual esta curvo solo en una porción de su longitud cerca de su extremo.

### Tubo de Bourdon Hélice

Tiene un comportamiento de deflexión similar al tubo en forma C. Es una variación del tubo Bourdon simple, que tiene un forma hélice, con cuatro o cinco vueltas, con este tipo se incrementa la movilidad de su extremo conectado al mecanismo indicador considerablemente, y su forma compacta facilita su aplicación. Un conector por el cual entra el fluido se conecta dentro del conducto del tubo tipo hélice, por donde circulará, haciendo que la hélice se dilate y expanda, moviendo así el indicador conectado a su extremo.

## **El Tubo de Bourdon Espiral**

El elemento de medición tipo espiral, es otra modificación del elemento Bourdon. Es un tubo plano enrollado en forma de espira. Cuando la presión es aplicada en la abertura de un extremo, el tubo tiende a desenrollarse y con este movimiento el extremo sellado que está conectado al indicador tendrá menores fricciones y eliminará la inercia para obtener una mejor medición.

## **El Tubo Bourdon Torcido**

Es un tubo plano torcido longitudinalmente. El número de vueltas varía entre dos a seis, pero también pueden tener menos de una vuelta completa dependiendo la aplicación que se requiera. El diseño especial del tubo torcido no muestra una apreciable deflexión hasta que se acerca a los límites del extenso rango de medida que poseen.

La exión del tubo de Bourdon varía con el radio de sus ejes, mayormente a menor sección transversal de los mismos a lo largo del tubo, a la diferencia entre la presión interna y externa, al radio de curvatura, al ángulo total del tubo curvo desde su centro de curvatura y la razón de torsión del tubo.

## **Materiales y Manufactura**

En su mayoría los tubos de Bourdon son metálicos. Las aleaciones utilizadas incluyen latón trabajado en frío, bronce, trescientas series de aceros inoxidable, precipitación endurecida con recubrimiento de berilio, propiedades de aleaciones de níquel tal como monel e inconel-x, y aleaciones de hierro templado con carbón, cromo, molibdeno y contenido en níquel. Ni-Span-C es uno de los materiales más populares, debido a que éste puede ser tratado en caliente, para minimizar los efectos en cambios de temperatura en tubos de deflexión característicos, con la excepción de los latones y bronce.

## **Amortiguamiento de la Vibración**

Los tubos de Bourdon, particularmente los tubos que adoptan diferentes posiciones son más sensibles a los choques y vibraciones que los diafragmas aunque son menos sensibles a los fuelles.

Los elementos del tubo de forma C pueden necesitar ser balanceados para efectos de vibración en la mayoría de los ejes sensitivos por un contador de peso en el "engranaje-mecánico" al elemento de transducción a menos que los requerimientos de movimientos de sellado de extremos, sean tan lentos que el tubo pueda ser muy resistente. Los tubos de hélice y espiral, sin embargo, están frecuentemente rodeados por un líquido semejante al aceite de silicón para amortiguar los efectos de vibración. El amortiguamiento es optimizado cuando el espacio alrededor del tubo es lo más pequeño posible.

La expansión del aceite amortiguador con la temperatura y el proceso de degradación del amortiguamiento y el cambio aparente de la presión de referencia puede ser impedido por una expansión de fuelles.

### **Tubos de Fuerza**

El elemento sensor del tubo de fuerza es utilizado en un limitado número de transductores. Su única similitud con el tubo de Bourdon está en sus acoplamientos finales, el sellado de un extremo en una terminación, la conexión de la otra y los materiales utilizados. El tubo de fuerza tiene una sección de cruces circular. Una presión diferencial a través de su pared causa una muy ligera contracción o expansión del diámetro del tubo (que indican una disminución o un aumento en la presión respectivamente). La deformación es máxima cerca del centro de la longitud del tubo. Un tipo de transductor usa el cambio en la frecuencia de resonancia del tubo causada por la deformación de la pared producida por un cambio en la presión aplicada.

## **B.3 PRESIÓN E INDICADORES DE PRESIÓN**

Entre los instrumentos de medición de presión encontramos los que emplean los elementos mecánicos y que varían desde el manómetro de presión con indicador de carátula, hasta los instrumentos indicadores o de registro, los cuales pueden incluir la transmisión eléctrica o neumática y controladores automáticos que estén incorporados en el instrumento.

La Presión la podemos definir de las siguiente manera :

- La acción de una fuerza que actúa en contra de cierta superficie dentro o no de un recipiente cerrado y generalmente se mide en términos de fuerza por unidad de área.

Encontramos términos asociados con las mediciones de presión que definiremos a continuación :

### **Presión Absoluta**

Esta es la presión del fluido medida con referencia al vacío perfecto o a la presión absoluta equivalente a cero. La presión absoluta equivalente a cero se obtiene únicamente cuando no existe el choque entre las moléculas, lo cual indica que la proporción de moléculas en estado gaseoso o la velocidad molecular sea muy pequeña. (presión que indica el manómetro de presión ordinario sumada a la presión atmosférica).

## **Presión Atmosférica**

Es la presión ejercida por la atmósfera de la tierra, tal como se mide normalmente por medio del barómetro ( de aquí el sinónimo de presión barométrica ). Al nivel del mar o a alturas cercanas a éste, el valor de la presión es aproximadamente de 14.7 lb/plg.-cuadrada abs. o de 29.9 plg ( 760mm ) de mercurio absolutas, disminuyendo estos valores con la altitud.

## **Presión Manométrica**

Se refiere generalmente a las presiones superiores a la atmosférica medidas por medio de un elemento que defina la diferencia entre la presión desconocida y la presión atmosférica existente. si el valor absoluto de la presión permanece constante y si la presión atmosférica aumenta, la presión manométrica disminuye. Así pues el valor absoluto de la presión manométrica puede obtenerse adicionando el valor real de la presión atmosférica a la lectura del manómetro.

## **Presión Diferencial**

Esta constituye la diferencia entre dos presiones medidas. La presión diferencial puede quedar indicada en un manómetro que haya sido arreglado para señalar la diferencia de presiones, lo que implica una referencia a cero colocada a la mitad de la escala para permitir lecturas en la otra dirección.

## **Vacío**

Este se refiere a presiones manométricas inferiores a la atmosférica y se mide frecuentemente con los mismos tipos de elementos con que se mide las presiones superiores a la atmosférica, es decir, la diferencia entre el valor desconocido y la presión atmosférica existente. Los valores correspondientes al vacío aumentan conforme se van acercando al cero absoluto , y por lo general se expresan en pulgadas de mercurio, pulgadas de agua o mm. de mercurio.

## **Presión Estática**

Es la fuerza por unidad de área ejercida en una pared y la cual es provocada por algún fluido en reposo ó cuyo flujo es paralelo a la pared del conducto. También es conocido como presión de línea.

## **Presión de Velocidad**

Esta presión es la producida por la velocidad del flujo, también conocida como carga de velocidad o presión de impacto. La presión debida al flujo es un factor que debe calcularse, ya que no puede determinarse a modo de una presión indicada.



## **Presión Total**

Es la suma de la presión estática mas la presión de velocidad ( también conocida como presión cinética ).

## **Presión ( o carga ) Hidrostática**

Es la presión localizada en cierto punto abajo de la superficie del líquido y la que se debe a la altura del éste arriba de dicho punto. Su valor 'P' a la distancia 'h' abajo de la superficie del líquido, cuya densidad es 'd', equivale a 'h' x 'd' x 'g', donde 'g' es la constante de gravedad y todos los valores tienen unidades constantes. El conocido manómetro o columna de mercurio, utiliza tal presión como medida de la presión desconocida.

## **Unidades de Presión**

Debido a que los instrumentos originales para medición de la presión, eran manómetros de tubo en forma U, las unidades de carga líquida se han empleado por costumbre, tanto en la ingeniería, como en los proyectos de tipo científico, para expresar, los valores de presión.

Como unidades de longitud, se utilizan tanto la inglesa, como la métrica. Así mismo, debido a que el tipo de líquido (generalmente mercurio o agua), determinan su propia densidad, es necesario señalarlo. Comúnmente se emplean los términos pulgadas, pies, centímetros y milímetros. Para vacíos de magnitud superior (cercaos al cero de presión absoluta), con frecuencia se utiliza, el micrón (10 elevado a la --3 de Hg).

Para las unidades de carga líquida, la densidad del liquido varía con la temperatura. Así pues, para definir la unidad de una manera rígida, es necesario establecer una temperatura estándar (la cual normalmente corresponde a la máxima densidad del liquido). En caso del agua, la temperatura estándar es 3.9° C o 39° F; para el mercurio, de 0° C o 32° F . Pocas veces, sin embargo, las lecturas de carga de liquido efectuadas a diferentes temperaturas a estas, son de poca importancia, y puede despreciarse la diferencia excepto cuando se trate de pruebas o trabajos científicos de gran precisión.

Las unidades de fuerza más comunes son las unidades gravitacionales, como la libra, la onza, o la tonelada y el gramo o kilogramo. La unidad de área casi siempre es consistente con la unidad de peso, ambas indicadas en unidades del sistema ingles o del sistema métrico. Las unidades comunes al área son la pulgada cuadrada y el centímetro cuadrado.

Otra forma de expresar la presión es en "atmósferas". Esta unidad simplemente utiliza el valor de 14.7 lb./plg.- cuadrada (o su equivalente en unidades métricas) de la presión atmosférica estándar y lo define como "una atmósfera". La unidad presenta ventajas en cuanto a expresar presiones altas. En la tabla se indican los factores de conversión para transformar los valores de presión de una unidad a su equivalente en otra.

Unidades de presión	lb/plg <sup>2</sup>	plg de H <sub>2</sub> O	pies de H <sub>2</sub> O	plg de Hg	atm	g/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>	cm de H <sub>2</sub> O	mm de Hg
1 lb/plg <sup>2</sup>	1.000	27.68	2.307	2.036	0.6805	70.31	0.07031	70.31	51.72
1 plg de H <sub>2</sub> O (39°F)	0.03613	1.000	0.08333	0.07355	0.002458	2.540	0.002540	2.540	1.868
1 pie de H <sub>2</sub> O (39°F)	0.4335	12.000	1.000	0.8826	0.02950	30.48	0.03048	30.48	22.42
1 plg de Hg (32°F)	0.4912	13.60	1.133	1.000	0.03342	34.53	0.03453	34.53	25.40
1 atm normal	14.7	406.79	33.90	29.92	1.000	1.033	1.033	1033.0	760.0
1 g/cm <sup>2</sup>	0.01422	0.3937	0.03281	0.02896	0.0009678	1.000	0.0010	1.000	0.7356
1 kg/cm <sup>2</sup>	14.22	393.7	32.81	28.96	0.9678	1.000	1.000	1.000	735.6
1 cm de H <sub>2</sub> O (4°C)	0.01422	0.3937	0.03281	0.02896	0.0009678	1.000	0.0010	1.000	0.7355
1 mm de Hg (4°C)	0.01934	0.5353	0.04461	0.03937	0.001316	1.360	0.001360	0.001360	1.000

## Aplicaciones de las Mediciones de Presión

En conjunto con la temperatura y el flujo, las mediciones de presión se emplean con frecuencia en las industrias de proceso o manufactura, en el laboratorio y en otros campos de acción tales como el aeroespacio, aviación y embarcaciones marítimas. En seguida se describirán algunas razones que constituyen el motivo para la medición (control automático) de la presión.

1) Mantenimiento de Condiciones de Operaciones Seguras. Cualquier recipiente o tubería posee cierta presión máxima de seguridad, que varía de acuerdo al material y su construcción. Presiones excesivas no solo pueden provocar la destrucción del equipo, sino que también, durante el proceso de destrucción pueden colocar al personal y al equipo adyacente en situaciones peligrosas. Para tales aplicaciones las lecturas absolutas y de gran precisión son tan importantes como lo es para la seguridad extrema.

2) Ayuda para el Control de Procesos. La presión puede llegar a tener efectos directos o indirectos en el valor de otra variable de proceso. En algunas ocasiones la simple indicación puede llegar a ser suficiente como guía para el operador; en otros casos se utiliza el registro y el control automático.

3) Suministro de Datos de Prueba. En los trabajos de investigación y/o en el control de calidad, es posible que el ensayo de materiales y de equipo requiera de una medición muy precisa de la presión como parte de otros datos de prueba.

### **Patrones de Presión**

Es necesario conservar patrones satisfactorios que varían dependiendo de las necesidades y requerimientos en el sistema de medición para calibrar y controlar los instrumentos medidores de presión. Los modelos típicos incluyen:

- "Los manómetros de prueba" de gran exactitud, los cuales por sí mismos deben comprobarse en contra de otro patrón absoluto de mayor exactitud.

- "Los probadores de columna líquida", los cuáles comparan el mecanismo que se prueba contra una carga de líquido conocida, y Protección del Elemento de Medición

- "Los probadores de peso propio", que proveen de una fuerza conocida por medio de pesas

### **Protección del Elemento de Medición**

Se pueden tener problemas si no se escoge o instala adecuadamente el instrumento de medición, ya que pudiera suceder, que el elemento vital de ésta, estuviera expuesto directamente con el fluido cuya presión se mide. Siendo esta la razón por la cual el usuario deba tener en cuenta las propiedades del fluido y los efectos que pudieran causar en el elemento. Alguno de estos problemas que pudieran sucederse, entre otros, son la corrosividad, y los líquidos que contienen sólidos en suspensión que pudieran obstruir las partes internas del elemento, que hace necesario el sellar las partes internas del elemento, así como los medios donde se efectúan las mediciones que presenten tendencia a la solidificación o congelación a causa de la temperatura ambiente del instrumento de presión.

Debido a que el área de medición de presión es muy amplia en el completo campo de la instrumentación en el cual los transductores con salida eléctrica son utilizados, una gran variedad de tipos de transductores de presión han sido desarrollados por la industria.

Muchos principios operativos son usados en estos diseños. la industria ha intentado expandir su uso sólo para algunos de ellos, otros tienen aplicaciones limitadas o especializadas, algunos son también difíciles de fabricar por razones económicas y ambientales.

## **Clasificación de los Métodos de Medición de la Presión**

Los instrumentos de medición de presión pueden clasificarse de acuerdo al valor que sirva como guía al usuario para la explicación de los principios de presión. A continuación se explicará la forma de agrupación que se ha seleccionado.

### **1) Tipos de Miembro Elástico**

Estos son del tipo en los que la presión a medir deforma un tubo de Bourdon u otro miembro elástico, con lo cual se desarrolla una fuerza de equilibrio en tal forma que permite su calibración para obtener la medición deseada. Los métodos incluidos dentro de ésta clasificación pueden medir presiones absolutas, manométricas, vacíos o diferenciales.

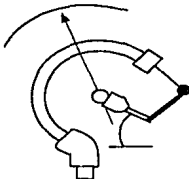
#### **- Unidades de Deflexión por Presión del Tipo Bourdon.**

Tubo de sección transversal aplanada, moldeada para formar un círculo (tubo de Bourdon convencional) incompleto o una espira o una hélice, el cual tiende a enderezarse cuando aumenta la presión. El movimiento transmitido al indicador se multiplica por medio de una leva o engranaje.

Su intervalo de medición va de 0 - 40 000 lb/plg (mayores con ciertos tipos). El Bourdon hasta de 100 000 lb/plg.

Su exactitud hasta 1/2 %.

La mayoría de los manómetros indicadores utilizan el tubo de Bourdon convencional. El método es simple, seguro y normalmente exacto.



**TUBO DE BOURDON**

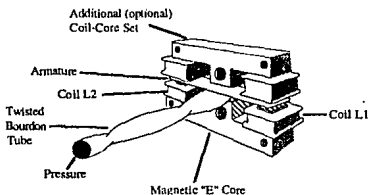
#### **- Elemento de Presión de Tubo Torcido.**

Está formado por un tubo hueco de metal que ha sido aplanado y retorcido al rededor del eje longitudinal. Uno de los extremos está sellado, el otro se encuentra abierto a la atmósfera. El tubo responde a la presión o al vacío aplicado interna o externamente, o a la diferencia de presión entre los

valores interno y externo. la respuesta a la presión se convierte en una señal eléctrica.

El intervalo de medición y la exactitud de éste elemento son iguales a las de el elemento Bourdon.

El pequeño volumen interno, masa baja, y la alta rigidez dan al elemento una frecuencia natural máxima de 10 000 cps. El poco movimiento rotacional del elemento mantiene los esfuerzos abajo del límite estático. Por lo tanto, la histéresis es mínima.



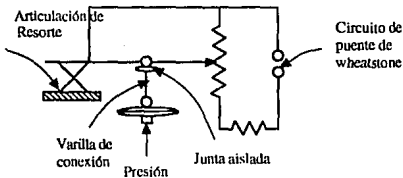
## - Detector de Resistencia

Transforma la presión manométrica en resistencia eléctrica por medio de una cápsula o un tubo de bourdón. La varilla de conexión coloca en posición al contacto deslizante construido de un metal noble, sobre el potenciómetro de precisión.

Su intervalo de medición es de 0-1 1/2 a 0-5 000 lb/plg-cuadradas.

Su exactitud es de 3/4 - 2 %.

El volumen interno de la cápsula es de 0.29 plg-cúbicas, el perteneciente al tubo de Bourdon es de 0.15 plg-cúbicas. La velocidad de respuesta es de 50 mseg. para toda la escala.



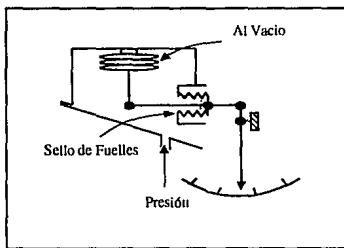
## - Manómetro de Presión Absoluta y Fuelles Simples

Los fuelles al vacío que se encuentran instalados dentro del recipiente cuya presión se desea determinar, transmiten el movimiento hacia afuera del recipiente a través del sello. La medición está dada en términos de la diferencia de presión en función del vacío, en consecuencia, constituye la presión absoluta.

Su intervalo de medición es de 0-200 mm de Hg. absoluta.

Su exactitud va de 1/2 - 1 %.

Pueden adquirirse con intervalos tan bajos como 0 a 6 mm de Hg. abs.. Para el secado al vacío, condensadores de vapor de agua, alambiques de operación al vacío, procesos de antibióticos.



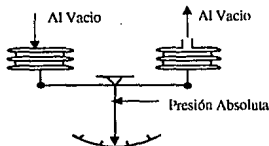
## - Manómetro de Presión Absoluta con dos Fuelles

Construido con fuelles opuestos o de balanceo con balancín, uno de ellos se encuentra al vacío y el otro conectado a la presión desconocida.

El intervalo de medición es de 0 - 25 lb/ plg-cuadradas absolutas.

La exactitud es de 1 % o más.

Exactitud considerable para presiones absolutas hasta de aproximadamente 5 mm de Hg.. Los usos son similares a los indicados anteriormente.



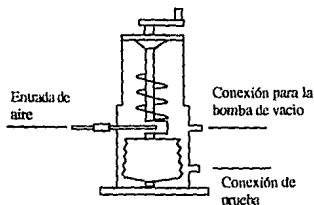
### - Manóstató Aneróide

Fuelles al vacío, sellado permanentemente, proporciona como referencia la presión absoluta de cero. El resorte de compensación de temperatura se opone en contra de la compresión de los fueles.

El intervalo de medición va de 0.8 - 60 pig de Hg. abs.

Su exactitud es alta.

Se utiliza para el servicio final en los sistemas estáticos de prueba; también en calibraciones y ensayos.



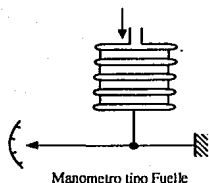
### - Manómetros del tipo Fuelle

Están formados por fueles metálicos, unidades capsulares y de diafragma múltiple, en los cuales la presión se balancea en contra de la acción de los resortes unitarios y en contra de un resorte calibrado.

El intervalo de medición comprende vacíos inferiores hasta aproximadamente 100 lb/pig.-cuadrada.

Su exactitud es de 1/2 - 1 %.

Simples y resistentes; se emplean bastante en instrumentos para medición de presiones moderadas y de vacíos inferiores (especialmente en los registradores)



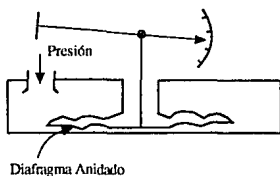
### - Manómetro de Diafragma Anidado

Este es una variación del tipo de fuelle en donde los diafragmas de metal se anidan por conveniencia en lo que respecta a la sensibilidad.

El intervalo de medición va de 0 - 30 plg. de agua hasta 0 - 30 lb/plg-cuadrada.

Su exactitud es de 1/4 % .

El manómetro puede soportar altas sobrepresiones externas sin que se perjudique o se altere su calibración.



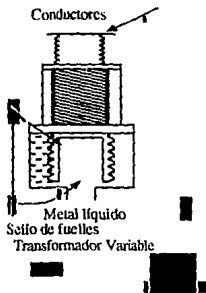
### - Fuelles de Acero Inoxidable

La presión se recibe en el metal líquido. El núcleo magnético del transformador variable se encuentra conectado al fuelle. Las variaciones de presión se transforman en señales eléctricas de salida, las cuales son indicadas por medio de un medidor adecuado.

El intervalo de exactitud de éste elemento son iguales a las del manómetro de diafragma anidado.

La unidad mide directamente la presión del metal fundido. El intervalo se ajusta mediante el sistema articulado del resorte de balanceo. El embobinado del transformador pertenece al transmisor y al receptor. Está conectado en serie, en tal forma que se proporciona la compensación por voltaje y temperatura.





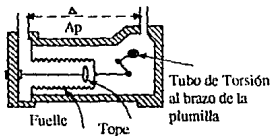
### - Manómetro Diferencial de Fuelle Simple

El fuelle (o diafragma) dentro de la caja se somete a una presión baja por uno de los lados y una presión alta por el otro. La extensión del fuelle representa la medida de la presión diferencial.

Su intervalo de medición va de 0 - 25 a 0 - 800 plg de agua diferenciales.

Su exactitud es aproximadamente del 2 %

Simple y resistente. El intervalo puede cambiarse con facilidad. No requiere de mercurio. Reduce al mínimo el mantenimiento. Para mediciones generales de presiones diferenciales, incluyendo la del flujo por medio del método de carga variable.



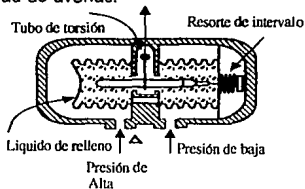
### - Manómetro Diferencial de Doble Fuelle

Los fuelles opuestos en la caja de dos partes se llenan con líquido, se balancean por medio de un resorte y están conectados entre sí mediante el eje que pasa a través de la restricción. El arreglo actúa de modo similar al pistón de resorte balanceado, aplicándose una presión alta en uno de los extremos y una presión baja en el otro.

Su intervalo de medición va de 0 - 10 plg. de agua hasta 0 - 400 lb/plg.-cuadrada.

Su exactitud es de 1/2 %.

Las pulsaciones se amortiguan mediante el control de válvula del flujo del líquido de uno de los fuelles al otro. La compensación por temperatura para la dilatación del líquido se logra mediante la sección de fuelle flotante. La unidad permanece inalterada por el sobrejalonado. El intervalo puede cambiarse con facilidad. El tubo de torsión para la transmisión del movimiento elimina la posibilidad de averías.

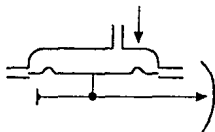


#### - Manómetro de Diafragma Suelto

El diafragma suelto se balancea por medio de la presión o la tensión de un resorte calibrado. El intervalo de medición es de 0 - 120 plg de agua.

Tiene una exactitud aproximada del 1 %.

Utilizado para presiones bajas y presiones de tiro, tal como de 0 a 0.5 plg. de agua.



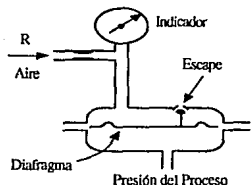
Manómetro de diafragma suelto

#### - Manómetro de Sello con Balanceo de Fuerzas

La presión del proceso se aplica a un transmisor neumático de balanceo de fuerzas, luego, la presión del transmisor actúa sobre el manómetro. La restricción R en la línea de suministro de aire en conjunto con la ventila y el diafragma de escape controlado, duplica exactamente la presión.

No tiene intervalo de medición y tiene una exactitud aproximada del 1 %.

El segmento de manómetro puede construirse apoyándose en la unidad o separado de ésta a una distancia tal como de 1000 pies para usarse en el control remoto. En cualquiera de las formas, el manómetro está protegido en contra de los fluidos corrosivos, viscosos, contaminados o radiactivos.



## 2) Tipos Gravitacional -Manométricos.

Principalmente son aquellos en los que una columna de líquido, tal como el mercurio, balancea la presión desconocida por medio de la fuerza gravitacional de la carga del líquido. En ésta clasificación están los manómetros de tubo en U y las variaciones que pueda tener. El pistón cargado con pesas puede incluirse dentro de ésta clase, lo mismo que las campanas de sello líquido (mecanismo que depende del peso para balancear la presión desconocida).

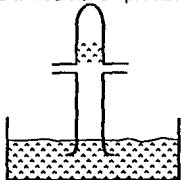
### - Barómetro de Columna Líquida

Este es el instrumento fundamental para la medición de la presión atmosférica. El tubo de vidrio cerrado en uno de sus extremos y que se encuentra lleno de mercurio, se invierte en el recipiente de mercurio. La altura de la columna de mercurio con respecto al nivel en el recipiente, es la presión barométrica en mm de mercurio.

El intervalo de medición comprende cualquier presión de la atmósfera.

La exactitud está cerca de 0.1 mm .

Aunque es menos conveniente que el del tipo aneroide, el barómetro de Hg. se emplea para mediciones precisas y calibración de otros instrumentos.



Barómetro de columna Líquida

### -Columnas de Vidrio llenas de Líquido del tipo Pozo o Tubo en U

Mide presiones, tiros, o vacíos en función de la presión de la atmósfera. La presión es proporcional a H (altura) .

Su intervalo de medición es de cerca de 2 plg. de carga de líquido.

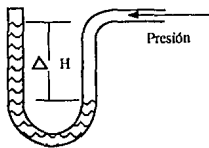
Su exactitud es aproximadamente 0.1 plg. del líquido del manómetro.  
Simple y exacto, pero limitado por la construcción de vidrio y la altura de líquido disponible. - - Manómetro de Tiro Inclinado

Similar al tubo en U, pero provisto de un ramal inclinado y de un pozo de gran diámetro para aumentar la exactitud de la lectura.

Su intervalo de medición va de 0.5 a 50 plg. de agua.

Su exactitud es superior a 0.1 plg. de líquido.

Se utiliza principalmente para tiros y presiones baja en donde es suficiente la indicación visual.



#### - Manómetro de Vidrio con Columna de Líquido

Idéntico a los de tipo U excepto que existen dos presiones conectadas, una a cada extremo del tubo.

Su intervalo de medición va de 0.5 a 50 plg. de mercurio.

Su exactitud es la división mínima de 0.02 plg. de líquido.

Lo mismo que para el barómetro de columna líquida. También está limitado en cuanto a la presión estática.

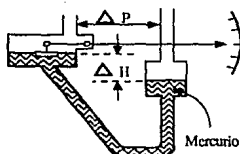
#### - Manómetros de Metal, Tubo Simple

El nivel del líquido (Hg. por lo general ) se lee determinando exteriormente la posición del flotador por medio de un cojinete de cierre hermético a la presión, tubo de torsión o seguidor magnético.

Su intervalo de medición es de presiones diferenciales desde un mínimo de 10 plg. de agua hasta mayores de 400 plg.

Su exactitud es del 1 %.

El método más común para la medición para la velocidad de flujo que se aplica en los medidores para el efecto. También se le utiliza en las mediciones de presiones diferenciales, niveles y densidades. Se pueden medir presiones estáticas hasta de 5 000 lb/plg.-cuadrada.

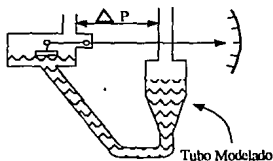


### - Manómetros de Metal, Tubo modelado

Similar al tipo de tubo simple, excepto que el tubo de recorrido está modelado en tal forma que tiene una sección parabólica variable para suprimir la proporcionalidad cuadrática del flujo.

Su exactitud es del 1 %.

No es de uso frecuente debido al alto costo de modelar con precisión el tubo de recorrido; proporciona una escala uniforme para el flujo.



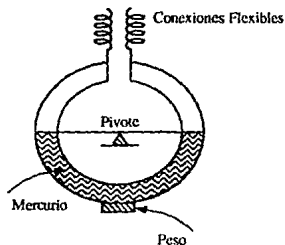
### - Manómetro de Anillo Balanceado

La presión diferencial desplaza el mercurio dentro del anillo, provocando que éste se incline hasta que el peso balancea al mercurio desplazado. El grado de inclinación es una medida de la presión diferencial .

Su intervalo de medición es máximo cercano a 10 plg. de agua.

Su exactitud es del 1 %.

Se le emplea en las mediciones generales de la velocidad de flujo. Se requiere de eje con cierre a presión.



### - Campana de Sello Líquido

La campana invertida se encuentra sumergida dentro del líquido, el cual actúa simplemente como sello. El balanceo de la campana se realiza por medio de un resorte calibrado.

Su intervalo de medición comprende vacíos hasta de aproximadamente 15 plg. de agua.

Su exactitud es del 1 % o mejor.

Se emplean en la medición de presiones bajas y de vacíos; puede lograrse que tenga una exactitud considerable.



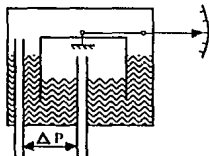
### - Campana Flotante, Simple

Similar a la campana anterior, excepto que se encuentra encerrada para poder aplicar presión por ambos lados. La posición de la campana es proporcional a la presión diferencial, cuya señal es transportada por medio de un tubo de torsión o de un cojinete de cierre hermético a la presión.

Su intervalo de medición va de 0.2 - 12 plg. de agua.

Su exactitud es del 1 %.

Una gran área de la campana permite disponer de la suficiente energía para operar el mecanismo de registro a presiones diferenciales muy bajas.



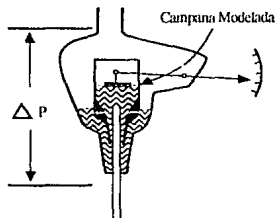
#### - Campana Modelada (Campana de Ledoux)

La campana está modelada internamente de tal modo que tiene una forma parabólica para eliminar la proporcionalidad de raíz cuadrada de la presión diferencial con objeto de disponer de una escala uniforme para el flujo. El líquido de sello es Hg.

El intervalo de medición es de 212 plg. de agua de presión diferencial máxima.

Tiene una exactitud del 2 %.

Se utiliza en las mediciones generales de la velocidad de flujo. La uniformidad de la escala facilita la lectura y la integración.



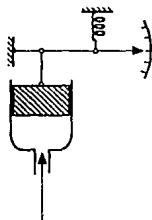
#### - Manómetro de Pistón

Excepto en lo que se refiere a su fricción, la unidad es similar al manómetro de diafragma suelto. La presión está balanceada por medio de un resorte calibrado. (Las variaciones incluyen los métodos de balanceo con carga de peso y del tipo báscula de balancín).

Su intervalo de medición va desde vacíos hasta presiones altas, dependiendo esto del resorte.

Su exactitud es de 0.1 % .

Empleado principalmente para el estudio de ciclos de presión, tal como el indicador de la máquina de vapor de agua. Opera la plumilla y el registrador.



Manómetro de pistón

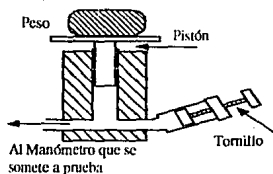
### - Probador de Peso Propio

Es un tipo similar al manómetro de pistón en que la presión de prueba se balancea en contra de un peso conocido que se aplica a cierta área definida de pistón: La presión se aplica mediante el pistón y el tornillo. La plataforma del peso se hace girar para evitar que el pistón permanezca fijo.

Su intervalo de medición es limitado.

La exactitud es de 0.2 % .

Utilizado principalmente como estándar primario para la calibración de manómetros.



### 3) Tipos para Medición de Vacíos Superiores.

La mayoría de los métodos para la medición de vacíos superiores son del tipo eléctrico en cuanto a naturaleza y requieren un conocimiento especializado en las técnicas de medición en comparación con los procedimientos para las presiones superiores.



## - Manómetro de McLeod

El gas a una presión absoluta baja es atrapado en el tubo de medición por el mercurio, a medida que el instrumento gira alrededor de su pivote en un ángulo equivalente a  $90^\circ$  con respecto a la horizontal. El mercurio comprime al gas en la parte superior del tubo de medición en donde se efectúa la lectura de volumen final, expresada ésta en presión absoluta inicial.

Su intervalo de medición es de 0.05 - 50 mm., 0.05 - 5 000 micras.

Su exactitud es del 1% .

Utilizado como estándar primario para presiones absolutas en micrones (0.001 mm.) . Se requiere de la eliminación de los materiales que condensan para evitar errores.



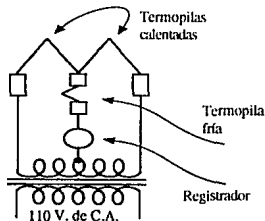
## - Termopares de Metal Noble

Están conectados a un circuito de puente. Las termopilas calentadas están alimentadas con corriente alterna de bajo voltaje. La termopila que permanece sin calentarse se conecta a la polaridad opuesta y suministra la compensación por temperatura ambiente. Se efectúa la medición de la salida en corriente directa.

El intervalo de medición es de 0 - 1 000 micras; 0.1 - 200 mm.

Su exactitud es alta.

Respuesta rápida, no sufre daño por su descarga a su presión atmosférica. Temperatura de operación baja; no existe la oxidación de los termopares. Mide las presiones totales como función de la conductividad térmica de las moléculas gaseosas remanentes.

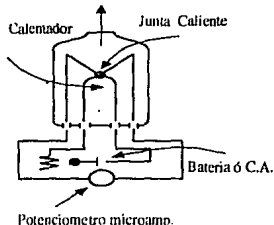


### - Manómetro Termopar

Es del tipo diferencial, en el cual se mide la conductividad térmica de los gases a presión reducida en términos de la presión. La temperatura del filamento correspondiente al calentador se determina por medio de un termopar.

El intervalo de medición es de 1 - 300 micras (algunos hasta 1 000 micras).

Es fácil de usarse, pero debe calibrarse para el tipo de gas que se trata de medir. Extiende sus mediciones a intervalos más abajo de los correspondientes a los manómetros del tipo fuelle y de mercurio. Respuesta rápida.



### - Manómetro de Pirani

Es similar en principio al manómetro de termopar, excepto que la temperatura del filamento calentado se mide como el termómetro de resistencia en el puente de Wheatstone.

El intervalo de medición es de 1 - 2 000 micras.

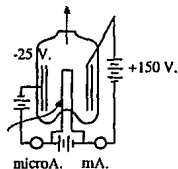
Las características son semejantes a las del manómetro de termopila. Los usos también son similares; el intervalo es superior al de operación de los manómetros de ionización.

### - Manómetro de Ionización de Filamento Caliente

Utiliza un tubo al vacío de tres elementos conteniendo el gas que se trata de medir a baja presión. Las moléculas se ionizan por medio de los electrones procedentes del filamento; éstos fluyen hacia la placa, se descargan y proporcionan una corriente de placa proporcional a la presión.

El intervalo de medición es de 0.001 a 1 micra.

Satisfactorio para presiones absolutas bajas, pero debe protegerse contra el quemado cuando la presión aumenta arriba de 1 micra. No es adecuado para gases que se descomponen por acción del filamento caliente.



### - Manómetro de Knudsen

Es del tipo radiómetro en que se produce una fuerza mecánica entre una superficie calentada y otra superficie que se encuentra a la temperatura del gas a causa de las moléculas que rebotan de la superficie caliente provistas de mayor energía cinética que la correspondiente a la superficie fría.

Esta fuerza mecánica es proporcional a la presión absoluta.

El intervalo de medición es de 0.001 - 0.000 001 mm. de Hg.

Las dificultades para medir la temperatura hacen a la mayoría de los manómetros de radiómetro insatisfactorios para uso en las plantas.

### 4) Tipos Medidores de Deformación.

Pertencen a un método de tipo eléctrico.

#### - Celda de Carga con Medidor de Deformación

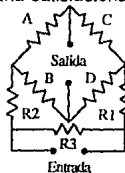
Utiliza pequeños elementos de resistencia unidos a otro elemento que se dilata cuando se somete a la presión interna. La dilatación aumenta la resistencia, la cual es proporcional a la deformación. En el método usual se adaptan cuatro elementos en un circuito de puente de Wheatstone, en tal forma que las resistencias A y D queden sometidas a la dilatación, mientras que B y C no presentan este caso. Se dispone de otras resistencias para la compensación por temperatura y la calibración.

Su intervalo de medición no tiene límite.

Su exactitud es de 1/4 % o mayor.

Este es un método relativamente nuevo, el cual se ha vuelto popular debido a su gran exactitud, facilidad de transmisión al indicador o registrador del milivoltímetro o el potenciómetro, buena linealidad y reproducibilidad, histéresis despreciable, respuesta rápida. También se utilizan los tipos que no poseen unión.

Los valores de exactitud que se mostraron son difíciles de generalizar para todos los tipos de instrumentos y en algunos casos sólo se utiliza un término cualitativo y en otros un valor aproximado, basado en los mejores datos de que se dispone. Dependiendo de su diseño, instalación y conservación se dará lugar a una satisfactoria exactitud.



## B.4 TIPOS DE INDICADORES DE DEFORMACION

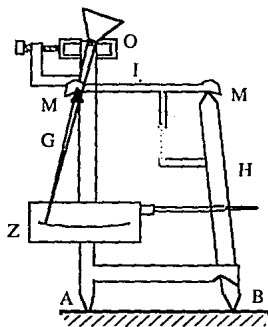
El problema encontrado en la medición de la deformación es determinar el movimiento entre dos puntos en una distancia  $l_0$  dada. Los principios físicos que han sido empleados para llevar a cabo ésta tarea son muy numerosos, y no se pretende una investigación completa, sino cubrir unos cuantos de los métodos más aplicables, brevemente.

Los principios empleados en la construcción de indicadores de deformación pueden usarse como la base de clasificación de los indicadores en los siguientes cuatro grupos:

1. Mecánicos
2. Ópticos
3. Eléctricos
4. Acústicos

### 1. Mecánicos

El indicador mecánico a ser considerado aquí es el tensómetro Huggenberger, el cual es el más popular y uno de los más precisos indicadores de deformación mecánicos en uso.



El indicador mostrado en la figura está basado enteramente en principios mecánicos. El desplazamiento de un extremo puntiagudo móvil es multiplicado por un conjunto de palancas móviles hasta que se obtiene una amplificación de más de 200 veces.

La operación de el tensómetro Huggenberger es ilustrado. El marco tipo C soporta los dos extremos puntiagudos A y B así como el sistema completo de palancas y la escala indicadora Z.

El extremo fijo A está fijado rigidamente al marco tipo C, mientras que el B rota alrededor de un punto fijo en la estructura a una distancia  $V_1$ . Este extremo sirve

como la primera palanca del sistema y como también es una parte integral del sistema de el brazo H, el desplazamiento DI es transmitido al punto M, donde se ha ampliado a la distancia Ds. El valor de Ds está dado por la simple regla de la palanca:

$$D_s = V_2 D_I / V_1$$

El movimiento en el punto M, esto es Ds, es transmitido a través del yugo I a la palanca G, la cual rota alrededor del punto O, sirve como puntero para el indicador de deformación.

El factor de amplificación es  $W_2 V_2 / W_1 V_1$  el cual se haya en cinco modelos comerciales entre 300 y 2000.

El indicador esta montado con abrasaderas, resortes y/o tornillos de presión aplicada a la estructura C.

El instrumento esta constreñido a la medición estática de la deformación debido a su tamaño e inercia que le relegan cualquier oportunidad de una razonable respuesta en frecuencia.

Se debe tener cuidado en mantener el instrumento calibrado.

Otro indicador de deformación basado en principios mecánicos es el indicador por rayadura, que consiste en dos placas base las cuales pueden ser soldadas, remachadas o unidas adhesivamente al componente que va a ser evaluado. Cuando dicho componente es sujeto a carga, las placas base se desplazan relativamente respecto a la otra y provoca que la aguja D se mueva hacia la placa objetivo T. La aguja registra el desplazamiento rayando la placa objetivo. La placa objetivo es rotada por un sistema de cable, el cual es activado por los desplazamientos relativos entre las placas base. Por ejemplo, cuando el indicador es sujeto a compresión las placas tienden a juntarse, lo que causa que el objetivo gire en sentido contrario al reloj.

Esta acción combinada -el movimiento directo de la aguja, junto on la rotación del objetivo- producen una línea dentada en la placa objetivo y efectua una separación entre los desplazamientos individuales asociados con diferentes niveles de carga.

Las placas objetivos son removidos del indicador después de completar una prueba, y los patrones de rayado son analizados con un comparador óptico o con un microscopio especial diseñado y calibrado para uso con placas grandes. El ancho de la rayadura es aproximadamente de 0.0005 in. (0,0125 mm) y el movimiento entre placas de 0.004 in. (0.10 mm) puede ser medido y distinguido con razonable exactitud.

Los indicadores tienen una capacidad limitada para la medición de cargas dinámicas y pueden manejar aceleraciones de 33 g sin efecto significativo en la precisión de la medición.

Debido al tamaño y peso de los componentes mecánicos, la respuesta a la frecuencia es limitada, y la mayoría de las aplicaciones involucran mediciones de deformaciones quasistáticas.

## 2. Ópticos

Los indicadores ópticos son muy parecidos a los mecánicos tipo Huggenberger en relación a que incorporan extremos puntiagudos unidos a el espécimen. La diferencia principal entre los dos indicadores radica en que en el de tipo óptico, rayos de luz sustituyen a las palancas mecánicas.

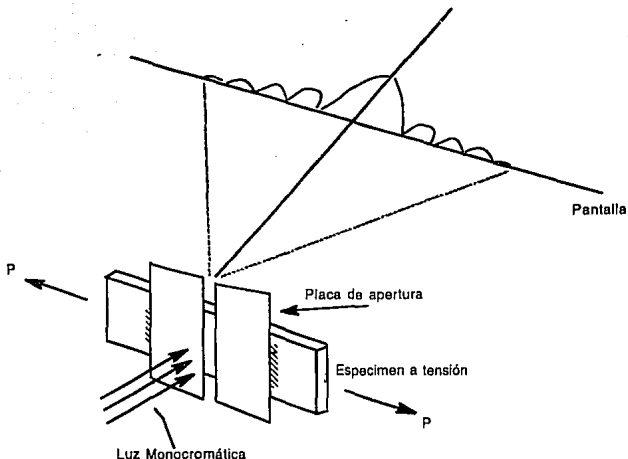
Esta sustitución reduce el tamaño y la inercia del sistema apreciablemente y permite al indicador óptico ser utilizado a bajas frecuencia en aplicaciones dinámicas.

Desde 1965 se ha dedicado considerable esfuerzo de investigación a ésta área de métodos ópticos para el análisis experimental de esfuerzos. La disponibilidad de lasers de gas y rubí como fuentes de luz coherente, colimada y monocroma a conducido a varios nuevos desarrollos en indicadores de deformación.

Dos de estos desarrollos, -el indicador de deformación de difracción y el interferométrico- son descritos brevemente para indicar las capacidades de los indicadores ópticos que usan luz coherente.

El indicador de deformación de difracción es de construcción muy simple; consiste de dos hojas separadas por una distancia  $b$  para formar una apertura delgada y son fijadas al espécimen en estudio por sus extremos para dar una longitud indicadora  $l$ . Un haz de luz colimada de un laser de helio-neón es dirigida hacia la apertura para producir un patrón de difracción que puede ser observado como una línea de puntos en una pantalla a una distancia  $R$  de la apertura.

Así como el espécimen en estudio es cargado, la deformación provoca un cambio en la anchura de la apertura a lo que corresponde un cambio en el patrón de difracción. La magnitud de esta deformación puede entonces ser determinada y medida respecto de los dos patrones de difracción (con y sin carga).



Un segundo método óptico de medición de la deformación utiliza los patrones de interferencia producidos cuando la luz monocromática y coherente de una fuente tal como un laser es reflejada por dos canales contiguos en forma de V grabados en una porción altamente pulida de la superficie del espécimen en estudio. Los canales V son cortados usualmente con un diamante a una profundidad de 0.00040 in (0.001 mm) y están espaciadas aproximadamente 0.005 in. (0.125 mm).

Cuando los canales que sirven como superficie reflejantes son lo suficientemente pequeñas para provocar que la luz se difracte, y cuando los canales están juntos lo suficiente para permitir que los rayos de luz difractada se superpongan -se traslapen- y produzcan un patrón de interferencia.

Así como la luz es reflejada de los lados de los canales V, dos patrones de interferencia son formados. En una situación actual experimental, los patrones son observados en pantallas localizadas aproximadamente a 8 pulgadas (200 mm) de los canales.

Cuando el espécimen es deformado, tanto la distancia  $d$  entre los canales como el ancho  $b$  de los canales cambia. Estos efectos producen corrimientos en las características de los dos patrones de interferencia.

El indicador de deformación interferométrico ofrece un método para la medición de la deformación sin usar un indicador, eliminando cualquier efecto de reforzamiento o dificultades de unión.

Puesto que no se establece ningún contacto, el método puede ser empleado en partes rotativas o en ambientes hostiles.

Se cuenta con compensación automática por temperatura, y el método puede ser empleado a muy altas temperaturas.



### 3. Eléctricos

Durante los pasados 30 años, los indicadores de deformación eléctricos se han vuelto tan ampliamente aceptados que ahora dominan enteramente el campo de indicadores de deformación excepto por algunas pocas aplicaciones especiales.

El indicador de deformación eléctrico más importante es el de tipo resistivo, el cual será cubierto con más detalle. Los dos tipos menos empleados comunmente son los de tipo capacitivo e inductivo.

Sí bien estos indicadores tienen un uso limitado en el análisis convencional de esfuerzos, son muy a menudo empleados en aplicaciones como transductores y en ocasiones encuentran aplicaciones especiales en la medición de la deformación de placas sujetas a deformación.

#### EL INDICADOR DE DEFORMACION CAPACITIVO

La capacitancia de un capacitor de placas paralelas puede calcularse de la relación:

$$C = 0.225 \text{ kA/h} \quad \text{para } A/h \text{ en pulgadas, y}$$

$$C = 8.86 \times 10^{-3} \text{ kA/h} \quad \text{para } A/h \text{ en milímetros.}$$

Donde  $C$  es la capacitancia en pF (picofarads),  $A$  el área transversal de las placas,  $h$  la distancia entre dos placas paralelas.

El capacitor de placas delgadas paralelas puede ser empleado como un indicador de deformación o desplazamiento en una de tres maneras posibles:

- (1) Cambiando la longitud del  $h$  entrehierro entre las placas,
- (2) Moviendo una placa en dirección transversa con respecto a la otra, y por lo tanto cambiando el área  $A$  entre las dos placas, y
- (3) Moviendo un cuerpo con una constante dieléctrica mayor que el aire entre las dos placas.

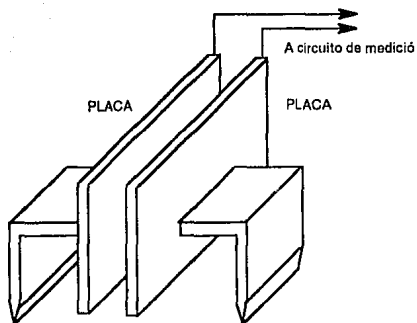
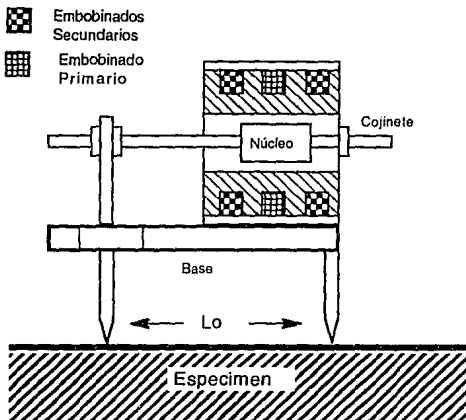


Diagrama esquemático de un indicador capacitivo de deformación.

## EL INDICADOR DE DEFORMACION INDUCTIVO

De los muchos tipos de sistemas de medición de inductancia que pudieran ser empleados a medir la deformación, consideraremos aquí el sistema de transformador diferencial.

El transformador diferencial lineal es un excelente dispositivo para convertir desplazamiento mecánico en una señal eléctrica. Puede ser empleado en una gran variedad de transductores, incluyendo los de deformación, desplazamiento, presión, aceleración, fuerza, y temperatura. Se muestra una ilustración esquemática de un transformador diferencial empleado como transductor indicador de deformación. Los extremos puntiagudos son desplazados sobre la longitud del indicador por la deformación inducida en el espécimen, el desplazamiento es transmitido al núcleo, el cual se mueve relativamente respecto a los embobinados, produciendo una salida eléctrica a través de las bobinas.



Indicador de deformación inductivo de transformador diferencial.

Un transformador lineal tiene 3 bobinas -un primario y dos secundarios-, un núcleo de material magnético, soportado en una flecha de material no magnético es posicionado en el centro de las bobinas; como se mueve dentro de las bobinas, varía la inductancia mutua entre el primario y cada uno de los secundarios, resultando en que un secundario queda más firmemente acoplado al primario y el otro secundario mucho menos acoplado. Los dos embobinados secundarios están conectados en serie y en oposición, y consecuentemente el voltaje de salida  $E_0$  es la diferencia entre los voltajes inducidos en cada secundario, esto es,  $E_0 = E_1 - E_2$ . En un transformador construido simétricamente, una salida nula debería ocurrir cuando el núcleo estuviera en el punto central de los dos embobinados secundarios.

Un movimiento del núcleo en una dirección fuera de la posición nula inducirá un desbalance entre  $E_1$  y  $E_2$ , y se producirá un valor neto  $E_0$ . Un desplazamiento en la dirección contraria también producirá un desbalance con un  $E_0$  resultante el cual está fuera de fase  $180^\circ$  de la primera salida.

Si se desea conocer la dirección de desplazamiento, debe determinarse el ángulo de fase.

El error del transformador diferencial lineal es en general del 0,5 % del rango especificado. La desviación de la linealidad es también del mismo orden. La respuesta dinámica está limitada por la masa del núcleo y el ensamble mecánico de soporte. Está también limitado eléctricamente por la frecuencia de voltaje de

AC aplicado, que debe ser por lo menos 10 veces la máxima frecuencia a ser medida.

En años recientes los transformadores diferenciales han sido suministrados con una fuente de DC/AC y con un demodulador para acondicionar el voltaje de salida. Cuando se empacan en una sola unidad el dispositivo se conoce como un DCDT (Transformador Diferencial con Corriente Directa) por sus siglas en inglés. Es pequeño, macizo, y extremadamente útil en el laboratorio. Puede usarse en muchas aplicaciones puesto que puede ser alimentada con una pila seca ordinaria de 6 Volts, y puede ser leída en un multímetro digital.

El uso de transformadores diferenciales lineales o de DCDT's para aplicaciones de indicadores de deformación ha estado limitada debido al problema de el acoplamiento mecánico; sin embargo, es uno de los mejores transductores de desplazamiento disponibles para uso general en laboratorios.

#### 4. Acústicos

Los indicadores de deformación acústicos han sido empleados en una variedad de formas en varios países desde finales de los 20's.

A la fecha han sido ampliamente sustituidos por los indicadores de resistencia eléctrica. Sin embargo son únicos entre todas las formas de indicadores de deformación en vista de su estabilidad a largo plazo y libertad para derivar por largos periodos de tiempo.

El ejemplo tratado aquí se refiere a un diseño de R.S. Jerret desarrollado en 1944. Esta basado en el uso de dos indicadores acústicos referenciados como un indicador a prueba y un indicador de referencia.

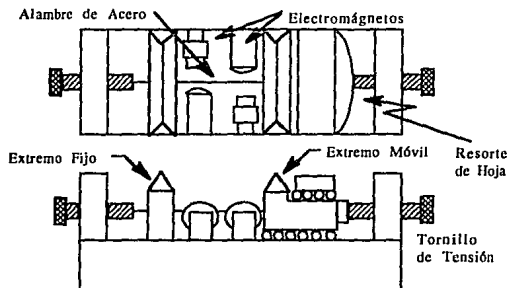


DIAGRAMA ESQUEMATICO DEL INDICADOR ACUSTICO TIPO JERRET

El indicador utiliza un soporte común de extremos puntiagudos. Un extremo está montado en el cuerpo principal, mientras que el otro está montado en una suspensión rotativa y está libre para elongarse con el espécimen.

La longitud del indicador  $l_0$  es de 3 pulgadas (76 mm). Un extremo de un cable de acero es colocado al extremo puntiagudo móvil mientras que el otro extremo del cable pasa a través de un pequeño agujero en el extremo puntiagudo fijo y es fijado a un tornillo de tensión. El extremo puntiagudo móvil es conectado a un segundo tornillo de tensión por medio de un resorte muelle.

Este diseño permite a la tensión inicial en el alambre ser aplicada sin la transmisión de carga a los extremos puntiagudos.

El alambre pasa entre las piezas polares de dos pequeños electromagnetos, uno de ellos es usado para mantener al alambre vibrando a su frecuencia natural; el otro es empleado para ajustar la frecuencia del sistema.

Eléctricamente ambos magnetos operan juntos en que la señal del magneto de ajuste es amplificada y realimentada hacia el magneto guía para mantener la cuerda excitada a su frecuencia natural.

El indicador de referencia es muy similar al indicador a prueba excepto que los extremos puntiagudos son removidos y un micrómetro es usado para tensar el alambre.

Un resorte helicoidal es empleado en serie con el alambre para dar rotaciones mayores de la cabeza del micrómetro para pequeños cambios de esfuerzo en el alambre.

Para operar el sistema el indicador de prueba es montado y ajustado, y el indicador patrón de referencia es colocado cerca del primero en un intento de compensar los efectos de la temperatura. Ambos son energizados y cada alambre emite una nota musical. Si la frecuencia de las vibraciones de ambos indicadores no es la misma, ocurrirá un batido. El micrómetro deberá ser ajustado en el indicador de referencia hasta reducir la frecuencia del batido a cero.

Se tomará entonces la lectura del micrómetro y se aplica la deformación al indicador a prueba. El cambio en la tensión de el alambre produce un cambio en la frecuencia, y es necesario ajustar el micrómetro en el patrón hasta que el batido es eliminado. La nueva lectura del micrómetro es proporcional a la deformación.

La sensibilidad de este instrumento es muy alta, con determinaciones de desplazamiento posibles del orden de 0.1 mpulg. (2.5 nm). El rango es limitado, en general, a alrededor de un milésimo de la longitud del alambre antes que la sobretensión o el aflojamiento de el alambre sensor se vuelva crítica.

El indicador es sensible a la temperatura a menos que los coeficientes de expansión térmica de la base y el alambre sean pareados muy cercanamente en el rango de temperatura encontrado durante la prueba.

Finalmente, la fuerza requerida para manejar el transductor es relativamente grande, y debe por lo tanto no ser empleada en sistemas en donde una fuerza impulsora grande pueda ser perjudicial.

## LOS INDICADORES DE DEFORMACION DE RESISTENCIA ELECTRICA

Anteriormente, se comentaron varios de los sistemas de medición de deformación y de sus características de funcionamiento, tales como rango, sensibilidad, longitud, y precisión en la medición.

Ninguno de estos dispositivos diferentes, sin importar el principio en que se basa su funcionamiento, exhiben todas las cualidades requeridas para un óptimo funcionamiento; sin embargo, el indicador de deformación de resistencia eléctrica se aproxima a los requerimientos de un sistema óptimo.

Como tal, este indicador, es el mas frecuentemente empleado tanto en transductores diseñados para medir cantidades tales como cargas, par, presión y aceleración.

El principio en que se basa fue descubierto en 1856 por Lord Kelvin, quien cargó alambres de hierro y cobre bajo tensión y notó que su resistencia eléctrica se incrementó con la carga o deformación aplicada al alambre.

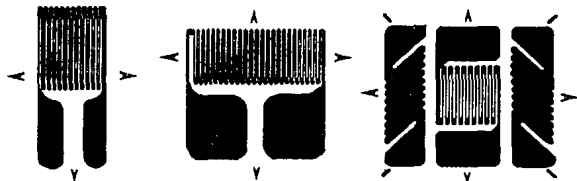
Se observó que el hierro permitía un incremento mayor en la resistividad que el cobre, cuando estaban sujetos al mismo cambio de deformación aplicada, finalmente, se empleó un puente de Wheatstone para medir.

En este experimento clásico se establecieron tres hechos vitales que han ayudado grandemente al desarrollo de los indicadores de deformación de resistencia eléctrica:

- (1) La resistencia del alambre cambia en función de la deformación
- (2) Diferentes materiales tienen diferentes sensibilidades
- (3) El puente de Wheatstone puede ser usado para medir estos cambios resistivos con exactitud.

Es bastante notorio que hubieron de pasar 80 años para que los indicadores de deformación de Lord Kelvin fueran comercialmente disponibles.

Hoy, después de 40 años de desarrollo comercial y de su uso extensivo en la industria y laboratorios académicos, los sistemas de indicadores en forma de hojuela monitoreados a través de un puente de Wheatstone se ha convertido en un sistema de medición altamente perfeccionado.



La mayoría de los indicadores utilizados hoy en día son fabricados de una aleación de Níquel-Cobre conocida como Constantan o Advance. La lista siguiente enumera las aleaciones más comúnmente empleadas con sus sensibilidades.

Material	Composición %	Sensibilidad
Advance o Constantan	45 Ni, 55 Cu	2.1
Nicromel V	80 Ni, 20 Cr	2.1
Isoclastic	36 Ni, 8 Cr, 0.5 Mo, 55.5 Fe	3.6
Karma	74 Ni, 20 Cr, 3 Al, 3 Fe	2.0
Armour	70 Fe, 20 Cr, 10 Al	2.0
Platino Tungsteno	92 Pt, 8 W	4.0

Tabla 1. Sensibilidad a la deformación para aleaciones comunes

#### Configuración básica del indicador resistivo.

Es teóricamente posible medir deformación con un solo cable longitudinal como elemento sensor, sin embargo, se requiere de ciertos circuitos para prevenir la sobrecarga de la fuente de poder y para minimizar el calor generado por la localización del indicador y ajustar un valor aproximado de 100 W en la resistencia del indicador.

Como resultado, un indicador de 100 W fabricado con alambre de diámetro de 0.001 pulg. (0.025 mm) y una resistencia de 25 W/pulg (1000 W/m) requiere una longitud de alambre de 4 pulgadas (100 mm).



Los primeros indicadores fueron del tipo no-unido, donde los conductores eran alambres rectos colgando entre un marco móvil y una estructura fija. Era muy grande y requería extremos puntiagudos para su montaje en el espécimen, lo que limitaba mayormente su aplicabilidad.

Esto se resolvió a mitad de los 30's cuando Ruge y Simmons independientemente desarrollaron los indicadores de alambre unido. La longitud del conductor dejó de ser problema al formar el largo requerido del alambre en un patrón de malla.

El problema del montaje se resolvió pegando directamente la malla de alambre a la superficie del espécimen utilizando adhesivos especiales. Actualmente la configuración de la malla es obtenida de una laminilla metálica a la que se le retira material con procesos serigráficos.

Como ese procedimiento es muy versátil, existe una gran variedad de formas y tamaños para las mallas.

La longitud mas pequeña disponible comercialmente en un indicador de hojuela metálica es de 0.008 pulg. (0.20 mm), y la mayor es de 4.00 pulg. (102 mm). Otro tipo de indicador, originalmente desarrollado para medición en altas temperaturas, es la de tipo soldable. Consiste en una fina lazada la cual está embebida en un contenedor metálico que contiene óxido de magnesio  $MgO$  compactado como aislante. El alambre dentro del tubo de deformación es reducido en diámetro por un proceso de fotograbado; de esa manera la resistencia mínima del indicador es obtenida con un alambre de alta resistencia y de muy pequeño diámetro, en lugar de formar una malla con alambre de diámetro mayor.

Actualmente este tipo de indicadores están disponibles con resistencias en un rango de 60 a 350 W y con longitudes que varían de 0.375 plg. (9,5 mm) hasta 1.09 plg. (27.7 mm).



Estos indicadores son utilizables desde temperaturas criogénicas hasta muy elevadas (de  $-200$  hasta  $650^{\circ}C$ ), son robustos y a prueba de agua, pudiendo ser embebidos en concreto incluso para registrar los esfuerzos en localidades internas de la estructura.

## LOS INDICADORES DE DEFORMACION SEMICONDUCTORES.

El desarrollo de indicadores semiconductores fue un producto de la investigación en los Laboratorios Bell que siguieron a la introducción del transistor en los inicios de los 50's.

Las propiedades piezoresistivas del silicio y germanio semiconductor fueron determinados en 1954 por Smith. Desarrollos posteriores de Mason y Thurston en 1957 condujeron eventualmente al mercadeo comercial de indicadores de deformación piezoresistivos en 1960.

Basicamente los indicadores semiconductores consisten en un pequeño y ultradelgado filamento rectangular de un cristal sencillo de silicio, el cual es montado comunmente en un portador para simplificar su manejo.

Los materiales semiconductores exhiben una muy alta sensibilidad con valores que van de 50 a 175 dependiendo del tipo de impurezas difundidas en el cristal de silicio puro. La resistividad  $r$  de dicho cristal con impurezas del orden de  $10^{16}$  a  $10^{20}$  átomos/cm<sup>3</sup> esta dada por:

$$r = \frac{1}{eNm}$$

donde  $e$  es la carga del electrón, lo cual depende del tipo de impureza,  $N$  es el número de portadores de carga, que depende de la concentración de impurezas, y  $m$  que es la movilidad de los portadores, que depende de la deformación y de su dirección relativa a los ejes del cristal.

## CAPITULO 2

### TRANSDUCTORES DE PRESION EN EL MERCADO NACIONAL

## CAPITULO 2

### TRANSDUCTORES DE PRESION EN EL MERCADO NACIONAL

A fin de orientar nuestra búsqueda de los transductores de presión para que pudieramos usarlos en conjunto con un PLC, se inició el contacto con distribuidores de equipo de instrumentación industrial a fin de obtener de parte de ellos la cotización, documentación y características de transductores de presión y/o manómetros que se acercaran por sus características a aquellas de nuestro interés.

Se requiere para establecer un lazo de control entre el PLC y el manómetro, un transductor de presión que entregue una señal eléctrica proporcional a la presión sensada, y que opere en un rango de 0 a 5 Kg/cm<sup>2</sup>, salida de 0 a 10 VDC, y 2 a 20 mA.

En ese orden de cosas se contactó a distribuidores de equipo de los cuales se obtuvieron los datos siguientes:

Modelo:	Manómetro Brecamex RIM 1289 Tipo bourdon de 0 a 4 Kg/cm <sup>2</sup> N\$ 39.35 + IVA
Modelo:	Manómetro FESTO SENSORIC 216-278 clave: FMA63-10 Tipo bourdon de 0 a 10 bares N\$ 95.08 + IVA
Modelo:	Manómetro SUREX Termopar Bimetálico Rango de 0 a 3.5 Kg/cm <sup>2</sup> N\$ 52.00 + IVA
Modelo:	Transductor FESTO SENSORIC R19562 clave: SDE-10 Rango de 0 a 10 bares

Salida de 0 a 10 VDC y 20 mA  
N\$ 1,156.33 + IVA

**Modelo:** Manómetro con salida eléctrica  
MGS 7  
Rango 0 a 3.5 Kg/cm<sup>2</sup>  
Control eléctrico por microswitch instalado en el cuerpo del medidor.  
Pueden prefijarse 2 puntos de operación para cerrar o abrir contactos que arranquen o paren un compresor.  
N\$ 630.00 + IVA

Se encuentran en el mercado nacional una variedad de manómetros los cuales solo cumplen con la función de medición, otros que permiten la regulación de presión a base de microswitches que controlan relevadores y que solo permiten apagar o prender un compresor, y debido a su limitación de operar solo con dos puntos fijos ( uno de arranque y otro de paro), obligan a implementar una lógica que combine a un grupo de éstos manómetros para obtener respuestas de control en puntos intermedios de presión, que permitan a su vez mantener, aumentar, o disminuir la presión según el estado del sistema.

El método descrito eleva el costo del lazo de control en comparación con aquel que utilizaría un transductor FESTO de salida proporcional, pues para tener señales de control del sistema operado con manómetros con microswitch se requerirían una cantidad de ellos dependiendo del número de rangos de presión que se requieran para operar compresores a distintas velocidades.

Lo más aproximado a nuestras necesidades, es el transductor FESTO pero eleva los costos de manera determinante.

En el mercado existen proveedores de equipo que brindan al consumidor la opción de importar bajo pedido, instrumentos de cuyos fabricantes ellos son sus representantes en nuestro país.

En nuestro caso la empresa EQUIPAR S.A. representa en México a la firma COLE PARMER, y nos ofrece en el esquema anterior un transductor de presión modelo G-07354-13 el cual tiene un rango de trabajo de 0 a 50 psi con una señal de salida de 4 a 20 mA. y requiere de ser alimentado con 24 VDC, con un costo de 623 USD LAB, lo cual significa añadir los gastos de importación y el factor de ganancia de dicha empresa, por lo que el precio se elevaría a 986.83 USD + IVA, con lo cual esta opción queda fuera de competencia respecto del transductor de la marca FESTO.

Por la situación prevaleciente antes descrita, queda más que justificada la necesidad de diseñar e implementar un transductor que cumpla con los requerimientos de nuestro proyecto.

## CAPITULO 3

### CONSIDERACIONES DE DISEÑO DEL TRANSDUCTOR DE PRESIÓN.

A. Cálculo de la lana

B. Conformado de materiales y accesorios

## CONSIDERACIONES DE DISEÑO DEL TRANSDUCTOR DE PRESIÓN.

El diseño del transductor de presión se basa en la idea de adaptar unos strain gages (indicadores de deformación ID's) a un manómetro de tubo de bourdon falcado o de tipo C.

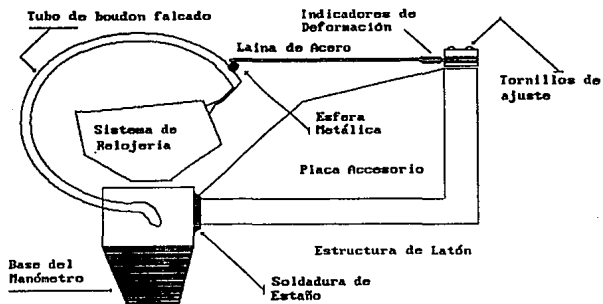
En un manómetro de este tipo, el desplazamiento del tubo de bourdon es proporcional a la presión en el interior del mismo.

Los ID's han sido desarrollados en base a principios electromecánicos, ópticos, acústicos, y neumáticos, hasta lograr los actuales medios indicadores de deformación. Las consideraciones que habrán de influir en su selección son: la longitud del indicador, su sensibilidad, el rango de deformación, y la exactitud de la lectura.

Los ID's empleados más extensamente por su bajo costo, disponibilidad, y características de rango, precisión, son los del tipo de resistencia eléctrica, por lo que fueron seleccionados para el presente trabajo.

En nuestro diseño particular, los ID's están montados en una lámina metálica que siendo dispuesta a actuar como una viga en cantilever en la cual su extremo libre queda en contacto con el tubo de bourdon a través de una pequeña esfera metálica a fin de asegurar en todo momento un solo punto de contacto, y su extremo fijo se haya sujeto a una estructura rígida que le permita actuar como una viga empotrada; dicha estructura se pensó de tal manera que conformara una sola unidad con el manómetro [Fig. 3.1].





**Fig. 3.1 Diagrama esquemático del Transductor**

El acoplamiento entre la lana y su estructura de montaje se realizó sujetando un extremo de la lana entre dos placas, y el conjunto asegurado a la estructura atornillándolo a uno de sus extremos.

La estructura consta de un macizo de latón maquinado en una pieza formando una escuadra con un ángulo de 90°. Esta disposición permite que la estructura soporte por un extremo a la lana en cantilever y por el otro sea soldada a la base del manómetro de carátula.

Respecto a los ID's, fueron colocados cuatro de ellos de tipo laminar o de hojuela, dos en cada cara de la lana en un lugar lo mas cercano al empotramiento, que es el lugar del máximo esfuerzo.

Se adhirieron a la lana requiriendo un trabajo preciso dada la fragilidad de los componentes.

### A. Cálculo de la lana.

La máxima deformación en la lana corresponde al desplazamiento máximo del tubo de bourdon: 3 mm, que corresponden a la flecha máxima del extremo de la lana en contacto con el tubo.

Si se considera que la lana se comporta idealmente como una viga en cantilever, con una superficie neutra que se localiza a la mitad exacta del espesor de la viga dada su geometría, y por lo mismo la deformación lineal de sus fibras son proporcionales a la distancia 'y' a dicha superficie y el esfuerzo ser:

$$\sigma_x = by$$

donde b es una constante diferente siempre de cero, y siendo el acero un material linealmente elástico, según la ley de Hooke:

$$\sigma_x = E\epsilon_x$$

donde x son los esfuerzos normales y E el módulo de elasticidad del acero. Los esfuerzos variarán linealmente en proporción a las distancias al eje neutro:

$$\sigma_x = By \quad (3.1)$$

El valor de B se calcula al aplicar 2 condiciones de equilibrio a un segmento de la viga.

$$1^a \quad \sum F_x = 0 \quad \int_A \sigma_x dA = \int_A B_y dA = B \int_A y dA = 0 \quad (3.2)$$

puesto que  $b \neq 0$

$$\int_A y dA = 0$$

$$2^a \quad M_z = 0 \quad M + \int (\sigma_x dA) y = 0 \quad \therefore M = -B \int_A y^2 dA \quad (3.3)$$

la integral depende de la geometría del área transversal, y su momento de inercia respecto a un eje centroidal -y será :

$M = -BI$  ó  $B = -M/I$  y al sustituir en (3.1) tendremos:

$$\sigma_x = -\frac{M y}{I} \quad (3.4)$$

que es la ecuación de flexión elástica para vigas, y en el nuestro caso, el momento de inercia será:  $I = bh^3/12$  donde  $b$  es el ancho y  $h$  es el espesor de la viga.

Los valores de  $M$  e  $I$  son constantes en una sección de la viga, y  $\sigma_x$  es máximo para  $y$  máxima ( $C$ ) tal que:

$$\sigma_{\max} = \frac{MC}{I} \quad (3.5)$$

qué será el esfuerzo máximo permisible para deformación elástica del material, y al revisar las tablas pertinentes se obtiene un valor de  $\sigma_{\max} = 4,000 \text{ Kg/cm}$ . Y correspondiendo a  $C$  la mitad del espesor de la viga:

$$\sigma_{\max} = \frac{M (h/2)}{bh^3/12} = \frac{6M}{bh^2} \quad (3.6)$$

para obtener los valores de  $M$  y  $h$  se requiere de una ecuación auxiliar, en este caso la ecuación de la deflexión [Método de la energía]:

$$U = \iiint_V (\sigma_x \epsilon_x + \tau_{xy} \gamma_{xy}) d_x d_y d_z$$

donde al ser despreciables los esfuerzos cortantes  $S_{xy}$  y por lo mismo la deformación angular  $\gamma_{xy}$  valen cero, la deformación lineal  $\epsilon_x$  para un esfuerzo uniaxial es:

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E}$$

la ecuación de la energía es:

$$U = \iiint_V \frac{\sigma_x^2}{2E} d_x d_y d_z = \iiint_V \left(\frac{M y}{I}\right)^2 d_x d_y d_z$$

$$U = \int_L \frac{M^2}{2EI} \left[ \int y^2 d_y d_z \right] d_x$$

$$U = \int_L \frac{M^2}{2EI} d_x$$

Suponiendo una fuerza  $P$  aplicada al extremo de la viga e integrando a lo largo de la línea :

$$U = \int_0^L \frac{(Px)^2}{2EI} dx = \frac{P^2}{2EI} \int_0^L x^2 dx = \frac{P^2}{2EI} \frac{x^3}{3} \quad (3.7)$$

$$U = \frac{P^2 L^3}{6EI}$$

Esta energía debe ser igual al trabajo realizado sobre la viga para flexionarla ( en el caso ideal de un proceso adiabático, de fuerzas cuasiestáticas, tal que la energía cinética sea despreciable) esto es:

$$W = U = P \frac{\Delta}{2} \quad (3.8)$$

donde  $\Delta$  es la deflexión de la viga.

Igualando las ecuaciones (3.7) y (3.8) tenemos:

$$P \frac{\Delta}{2} = \frac{P^2 L^3}{6EI}$$

$$\Delta = \frac{PL^3}{3EI} \quad (3.9)$$

Puesto que se conoce que la deflexión máxima es de 3 mm, este valor se le aplica a  $\Delta$ .

Si de la ecuación (3.6) se despeja a  $M$ :

$$M = \sigma_{\max} \frac{bh^2}{6}$$

y reorganizando (3.9) para despejar  $M$

$$\Delta = \frac{PLL^3}{3EI} = \frac{ML^3}{3EI} \quad \therefore \quad M = \Delta \frac{3EI}{L^3}$$

y lo igualamos a la ecuación derivada de (3.6) :

$$\sigma_{\max} \frac{bh^2}{6} = \Delta \frac{3EI}{L^3}$$

$$\text{Si } I = \frac{bh^3}{12}$$

$$\sigma_{\max} \frac{bh^2}{6} = \frac{3Ebh^3 \Delta}{12L^3}$$

de donde obtenemos:

$$\Delta = \frac{2}{3} \frac{\sigma_{\max} L^2}{E} / h \quad (3.10)$$

en donde se relacionan la deflexión máxima, el esfuerzo máximo permisible, el módulo de elasticidad y los parámetros de diseño  $L$  y  $h$ , longitud y espesor de la viga respectivamente.

La bondad de esta ecuación radica en el hecho de que  $D$  no está en función de la fuerza aplicada  $P$ , la cual es difícil de conocer y nos brinda un sistema de ecuaciones linealmente independiente. Se nos brinda de manera explícita el comportamiento de la deflexión de la lana, la cual es directamente proporcional al cuadrado de la longitud, e inversamente proporcional a su espesor siempre y cuando el valor de  $S_{max}$  sea constante, de tal modo que si se aplica una fuerza, la deflexión será mayor si la longitud aumenta y/o el espesor disminuye, e inversamente, dicha deflexión será menor al disminuir la longitud y/o aumentar el espesor de la lana.

El valor del ancho ( $b$ ) de la lana se fijó en 12.7 mm (0.5 pulgadas) en base a que es el valor mínimo que nos permite acomodar con holgura los indicadores de deformación ID's, y es un tamaño altamente comercial en acero inoxidable.

Los valores  $L$  y  $h$  se calcularon a partir de un método iterativo que pretende encontrar juegos de valores evaluando la ecuación (3.10).

El listado del programa y sus resultados aparecen en el Apéndice A.

Los valores finales de diseño de la lana se fijaron en:

Espesor ( $h$ ):	0.63 mm	(1/40 ")
Longitud ( $L$ ):	38.00 mm	(1 1/2")
Ancho ( $b$ ):	12.70 mm	(1/2 ")
Flecha ( $D$ ):	3.00 mm	(1/8 ").

## **B. Conformado de materiales y accesorios**

Obtenidos del modo descrito los parámetros de la lana, se paso a definir las características de sus apoyos y la manera en que ésta habría de fijarse a la estructura de latón.

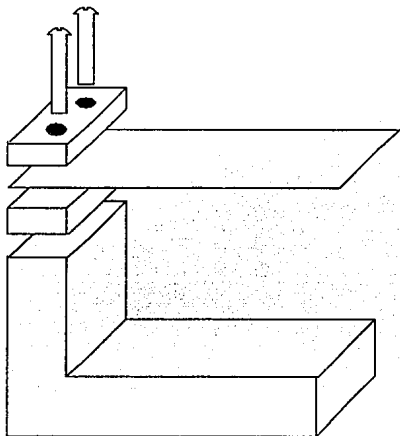
Dicha estructura se conformó fresando en una pieza de latón dos secciones rectangulares de distinta longitud formando un ángulo de  $90^\circ$  para darle la forma de una  $L$  invertida. El extremo más largo se unió a la base del manómetro con una soldadura de estaño que resultó ser la más adecuada dada su bajo punto de fusión y de esa manera evitar que por un recalentamiento se establecieran esfuerzos adicionales al cobre del bourdon.

El maquinado y soldado de esta pieza requirió de un esmerado trabajo, pues debía asegurar que la deformación de la lana solo obedecería en todo momento exclusivamente al movimiento del tubo de bourdon y no a cualquier movimiento o esfuerzo de la base de latón, por lo cual las superficie de las caras extremas se fresaron para de esa manera poder obtener un acoplamiento rígido.

Se maquinaron dos piezas más de latón a fin de obtener un par de placas planas cuya función es la de sujetar a la lana por sus caras para no permitir su desplazamiento. El método de unión entre las placas y la lana fué a través de

tornillos de latón de 1/8" que atravesaron agujeros abocardados en las placas y laina, y se insertaban en agujeros machueledas en la cara transversal del extremo vertical de la estructura.

El propósito de utilizar tornillos de latón obedece a la intención de tratar de minimizar los efectos de la dilatación térmica entre los distintos materiales usados (acero inoxidable y latón), fabricando los elementos de acoplamiento del transductor (estructura, placas de sujeción y tornillos) del mismo material [Fig. 3.2].



### Fig. 3.2 Acoplamiento de la Estructura

Se maquinó una placa adicional que permitiese incrementar la rigidez del conjunto, y dicha placa se atornilló a las caras laterales de la estructura y a la base del manómetro de presión.

Con respecto a los ID's estos fueron del tipo laminar o de hojuela metálica. Su elección se basó en el hecho de su bajo costo y su amplia disponibilidad comercial, y al hecho de que son utilizados para medir rangos mayores de esfuerzos que los de tipo alambre metálico (Metal Wire) que se dañan mas facilmente.

Debido al poco espesor del indicador de deformación de tipo laminar, este puede arrugarse, doblarse o rasgarse, por lo que se le une a una hoja plástica portadora.

El material elegido para el indicador fué el constantán debido a que sus sensibilidad se mantiene lineal en un amplio rango de deformación y no varía cuando el material

se vuelve plástico. La aleación (Níquel 45%, y Cobre 55%) tiene una resistividad elevada  $\rho_0 = 0.49 \Omega\text{m}$  y tiene una gran estabilidad térmica.

Su alta resistividad lo hace ideal para ser conectado a un puente de Wheatstone y así poder medir la deformación del indicador.

Con respecto al método empleado para su montaje se aprovechó que el ID tiene marcado un sistema de coordenadas (Modelo EA-06 BG 120 de la Cia. Micro Measurements), así que se señaló la lana de acero con marcas (rayando su superficie) a lo largo de su eje longitudinal que después se hicieron coincidir con el sistema coordinado de los indicadores.

Antes de marcar la superficie y de pegar los indicadores, la lana fue pulida para prevenir la existencia de rugosidades que alterarían el empalme entre el portador del indicador y la superficie de la lana.

Después del pulido y la limpieza la lana se neutralizó y acondicionó con dos productos comerciales (M Prep. Conditioner A, y Neutralizer 5 de Micro Measurements), terminado este proceso se unieron los indicadores ID's y la lana usando un adhesivo de contacto (M-Bond 200 Adhesive -M-M), se ejerció presión a través de materiales suaves para coadyuvar a un pegado homogéneo y se le aplicó posteriormente un impermeabilizante (M Coat B Nitrile Rubber Coating M-M) para recubrir la superficie libre del indicador y protegerlo de daño mecánico en su superficie.

La conexión eléctrica se hizo a través de laminillas metálicas sobre las cuales se soldan los cables terminales como se aprecia en la Figura 3.3

Dicho arreglo permitió no ejercer presión o jalón alguno sobre los ID's .

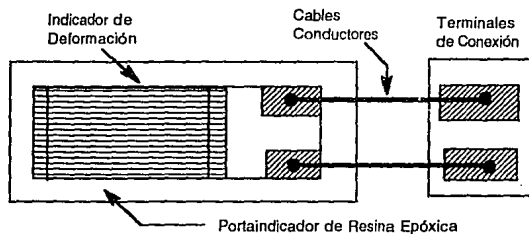


Fig. 3.3 Indicador de Deformación Tipo Laminar.

## PRUEBAS DE COMPORTAMIENTO DINAMICO.

Se realizaron algunas pruebas con el transductor que tuvieron por objeto identificar algunos de los parámetros que condicionan la respuesta dinámica del transductor de presión.

No siendo el objeto del presente trabajo conseguir un modelo matemático de la respuesta en frecuencia del transductor de presión, sino de la factibilidad de su construcción y de su respuesta comparado con un transductor comercial, no haremos un planteamiento de las pruebas en términos de la dinámica de sistemas físicos, sino que nos limitaremos a obtener gráficas de respuesta que nos permitan evaluar a nuestro transductor de la forma ya mencionada.

El sistema de transducción consiste en un tubo de bourdon, un sistema de relojería (que corresponde al manómetro de carátula), y la laminilla de acero.

Cabe comentar el doble propósito del sistema de relojería, primero por su función como elemento de registro del desplazamiento del bourdon, y segundo, como un resorte cuya función es la de forzar el retorno del bourdon a su estado inicial. Si bien la aguja del manómetro fue sustituida por la laina con indicadores de deformación para indicar la presión, no fue posible remover del manómetro el subsistema de relojería.

Para llevar a cabo las mediciones de la respuesta libre del transductor se utilizó un osciloscopio, y una etapa de amplificación y filtrado que permitiera un registro de la señal generada por el transductor sin que estuviera enmascarada por el ruido eléctrico de fondo, dado los valores de voltaje (de -2.5 a +15 mvolts) que nos entrega el puente de wheatstone.

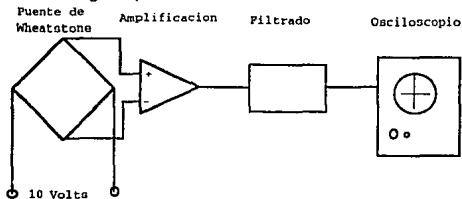
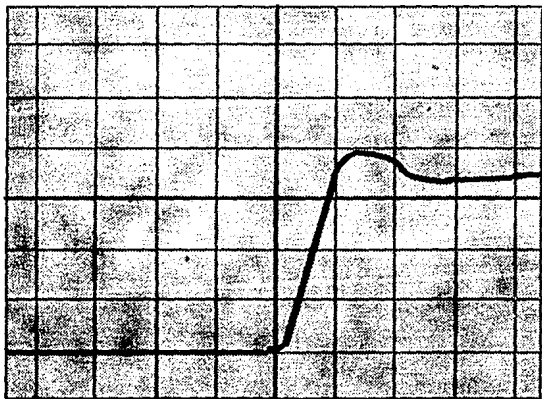


Fig. 3.4 Diagrama del circuito de prueba



El método empleado para obtener la respuesta libre consistió en tener un valor inicial de salida, esto es, que el bourdon tuviera un desplazamiento inicial, esto se consiguió girando la aguja de la carátula del manómetro, mantenerla en una posición diferente con cierto ángulo de giro y dejándola regresar libremente, provocando de esta manera que el bourdon recuperara su posición original sin que existiera alguna señal de excitación.

El sistema de relojería-bourdon tiene implícito cierto retardo de valor constante. Es en sentido riguroso, un sistema biunívoco para el cual a una posición de la aguja corresponde una sola posición del bourdon y viceversa.

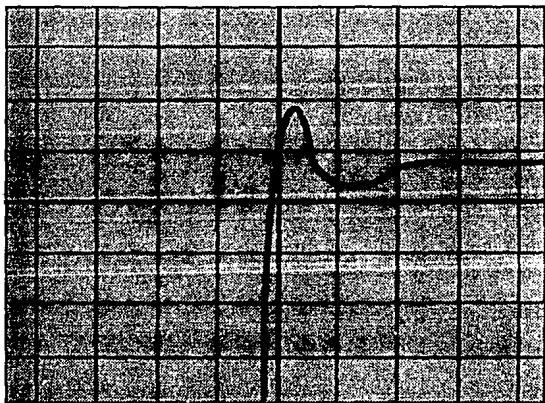


VOLTS	50 mV/div
TIEMPO	50 mSec/div

Fig. 3.5 Respuesta Libre del transductor

Por la respuesta obtenida en el osciloscopio resulta claro que el transductor se comporta analógicamente a un sistema dinámico de segundo orden, y que se trata de un sistema subamortiguado.

De dicho oscilograma pudieron medirse tanto la constante de amortiguamiento  $\alpha$  y la frecuencia natural amortiguada  $\omega$  del sistema (20 cps (126 rad/seg)), con esos valores puede calcularse la frecuencia natural no amortiguada  $\omega_0$ , y el tiempo de respuesta del sistema  $\tau$ .

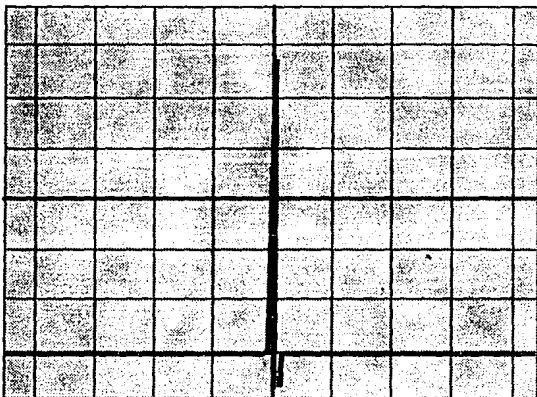


VOLTS	10 mV/div
TIEMPO	0,5 Sec/div

Fig. 3.6 Respuesta libre del transductor Amplificada

Se realizaron otras pruebas con el transductor tales como una de respuesta a impulso de presión y otro de respuesta a señal senoidal.

La respuesta a impulso se consiguió montando el manómetro en una cámara de prueba (un recipiente cilíndrico de acrílico) en el que se hizo estallar un globo y un petardo de pólvora para obtener dos lecturas que semejaran un impulso y que tuvieran valores diferentes.



VOLTS	5 mV/div
TIEMPO	0,5 Sec/div

Fig. 3.7 Respuesta a impulso (Explosión)

Para la respuesta a señal senoidal se montó al transductor en la estructura donde se conecta un diagramador de presión de un compresor de doble efecto (Worthington, 7 Kg/cm<sup>2</sup>), se instaló junto a él un transductor de presión KYOWA PE 5KRMT a fin de comparar el comportamiento de nuestro transductor respecto de uno comercial.

Para que ambos tuvieran un mismo rango de voltaje de salida se incrementó la ganancia de la etapa de amplificación a 1,000.

## **CONCLUSIONES**

Concluyendo, éste capítulo pretende exponer en forma clara el diseño, construcción y características del transductor de presión desarrollado para el presente trabajo.

El transductor basa su funcionamiento en unos indicadores de deformación del tipo de hojuela metálica de resistencia eléctrica, adaptados en un manómetro de presión de carátula mostró ser un sistema fuertemente amortiguado, con un tiempo de respuesta pequeño, tal que permite el registro inclusive de transitorios.

Su comportamiento comparado con un transductor comercial fué ejemplar, aventajandolo.

Destaca el bajo costo del dispositivo y de la relativa sencillez de su manufactura.

Del objetivo propuesto al inicio del cuerpo del presente trabajo, se ha conseguido un transductor que funciona de manera competitiva con los comerciales.

Una mejora que ha de realizarse a nuestro diseño es el tamaño de la estructura que soporta el cantilever que habrá de hacerse menos masiva y más integrada al manómetro de carátula, lo que permitiría un conjunto más manejable y más comercial.

## APENDICE 'A'

EL SIGUIENTE PROGRAMA DE QUICK BASIC CALCULA LA LONGITUD Y EL ESPESOR DE LA LAINA, BASANDOSE EN LA ECUACION DE FLEXION DE UNA VIGA

```
CLS
INPUT "Flecha : ", flecha
INPUT "Max_Flecha : ", fmax
INPUT "Longitud : ", longitud
INPUT "Max_Long : ", lmax
OPEN "TEST.DAT" FOR OUTPUT AS #1
PRINT #1, "Valor inicial de Flecha : ", flecha
PRINT #1, "Valor máximo de la flecha : ", fmax
PRINT #1, "Valor inicial de longitud : ", longitud
PRINT #1, "Valor máximo a iterar : ", lmax
PRINT #1
PRINT #1
PRINT #1, "Longitud      Flecha      Espesor"
DO WHILE longitud < lmaxvm = flecha
DO WHILE vm < fmax
e = 2030000
sm = 4000
h = (2 * sm * longitud ^ 2) / (3 * e * vm)
PRINT #1, USING "###.##      "; longitud; vm
hvm = vm + .1
LOOP
longitud = longitud + .1
LOOP
END
```

## LISTADO PARA LOS DATOS INICIALES QUE SE DETALLAN.

Valor inicial de Flecha : 0.20  
 Valor máximo de la flecha : 0.31  
 Valor inicial de longitud : 3.00  
 Valor máximo a iterar : 5.10

Longitud	Flecha	Espesor
3.00	0.20	0.06
3.00	0.30	0.04
3.10	0.20	0.06
3.10	0.30	0.04
3.20	0.20	0.07
3.20	0.30	0.04
3.30	0.20	0.07
3.30	0.30	0.05
3.40	0.20	0.08
3.40	0.30	0.05
3.50	0.20	0.08
3.50	0.30	0.05
3.60	0.20	0.09
3.60	0.30	0.06
3.70	0.20	0.09
3.70	0.30	0.06
3.80	0.20	0.09
3.80	0.30	0.06
3.90	0.20	0.10
3.90	0.30	0.07
4.00	0.20	0.11
4.00	0.30	0.07
4.10	0.20	0.11
4.10	0.30	0.07
4.20	0.20	0.12
4.20	0.30	0.08
4.30	0.20	0.12
4.30	0.30	0.08
4.40	0.20	0.13
4.40	0.30	0.08
4.50	0.20	0.13
4.50	0.30	0.09
4.60	0.20	0.14
4.60	0.30	0.09
4.70	0.20	0.15
4.70	0.30	0.10
4.80	0.20	0.15
4.80	0.30	0.10
4.90	0.20	0.16
4.90	0.30	0.11
5.00	0.20	0.16
5.00	0.30	0.11
5.10	0.20	0.17
5.10	0.30	0.11

## **CAPITULO 4**

### **FABRICACION Y PRUEBAS DE LA ETAPA ELECTRONICA**

#### **A. DESARROLLO Y ALTERNATIVAS**

#### **B. IMPLEMENTACIÓN**

## CAPITULO 4

### FABRICACION Y PRUEBAS DE LA ETAPA ELECTRONICA

#### A. DESARROLLO Y ALTERNATIVAS

Bajo el concepto del bajo costo de fabricación, se buscaron diversas formas de implementación en cada una de las etapas del transductor; cuidando eficiencia, espacio, comercialización y la fácil adquisición de cada uno de los componentes. El siguiente análisis justifica la selección de ellos.

En la etapa siguiente al sensor, se requiere de amplificar la señal de medición, fidedignamente a la original, con ganancia estable y de fácil ajuste.

El amplificador que se requiere y que se utiliza para casos de medición, control o instrumentación se le denomina amplificador de instrumentación.

Este amplificador existe en el mercado, contiene los amplificadores y resistencias de precisión necesarios para dar estabilidad y exactitud al circuito. A este tipo de amplificadores se les encuentra en diversas marcas y características similares.

Este circuito, que resuelve gran parte del problema y que reduce físicamente el espacio, tiene un costo elevado, quedando fuera del objetivo del prototipo en cuestión; además, se requiere de un mínimo de piezas en la compra, la fabricación es extranjera y se importa bajo pedido, lo que eleva la inversión. Sin embargo, se puede implementar un amplificador de instrumentación con diversos componentes, como amplificadores operacionales, resistencia, etc. Con características muy semejantes al circuito integrado.

El amplificador de instrumentación está constituido por amplificadores operacionales, en una configuración específica. Por lo que se pretende construir un amplificador idéntico en una versión discreta. Comenzaremos por hablar del amplificador diferencial básico, el cual constituye el punto de partida en nuestro diseño.

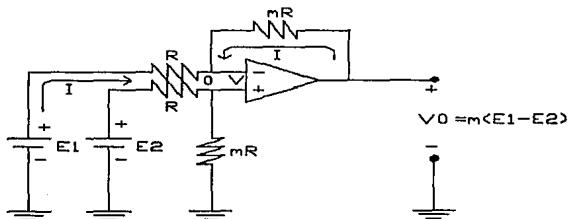


FIG. 4.1 AMPLIFICADOR DIFERENCIAL BASICO



En el amplificador diferencial básico como se muestra en la figura 1, consta de 4 resistencias, que para la eficiencia en la respuesta, son resistencias de precisión con una incertidumbre baja ( $\pm 1\%$ ).

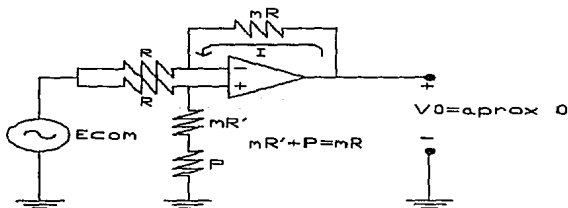


FIG. 4.2 ALIMENTACION COMUN EN EL AMPLIFICADOR DIFERENCIAL

Al alimentar una señal común, en el amplificador básico a cada una de las entradas, con la terminal común negativa conectada a una tierra física, (para evitar estática debido a capacitancia). Como se muestra en la figura dos.

Como resultado del análisis del amplificador se obtiene una ganancia que se encuentra en función de la diferencia de potencial de las entradas.

$$G = \frac{V_0}{E_1 - E_2} = \frac{mR}{R} = m \quad \text{EC.1}$$

El voltaje a la salida, en teoría según la ecuación 1, debe de ser cero, y no lo cumple el circuito, . En la práctica esto es difícil de lograr, debido a la pequeña diferencia entre los valores de las resistencias, por lo que se requiere un potenciómetro en serie con una resistencia, para aproximar el voltaje de salida a cero volts.

En conclusión el circuito presenta dos desventajas en nuestro desarrollo. Uno, baja impedancia de entrada; Dos, un ajuste difícil en el cambio de ganancia, al variar una resistencia  $mR$ , se debe variar idénticamente la otra resistencia  $mR$ . Este tipo de configuración muestra características poco apropiadas, para nuestro propósito.

Sin embargo tiene cualidades, que serán utilizadas en una etapa posterior del mismo amplificador de instrumentación.

El siguiente circuito que aparece en la figura 3, nos cambia el panorama de las desventajas anteriores.

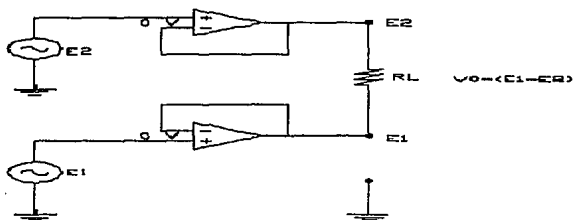


FIG.4.3 AMPLIFICADOR SEGUIDOR DE VOLTAJE

Se obtiene una impedancia alta de entrada, así no cargará al circuito previo. Esto se puede ver, en ambas entradas los amplificadores se encuentran como seguidores de voltaje, los voltajes de salida con respecto a tierra, de cada uno de los amplificadores, son iguales a los voltajes de entrada. Así  $V_0$  es igual a la diferencia entre E1 y E2.

Ya que los voltajes entre las terminales, + y - de los amplificadores operacionales son 0 volts.

Para lograr una ganancia variable, el cual permita calibrar al instrumento, se implementan dos resistencias dentro de la retroalimentación de los lazos de cada amplificador y otra entre ambos lazos de retroalimentación en serie con un potenciómetro de ajuste. Se obtiene un amplificador que dará a la señal una ganancia variable de fácil control, sin perder la característica de los seguidores de voltaje, alta impedancia de entrada.

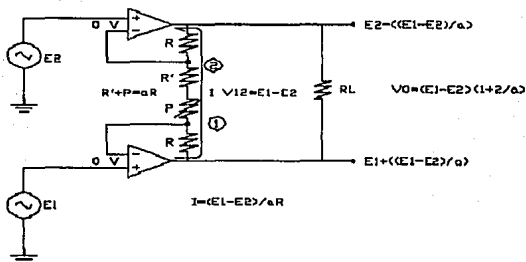


FIG. 4.4

En los puntos 1 y 2 se obtiene respectivamente los voltajes de entrada  $E_1$  y  $E_2$ , y el voltaje de carga será proporcional a la corriente  $I$  por la resistencia  $aR$ .

El voltaje de salida de los amplificadores operacionales, se define de la siguiente manera :

$$V_R = RI \quad \text{EC.2}$$

$$I = \frac{(E_1 - E_2)}{aR} \quad \text{EC.3}$$

de la EC.3 en EC.2

$$V_R = \frac{(E_1 - E_2)R}{aR} = \frac{(E_1 - E_2)}{a} \quad \text{EC.4}$$

para  $V_1$

$$V_1 = E_1 + V_R = E_1 + \frac{(E_1 - E_2)}{a} \quad \text{EC.5}$$

para  $V_2$

$$V_2 = E_2 - V_R = E_2 - \frac{(E_1 - E_2)}{a} \quad \text{EC.6}$$

para obtener  $V_0$

$$V_0 = V_1 - V_2 \quad \text{EC.7}$$

$$V_0 = E_1 + \frac{E_1 - E_2}{a} - E_2 + \frac{E_1 - E_2}{a}$$

$$V_0 = (E_1 - E_2) + 2 \frac{(E_1 - E_2)}{a} \quad \text{EC.8}$$

$$V_0 = (E_1 - E_2) \left(1 + \frac{2}{a}\right)$$

Con este circuito se tienen características favorables, rechazo a modo común;  $V_0=0$  cuando  $E_1=E_2$ ; alta impedancia de entrada, seguidores de voltaje; y ganancia ajustable,  $aR$ .

Sin embargo los voltajes  $V_1$  y  $V_2$  son cargas flotantes, ninguna se puede aterrizar.

Para corregir esta deficiencia se hace uso del amplificador diferencial básico, figura 1; que se mostró anteriormente, en una configuración como la mostrada en la figura 5. Las resistencias  $R$  se seleccionan por sus valores, no debe variar en más del  $\pm 1\%$ ,  $r'$  en serie con  $p'$  balancea el voltaje en modo común, eliminando un posible voltaje de offset. Obteniendo una ganancia unitaria.

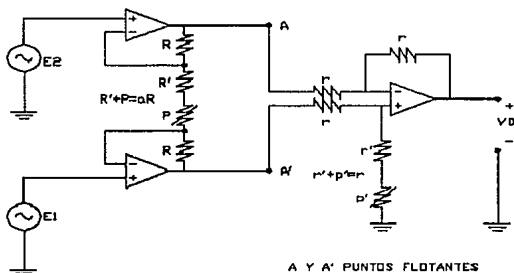


FIG.4.5 IMPLEMENTACION DE AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACION

En resumen se tiene un amplificador de instrumentación con gran eficiencia, que aunado a su bajo costo lo hace comercial.

El amplificador de instrumentación desarrollado posee alta impedancia de entrada, ganancia variable, ajuste offset, estabilidad. Y de un costo del 75% menor que el de un amplificador comercial. Con lo que los objetivos perseguidos se cumplen.

El circuito puede estar propenso a ruido, de cualquier índole, térmico, vibración, magnético, etc., por lo cual se requiere de una etapa de filtrado que haga eficiente la señal de salida ante cualquier variación ambiental que pueda alterar el funcionamiento del transductor digital. Haciendo necesariamente una parte integral el filtro, del transductor digital.

En la etapa de filtrado, se utiliza un filtro activo butterworth paso bajos, de uso común, utilizando sólo un amplificador operacional con una atenuación de  $-40\text{dB/dec}$ .

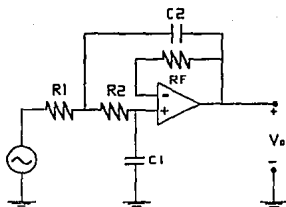


FIG.4.6 DISEÑO DEL FILTRO PASO BAJAS BUTTERWORTH

El diseño del amplificador se simplifica haciendo los resistores  $R_1$  y  $R_2$  iguales y bajo el siguiente procedimiento se analizan los valores de los elementos restantes:

- 1). Frecuencia de corte  $W_c$  o  $f_c$  ( $W_c=2(3.14)f_c$ )
- 2).  $R_1=R_2=R$  (10,100k);  $R_f=2R$
- 3).  $C_1$ :  $C_1=0.707/W_cR$
- 4).  $C_2$ :  $C_2=2C_1$

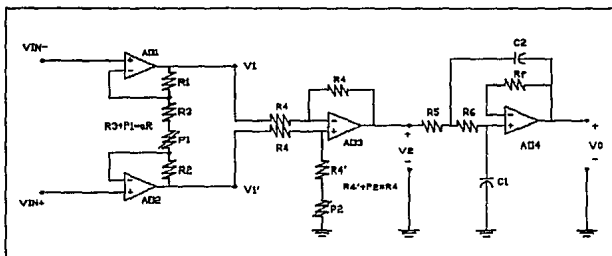


FIG.4.7 CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL

Hasta este punto nosotros contamos con un transductor electrónico analógico, que entrega una señal proporcional a la deformación que experimenta el tubo de Bourdón, bajo la presencia de la presión de un fluido X y filtrada, eliminando ruido e interferencia.

Para complementar nuestro manómetro digital, es necesario definir la etapa de despliegue de información, comunicación del medio con el usuario, y que por tratarse de una comunicación por medio de una pantalla de cristal líquido, da nombre al instrumento.

En la etapa del despliegue de información utilizaremos, previa investigación en el mercado, un dispositivo que se compone internamente de un voltímetro con salida para una pantalla de cristal líquido de cuarzo.

Este dispositivo es nombrado ICL 7106 de INTERSIL. El componente es el primer circuito que contiene todos los elementos para desplegar información a través de un display de 3 1/2 dígitos de LCD.

Con respecto al costo, este circuito integrado sustituye a lo que sería un convertidor analógico digital, un contador código BCD, un decodificador de 7 segmentos, un driver para 3 1/2 dígitos y a un reloj. Siendo necesario adicionar para su total implementación solamente 4 resistencias, 4 capacitores y una pantalla de LCD.

Por lo que el costo se reduce al disminuir el número de componentes, el precio es de sólo \$ 5.95 dls en el mejor de los casos, la pantalla de LCD entre \$ 3.00 y \$4.00 dls, y como promedio de unos \$ 8.00 dls de mano de obra y otros componentes. nos dan un total de \$ 18.00. Añadiendo la simplificación de espacio y comercialización, este elemento presenta una buena opción para nuestro interés.

Las características del circuito ICL7106 son :

#### RANGOS MÁXIMOS ABSOLUTOS

FUENTE DE VOLTAJE (V+ a V-)	15 V
VOLTAJE ANALÓGICO DE ENTRADA	(NOTA 1)
VOLTAJE DE REFERENCIA	(V+ a V-)
ENTRADA DE RELOJ	TEST a V+
PODER DE DISIPACIÓN	
ENCAPSULADO CERÁMICO	1000 W
ENCAPSULADO PLÁSTICO	800 W
TEMPERATURA DE OPERACIÓN	0 C° a 70 C°

NOTA 1: El voltaje de entrada puede exceder del voltaje de la fuente pero sin rebasar los 100 microamperes de corriente demandada.

El ICL7106 nos entrega lecturas digitales en dos escalas que son las de 0.0 a 200.0 mV y la de 0.0 a 2.0 V, esta selección se hace bajo el cambio de elementos resistivos y capacitivos adicionales al integrado, los cuales obedecen a la siguiente tabla

COMPONENTE	200.0mV	2.000V
C <sub>2</sub>	0.47 microF	.047 microF
R <sub>1</sub>	24 Kohms	1.5 Kohms
R <sub>2</sub>	47 Kohms	470 Kohms

Es versátil y se puede configurar de más de una forma según las aplicaciones en su uso, pero para nuestros fines lo utilizaremos en el modo simple o típico.

## B. IMPLEMENTACION

Basándonos en la ecuación que define a nuestro amplificador de instrumentación que se muestra a continuación como la relación entrada/salida:

$$V_o = (E_1 - E_2) \left( 1 - \frac{2}{a} \right) \quad \text{EC.8}$$

El transductor tiene un rango de medición de 0.00 volts hasta los 15.00 milivolts. Correspondiente a la presencia de una presión dentro de un rango de los 0.00 kg/cm<sup>2</sup> a los 4 kg/cm<sup>2</sup>, (Presión manométrica).

El circuito integrado de intersil IÇL 7106, acepta voltajes mayores que la fuente de voltaje (V+ a v-), como señal de entrada. Y cuando esto sucede, los voltajes se restringen a un límite de corriente de 100 microamperes.

Para determinar el rango de ganancia que se necesita, se limitan los voltajes mayores de lectura, que aparecerán en la pantalla de LCD, y permitirán el cambio de unidades o escala así como de calibración del instrumento y el máximo voltaje del sensor el voltaje de entrada del amplificador de instrumentación.

Seleccionando un voltaje límite superior mínimo de 2.00 volts, trabajaremos con la ecuación anterior y con la ecuación de definición de ganancia

$$G = \frac{V_o}{E_1 - E_2} = \frac{2}{0,015} = 133,33 \quad \text{EC.9}$$

Para la misma ecuación seleccionamos un segundo valor como límite superior máximo de 5 volts, tenemos

$$G = \frac{5}{0,015} = 333,33 \quad \text{EC.10}$$

Estos dos resultados nos dan una idea del rango de ganancia de nuestro transductor digital. Los límites de ganancia son 133.33 y 333.33.

Este rango de ganancia nos dará la facilidad de ajustar nuestra lectura a las unidades deseadas de presión es decir de  $\text{kg/cm}^2$  o  $\text{lib/plg}^2$ , como ejemplo, cambio de escala y calibración

Con esta misma ecuación de ganancia podremos obtener la constante "a" mediante un despeje y como consiguiente los valores de las resistencia de amplificación para ambos límites de ganancia.

$$a = \frac{2}{\left(\frac{V_o}{(E_1 - E_2)}\right) - 1} \quad \text{EC.11}$$

$$a = \frac{2}{133,33 - 1} = 0,01511 \quad \text{EC.12}$$

Por lo que para el primer caso tenemos una constante  $a = 0.015113$  y si  $R_1 = R_2 = 100 \text{ kohms}$  tenemos que  $aR' = 1511.33 \text{ ohms}$ .

Para el segundo caso  $a = 0.006018$  y si mantenemos las mismas resistencias  $R_1$  y  $R_2$ ,  $aR'' = 601.81 \text{ ohms}$ .

De tal forma que el rango de la resistencia variable  $aR$  se encuentra entre  $601.81$  y  $1511.33$ .

El valor teórico de la resistencia variable de  $aR$ , podremos limitarla con los valores de  $aR'$  y  $aR''$ , tomando en cuenta que  $aR$  no debe ser en ningún caso, ni pequeño, ni igual a 0, ya que la corriente de carga se haría tan grande con tendencia a infinita, que sobrecargaría al circuito.  $aR$  se compone de una resistencia fija  $R_3$  de  $500 \text{ ohms}$  y una variable  $P_1$  de  $1 \text{ kohm}$ .

El juego de resistencias  $R_4$  son seleccionadas bajo términos de estabilidad y de mínima tolerancia, así las resistencias son de  $100 \text{ ohms} \pm 1\%$ ,  $R_4'$  tiene un valor de  $50 \text{ ohms}$  y el potenciómetro  $P_2$  de ajuste de offset de  $100 \text{ ohms}$ . Este último para compensar la diferencia que llegue a existir entre el valor de las resistencias de precisión, de tolerancia de  $\pm 1\%$ . Para obtener una ganancia unitaria.

En la etapa de filtrado, para un filtro tipo butterworth paso-bajos, se calculan los valores de los elementos, con una frecuencia de corte  $f_c = 30 \text{ Hz}$ . En un análisis previo de ruido, el tipo de ruido que interfiere en la señal con menor frecuencia, es el generado por la línea de alimentación y no es menor de  $30 \text{ Hz}$ .



Por lo que :

$$f_c = 30 \text{ Hz} \Rightarrow W_c = 2\pi 30 = 188,49$$

$$C1 = 0,1\mu\text{F} \Rightarrow C2 = 0,2\mu\text{F}$$

$$R = \frac{0,707}{0,1\mu\text{F} \times 2 \times \pi \times 30 \text{ Hz}}$$

$$R = R1 = R2 = 37,5\text{K}\Omega \Rightarrow Rf = 75\text{K}\Omega$$

En la práctica tal vez sea necesario modificar el valor de los elementos después del armado y prueba.

El armado del voltímetro digital, se hará típicamente según el dibujo que se muestra a continuación.

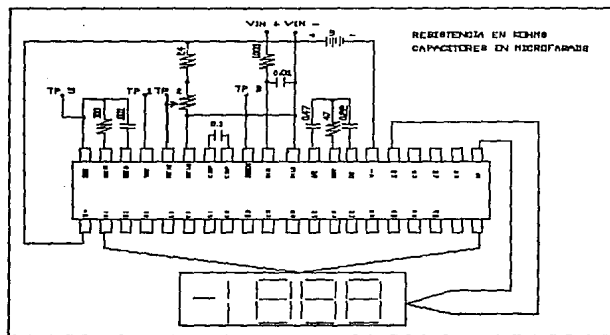


FIG.4.8 CONEXION TIPICA

El arreglo utilizado es el recomendado por el fabricante como el típico. Resultando la implementación sencilla.

## IMPLEMENTACION DEL MANOMETRO DIGITAL

Una vez hecha la elección de los dispositivos y arreglos para la amplificación, filtrado y despliegue de la información obtenida del transductor de presión, se llevó a cabo el armado, para lo cual se utilizaron tabletas de prueba, ensamblando por separado los distintos arreglos con el fin de realizar los ajustes de la etapa electrónica y así poder manejar con facilidad el cambio de componentes (resistencias, capacitores, circuitos integrados, etc.).

El siguiente diagrama muestra los bloques de la etapa electrónica y como van conectados entre sí, tomando en cuenta la fuente de voltaje para el funcionamiento de cada circuito integrado:

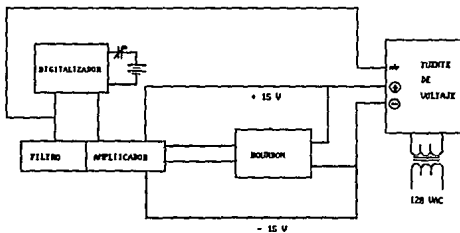


FIG.4.9 BLOQUES DE LA ETAPA ELECTRONICA

Al terminar el armado en la tableta de prueba, se decidió hacer un prototipo del circuito impreso de los bloques de amplificación, filtrado y despliegue, así como el de la fuente de voltaje de  $\pm 15$  VDC para la operación de los amplificadores operacionales.

Para hacer el prototipo del circuito impreso, se diseñaron las pistas con ayuda de programa SMART WORK para computadora personal a fin de obtener una impresión a la escala 2 a 1. Posteriormente se remarcó cada pista de nuestro circuito para elaborar un positivo y un negativo fotográfico al 50 % evitando así, algún error en las pistas, cuando el fabricante de circuitos impresos elabore nuestro prototipo propuesto.

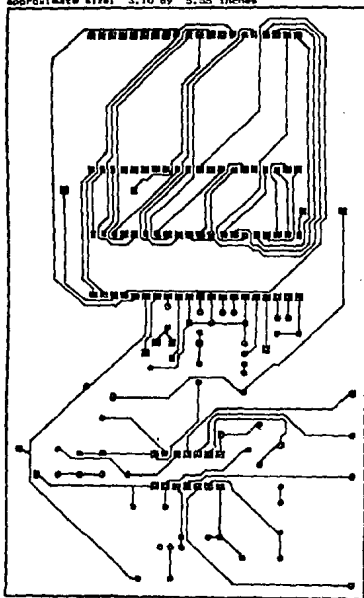


FIG. 4.10 CIRCUITO IMPRESO DEL MANOMETRO DIGITAL

Una vez obtenido el circuito impreso, se llevó a cabo la etapa de soldar los componentes, tomando en cuenta la instalación de bases (sockets) para la colocación de los circuitos integrados, y lograr así un manejo más correcto de los mismos.

La fuente de voltaje se construyó en forma simple, utilizando un transformador conectado al suministro de C.A., para disminuir el valor del voltaje al nivel deseado, posteriormente rectificarlo mediante un circuito rectificador de onda completa, filtrar el voltaje de salida utilizando un condensador, y finalmente regular ese voltaje de C.C. utilizando un regulador fijo.

El regulador de voltaje, comprende una amplia clase de circuitos integrados utilizados. Estas unidades contienen la circuitería para la fuente de referencia, el

amplificador de error, el dispositivo de control, y la protección de sobrecarga, todas contenidas en una sola pastilla.

Cuenta con una entrada de voltaje no regulado  $V_{in}$ , el cual es aplicado a una de sus tres terminales; entrega como salida un voltaje regulado  $V_o$ , en una segunda terminal; su tercera terminal se le conecta a tierra. En nuestro caso los reguladores utilizados fueron el 7815 para un voltaje de +15 VDC y el 7915 para un voltaje de - 15 VDC.

Los condensadores que pueden conectarse entre  $V_{in}$  y tierra, o entre  $V_o$  y tierra, ayudan a mantener el valor de C.C. y adicionalmente a filtrar las variaciones de voltaje a cualquier frecuencia elevada.

El diagrama de conexión de la fuente regulada se muestra en la siguiente figura

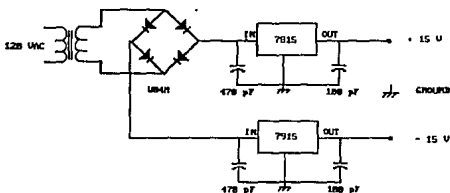


FIG. 4.11 FUENTE REGULADA DE VOLTAJE.

## **CAPITULO 5**

### **CONTROLADORES LOGICOS PROGRAMABLES EN PROCESOS INDUSTRIALES.**

**A) PRINCIPIOS DE OPERACION**

**B) SITUACION ACTUAL DE LOS PLC's EN EL MERCADO**

**C) APLICACIONES**

## CONTROLADORES LOGICOS PROGRAMABLES EN PROCESOS INDUSTRIALES.

### A) PRINCIPIOS DE OPERACION.

Un controlador lógico programable es un dispositivo electrónico con un cuerpo integral hecho de múltiples relevadores electrónicos, temporizadores y contadores y cuyo cableado interno es ejecutado a través de el panel de programación, éste dispositivo cuenta con la capacidad de almacenar en memoria instrucciones mediante las cuales a partir de determinadas entradas se activen las salidas que permitan controlar una gran variedad de tipos de máquinas.

La diferencia fundamental de un PLC respecto de un panel de relevadores es que en el segundo, todas las secuencias son ejecutadas paralelamente al mismo tiempo, mientras que en un PLC la operación es repetida ciclicamente de acuerdo a un programa.

Otra diferencia radica en que un panel de relevadores requiere un completo recableado cuando se necesitan modificaciones de proceso, mientras que con un PLC con modificar la secuencia de programación para llevar a cabo dichas modificaciones.

Los controladores lógicos programables tienen un amplio uso como los elementos centrales en procesos de automatización de fábricas. Son esenciales para la automatización de la producción y pueden ser usados en una gran variedad de aplicaciones que van desde configuraciones sistemáticas las cuales controlan la operación entera de una fábrica, hasta configuraciones "Stand-Alone" que controlan máquinas individuales.

Un controlador lógico programable (PLC) funciona de acuerdo a 2 tipos de entradas que son :

#### a) Entradas de instrucciones

Estas pueden ser generadas por medio de botones , switches selectores ó switches digitales de un panel de operaciones.

#### b) Entradas sensadas

Este tipo de entradas pueden ser generadas por medio de switches de límites, switches de proximidad y fotosensores, los cuales se encargan de detectar la condición de operación de un equipo.

En respuesta a estas entradas el controlador programable controla 2 tipos de cargas; las de impulso de carga ( tales como válvulas solenoides, motores, y clutches electromagnéticos), y las de indicadores de carga ( tales como lámparas piloto o displays digitales).

La relación existente entre las señales de salida y sus correspondientes señales de entrada es determinada por un programa almacenado en el controlador programable.

En el controlador es posible manejar directamente cargas eléctricas ligeras tales como válvulas solenoides, motores, inversores y lámparas piloto. Sin embargo, las cargas mayores, tales como motores trifásicos, válvulas solenoide de gran capacidad, etc., necesitan ser manejadas a través de un contactor o relevador intermedio.

Tales contactores, relevadores intermedios, o ruptores de potencia deben de instalarse con el controlador programable en el tablero de control.

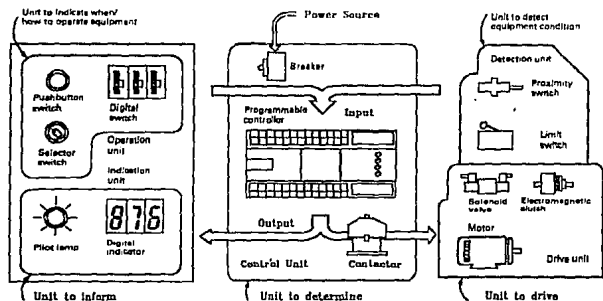


FIGURA # 1 ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE UN PLC.

### A.1) ARREGLOS DE UN CONTROLADOR PROGRAMABLE

Un controlador lógico programable es una computadora industrial la cual está integrada por los siguientes elementos :

- 1) Circuitos eléctricos los cuales están basados en unidades de memoria y microprocesador.
- 2) Interfases de entrada y salida que son utilizadas para separar las entradas y salidas de los circuitos eléctricos.
- 3) Panel de programación el cual sirve para definir las actividades que debe de realizar el sistema. Este está colocado directamente en la parte superior de los PLC's ó está conectado por medio de un cable de extensión.

Una de las ventajas de conectar directamente este panel de operación al PLC es la facilidad de estar monitoreando el estatus interno de operación del sistema.

Un Controlador lógico programable internamente esta integrado por timers (T), contadores (C), relevadores de salida (Y), y relevadores auxiliares (M).

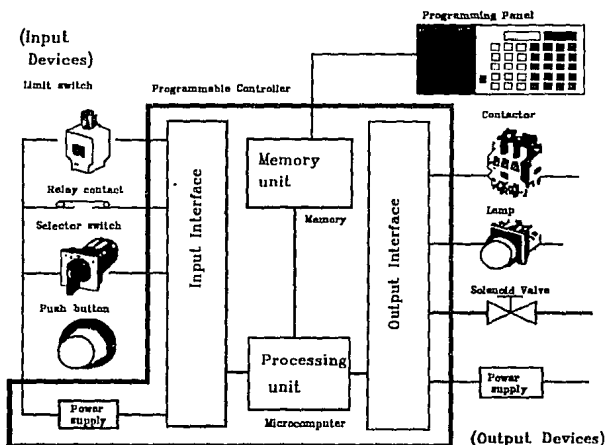


FIGURA # 3 ESQUEMA INTERNO DE UN PLC.

## A.2) VENTAJAS EN EL USO DE LOS CONTROLADORES LOGICOS PROGRAMABLES.

### 1) Economía :

Para cualquier sistema de control que requiera de más de 10 relevadores, se recomienda utilizar un controlador programable debido a una importante disminución en el costo inicial y de mantenimiento.

### 2) Diseño simplificado :

Se reduce grandemente el esfuerzo de diseño gracias a la reducción de sus componentes, así como a la facilidad en la elaboración de la secuencia de planes y menor cantidad de ajustes durante las pruebas.



### **3) Desarrollo rápido :**

Esto se logra debido a una disminución en el número de partes, mayor poder de procesamiento en la caja de control, y se logra también una mayor flexibilidad para responder a cambios de especificaciones que implican una importante reducción en el tiempo de instalación.

### **4) Compactación y Estandarización :**

Las aplicaciones en cuyos diseños se especifican controladores lógicos programables, son considerablemente más compactos que los que utilizan cajas relevadoras; su producción en masa es posible debido al empleo de circuitos electrónicos integrados, y su estandarización se debe principalmente a la facilidad de programación de los mismos.

## **A.3) SET BASICO DE INSTRUCCIONES DE LOS CONTROLADORES LOGICOS PROGRAMABLES.**

### **1) LD (LOAD)**

Instrucción que se utiliza para conectar un contacto normalmente abierto a una línea del bus.

### **2) LDI (LD inversa)**

Instrucción que se utiliza para conectar un contacto normalmente cerrado a una línea del bus.

### 3) OUT (OUT)

Instrucción para indicar cuál es la salida del sistema.

Estas instrucciones pueden ser referenciadas a un timer de programación. Las instrucciones LD y LDI son conocidas como instrucciones de contacto, mismas que son aplicadas a los siguientes tipos de contactos: relevadores de entrada (X), relevadores de salida (Y), timers (T), contadores (C) y relevadores auxiliares (M).

### 4) AND (AND)

Instrucción para conectar un contacto normalmente abierto en serie.

### 5) ANI (AND Inversa)

Instrucción para conectar un contacto normalmente cerrado en serie.

### 6) OR (OR)

Instrucción para conectar un contacto normalmente abierto en paralelo.

### 7) ORI (OR Inversa)

Instrucción para conectar un contacto normalmente cerrado en paralelo.

Estas instrucciones se utilizan para simular el funcionamiento de un relevador auxiliar.

### 8) ORB (OR Block)

Instrucción que se utiliza para conectar bloques de circuitos en serie en paralelo.

### 9) ANB (AND Block)

Instrucción que se utiliza para conectar bloques de circuitos en paralelo en serie.

### 10) PLS (PULSE)

Instrucción que se utiliza para generar pulsos de salida.

### 11) S (SET)

Instrucción para generar una señal alta en la salida.

### 12) R (RESET)

Instrucción para generar una señal baja en la salida.

### 13) RST (RESET)

Instrucción que realiza un borrado de contadores y registros de control.

### 14) MC (MASTER CONTROL)

Es una conexión común en serie con un contacto normalmente abierto.

#### 15) MCR (MASTER CONTROL RESET)

Denota el fin de un bloque de control maestro.

El control maestro actúa como un grupo de switches los cuales pueden apagar todo el equipo eléctrico de un tablero de control, por ejemplo. Es decir el uso del control maestro es un fácil camino para separar un grupo de operaciones de otro grupo.

#### 16) CJP (CONDITIONAL JUMP)

Instrucción que realiza un salto condicional si la entrada manda una señal alta.

#### 17) EJP (END OF JUMP)

Instrucción que indica el fin del salto.

#### 18) NOP (NO OPERATION)

Cuando un programa ha sido borrado todo el set de instrucciones debe de estar en no operación.

#### 19) END (END)

El controlado lógico programable repetidamente ejecuta las entradas de procesos y proporciona ciertas salidas de acuerdo a la programación del mismo. Una vez que se encuentra la instrucción END, todos los pasos después de ésta serán ignorados y las salidas borradas.

### A.4) IMPLEMENTACION DE LOS CONTROLADORES LOGICOS PROGRAMABLES

Un aspecto muy importante en el uso e implementación de los controladores lógicos programables es la técnica de diseño que se utilice, en ella deben de ser considerados los siguientes aspectos:

#### 1) Selección

Es el primer paso que se debe de considerar cuando se desea diseñar con controladores lógicos programables ya que se deben de tomar en cuenta el número de entradas y salidas para determinar el tamaño del controlador lógico programable, las entradas deben de ser contadas directamente del diagrama de secuencias previamente realizado.

En la selección del modelo se debe considerar el voltaje de alimentación que puede ser de 110 ó 220 Volts de AC ó 24 Volts de DC.

Otro punto importante en la selección del PLC es el tipo de memoria, cada tipo de memoria tiene una capacidad aproximada de 1000 pasos de programación.

## 2) Diseño

En este paso se deciden las relaciones existentes entre entradas y salidas, así como la manera de programar el sistema.

Una vez que el controlador ha sido elegido, los instrumentos que van a las entradas y salidas del controlador deben de estar seleccionados de acuerdo a la especificación del tipo de máquina a controlar.

## 3) Instalación y cableado

Los controladores programables pueden ser montados directamente a la caja de control utilizando los cuatro hoyos en las esquinas, o montándolo sobre brackets, en la instalación debe de asegurarse que el controlador no esté expuesto en lugares con gases corrosivos, al polvo, en lugares donde exista movimiento, no debe de estar expuesto al sol, ni a la humedad.

Se deben instalar lo más lejos posible de transformadores, cables de alto voltaje, y motores eléctricos, no se debe de utilizar el mismo cable para señales de entrada y salida.

## 4) Operación

Se debe de checar la operación del sistema mediante la aplicación del software al controlador para verificar el funcionamiento correcto del mismo

## 5) Mantenimiento

Una vez instalado el sistema se debe de tener un respaldo del software, así como la información necesaria del mismo.

Es de gran ayuda también el panel de operación del PLC, el cual indica errores en la alimentación del sistema, errores en el programa, etc.

En algunos casos la vida del PLC puede ser reducida debido a altas frecuencias de operación ó manejo de altas cargas capacitivas.

## B) APLICACIONES DE LOS CONTROLADORES LOGICOS PROGRAMABLES

Los controladores lógicos programables tienen un sin número de aplicaciones en la industria ya sea para controlar procesos completos de automatización en una fabrica ó para controlar pequeños sistemas independientes.

Una aplicación muy común de los PLC es el de checar los contenidos de los tanques de almacenamiento pudiendo ser estos de agua, aceite, alimento, etc. mandando una señal de alarma cuando los niveles estén por debajo de los establecido ó activando ciertos mecanismos de control para lograr una compensación en dichos niveles para estabilizar el sistema.

La siguiente figura muestra una de las aplicaciones de los controladores lógicos programables en la cual mediante un detector de nivel se controla la cantidad de alimento que debe existir en el recipiente de tal forma que cuando se llegue al límite inferior el sistema mande una señal de alarma la cual consistirá en encender una lámpara y hacer sonar una bocina.

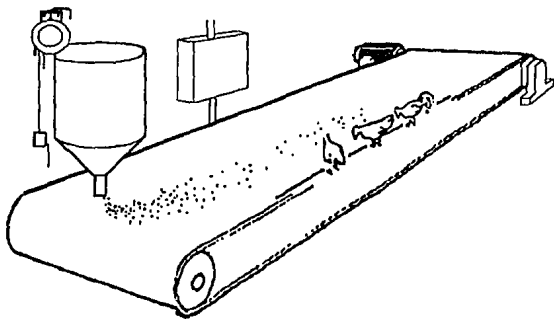


FIGURA #1 CONTROL DE ABASTECIMIENTO DE ALIMENTOS

Otra aplicación quizá la mas común es para el control en el nivel de almacenamiento de agua la cual consistirá en encender automáticamente una bomba de agua cuando el nivel de almacenamiento se encuentre por debajo de los requerimientos planteados.

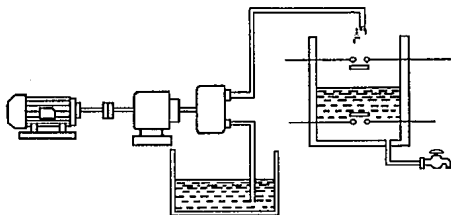


FIGURA # 2 CONTROL DE NIVEL DE LIQUIDOS

Otra aplicación quizá de las mas comunes es para el control de semáforos en las ciudades controlando el tiempo de encendido y apagado de las luces.

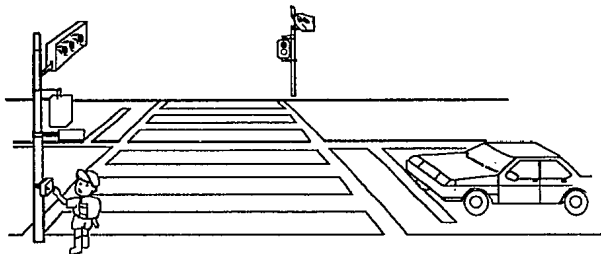


FIGURA # 3 AUTOMATIZACION DE SEÑALES DE TRANSITO

Una aplicación para uso domestico muy empleada es para el control de acceso a cocheras u estacionamientos mediante el cual el controlador es activado mediante un boton ó una señal de frecuencia la cual ocasiona que un motor sea activado y abra la reja ó malla de acceso.

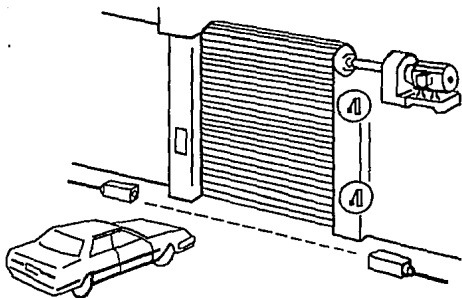


FIGURA # 4 CONTROL DE ACCESO A ESTACIONAMIENTOS

### C ) SITUACION ACTUAL DE LOS PLC'S EN EL MERCADO

A fin de conocer las características que poseen los equipos comerciales en el mercado, con el propósito de obtener información que permitiera definir la decisión del equipo a utilizar en términos tanto económicos como técnicos, se cotizaron un variedad de marcas y modelos que cubrían el rango de operación requerido por el proyecto.

#### MARCA FESTO - ELECTRONIC

Modelo: 202 c  
8 Entradas y 8 Salidas  
N\$ 3,195.80

Modelo: 101 AF  
21 Entradas (8 analógicas)  
14 Salidas (2 analógicas)  
N\$ 4,760.08

Módulo de Expansión de Entrada/Salida  
8 Entradas y 8 Salidas  
N\$ 1,696.90

Cable de conexión  
N\$ 337.68

Unidad de parámetros  
N\$ 2,361.15

Software para programar desde PC  
N\$ 525.60

Los PLC's de FESTO tienen la gran desventaja de que solo pueden programarse a través del software para PC. Aún adquiriendo la unidad de parámetros, esta no sirve para modificar el programa del PLC, sino solo para monitorear algunas variables de su funcionamiento.



## MARCA SIMATIC - TEXAS INSTRUMENTS

Modelo:	308-OIT 2 Módulos de 8 puntos de salida Relevador de 220 VAC y 4 Amp \$ 230.00 USD
Modelo:	305 - 05N 1 Módulo de 16 puntos de entrada a 24 VDC \$ 185.00 USD
Modelo:	330-37 1 Módulo CPU de 3.7 Kb de RAM \$ 408.00 USD
Modelo:	305-02B 1 Rack de 5 ranuras Alimentación de 115/230 VAC \$ 255.00
Modelo:	305-DMY Tapa de slot \$ 13.00 USD
Modelo:	305-PROG Programador manual portátil \$ 223.00 USD

MARCA GENERAL ELECTRIC

Modelo: Tarjeta de 16 puntos de entrada 115 VAC  
\$ 420.00 USD

Tarjeta de 16 puntos de salida Relay de 2 Amp  
\$ 360.00 USD

CPU Serie ONE de 3.7 Kb de RAM  
\$ 1,150.00 USD

Rack de 5 slots serie ONE  
\$ 380.00 USD

Tarjeta para entrada analógica (8 bits)  
4 Puntos de entrada de 0 a 5 V, 4 a 20 mA  
\$ 625.00 USD

Tarjeta para salida analógica (8 bits)  
2 Puntos de salida de 0 a 10 V, 4 a 20 mA  
\$ 625.00 USD

## MARCA ALLEN - BRADLEY

**Modelo:** Conjunto Serie SLC500  
Módulo 1747 - L40A SLC500  
1 Kb de Memoria RAM, 5/01 CPU  
24 Entradas a 120 VAC  
16 Salidas por Relevador  
\$ 736.00 USD

Módulo 1747-L40P SLC500  
1 Kb de Memoria RAM, 5/01 CPU  
24 Entradas a 240 VAC  
16 Salidas por TRIAC  
\$ 848.00 USD

## MARCA MITSUBISHI

**Modelo:** PLC FX 32MR  
16 puntos de entrada  
16 puntos de salida por relevador a 220 VAC y 5  
Amp  
2,000 pasos de programación  
N\$ 2,100.00

**Modelo:** Interfase FX-4AD  
4 Entradas Analógicas  
N\$ 1,275.00

**Modelo:** Unidad de Programación de bolsillo  
MELSEC FX10P  
Dos líneas en pantalla LCD  
N\$ 1,200.00

**Modelo:** Cable serial de conexión  
FX20P-CAB  
N\$ 250.00

## CAPITULO 6

### IMPLEMENTACION DEL LAZO DE CONTROL UTILIZANDO UN CONTROLADOR LOGICO PROGRAMABLE.

- 1.- SELECCION
- 2.- DISEÑO
- 3.- INSTALACION Y CABLEADO
- 4.- OPERACION
- 5.- MANTENIMIENTO

## 1.- SELECCION

El PLC seleccionado es el modelo MELSEC FX32MR de la compañía Mitsubishi. Este PLC opera en forma autoajutable en un rango desde los 100 a los 240 volts de AC, cuenta con memoria para 2048 instrucciones, 16 entradas y 16 salidas, siendo todas las salidas por relevador y organizándose en 4 bloques de salidas cada uno teniendo un nodo común. Cada bloque de salidas puede tener un voltaje distinto. En nuestro caso el bloque 1 maneja salida de 24 VDC para habilitar lamparas indicadoras, y el bloque 4 maneja 5 VDC para controlar las velocidades de un motovariador.

A pesar de su tamaño reducido, la serie a que pertenece éste modelo tiene un conjunto de instrucciones muy amplio y sencillo, a diferencia de otras marcas (como en el caso de los PLC's de SIEMENS) que a pesar de que su programación puede diseñarse en base a diagramas de escalera, tienen unas instrucciones y procedimientos que hacen difícil al operario promedio, una rápida modificación del programa.

Esto puede explicarse en base a consideraciones comerciales, puesio que SIEMENS, PHILIPS, GROUPE BULL y otras marcas amarran a la venta del equipo, la implementación, programación, y capacitación de operadores, situación que no prevalece con otros proveedores de equipo.

Existen en el mercado otras marcas tales como MODICON, GENERAL ELECTRIC-FANUC, TOSHIBA, FESTO ELECTRONIC, ALLEN BRADLEY, SIMATIC-TEXAS INSTRUMENTS; que cuentan con conjuntos de instruccipnes similares y rangos de funciones semejantes al PLC seleccionado. La selección de la marca MITSUBISHI respecto a las anteriores se debió a su amplia disponibilidad, servicio de refacciones y mantenimiento, a una relación precio/capacidad (referida a Entradas/Salidas y memoria) positiva, que hacen a la serie MELSEC muy atractiva; y al soporte técnico que dicha empresa tiene en México para apoyar a instaladores de su equipo en la capacitación de sus cuadros técnicos.

El PLC cuenta con una interfase MITSUBISHI X4AD la cual es un convertidor analógico-digital que utiliza conversión lineal de 12 bits, almacenada en forma de complemento de 2's, obteniendo un rango de valoración de -2048 a +2047.

Se alimenta con 24 VDC. Cuenta con 4 canales de entrada, dos de voltaje y dos de corriente. Utiliza un aislamiento por fotoacopladores entre las etapas analógica y digital

Opera con un rango de entrada de -10 a +10 VDC con una impedancia de entrada de 200 Kohms. Su resolución es de 5 mV correspondiente a 1/2000 del rango default de entrada. La velocidad de conversión es de 15 ms por canal

Se optó por este equipo por ser 100 % compatible con el PLC antes mencionado y porque las señales de entrada son del mismo rango que las proporcionadas por la etapa de acondicionamiento del transductor.

Para efectos de el presente trabajo, se pudo utilizar el modelo FX2AD, el cual solo maneja 2 canales de entrada, uno de voltaje y otro de corriente. El hecho de utilizar uno de cuatro canales, obedece a la idea de dejar un grado de libertad en el diseño para la implementación posterior de monitores de factores tales como temperatura, humedad, que pudieran afectar las condiciones de operación del sistema de control.

La señal de entrada se toma de la salida del transductor electrónico que maneja un rango de salida de 0 a 2 VDC y se conecta a una de las entradas de voltaje de la interface, generando un rango de salida digital de 0 a 400 unidades digitales. Cabe hacer notar que se le denominan "unidades digitales" a las lecturas de un contador interno que en una unidad de tiempo alcanza a registrar, siendo directamente proporcional al voltaje de entrada.

La salida de la interface se conecta directamente del bus de la unidad FX4AD al bus de entrada del PLC por medio de un cable (suministrado). La unidad FX4AD se alimenta con 24 VDC tomada de la fuente interna del PLC. La salida del transductor electrónico es conectada al canal 1 (entrada de voltaje).

La operación la realiza directamente el PLC en base a la programación elaborada. En el convertidor (DAC) se direccionó la lectura al registro promedio, es decir, que la lectura registrada por el PLC es el promedio de varias lecturas tomadas del transductor en una unidad de tiempo y almacenadas en una memoria interna propia, al realizar el promedio, los registros de memoria se borran y se reemplazan por lecturas nuevas.

Para tener un control del gasto a la salida del compresor, fué necesario variar la velocidad del motor impulsor, la cual es inversamente proporcional a la caída de presión, con esa finalidad se implementó un variador de frecuencia. Tal equipo se seleccionó de manera tal que fuera compatible con el PLC y de la capacidad y características necesarias al proyecto que nos ocupa.

Es sugerido en la partida de adquisición, como complemento del paquete del PLC y su interfase.

## 2.- DISEÑO

En el caso que nos ocupa, la implementación del lazo de control involucra compresores que son impulsados con motores inductivos trifásicos, por lo cual la idea de controlar su velocidad involucró necesariamente inversores, que brindaran modificación de la velocidad del motor y permitieran mantener un valor de par constante en la flecha.

Si bien los inversores (conocidos ampliamente en México como motovariadores) pueden contar entre sus funciones la posibilidad de ser programadas una serie de velocidades, tasas de aceleración y frenado, son pocos los que en su diseño incluyen funciones lógicas que le permitan operar de manera automática, aunque todos incluyen aditamentos tales como paneles de programación que permiten el ajuste y monitoreo de la operación del inversor.

El equipo seleccionado cuenta con dos modos de operación:

#### EL MODO INTERNO

Cuando se opera desde el teclado del programador de bolsillo.

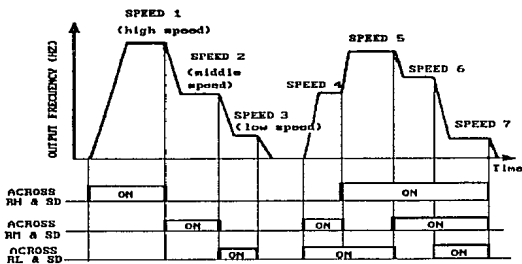
#### EL MODO EXTERNO

Cuenta con dos opciones; un control digital, cuando son cortocircuitadas las terminales RM, RH, y RL simultáneamente con las terminales SD y SF; y un control analógico, en el cual se maneja un voltaje de 10 VDC entre las terminales 5 y 10, conectadas paralelamente a los extremos de un potenciómetro, cuyo cursor se conecta a la terminal 2 para fijar un voltaje de referencia que provocará un cambio de frecuencia proporcional al voltaje en dicha terminal.

En ese orden de cosas, se eligió el modelo FR Z220-0 de la Marca MITSUBISHI con una capacidad de 1 Hp que permite prefiijar a partir de 3 entradas y sus combinaciones, 7 velocidades predeterminadas por las necesidades del usuario, para que operara conjuntamente al PLC y que fuera este último el que enviara las señales de control que permitiera al inversor reconocer la situación para operar el arranque, cambio de velocidad, o frenado de los motores impulsores del compresor.

De esta manera, el inversor opera como esclavo del PLC, y la relación entre la combinación de entradas y las velocidades, se aprecia en la gráfica de tiempos.

DIAGRAMA DE COMBINACION DE VELOCIDADES



F-4. 1.1

El motovariador opera a 220 volts AC en una fase o bifásico, y entrega un voltaje trifásico de 220 volts con frecuencia variable y amarre de fase, con una onda de corriente muy próxima a la senoidal y una débil tasa de armónicas, dando lugar a una rotación regular y sin tirones del motor que provocan un funcionamiento global muy silencioso; procura un gran sobrepasar en el arranque y en régimen transitorio, y reduce el calentamiento del motor en vacío y a baja velocidad, brinda protección contra sobretensiones y subtensiones de la red, y contra cortocircuitos entre fases.

Al PLC han de llegar señales del transductor de presión que fueron previamente acondicionadas mediante una etapa de amplificación y filtrado, para cumplir con los estándares de instrumentación tanto en voltaje como en corriente (0-10 volts DC, 4-20 mA). El transductor de esta manera tiene la capacidad de enviar señales que el PLC pueda interpretar como condiciones de operación de la presión de la línea de vapor-liquido y enviar al motovariador las señales para controlar la velocidad del compresor y a su vez controlar la presión en la línea dentro de rangos previamente programados.

### 3.- INSTALACION Y CABLEADO

El PLC fué instalado en un panel de operación que contiene además de el equipo del motovariador, a los circuitos de acondicionamiento de señales, los indicadores de operación y de emergencia, y las botoneras de arranque, paro, de operación manual y de paro de emergencia.

La instalación se realizó con brackets-comerciales sostenidos por tornillería pasada, y todo el alambrado de control se acomodó en condulets plásticos después de haberse etiquetado con identificadores a cada cable.

Todos los indicadores luminosos son de tipo comercial de 22 mm con lámparas de 24 VDC, siendo del mismo tamaño las botoneras (push buttons) de operación manual.

La instalación de las líneas energizadas a 220 VAC se hicieron a través de conduit flexible de aluminio de 5/8 plg. para prevenir un acceso peligroso o descuidado a las mismas, dado que el panel es de tipo abierto.

La alimentación para el caso de 220 VAC mono o bifásico, es conectando las terminales R y S. El inversor convierte internamente la señal alterna, en una señal de potencia de corriente directa la cual pasa a una etapa inversora, convirtiendola la señal de corriente directa única a una señal alterna trifásica de 220 VAC, la cual se toma en las terminales U, V, y W. El motor trifásico de 0.5 HP es conectado a estas terminales; quedando de esta manera instaladas las líneas de potencia.

En la parte de control, el inversor posee una salida (SD) de 5 VDC a la cual se cortocircuitan las terminales RL, RM, RH, y SF; con la combinación de estas es seleccionada alguna de las siete velocidades, y la acción mecánica del cierre del cortocircuito se realiza a través de los relevadores del PLC.

### 4.- OPERACION



La secuencia de instrucciones fué cargada en la memoria del controlador (vease anexo) y se realizaron pruebas de funcionamiento habilitando las señales de salida mediante la simulación de las entradas, utilizando un puente de Weatstone resistivo que permitía simular las señales del transductor en su rango de operación.

Mediante un panel de LED's que están montados en el cuerpo del PLC pudieron monitorearse tanto las entradas como las salidas habilitadas mediante el proceso ya descrito. De esa manera se verificó que la lógica de la secuencia de intrucciones fuera la correcta.

Realizado lo anterior se cablearon las salidas del PLC al inversor al que previamente se le habian programado los parámetros de velocidad del motor, así como otras variables como son los tiempos de aceleración y frenado.

Apyados en el panel de programación del inversor se verificó que las señales enviadas por el PLC correspondieran a las velocidades de salida del inversor, y fué hasta que se habian corregido todos los detalles de programación de ambos equipos (PLC e inversor) que se procedió a cablear la salida trifásica del inversor al motor del compresor.

Al equipo compresor para efectos de prueba, se le desacopló el motor de la etapa de compresión de manera que permitiera hacer pruebas con el sistema libre de carga.

Se repitieron las etapas de simulación de las señales de entrada del PLC y se verificó que el equipo funcionara ya con el motor conectado a entera satisfacción.

Se procedió subsecuentemente a realizar el acoplamiento entre el motor y el compresor, con el fin de dejar el equipo en condiciones de operar bajo carga y se verificó positivamente el funcionamiento correcto del sistema completo PLC-INVERSOR-COMPRESOR.

## **5.- MANTENIMIENTO**

En esta etapa se realizó la documentación que describe la secuencia de operaciones del PLC como son su diagrama de escalera, el listado de instrucciones (programa de operación), los diagramas de flujo y diagramas de conexión física.

Se apoyó la información anterior con el diagrama de conexión del inversor así como con el listado de los parámetros de operación del mismo.

## LISTADO DE INSTRUCCIONES DEL PLC

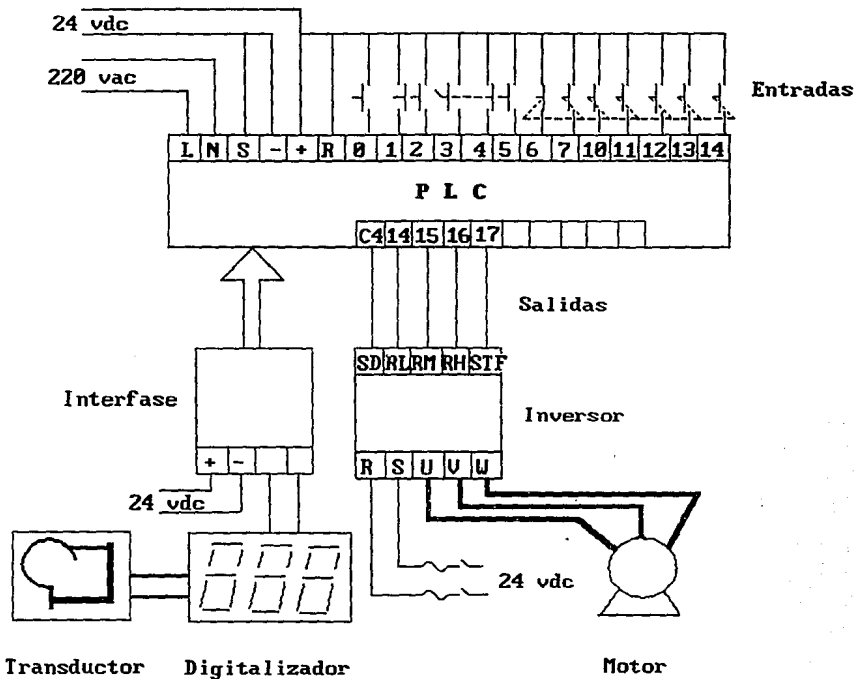
0	LD	X000
1	OR	Y000
2	AND	X001
3	OUT	Y000
4	MC	N 0
		M 0
7	LD	X002
8	OR	Y17
9	ANI	M600
10	OUT	Y017
11	OUT	Y001
12	LD	X003
13	ANI	X004
14	OUT	M 2
15	OUT	Y002
16	LD	X004
17	ANI	X003
18	OUT	M 3
19	LD	M 2
20	FROM	
	1	K 0
	2	K 5
	3	D 0
	4	K 1
29	LD	M 2
30	CMP	
	1	D 0
	2	K1465
	3	M100
37	CMP	
	1	D 0
	2	K1420
	3	M110
44	CMP	
	1	D 0
	2	K1375
	3	M120
51	CMP	
	1	D 0
	2	K1330
	3	M130
58	CMP	
	1	D 0
	2	K1285
	3	M140
65	CMP	
	1	D 0

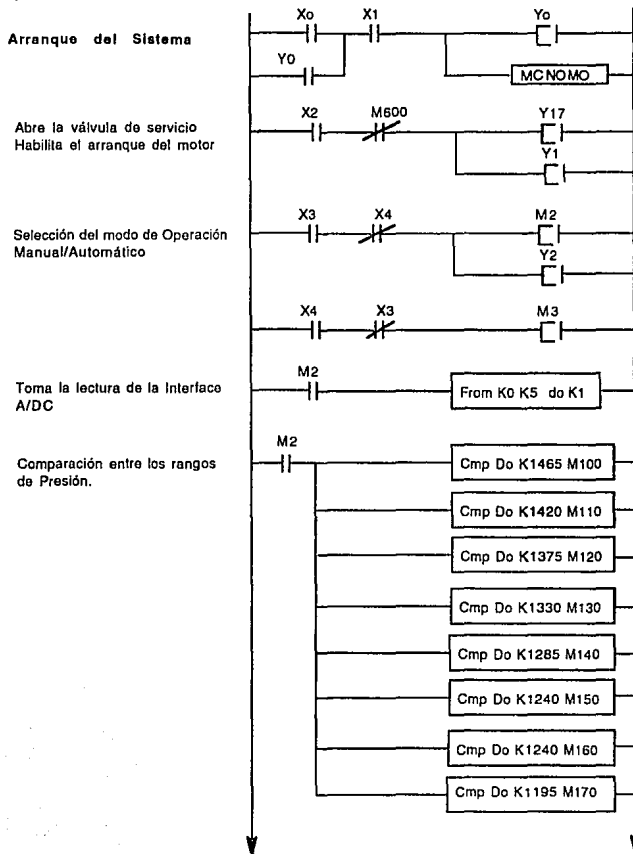
	2	K1240
	3	M150
72	CMP	
	1	D 0
	2	K1240
	3	M160
79	CMP	
	1	D 0
	2	K1195
	3	M170
86	LD	M102
87	OR	T 1
88	OR	M600
89	ANI	X005
90	AND	M 2
91	OUT	M600
92	OUT	Y003
93	LD	M100
94	AND	M112
95	LD	M140
96	AND	M152
97	ORB	
98	LD	M160
99	AND	M162
100	ORB	
101	LD	M160
102	AND	M172
103	ORB	
104	AND	M 2
105	OUT	M 5
106	LD	M110
107	AND	M122
108	LD	M130
109	AND	M142
110	ORB	
111	LD	M150
112	AND	M162
113	ORB	
114	LD	M160
115	AND	M172
116	ORB	
117	AND	M 2
118	OUT	M 6
119	LD	M120
120	AND	M132
121	LD	M130
122	AND	M142
123	ORB	
124	LD	M140
125	AND	M152

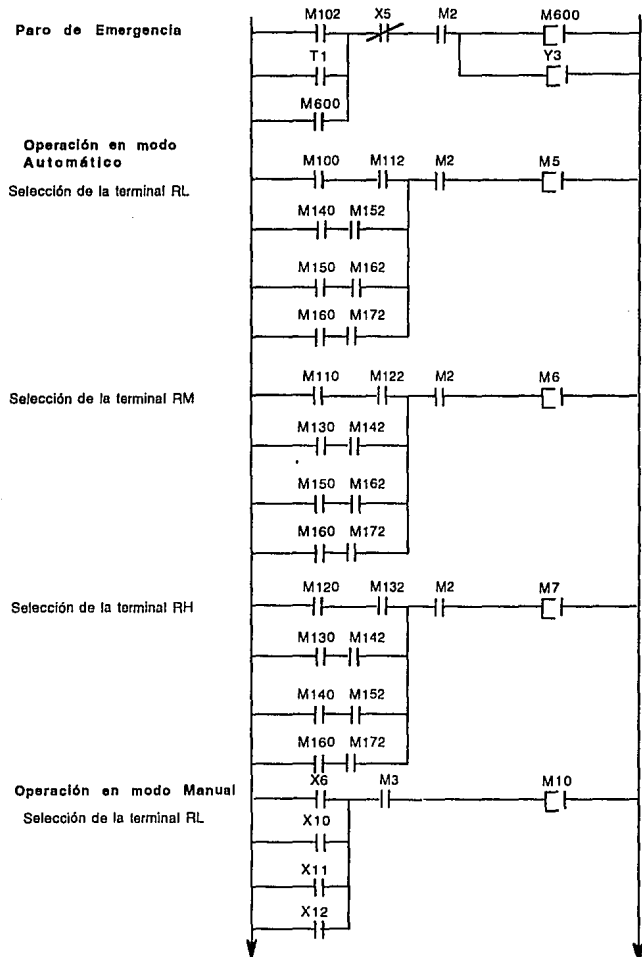
126	ORB	
127	LD	M160
128	AND	M172
129	ORB	
130	AND	M 2
131	OUT	M 7
132	LD	X006
133	OR	X010
134	OR	X011
135	OR	X012
136	AND	M 3
137	OUT	M 10
138	LD	X006
139	OR	X007
140	OR	X011
141	OR	X013
142	AND	M 3
143	OUT	M 11
145	OR	X007
146	OR	X010
147	OR	X014
148	AND	M 3
149	OUT	M 12
150	LD	M 5
151	OR	M 10
152	OUT	T 2
		K 20
155	LD	M 6
156	OR	M 11
157	OUT	T3
		K 20
160	LD	M 7
161	OR	M 12
162	OUT	T 4
		K 20
165	LD	M 5
166	OUT	Y014
167	LD	M 6
168	OUT	Y015
169	LD	M 7
170	OUT	Y016
171	MCR	N 0
173	END	

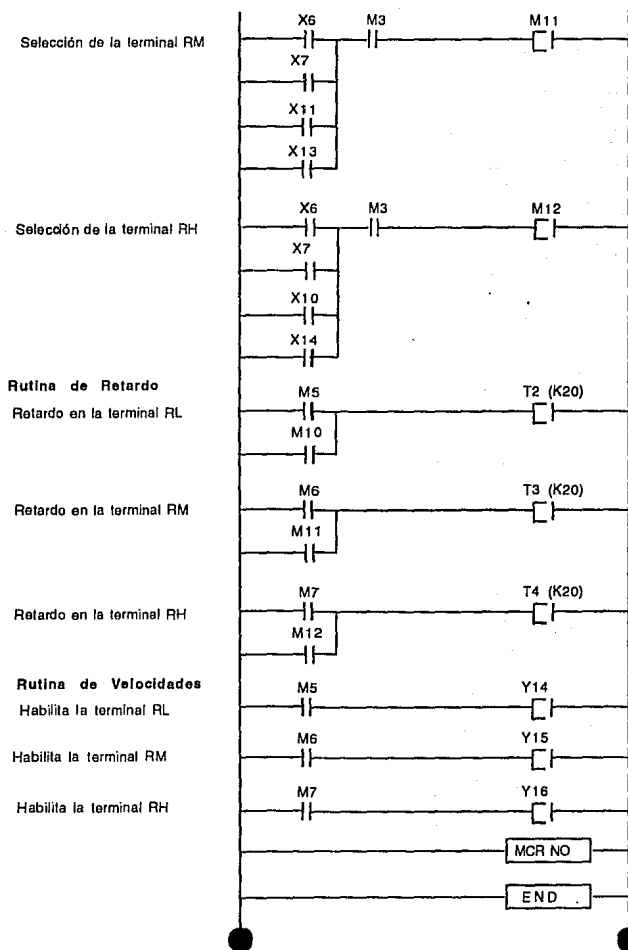
ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

# DIAGRAMA DE INTERCONEXION DE MODULOS











## CONCLUSIONES

## CONCLUSIONES

- El transductor aquí implementado, manipula el voltaje obtenido en los strain gages en forma proporcional a la elongación del tubo de Bourdon tipo "c" falcado; de una manera eficiente y veraz y ofrece una lectura de presión confiable y económica mediante el uso de componentes comerciales de bajo costo, tales como los que fueron utilizados en la parte de electrónica.
- Se construyó un manómetro digital de características superiores a lo que se puede encontrar en el mercado nacional, y fué el resultado de nuestro prototipo, contando la ventaja de poder realizar miniaturización adicional a fin de minimizar costos, en el caso de que se tratase de implementar una producción comercial en serie.
- La implementación del sistema total en sí, es una demostración de la versatilidad del prototipo, pues ningún producto comercial, lo puede sustituir.
- La idea básica del funcionamiento del trasductor se puede aplicar a cualquier rango de presión, como manómetros con tubo de Bourdon existan. En otras palabras, resulta satisfactorio el haber logrado un prototipo que se encuentra por encima de los productos comerciales.
- Sobre el PLC se concluye, que es un medio de procesamiento versátil, confiable y seguro, sobrado de nuestro objetivo, pero de ninguna manera es un equipo excesivo en recursos, pues se pueden implementar mas variables de control según se quiera en un futuro, ampliando y modificando el programa interno, lo cual es una operación simple.
- La capacidad del inversor tiene una potencia límite, se puede sustituir por algún sistema de gobierno sobre el control de gasto del fluido.
- En una implementación real, con rangos mayores de variables de operación, se adapta el sistema cambiando las partes del equipo necesarias, a potencias adecuadas.

## PERSPECTIVAS

- ☞ Como producto del desarrollo contenido en el cuerpo del presente trabajo, tenemos como consideraciones para desarrollos futuros, el miniaturizar la etapa de acondicionamiento de señal, el convertidor A/D, y el display de tres y 1/2 dígitos de manera tal que puedan conformarse en una sola unidad que vaya integrada al cuerpo del manómetro, y de esa forma se cuente con un producto que sea de fácil montaje y que compita con ventaja a los disponibles en el mercado nacional y en el mercado norteamericano.
- ☞ Resulta simple el adecuar este lazo de control a sistemas de compresión impulsados por motores de corriente directa pues tan solo implicaría usar un inversor distinto de acuerdo a las capacidades que sean necesarias, lo cual daría a este proyecto una versatilidad aún mayor.

## BIBLIOGRAFIA

## **BIBLIOGRAFIA**

AVNER, Sidney H. ; Introducción a la metalurgia física. Ed. Mc Graw Hill, 2ª Edición , 1981

BERNSTEIN, Leonard; Measurement of Unsteady pressures, forces and accelerations, Ed. Prentice Hall, 1983

BOYLESTAD, Robert & NASHELSKY, Louis; Electronic Devices and circuit theory, Ed. Prentice Hall, 3ª Edición , 1982

CARR, Joseph J.; Elements of electronic Instrumentation & Measurement, Ed. Reston Publishing Co., A Prentice Hall Co., 1979

COUGHLIN, Robert F. & DRISCOLL, Frederick F.; Ampificadores Operacionales y circuitos integrados lineales, Ed. Prentice Hall, 2ª Edición española, 1993.

CONSIDINE, Douglas M. & ROSS, S.D.; Manual de Instrumentación Aplicada. Ed. CECSA, 1964

COOPER, William David; Electronic instrumentation & Measurement techniques. Ed. Prentice Hall 2ª Edición, 1978, Englewood Cliffs, N.J.

FLINN, Richard A. & TROJAN, Paul K.; Materiales de ingeniería y sus aplicaciones. Ed. Mc Graw Hill, 1985

KALLEN, Howard P. (Editor); Handbook of Intrumentation & Control. Ed. Mc Graw Hill, 1961, USA

MALVINO, Albert Paul; Principios de Electrónica. Ed. Mc Graw Hill, 2ª Edición, 1983.

NORTON, Henry N.; Handbook of transducer for electrónic measuring systems.1985

POPOV, Egor P.; Introducción a la Mecánica de Sólidos. Ed. LIMUSA, 4ª Reimpresión, 1982.

## MANUALES.

VVF Transistor Inverter FREQOL Z024 UL  
MITSUBISHI ELECTRIC  
Instruction Manual

FX 10 PE  
PROGRAMMABLE CONTROLLERS  
OPERATION MANUAL  
MITSUBISHI ELECTRIC

FX 4AD  
INTERFACE USERS MANUAL  
MITSUBISHI ELECTRIC

FX SERIES PROGRAMMABLE CONTROLLERS  
HANDY MANUAL  
MITSUBISHI ELECTRIC

FX SERIES PROGRAMMABLE CONTROLLERS  
USERS MANUAL  
MITSUBISHI ELECTRIC

MELSEC FX SERIES PROGRAMMABLE CONTROLLERS  
PROGRAMMING MANUAL  
HIGH FUCTION VERSION  
MITSUBISHI ELECTRIC