

**FACULTAD DE INGENIERIA**

---

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

**MANUAL DE PRACTICAS**  
**DE**  
**TRANSDUCTORES Y CONVERTIDORES**  
**ELECTRICOS**

GLORIA MATA HERNANDEZ  
JUAN MANUEL GOMEZ GONZALEZ  
RICARDO GARIBAY JIMENEZ

---

DIVISION DE INGENIERIA ELECTRICA, ELECTRONICA Y EN COMPUTACION  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE CONTROL  
1993

---

## PRESENTACION

Este manual viene a ser la segunda parte del manual de prácticas de Laboratorio de Medición e Instrumentación, la primera es el actual manual en uso. Las Prácticas de Transductores Eléctricos cubren los temas IV y V de la correspondiente asignatura, por lo que se le sugiere al profesor de laboratorio sea utilizado cuando haya transcurrido aproximadamente el 60% del semestre.

El manual se compone de una introducción, 12 prácticas y 3 Apéndices; se incluyen 9 prácticas prácticas correspondientes a transductores y 3 a convertidores eléctricos.

En la Introducción se describen los transductores eléctricos, sus características eléctricas, mecánicas, ambientales y de funcionamiento tanto en condiciones estáticas como dinámicas. Se presenta además una tabla de los diversos tipos de sensores indicando su principio de operación, la variable de detección y su salida.

Los tipos de transductores que cubre el manual son, potenciométrico, de posición lineal, transductor diferencial variable, de velocidad y aceleración, codificador incremental, caudal y nivel, fuerza, presión y luminosidad.

En relación a éstas prácticas de transductores, el enfoque principal que se les da, es el de proporcionar un conocimiento básico de cada uno de los dispositivos, así como la obtención de sus características y parámetros principales en condiciones estáticas, excepto en la prácticas de Transductores de Luminosidad en la que además se presenta someramente un sistema de control de luminosidad (los sistemas de control quedan fuera del alcance de la asignatura y del laboratorio).

Cada una de estas prácticas incluye en forma modular el transductor, el acondicionador de señal y la visualización de la información. Con esto, el alumno no solo adquiere el conocimiento del principio de funcionamiento del elemento sino conoce técnicas de acondicionamiento de señales tales como amplificación, filtrado, transmisión en línea, división de frecuencias, etc. y su presentación en despliegues digitales.

El manual junto con el equipo ayudan a obtener las bases teóricas para la implementación de otros circuitos que el alumno puede desarrollar como proyectos. Algunos de ellos son, frecuencímetro, tacómetro digital, posicionador angular, contadores digitales, etc.

Como se mencionó anteriormente, se incluyen también 3 prácticas correspondientes a convertidores eléctricos, estos son, Analógico/Digital (CAD) y Digital/analógico (CDA); Voltaje/Frecuencia (CVF) y Frecuencia/Voltaje (CFV); y Voltaje/Corriente (CVI) y Corriente/Voltaje (CIV).

En el CAD y CDA se estudian dos tipos de ellos y se dispone de un programa de computadora, con varias opciones para interactuar a través de la computadora con el convertidor. En los otros dos tipos de convertidores, CVF-CFV y CVI-CIV, se analizan sus respuestas y se simula su utilización en líneas de transmisión.

Los 3 Apéndices incluyen información a la que se hace referencia en el desarrollo de las Prácticas.

Aparte de los autores, el personal prestador de servicio social fue de gran ayuda para la culminación de éste manual, como se menciona más adelante.

## Presentación

La Ing. Gloria Mata Hernández fue la responsable de la elaboración y culminación del trabajo, participó en el desarrollo directo de la introducción, en 8 prácticas y en la supervisión, revisión y operación de todas las demás, tanto en su funcionalidad como en la redacción y edición de las mismas.

El Ing. Juan Manuel Gómez González, participó en el desarrollo, pruebas y funcionamiento de 3 prácticas y colaboró ampliamente en la edición del trabajo.

El Ing. Ricardo Garibay Jiménez, jefe del Departamento de Ingeniería de Control, participó como asesor general del trabajo.

El C. Cesar Carbajal Peña participó elaborando una de las prácticas y apoyando entusiastamente en la elaboración de dibujos y la edición del formato que llevan todas las prácticas.

Los alumnos de servicio social, Teresita Chavez Aguirre, Mauricio Ayala Hernández, Antonio Silva Paniagua, León Flores González, Adrian Resendiz Maguey y Alejandro Rodriguez Aguayo, participaron activamente y con gran ahínco, en prueba de experimentos, búsqueda de información, formación y realización de dibujos.

El orden en el cual están las prácticas es el recomendado, ya que algunas dependen del conocimiento previo de otras. Sin embargo el profesor puede variarlo según sus necesidades y recursos disponibles.

Finalmente agradeceríamos ampliamente a todos los usuarios del manual que nos dieran su opinión y sugerencias para el mejoramiento de éste material en futuras ediciones.



FACULTAD DE INGENIERIA

APUNTE 220

FACULTAD DE INGENIERIA UNAM.



600836

G.- 600836

# INDICE

G-611897  
600836

PRESENTACION	
INTRODUCCION A LOS TRANSDUCTORES ELECTRICOS	1
<b>PRACTICA 1: TRANSDUCTOR DE DESPLAZAMIENTO</b>	11
<b>PRACTICA 2: TRANSDUCTORES DE PROXIMIDAD</b>	23
<b>PRACTICA 3: TRANSFORMADOR DIFERENCIAL DE VARIACION LINEAL</b>	35
<b>PRACTICA 4: TRANSDUCTOR DE ACCELERACION Y VELOCIDAD</b>	47
<b>PRACTICA 5: CODIFICADOR INCREMENTAL</b>	63
<b>PRACTICA 6: TRANSDUCTORES DE CAUDAL Y NIVEL</b>	77
<b>PRACTICA 7: TRANSDUCTOR DE FUERZA</b>	97
<b>PRACTICA 8: TRANSDUCTORES DE PRESION</b>	113
<b>PRACTICA 9: TRANSDUCTORES DE LUMINOSIDAD</b>	129
<b>PRACTICA 10: CONVERTIDOR ANALOGICO/DIGITAL Y DIGITAL/ANALOGICO</b>	143
<b>PRACTICA 11: CONVERSION DE VOLTAJE A FRECUENCIA Y FRECUENCIA A VOLTAJE</b>	163
<b>PRACTICA 12: CONVERTIDORES DE VOLTAJE A CORRIENTE Y CORRIENTE A VOLTAJE</b>	179
APENDICE A	A1
APENDICE B	B1
APENDICE C	C1

## INTRODUCCION A LOS TRANSDUCTORES ELECTRICOS

Los sistemas de instrumentación se clasifican, en términos generales, en sistemas de medición y sistemas de control. En el primer caso, la magnitud de la variable se mide y el valor se registra o se visualiza en el medio adecuado. Dentro de esta clasificación se encuentran los sistemas analizadores cuya función es visualizar la naturaleza y proporción de una variable. En los sistemas de control, la magnitud medida se utiliza para controlar la variable de manera que el valor medido se iguale con el valor deseado.

Tanto los sistemas de medida como los analizadores pueden estar incluidos en sistemas de control.

En la Figura 1 se muestra un sistema electrónico básico de medida, el cual está formado por los siguientes bloques:

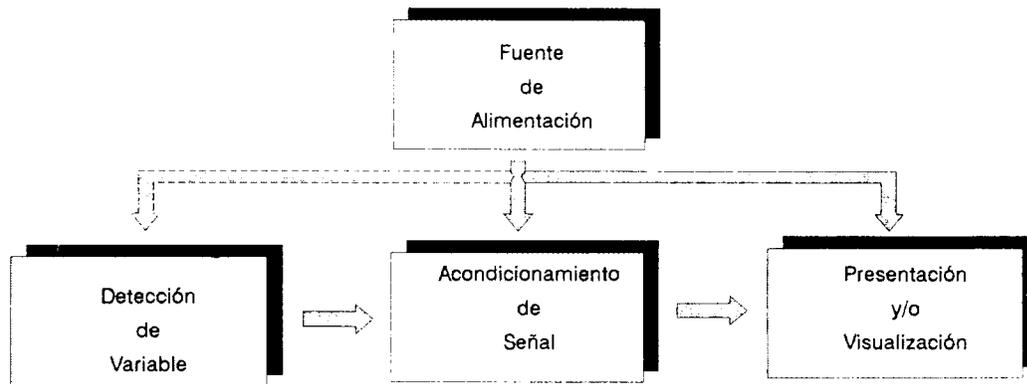


Figura 1

- Detección de variable
- Acondicionamiento de señal
- Presentación y/o visualización
- Fuente de alimentación

En el bloque de detección se sensa la variable a medir. El medio físico para llevarla a cabo es el llamado transductor, el cual es un dispositivo que al ser afectado por la energía de un sistema de transmisión proporciona energía del mismo o de otro tipo a un segundo sistema de transmisión. Esta transmisión de energía puede ser eléctrica, mecánica, química, óptica (radiante), térmica, etc.

El bloque de acondicionamiento tiene la función de adecuar la señal del transductor mediante un circuito el cual, dependiendo de la aplicación específica, puede amplificar, acoplar las impedancias, aislar, filtrar, etc. dicha señal, con el fin de obtenerla adecuadamente para el medio de presentación.

Una vez que se logra una señal con el nivel y las características adecuadas, puede ser enviada a diversos dispositivos de presentación que pueden ser desde un voltmetro, graficador, osciloscopio para su observación y registro de datos hasta una computadora digital para el registro, procesamiento y análisis de la información, o bien a un sistema de control si forma parte de algún sistema de control de variable.

La fuente de alimentación proporciona la energía eléctrica adecuada a todos los componentes del sistema que así lo requieran.

La variable a medir generalmente es física tal como temperatura, presión, fuerza, intensidad luminosa, desplazamiento, etc. El medio de detección, como se mencionó, es un transductor que convierte dicha variable física en una variable generalmente eléctrica que puede ser más fácilmente manipulada.

Existe una inmensa variedad de transductores y con diversas características para poder seleccionarlos y aplicarlos en el área de instrumentación industrial. Los transductores se pueden clasificar de acuerdo a su principio de operación, aplicación, método de conversión de energía, tipo de señal de entrada o de salida, etc. Aquí, la clasificación se hace de acuerdo al principio de operación eléctrica, presentando una gran variedad de los más comunes y las aplicaciones típicas a que están destinados.

Por otro lado, si el transductor produce una señal eléctrica (voltaje o corriente) sin necesidad de excitación eléctrica, se les llaman transductores activos o de autogeneración; y si únicamente generan una señal de salida sólo cuando se utilizan con una fuente de excitación se les llama transductores pasivos.

<b>PARAMETRO ELECTRICO Y CLASE DE TRANSDUCTOR</b>	<b>PRINCIPIO DE OPERACION Y NATURALEZA DEL DISPOSITIVO</b>	<b>APLICACION TIPICA</b>
<b>Resistencia</b>	<b>Transductores pasivos (con potencia externa)</b>	
Dispositivo potenciométrico	El posicionamiento de un cursor por medio de una fuerza externa varia la resistencia de un potenciómetro o un circuito puente.	Presión, desplazamiento
Galga extensométrica resistiva	La resistencia de un alambre o semiconductor cambia según la elongación o compresión debida a los esfuerzos aplicados externamente.	Fuerza, Par, Desplazamiento.
Medidor de alambre caliente o medidor Pirani	La resistencia de un elemento caliente varía enfriándolo con flujo de gas.	Flujo de gas, presión de gas
Termómetro de resistencia	La resistencia de un alambre de metal puro con un coeficiente de temperatura de resistencia positivo grande varía con la temperatura.	Temperatura, calor radiante

Termistor	La resistencia de ciertos óxidos de metal con coeficiente de temperatura de resistencia negativo cambia con la temperatura.	Temperatura
Higrómetro de resistencia	La resistencia de una cinta conductiva se altera con el contenido de humedad.	Humedad relativa
Celda fotoconductiva	La resistencia de una celda como elemento de circuito se modifica con la luz incidente.	Relevador fotosensible, luz
<b>Capacitancia,</b>		
Medidor de presión de capacitancia variable	Una fuerza aplicada externamente varía la distancia entre dos placas paralelas	Desplazamiento, presión
Micrófono de capacitor	La presión del sonido altera la capacitancia entre una placa fija y un diafragma móvil.	Voz, música y ruido
Medidor dieléctrico	La capacitancia varía por cambios en el dieléctrico.	Nivel de líquidos, espesor
<b>Inductancia</b>		
De circuito magnético	Los cambios del circuito magnético modifican la autoinductancia o inductancia mutua de una bobina excitada por ca.	Presión, desplazamiento
Detector de reluctancia	La reluctancia de un circuito magnético varía al cambiar la posición del núcleo de hierro de una bobina.	Presión, desplazamiento, vibración, posición
Transformador Diferencial Lineal Variable (LVTD)	El voltaje diferencial de dos devanados secundarios de un transformador varía al mover el núcleo magnético por medio de una fuerza aplicada desde el exterior.	Presión, fuerza, desplazamiento, posición
Medidor de corriente parásita	La inductancia de una bobina se altera por la proximidad de una placa con corrientes parásitas inducidas.	Desplazamiento, espesor.
Medidor de magnetrostricción	Las propiedades magnéticas cambian por presión y esfuerzos.	Fuerza, presión, sonido

**Voltaje y corriente**

Detector por efecto Hall	Se genera una diferencia de potencial a través de una placa semiconductor (de germanio) cuando un flujo magnético interactúa con una corriente aplicada.	Flujo magnético, corriente
Cámara de ionización	Se induce un flujo de electrones mediante la ionización de un gas debido a radiación radiactiva.	Conteo de partículas, radiación
Celda fotoemisiva	Hay una emisión de electrones debida a la radiación incidente en una superficie fotoemisiva.	Luz y radiación
Tubo fotomultiplicador	La emisión de electrones secundarios es debida a la radiación incidente sobre un cátodo fotosensible.	Luz y radiación, relevadores fotosensibles
Termopar y termopila	Se genera una fem por la unión de dos metales disímiles o semiconductores cuando la unión se calienta.	Temperatura, flujo de calor, radiación
Generador de bobina móvil	El movimiento de una bobina en un campo magnético genera un voltaje.	Velocidad, vibración
Detector piezoeléctrico	Se genera una fem cuando una fuerza externa se aplica a ciertos materiales cristalinos como el cuarzo.	Sonido, vibración, aceleración, cambios de presión.
Celda fotovoltaica	Se genera voltaje en un dispositivo de unión semiconductor cuando la energía radiante estimula la celda.	Medidor de luz de luz, celda solar

**CARACTERISTICAS DE LOS TRANSDUCTORES**

Tanto en el diseño y fabricación de un transductor como en los ya comercializados, debe tomarse en cuenta las especificaciones para obtener la mejor capacidad de medición. Dichas especificaciones son las que caracterizan al transductor y permiten definir el tipo y rango de la medición, exactitud, precisión, condiciones ambientales, montaje etc., para la aplicación específica.

**Características de la magnitud a medir**

Corresponden básicamente a los parámetros relacionados con la magnitud práctica a medir sin que se afecte la operación del transductor.

---

**Amplitud de medición** - En la diferencia algebraica entre los dos límites del rango.

**Rango** - Son los límites superior e inferior de los valores de la magnitud a medir. El rango puede ser unidireccional (0 a 2.5 cm), bidireccional: simétrico ( $\pm 45^\circ$ ), asimétrico (-2 a 10 gr) o desplazado con cero suprimido (70 a 120 psig).

**Sobrerango** - Es la magnitud máxima de la medida con que se puede aplicar el transductor sin que sobrepase la tolerancia especificada.

**Tiempo de recuperación** - Después de operar en sobrerango, es el tiempo que transcurre para que el transductor recupere su operación normal dentro de las tolerancias especificadas.

### **Características eléctricas de diseño**

Corresponden a parámetros externos al transductores, considerándolo como una caja negra sin analizar su operación interna y utilizándolo únicamente como un dispositivo que realiza una interfase eléctrica con otros equipos.

**Excitación de entrada** - Es un voltaje o corriente externos que requiere el transductor para su correcto funcionamiento. Excepto para los transductores activos.

**Impedancia de salida** - Corresponde a la impedancia presentada en las terminales de salida del transductor.

**Impedancia de entrada** - Es la impedancia del transductor presentada a la fuente de excitación.

**Impedancia de carga** - Es la impedancia que ve la salida del transductor debida al acondicionador y cables de conexión conectados a él.

**Salida** - Es la magnitud eléctrica producida por el transductor y es función de la magnitud aplicada de entrada. La salida puede manifestarse como una variación de resistencia, inductancia o capacitancia, para el caso de transductores pasivos; o bien, un voltaje o corriente continuo (salida analógica), o bien digital en donde las magnitudes se representan en forma discreta, para el caso de los transductores activos.

**Tierras** - Las línea de retorno de la excitación y de salida pueden estar con tierras independientes, como en el caso de un puente de galgas extensométricas; o pueden ser comunes, como cuando se utiliza un transductor potenciométrico

### **Características Mecánicas**

Corresponden a las especificaciones del fabricante en relación a las dimensiones, montaje, tamaño, localización de conexiones eléctricas e información pertinente que comúnmente viene en los datos de placa tal como rango, excitación, salida número de serie, número de componentes, fabricante.

### **Características de actuación**

Básicamente se refieren a las características operativas del transductor. Estas se pueden clasificar en cuatro categorías:

— Características estáticas

---

- Características dinámicas
- Características del medio ambiente
- Características de confiabilidad

### **Características estáticas**

Estas características describen la operación del transductor en condiciones ambientales óptimas (por ejemplo a una temperatura de  $25 \pm 10$  C, una humedad relativa del 90 % o menor y una presión barométrica entre 880 y 1080 mbar) con cambios muy lentos de la magnitud a medir y en ausencia de golpes, vibraciones o aceleraciones (a menos que ésta sea la variable a medir). Se establecen a partir de una relación ideal o teórica entre la salida y la magnitud a medir.

**Banda de error** - Son los límites dentro de los cuales se encuentran las desviaciones máximas de salida respecto a la curva de referencia del transductor, debidas a causas atribuibles al transductor, en el rango de operación pero bajo alguna condición específica de operación.

**Banda de error estático** - Es la banda de error aplicable en condiciones ambientales y en ausencia de golpes, vibraciones o aceleraciones (a menos que sea la magnitud a medir).

**Calibración estática** - Es un análisis de las características determinadas estáticamente . Esta calibración es una prueba durante la cual se aplica una magnitud de valor conocido al transductor y se registra la lectura de la salida correspondiente.

**Características de Confiabilidad** - Son características que dependen del tiempo y pueden determinarse mediante una serie de calibraciones estáticas repetidas.

**Ciclo de calibración** - Es cuando se realiza la prueba sobre el rango completo del transductor , una vez con magnitudes crecientes y una con magnitudes decrecientes. Una calibración completa comprende usualmente dos o más ciclos de calibración.

**Conformancia o conformidad** - Es un término que se utiliza en determinadas ocasiones, aplicado en la comparación de una curva de calibración con una curva especificada para un transductor inherentemente no lineal.

**Curva de calibración** - En este caso el registro resultante se realiza en forma de gráfica a partir de la calibración estática ya sea manualmente o mediante una computadora.

**Curva del transductor** - Es la relación ideal o teórica entre la salida y la magnitud de entrada aplicada sobre el rango del transductor, la cual puede establecerse mediante una curva a partir de una tabla de valores, una gráfica, una ecuación o modelo matemático. Para el caso de una relación lineal, la curva es una línea recta.

**Desplazamiento de cero** - Es un cambio en la salida correspondiente a la magnitud de entrada cero dentro de un periodo de tiempo especificado a temperaturas ambientales. La salida para magnitud cero se caracteriza por ser un desplazamiento paralelo a la curva de calibración.

**Desplazamiento de sensibilidad** - Es un cambio en la pendiente de calibración debido a un cambio en la sensibilidad y se especifica con el valor máximo observado en un periodo de tiempo.

**Error de fricción** - Sin confundirlo con la histéresis, ya que se asemeja mucho, es el máximo cambio a la salida para un determinado valor de la magnitud a medir dentro del rango. Si embargo este es debido a la fricción entre los elementos del transductor como por ejemplo en los transductores potenciométricos debido a la fricción entre el brazo de la escobilla y el elemento potenciométrico.

Este efecto puede ser minimizado mediante la relajación del transductor aplicando fuerzas de aceleración oscilatoria o intermitente al mismo. Cuando un transductor se calibra con una técnica de relajación se permite establecer la histéresis real, si no se especifica la relajación, el error de fricción se incluye dentro de la histéresis.

**Error del transductor** - Es la diferencia algebraica entre el valor indicado o medido y el ideal o teórico.

**Estabilidad temporal de la salida** - Es el cambio ocurrido en la salida en un período de tiempo especificado cuando la magnitud que se mide se mantiene constante (y a un valor distinto de cero) y todas las condiciones ambientales son constantes.

**Exactitud** - Es la relación entre el error del transductor y el valor verdadero de la variable medida, expresándose generalmente en  $\pm\%$ .

**Histéresis** - Es la máxima diferencia en la salida que se presenta cuando el valor de la magnitud a medir pasa por cero; ya sea que este valor es alcanzado mediante el aumento y disminución de la magnitud. La histéresis está ocasionada normalmente por una retención magnética en la acción del elemento sensor. Se expresa en  $\%$  del valor a plena escala.

**Linealidad** - Expresa el comportamiento diferencial de la curva de calibración respecto a una línea recta especificada. Se expresa como  $\pm\%$  del valor a plena escala, determinando la máxima desviación de la variable medida desde cualquier punto de la curva de calibración. Cuando se realiza más de un ciclo de calibración se especifica la peor linealidad observada. Los diferentes tipos de linealidad son los siguientes:

**Linealidad con pendiente teórica** - Está relacionada con la pendiente teórica que es la línea recta entre los puntos terminales teóricos. Normalmente está referida del 0 al 100  $\%$  del rango de operación.

**Linealidad de puntos extremos** - Está referenciada a la línea recta de puntos extremos, que son las salidas de los límites superior e inferior del rango obtenidos durante una calibración.

**Linealidad independiente** - Está referenciada con la mejor línea recta que es la línea inmediata entre las dos líneas paralelas en cuyo interior se mantienen todos los valores de salida de una curva de calibración.

**Linealidad de mínimos cuadráticos** - Está referenciada a la línea de mínimos cuadrados que es la línea recta para la cual la suma de los cuadrados de las desviaciones de las lecturas de la salida respecto a los valores correspondientes a la línea recta calculada es mínima.

**Precisión o Repetibilidad** - Es la habilidad de un transductor en reproducir lecturas de salida cuando se aplica el mismo valor de la magnitud de manera consecutiva, bajo las mismas condiciones y en la misma dirección. Se expresa como la máxima diferencia entre las lecturas de salida, determinadas mediante dos ciclos de calibración. Si el muestreo se realiza aumentando el número de ciclos de calibración se obtiene una mejor medida estadística de la precisión.

**Registro de calibración** - Es el registro resultante cuando se realiza en forma de tabla a partir de la calibración estática.

**Resolución** - Es una característica del comportamiento del transductor con respuesta en incrementos pequeños. Es la magnitud de los cambios en escalón de la salida cuando la magnitud a medir varía continuamente dentro del rango. Esto se presenta por ejemplo en los transductores potenciométricos con elementos embobinados, como resultado del deslizamiento del contacto de una espira a otra provocando escalones en la magnitud de salida.

**Resolución media** - Se define como el recíproco del número total de escalones en la salida a lo largo del rango y expresado en % de plena escala.

**Resolución máxima** - Es la magnitud o el mayor de todos los escalones observados en la salida.

**Resolución continua** - Corresponde al caso cuando los escalones no son medibles en la salida de un transductor.

**Sensibilidad** - Es la relación en el cambio a la salida con el cambio en el valor de la magnitud a medir. Establece la pendiente de la curva de calibración.

**Umbral** - Es el cambio más pequeño en la magnitud a medir para conseguir un cambio medible en la salida. Normalmente se define en términos de la magnitud a medir y puede tener valores diferentes en porciones diferentes del rango.

### **Características Dinámicas**

Se deben establecer estas características cuando se utiliza un transductor en medidas donde la magnitud varía de manera rápida o en donde pueden existir cambios de la misma con entrada escalón. Estas pueden estar definidas y determinadas en términos de la respuesta en frecuencia o tiempos de respuesta o amortiguamiento a la frecuencia natural, dependiendo del tipo de transductor y de la aplicación.

**Amortiguamiento** - Es la disipación de potencia que junto con la frecuencia natural, determina el límite superior de la respuesta frecuencial, así como la respuesta transitoria de un transductor.

En respuesta a un escalón de la magnitud a medir, un sistema subamortiguado oscila alrededor del valor permanente final antes de permanecer en este valor.

El sistema sobreamortiguado alcanza el valor permanente final sin superarlo.

Un sistema críticamente amortiguado se encuentra en el punto de cambio entre las condiciones de sub y sobre amortiguamiento.

**Frecuencia natural** - Se obtiene cuando un elemento sensor de un transductor se coloca en oscilación libre. La frecuencia de esta oscilación es la frecuencia natural. Se define también como la frecuencia de una magnitud aplicada senoidalmente a la que la salida adelanta a la magnitud con 90 *SUPO*.

**Relación de amortiguamiento  $\zeta$**  - Es la relación de amortiguamiento  $\zeta$  con el grado de amortiguamiento requerido para un amortiguamiento crítico

Si  $\zeta = 1$  se tiene Amortiguamiento crítico.

Si  $\zeta > 1$  se tiene Sobreamortiguamiento.

Si  $\zeta < 1$  se tiene Subamortiguamiento.

**Respuesta en frecuencia** - Es el cambio observado en la frecuencia de la relación de la amplitud de salida y la magnitud aplicada al transductor dentro de un rango definido de frecuencias y variaciones senoidales. También se puede definir como el cambio con la frecuencia de la diferencia de fase entre la magnitud de entrada y la salida. Un ejemplo de cómo se especifica es:  $\pm 27\%$  (ó  $\pm 3$  db) de 0 a 300 Hz.

**Respuesta transitoria** - Es el término general para la respuesta de un transductor a un cambio en escalón de la magnitud.

**Tiempo de respuesta, Tiempo de subida y Constante de tiempo** - Son parámetros que caracterizan la respuesta de un transductor (no subamortiguado) a un cambio en escalón de la magnitud a medir.

El tiempo de respuesta es el tiempo requerido para que la salida alcance un porcentaje especificado de su valor final a entrada escalón.

El tiempo de subida corresponde al lapso requerido por la salida para ascender desde el 10 al 90 % de su valor final.

Para la constante de tiempo este porcentaje es de 63.2 %

#### **Características del medio ambiental.**

Las características de la actuación estática y dinámica se especifican y verifican cuando el transductor opera en condiciones ambientales adecuadas y en ausencia de condiciones externas que puedan afectar su operación, es decir, el transductor debe calibrarse bajo condiciones de operación en el medio ambiente adecuado, y si está fuera de las condiciones es necesario conocer los efectos ambientales; y las derivaciones resultantes de las actuaciones estáticas (errores ambientales), deben estar limitadas por tolerancias determinadas mediante pruebas, por ejemplo de temperatura, presión, etc.

**Efectos térmicos** - Corresponden a cualquier tipo de alteración que afecte la operación del transductor en relación con la temperatura de operación.

**Error de temperatura** - Es el cambio máximo en la salida cuando la temperatura (dentro del rango de operación del transductor) cambia de la temperatura ambiental a una temperatura extrema especificada. Este error puede especificarse mediante el concepto de banda de error.

**Error de aceleración** - Es la diferencia máxima, con respecto a un valor de la magnitud dentro del rango del transductor, entre las lecturas de salida tomadas con y sin la aplicación de una aceleración a lo largo del eje más sensible. Son debidos a los efectos de las aceleraciones en estado casi permanente sobre los elementos internos de un transductor, ocasionando un error en la salida tales como desplazamientos de masas, deformaciones y distorsiones. Los errores de aceleración generalmente afectan más cuando la aceleración se aplican a lo largo del eje más sensible.

**Error de vibración** - Es el máximo cambio en la salida, dentro del rango del transductor, ocasionado por determinados niveles de vibración tanto de amplitud como de frecuencia. Estos se presentan particularmente cuando el transductor incluye sensores mecánicos.

**Error de montaje** - Es el resultado de la deformación mecánica del transductor debidos a efectos de montaje que pueden surgir durante la instalación del transductor. Estos errores no se incluyen en las especificaciones, sin embargo, es necesario verificar su ausencia.

**Rango de temperatura operativo** - Es el rango de temperaturas ambientales, máximo y mínimo, dentro del cual el transductor opera en estado normal o especificado.

**Rango de temperatura compensada** - Corresponde al rango de temperatura operativo, sin embargo, éste se especifica cuando los transductores incluyen elementos destinados a compensar los efectos de la temperatura.

**Rango de temperatura del fluido** - Se especifica en el caso cuando la temperatura de un fluido a medir ocasiona efectos térmicos significativos en el transductor, por lo que en lugar de definir el rango operativo, se dan las especificaciones relacionadas con la temperatura.

**Características de confiabilidad.**

Son las que corresponden a la esperanza de vida útil del transductor así como con los sucesos que pueden presentarse por su utilización inadecuada en un sistema en el que operan conjuntamente.

**Vida operativa o de ciclo** - Es el tiempo mínimo especificado en el que el transductor operará, ya sea continuamente o sobre un número de ciclos de funcionamiento, en el rango completo, sin que cambien las características de funcionamiento dentro de las tolerancias especificadas.

**Efectos adversos** - Estos se contemplan cuando ya se ha instalado el transductor, y pueden presentarse en fallas como cortos circuitos, presiones en el encapsulado del sensor, etc.

## TRANSDUCTOR DE DESPLAZAMIENTO

El empleo de dispositivos automáticos de medición y de control son cada vez más utilizados en el campo industrial, esto ha tenido como consecuencia un considerable impulso en la tecnología de los transductores o sensores de los cuales uno de los más difundidos es el transductor de desplazamiento.

De acuerdo al principio físico con el que funcionan los transductores, se clasifican en tres grupos: los que se basan en fenómenos puramente eléctricos; en fenómenos eléctricos con intervención de un campo magnético y los basados en las máscaras codificadoras.

Los transductores del primer grupo pueden ser principalmente de tres tipos: transductores capacitivos, resistivos o potenciométricos y piezorresistivos.

### TRANSDUCTORES CAPACITIVOS

Los transductores capacitivos se basan en la propiedad que tienen los capacitores de placas paralelas para almacenar cierta diferencia de potencial que es proporcional a la superficie de las placas e inversamente proporcional a la distancia que las separa, considerando esto, el sensor tiene una capacidad de variación de modo lineal con la magnitud incógnita, ya sea de longitud o de ángulo, según se muestra en la figura 1.

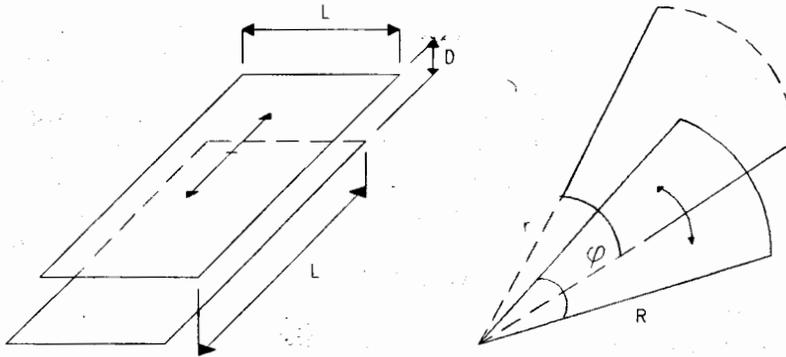


FIGURA 1

Algunos transductores que funcionan bajo este principio físico, se presentan en aparatos de medición de vibraciones, o bien en los dispositivos de determinación del nivel alcanzado por los líquidos dieléctricos en los tanques metálicos. En la figura 2 se muestra el principio teórico de estos sensores. El transductor capacitivo tiene una excelente respuesta de frecuencia y puede medir fenómenos estáticos o dinámicos.

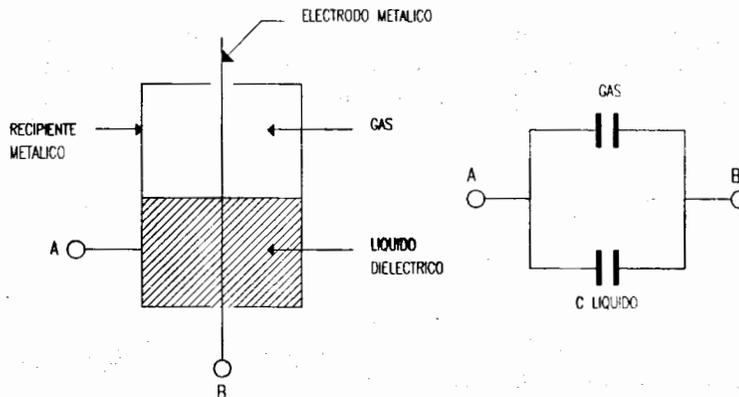


FIGURA 2

## TRANSDUCTORES POTENCIOMETRICOS

Los transductores resistivos o potenciométricos, tienen su principio en la propiedad resistiva de los materiales conductores, la cual es proporcional a la superficie de éste.

Los transductores potenciométricos cuentan con una escobilla o contacto deslizante que se mueve sobre un elemento resistivo, que está unido directamente al eje sensor. Existen dos tipos de transductores potenciométricos, de desplazamiento lineal y angular, éstos se muestran en la figura 3.

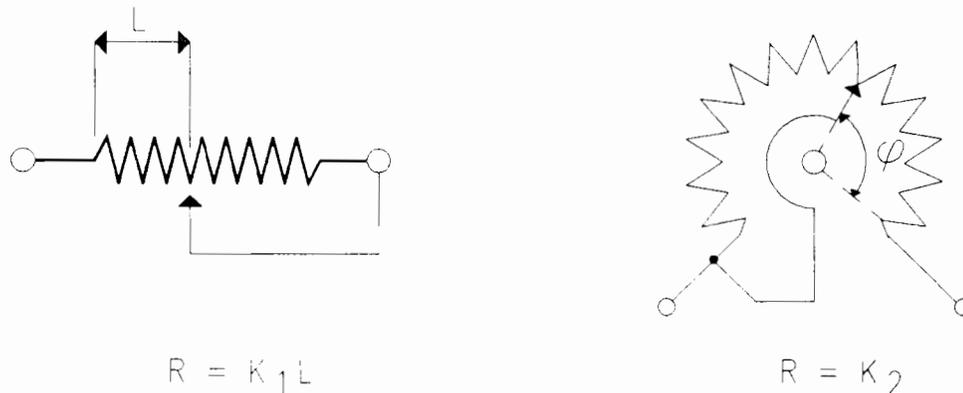


FIGURA 3

Básicamente están constituidos por un resistor, el cual es proporcional a la distancia existente entre dos puntos. Existen potenciómetros constituidos por diferentes tipos de materiales, en el caso de los lineales por lo general el elemento es embobinado, por lo que su resolución está dada por el número de vueltas por unidad de longitud, es por ello que para tener una mayor sensibilidad es necesario utilizar resistencias elevadas y un hilo de calibre delgado, sin embargo esto puede traer como consecuencia errores al variar la carga del transductor, ya que la impedancia de salida es muy grande. Los elementos potenciométricos de resolución continua están constituidos por conductor plástico, película de carbón, película metálica o mezclas de metal-cerámica o “cermet”. La precisión es del orden de 0.1 % en los potenciométricos de alambre metálico y del 0.5 % en los de “cermet”, en cuanto a los elaborados con materiales plásticos se puede considerar que tiene un error mínimo.

## TRANSDUCTORES PIEZORRESISTIVOS

Los transductores piezorresistivos son sensores que se basan en la propiedad de vincular un alargamiento porcentual con una variación de resistencia, esto se realiza por medio de galgas extensométricas\*, el transductor consiste en un marco estacionario y una armadura, la armadura se puede mover en una sola dirección, la distancia está limitada por cuatro filamentos de alambre sensible a los esfuerzos. Cuando se le aplica una fuerza externa al “extensómetro” la armadura se mueve una cierta distancia, el cambio de resistencia de los cuatro filamentos es proporcional a la distancia recorrida. La figura 4 muestra una configuración del extensómetro. Existen “extensómetros” de materiales semiconductores los cuales tienen una alta sensibilidad, sin embargo son dependientes de la temperatura. Los sensores de deformación se encuentran muy a menudo en los transductores de fuerza y presión<sup>1</sup>.

1 Para más detalles ver la práctica de Fuerza

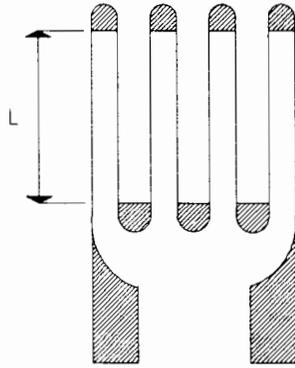


FIGURA 4

**TRANSDUCTORES BASADOS EN FENOMENOS ELECTRICOS CON INTERVENCION DEL CAMPO MAGNETICO**

En los transductores basados en fenómenos eléctricos con intervención de un campo magnético, se incluyen todos los transductores que convierten un desplazamiento en variaciones de voltaje de ca, mediante un voltaje inducido por un campo magnético. Dentro de los sensores que miden desplazamientos angulares se encuentra el sensor sincro y el sensor de resolución. El primero es un dispositivo eléctrico similar a un transformador en el que la función del primario la realiza el rotor monofásico y la función del secundario es desarrollada por un estator de tres embobinados conectados en estrella y defasados entre sí  $120^\circ$ , como se ilustra en la figura 5.

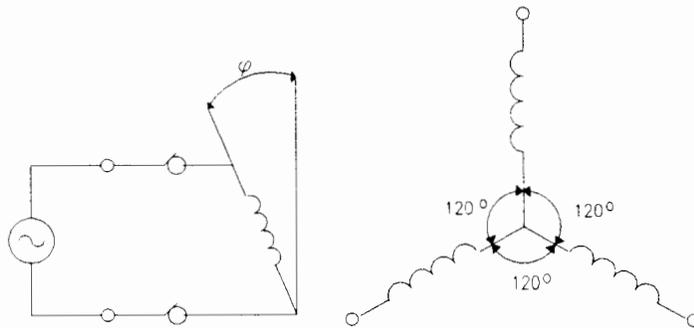


FIGURA 5

Al aplicarle al rotor una señal senoidal de frecuencia  $\omega$  de amplitud constante, se puede medir un voltaje inducido entre el centro de la estrella y cada uno de los embobinados del estator, estando defasados  $120^\circ$  entre ellos, como se muestra en la figura 6. Las amplitudes del voltaje en el estator dependerán de la posición angular del rotor.

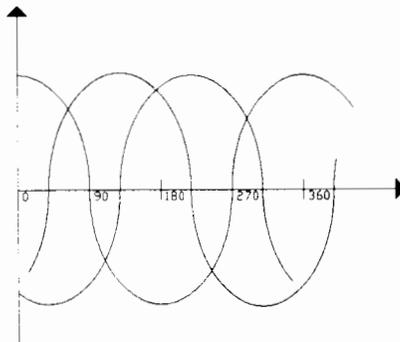


FIGURA 6

El segundo sensor de este tipo, es el dispositivo de resolución que cuenta con un rotor monofásico que cumple la función del primario, mientras que el estator de dos embobinados separados  $90^\circ$ , realizan la función del secundario. El diagrama esquemático se ilustra en la figura 7.

Si se le aplica al rotor una señal senoidal de frecuencia  $\omega$  y amplitud constante, se obtienen dos voltajes inducidos, en los extremos del estator defasados  $90^\circ$  entre sí, como se muestra en la figura 8. En forma similar al síncrono, la amplitud del voltaje de salida, dependerá de la posición angular de la entrada.

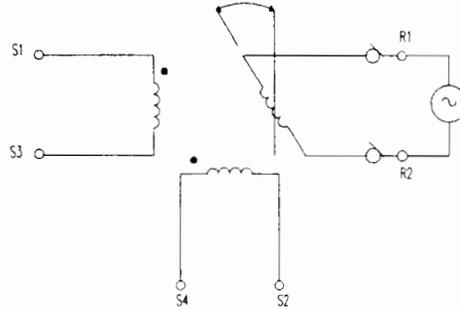


FIGURA 7

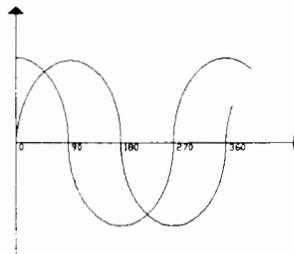


FIGURA 8

El último tipo de sensor que aprovecha este fenómeno físico, es el transformador diferencial de variaciones lineales o LVDT<sup>2</sup>, el cual está constituido por un soporte de material ferromagnético, un embobinado primario y dos secundarios colocados paralelamente como se indica en la figura 9. Cuando se aplica una excitación de corriente alterna en el primario al mismo tiempo que el núcleo ferromagnético se mueve dentro del conjunto de los devanados, el acoplamiento del primario con cada uno de los secundarios varía dando como resultado que la magnitud y fase de la tensión de los secundarios cambie desde cero, lo cual solo es posible cuando el núcleo se encuentra centrado en los dos secundarios.

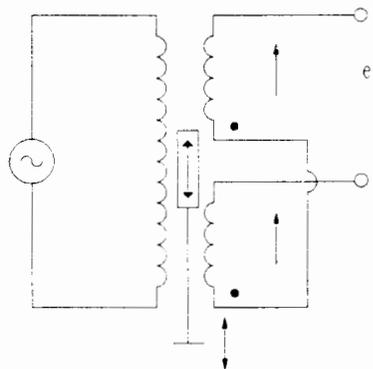


FIGURA 9

2 Para más detalles ver la práctica del LVDT

## TRANSDUCTORES BASADOS EN MASCARAS CODIFICADORAS.

Los transductores basados en máscaras codificadoras<sup>3</sup>, son convertidores mecánicos que traducen la posición angular dada por un eje a una señal digital, el transductor está formado por un disco, que contiene patrones de codificación que se encuentran localizados concentricamente a él, en el que existen segmentos alternados de material conductor (negro) y no conductor (blanco), y de un eje de un motor de autobalance. Utiliza código binario. La resolución de dichos dispositivos es inversamente proporcional al número de áreas de material conductor y directamente proporcional al desplazamiento angular.

### Parámetros característicos del transductor de posición resistivo

Los parámetros fundamentales que caracterizan el campo de operación de un transductor de posición son los siguientes:

- Tipo de desplazamiento (lineal o angular)
- Tipo de material utilizado
- La resistencia de los potenciómetros
- La carrera mecánica, que es la distancia lineal o angular que puede recorrer el cursor.
- La carrera eléctrica, que es la distancia o el ángulo dentro del cual las características del transductor no cambian.
- El par de arranque, que es la fuerza necesaria para que el cursor comience a desplazarse.
- La temperatura de funcionamiento.

Además la calidad de las mediciones realizadas con el transductor esta relacionada con los siguientes parámetros:

- La linealidad, que es la desviación de la medición del transductor con respecto a un comportamiento ideal y puede ser calculada a partir de la gráfica de respuesta de voltaje contra desplazamiento, trazando dos líneas paralelas y equidistantes a la recta óptima, de tal forma que, se comprendan todos los puntos de la gráfica.

$$\text{Linealidad} = \frac{V_1 - V_2}{F.S.O} \left( \pm \frac{1}{2} \right)$$

Donde F.S.O es el voltaje a plena escala.

- La sensibilidad, que es la variación que existe entre el valor de la señal de salida con respecto al valor de la señal de entrada.

$$\text{Sensibilidad} = \frac{V_2 - V_1}{D_2 - D_1}$$

3 Para más detalles ver la práctica del Codificador Incremental

## DESCRIPCION DEL EQUIPO

El equipo consta del módulo G22 en el que se encuentran el transductor y su acondicionador de señal. El transductor utilizado es del tipo potenciométrico lineal con resistencia de película plástica conductiva.

La disposición del módulo G22 se muestra en la Figura 10.

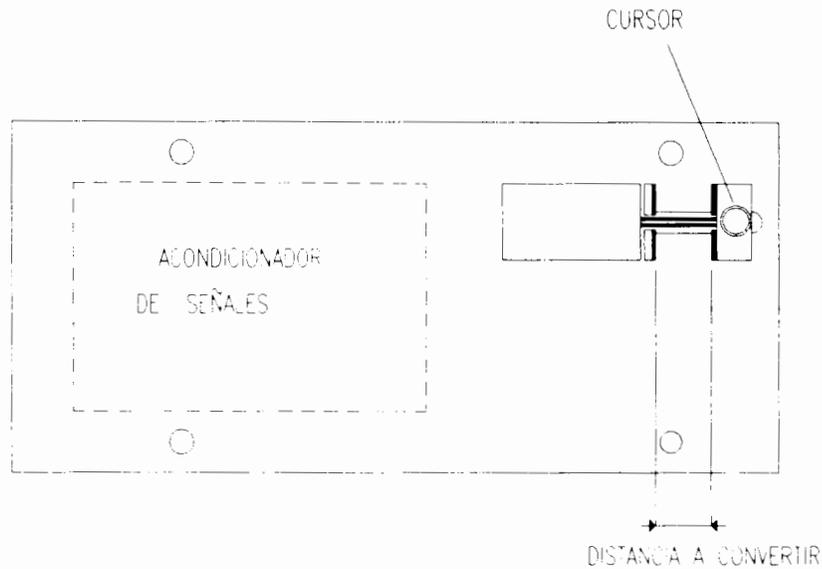


FIGURA 10

Para realizar la lectura del desplazamiento se utiliza un vernier, el cursor del transductor debe estar bien sujeto a fin de obtener una lectura correcta, durante la fijación del cursor se debe tener precaución de que las dos laminillas de referencia de medición permanezcan paralelas.

Las características del transductor empleado son las siguientes:

- El valor del potenciómetro es de 10K.
- La linealidad es aproximadamente el 1% de valor de fondo de escala.
- La máxima potencia que el transductor puede disipar, es de 0.55 W.
- Los valores relativos a los recorridos mecánicos y eléctricos se encuentran, ambos recorridos son de 30 mm con una tolerancia de  $\pm 0.5$
- La fuerza mínima para que el cursor se desplace es de 30 gramos.
- Las dimensiones del transductor son 15 x 24 x 58 mm.

Para obtener las distancias correctas debe usarse un vernier con una precisión de 3 a 6 veces mayor que el error posible causado por el transductor; la distancia máxima que puede recorrer el transductor es de 30 mm, si el error posible en este transductor es del 1 % del valor del fondo de escala, el máximo error posible es de 0.3 mm, por lo que el vernier utilizado debe tener una exactitud mínima de 0.1 a 0.05 mm.

---

## ACONDICIONADOR DE SEÑAL

En los diferentes transductores es necesario que el sistema de interface sea el más adecuado, ya que tiene la función de un circuito excitador, que produce una señal de salida a niveles de voltaje y corriente adecuados para operar varias cargas o para operar otros dispositivos.

El acondicionador de señal para un transductor potenciométrico, es un dispositivo cuya función es básicamente la de alimentar al transductor con un voltaje estable, y aislar a la salida del transductor del sistema de lectura, cuando éste último tiene una impedancia de entrada igual a la del transductor. El circuito de interface se muestra en la figura 11.

El voltaje con el cual se polariza el acondicionador es de +12 V, -12 V. El transistor T1 y los diodos D1, D2 funcionan como una fuente de corriente de 10 mA, que alimenta al diodo zener Z estableciéndose un voltaje de 6.2 V, llamado "voltaje referencial inicial  $V_z$ ", dicho valor se puede medir en el borne 1 del módulo G22. En el borne 2 del módulo, el voltaje depende de la malla constituida por el diodo zener Z, las resistencias R3 y R4 y el diodo D3. El amplificador operacional IC1 es del tipo no inversor, y amplifica el voltaje en este punto, por lo que en el borne de +Vref se tiene un voltaje de 8 V, que es calibrado mediante el potenciómetro Rv1 que regula la amplificación del voltaje de IC1. El diodo D3 compensa las variaciones del voltaje de referencia inicial, al variar la temperatura; de hecho cuando la temperatura aumenta, el voltaje en el zener aumenta con un coeficiente de 3.5mV/C, al mismo tiempo que el voltaje en las terminales del diodo D3 varían con un coeficiente de -1.5mV/C y las resistencias R3 y R4 compensan la desviación del voltaje zener  $V_z$  al variar la temperatura.

La inversión de voltaje +Vref es realizada por un amplificador operacional inversor IC2, obteniéndose así un voltaje de -8 V en el borne de -Vref, este amplificador está controlado por el potenciómetro Rv2.

## OBJETIVOS

- Conocer el funcionamiento básico del Transductor Potenciómetro de Desplazamiento.
- Aprender el procedimiento de calibración para el acondicionador de señal.
- Obtener la recta óptima o ideal del transductor.
- Determinar los principales parámetros característicos del transductor.

## EQUIPO Y MATERIAL.

- . Módulo G22.
  - Cables para el módulo G22.
  - 1 Fuente de alimentación PS1.
  - 1 Multímetro digital.
  - 1 calibrador vernier.
-

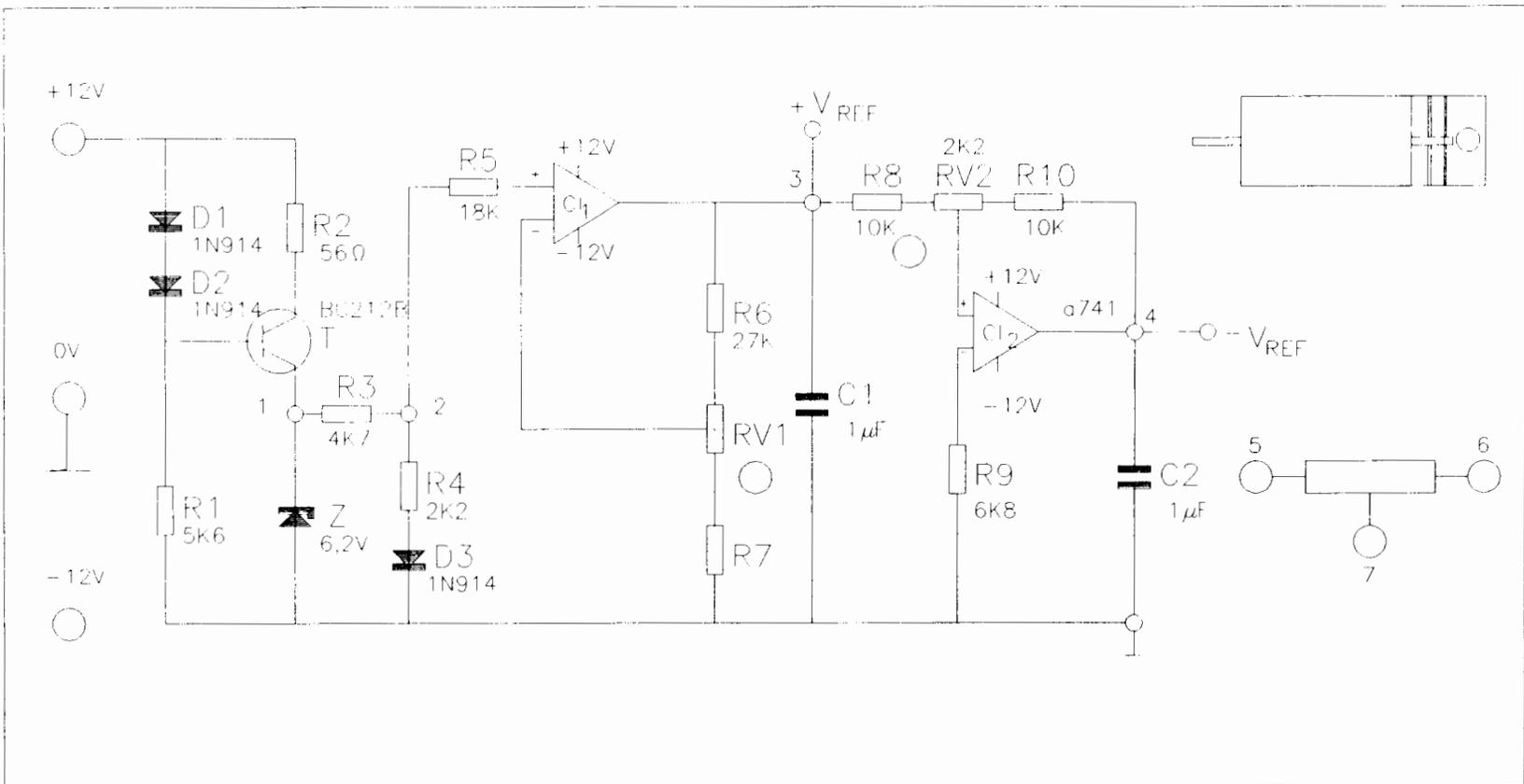


FIGURA 11

- 
- 1 juego de cables de potencia.
  - 1 banco de focos.
  - 1 desarmador de calibración
  - 1 Termómetro.

## **DESARROLLO.**

### **EXPERIMENTO 1: CALIBRACION DEL ACONDICIONADOR DEL TRANSDUCTOR.**

- Conectar los bornes del módulo  $\pm 12V$  y  $0 V$  a la fuente de alimentación.
- Conectar el voltmetro entre el borne  $+V_{ref}$  y tierra.
- Encender la fuente de alimentación.
- Medir el voltaje  $+V_{ref}$  y ajustar con  $Rv1$  hasta obtener  $+8V$ .
- Conectar el voltmetro entre el borne  $-V_{ref}$  y tierra.
- Verificar que el voltaje  $-V_{ref}$  sea de  $-8V$ , de lo contrario ajustar con  $Rv2$  hasta obtener dicho valor.

### **EXPERIMENTO 2: DETERMINACION DE LA CURVA DESPLAZAMIENTO - VOLTAJE DEL TRANSDUCTOR.**

- Conectar el borne del  $+V_{ref}$  al borne 5.
  - Conectar el borne 6 a tierra.
  - Conectar el voltmetro entre el borne 7 y tierra.
  - Desplazar el cursor del potenciómetro a partir de la posición cero, con intervalos de 3mm para observar los diferentes valores de voltaje de salida del transductor, registrar los datos en la Tabla 1.
  - Conectar el borne  $-V_{ref}$  al borne 6.
  - Conectar el borne 5 a tierra.
  - Conectar el voltmetro entre el borne 7 y tierra.
  - Medir la temperatura.
-

- Medir los voltajes en el borne 1 y en el borne 2.
- Desplazar el cursor con intervalos de 3mm, registre los diferentes valores en la Tabla 2.
- Realizar también mediciones para  $-V_{ref}$  y  $+V_{ref}$  y regístrelas en una tabla semejante a las utilizadas.

D(mm)	V(volts)

TABLA 1

D(mm)	V(volts)

TABLA 2

**EXPERIMENTO 3: DETERMINACION DE LA VARIACION DE VOLTAJE CON RESPECTO A LA TEMPERATURA.**

- Calentar 15 minutos el módulo G22 con ayuda del banco de focos y medir la temperatura.
  - Medir los voltajes en el borne 1 y en el borne 2.
  - Realizar las mediciones con  $+V_{ref}$  y  $-V_{ref}$  y registrar los valores en tablas semejantes a las anteriores.
-

**ANALISIS DE DATOS Y RESULTADOS.**

1. ¿Cuál es el objeto de calificar el acondicionador?.
2. ¿Cuáles fueron los voltajes de calibración de acondicionador de señal?.
3. De acuerdo a la potencia máxima que el transductor puede disipar, ¿Cuál es el voltaje máximo que se le puede aplicar?.
4. Trazar las gráficas de voltaje contra desplazamiento de todos los experimentos realizados.
5. Obtener un modelo matemático para cada grupo de valores.
6. Compare las variaciones de temperatura con las especificadas por el fabricante.
7. A partir de los datos obtenidos con relación a las variaciones de voltaje por temperatura obtenga la linealidad del transductor.
8. ¿Qué sucede cuando interviene la temperatura en el transductor?.
9. Presenta una lista de los parámetros reales del transductor.
10. Proponga un sistema de instrumentación, mediante diagrama de bloques, que incluya un transductor potenciométrico.

## TRANSDUCTORES DE PROXIMIDAD

La mayoría de los indicadores de posición utilizan para su funcionamiento algún tipo de contacto mecánico entre el actuador (el objeto cuya distancia es detectada) y el detector. Existe un grupo particular de indicadores de posición que no requieren contacto físico alguno, llamándose a este último tipo de dispositivos "detectores (o transductores) de proximidad".

Los transductores de proximidad pueden ser del tipo lineal (conversión de posición) o de tipo On-off (en los que la conmutación indica una posición particular).

Por su principio de funcionamiento se dividen en tres grupos fundamentales: los detectores de proximidad inductivos, capacitivos y magnéticos son los tipos más importantes de esta clase de dispositivos. Esta clasificación se muestra en la Figura 1.

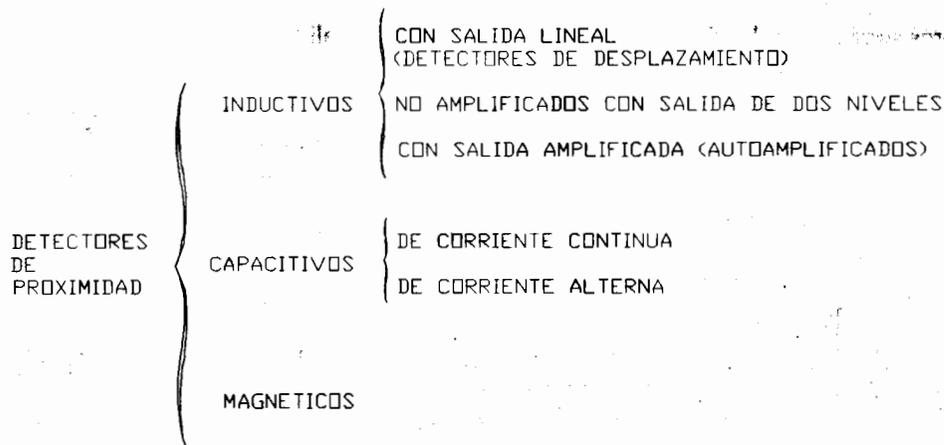


Figura 1.

### DETECTORES DE PROXIMIDAD INDUCTIVOS CON SALIDA LINEAL.

Los detectores de proximidad de principio inductivo funcionan con base al fenómeno de amortiguamiento que se produce en un campo magnético a causa de las corrientes inducidas (o corrientes de Foucault) en materiales situados en las cercanías, según se muestra en la Figura 2.

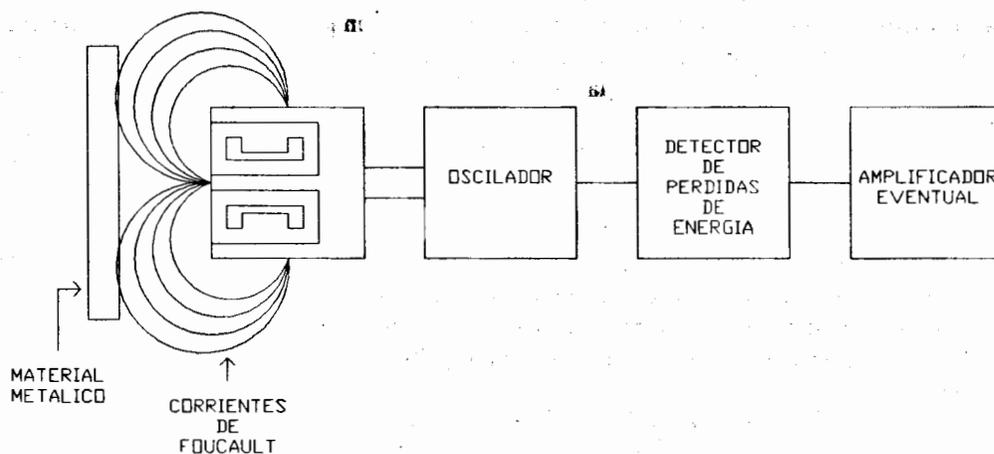


Figura 2.

Un circuito oscilante se aplica a un circuito inductivo el cual genera un campo electromagnético de alta frecuencia que induce corrientes parásitas en un actuador metálico ubicado en una distancia próxima.

Estas corrientes provocan una pérdidas de energía en el oscilador, amortiguando la amplitud de la señal; esta reducción de amplitud de la señal es detectada y transmitida hacia la salida (la distancia a la que será sensible el detector dependerá del tipo de metal del actuador).

Los detectores de proximidad inductivos con salida lineal tienen la característica de que su salida es proporcional (lineal) a la distancia existente en el actuador y al detector propiamente dicho, lo que da gran ventaja cuando se necesita situar un objeto en una posición exacta. No obstante, esta relación es lineal solamente en un rango de valores, es decir, entre una distancia mínima ( $d_m$ ) y una distancia máxima ( $d_M$ ) definidas por el fabricante.

### DETECTORES DE PROXIMIDAD INDUCTIVOS CON SALIDA DE DOS NIVELES

Estos detectores suministran dos diferentes valores de corriente de salida en función de la posición del actuador metálico.

El símbolo del detector está representado por unos signos senoidales que indican la función del oscilador generador de campo magnético y un escalón mostrado en la Figura 3 que indica que la salida es de dos niveles .

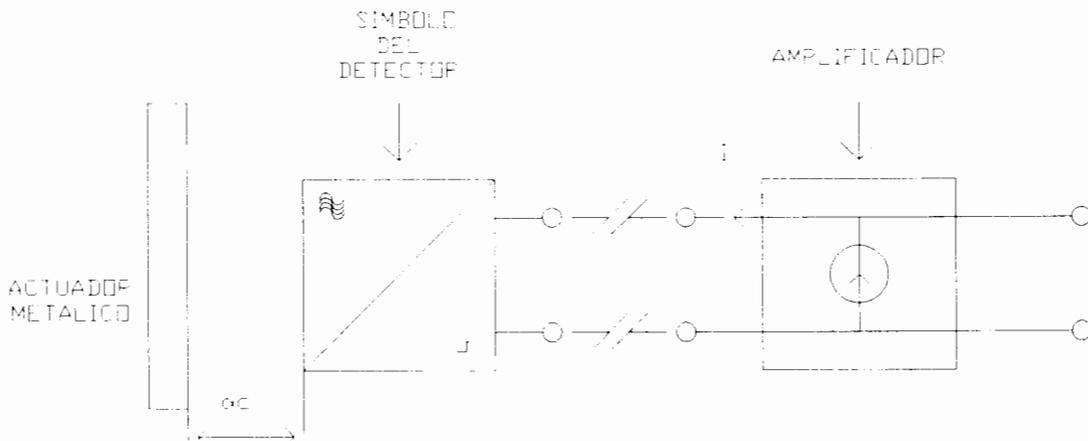


Figura 3

El amplificador (acondicionador de señal) consiste, en esencia, de un generador de voltaje con una resistencia en serie. Al variar la corriente varía también la caída de voltaje en la resistencia, por lo que en la salida se tiene una señal "on-off" (de voltaje) que indica si la distancia del actuador es mayor o menor que la distancia de conmutación.

### DETECTORES DE PROXIMIDAD CAPACITIVOS CON SALIDA C.C.

Estos detectores funcionan con base en las variaciones de la capacitancia parásita que se origina entre el detector y el objeto cuya distancia se desea medir. Cuando la cara sensible del detector se halla a una determinada distancia de dicho objeto, empieza a oscilar un circuito. Esta oscilación es captada por un detector de umbral, el cual envía un impulso de mando hasta un amplificador que acciona una carga externa como se muestra en la Figura 4.

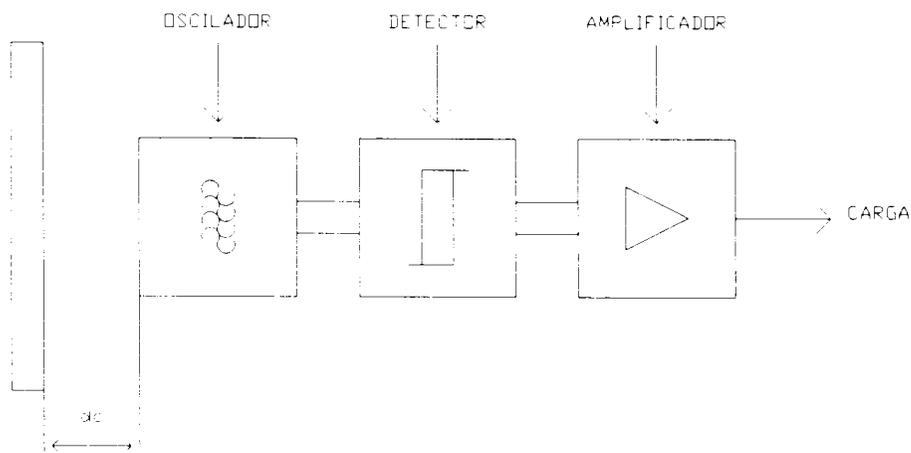


Figura 4

Debido al principio antes descrito se puede ver que los detectores de proximidad capacitivos pueden ser utilizados para medir distancia entre objetos de distintos materiales (no sólo metálicos).

El tipo de amplificador final que se utilice determina si el detector será de corriente continua (como en el caso del equipo utilizado en la presente práctica) o de corriente alterna.

#### DATOS CARACTERISTICOS DE LOS DETECTORES DE PROXIMIDAD

Los principales datos característicos de los detectores de proximidad son:

- La cota de intervención. Es la distancia entre el actuador y el detector, en el instante en el que se produce el cambio rápido de estado lógico (off-on), es decir, cuando se pasa por un estado en el que el actuador no es detectado, a uno en el que si lo es;
- La cota de desconexión. Es la distancia entre el actuador y el detector, en el instante en el que se produce el cambio rápido de estado lógico (on-off), es decir, cuando se pasa de un estado en el que el actuador es detectado a uno en el que no lo es;
- La carrera diferencial. Es la diferencia entre la cota de intervención y la cota de desconexión;
- La repetibilidad. Es la diferencia entre dos valores de la cota de intervención medidos durante un periodo de 8 horas, con una temperatura comprendida entre 15 y 30 °C y un voltaje de alimentación cuyo valor puede variar, respecto a al nominal, en un 15%;
- La caída de voltaje. Es la que se mide en el detector con la salida activada;
- El valor de la corriente permanente. Es la máxima corriente que puede suministrar el detector en funcionamiento continuo.

#### APLICACIONES

Los detectores de proximidad inductivos son empleados casi exclusivamente en aquellas instalaciones en las cuales es necesario un elevado nivel de seguridad (ambientes con peligro de explosiones, incendios, etc.).

La aplicación enfocada a aquellas operaciones que tienen el peligro de explosiones utiliza, por trabajar con niveles eléctricos muy bajos, los detectores de proximidad inductivos con salida a dos niveles.

Los detectores de proximidad inductivos con salida lineal se utilizan para situar objetos en una posición exacta, para medir espesores, flexiones, vibraciones o, en general, cuando sea necesario convertir la medida de una distancia en un valor de voltaje.

Los detectores de proximidad capacitivos pueden ser utilizados para medir la distancia a objetos metálicos y no metálicos, tales como la madera, líquidos y materiales plásticos. Algunas aplicaciones típicas se tienen, por ejemplo, en los dispositivos para contar piezas, en los controles de nivel de recipientes, etc.

## **OBJETIVO**

- Que el alumno observe y aprenda el funcionamiento de distintos tipos de detectores de proximidad.
- Con este fin se determinarán las características más importantes de los detectores de proximidad con que cuenta el laboratorio, que consisten en detectores de proximidad inductivos y en detectores de proximidad capacitivos. Los resultados obtenidos deberán compararse con los ofrecidos con el fabricante.

## **MATERIAL**

- Un módulo G-29
- Una unidad TY29/EV (con cables para conexión con el módulo G-29)
- Una barrita de plexiglás para ser enroscada al actuador de la unidad TY-29
- Un voltmetro digital
- Un Vernier
- Cables de conexión

## **EXPERIMENTO 1. DETERMINACION DE LAS CARACTERISTICAS DEL DETECTOR DE PROXIMIDAD INDUCTIVO CON SALIDA LINEAL.**

- Primero se procederá a la calibración del acondicionador de señal, de tal modo que, a una distancia de 3mm corresponda un voltaje de salida de 3V y a una distancia de 5mm uno de 5V.
- A continuación se trazará la curva que muestra la relación existente entre el campo de distancias "actuador/detector" y el voltaje de salida del detector (borne 1). Con los datos obtenidos se construirá la recta óptima del detector, o sea, la recta ideal que establece una relación óptima entre el desplazamiento del actuador y el voltaje de salida del detector.

- Una vez que se obtenga la gráfica anterior se procederá a trazar la curva que muestra la relación existente entre el campo de distancias "actuador/detector" y la tensión presente en la salida proporcional del acondicionador (borne 3).
- Las resistencias y los bornes que se mencionan en los experimentos se encuentra señalados en el módulo G-29 de la Figura 6.

#### a) CALIBRACION

- Conecte los bornes de  $\pm 12V$ ,  $0V$  y  $+5V$  del módulo G-29 a una fuente de alimentación regulada.
- Conecte el módulo G-29 a la unidad TY29/EV.
- Utilizando el Vernier coloque el actuador a 3mm del detector (los tres detectores se encuentran en paralelo con el actuador); el detector que se utiliza en este experimento es el de salida lineal, pero resulta indistinto tomar la distancia de cualquiera de los tres como se indica en la Figura 5.

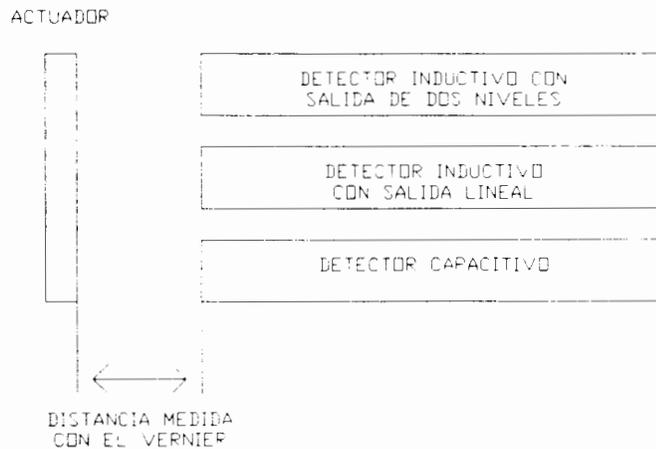


Figura 5

- Regule RV1 hasta que el voltaje del borne 2, medido con el voltmetro digital, sea de  $0V$ .
- Verifique que en la salida estandar el voltaje sea también de  $0V$ .
- Regule RV3 hasta obtener  $3V$  en la salida proporcional.
- Con ayuda del vernier, coloque de manera exacta el actuador a  $5mm$  del detector.
- Ajustando RV2 verifique que el voltaje de la salida estandar sea de  $+8V$  y la de salida proporcional de  $+5V$ .

#### b) DETERMINACION DE LA CURVA CARACTERISTICA DEL DETECTOR "DISTANCIA/VOLTAJE"

- Con ayuda del vernier coloque el actuador a  $3mm$  del detector.
- Conecte el voltmetro digital entre el borne 1 y tierra.

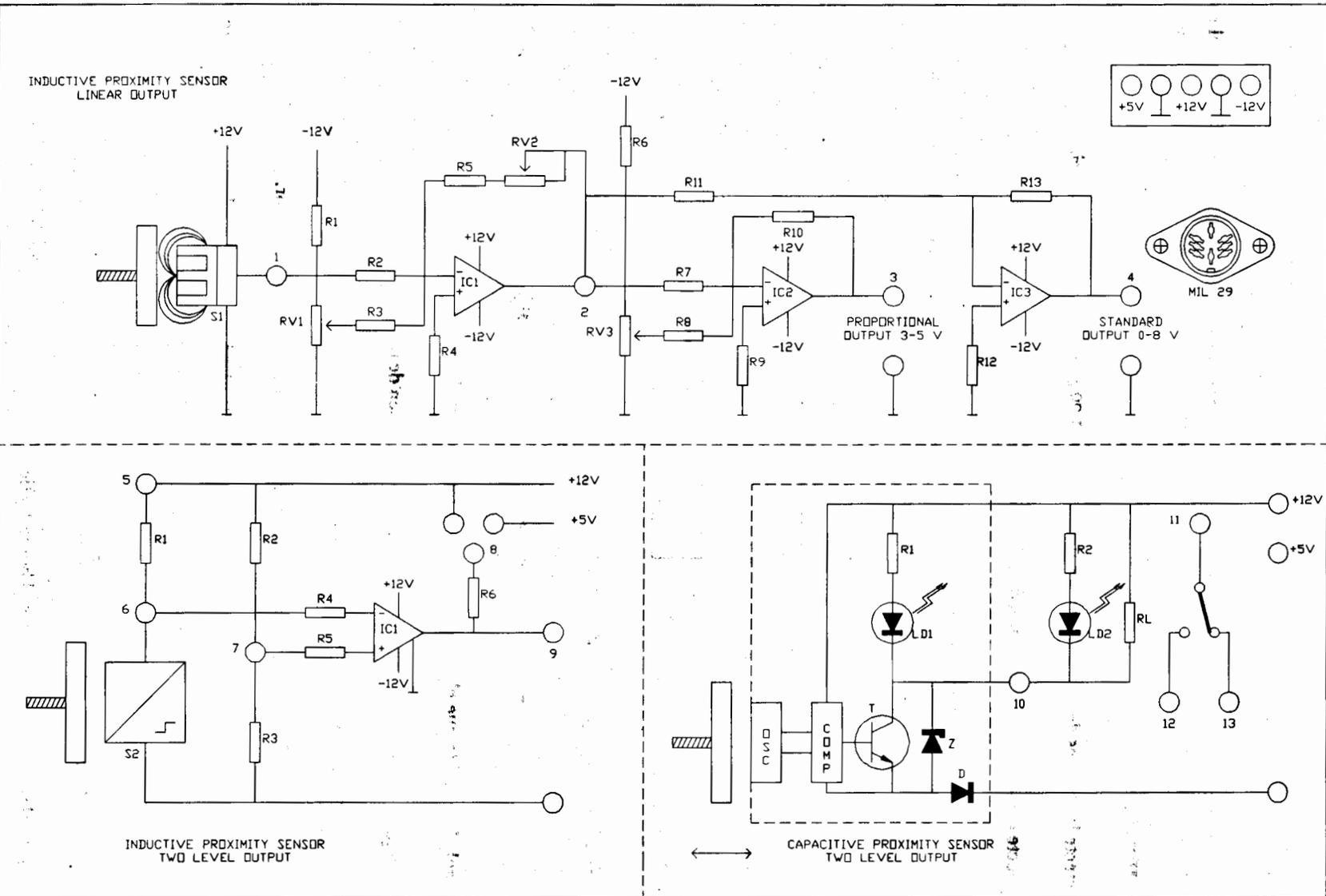


Figura 6

- Varíe la distancia del actuador por medio de la perilla indicada en la Figura 7 en pasos de 0.5mm; para cada valor de distancia medido, obtenga el correspondiente voltaje de salida con el voltmetro digital; continúe de esta manera hasta llegar a 5mm de distancia.

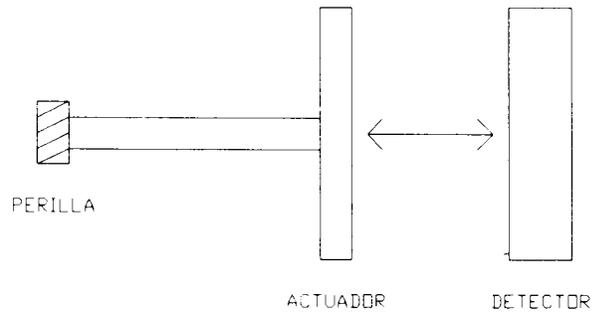


Figura 7.

- Anote los datos obtenidos en la Tabla 1.

L (mm)	V <sub>out</sub> (V)
3.0	
3.5	
4.0	
4.5	
5.0	

Tabla 1

- Repita el experimento anterior considerando ahora una distancia inicial de 0mm y una distancia final de 8mm (los incrementos serán de 0.5mm). Anote los datos obtenidos en la Tabla 2.

L (mm)	V <sub>out</sub> (mV)
0.0	
2.0	
4.0	
6.0	
8.0	

Tabla 2

**c) DETERMINACION DE LA CURVA CARACTERISTICA DEL DETECTOR MAS EL ACONDICIONADOR "DISTANCIA/VOLTAJE"**

- Cambie la escala de mV a V.
- Repita los pasos del experimento (b), utilizando ahora como salida el borne 3 y sólo para distancias entre 3mm y 5mm.

- Anote los datos obtenidos en la Tabla 3.

L (mm)	V <sub>out</sub> (V)
3.0	
3.5	
4.0	
4.5	
5.0	

Tabla 3

**EXPERIMENTO 2. CARACTERÍSTICAS DEL DETECTOR DE PROXIMIDAD INDUCTIVO CON SALIDA DE DOS NIVELES.**

- Primero se verificará si los valores de la corriente que fluye en el actuador corresponden a los valores nominales.
- Posteriormente se calculará la distancia (en mm) entre el actuador y el detector, de manera que la salida del borne 9 pase de un nivel alto (led apagado) a un nivel bajo (led encendido). Una vez realizado lo anterior, se comprobará si existe histéresis entre la cota de intervención (cuando el led se enciende) y la cota de desconexión (cuando el led se apaga).
- Por último se encontrará el error de repetibilidad. En este experimento se calculará la cota de intervención (en mm) con 5 pruebas y se verá cuanto se aleja de su valor nominal.

**a) DETERMINACION DE LA CORRIENTE EN PRESENCIA O AUSENCIA DEL ACTUADOR.**

- Conecte el voltmetro digital entre los bornes 5 y 6 y mida el valor del voltaje en los extremos de R1 en presencia y ausencia del actuador.
- Sabiendo que R1 vale 2.2 k, calcule el valor de las dos corrientes.

**b) CALCULO DE LA COTA DE INTERVENCION.**

- Sitúe el actuador a una distancia de 10mm del detector (led apagado).
- Acerque lentamente el actuador hasta que se encienda el led.
- Mida con el vernier la distancia entre el actuador y el detector.
- No mueva el actuador de la posición en que se encuentra.

**c) CALCULO DE LA HISTERESIS.**

- A partir de la posición en que se dejó el actuador en el experimento anterior, retírelo del detector hasta que el led se apague.
- Mida la distancia exacta con el vernier y obtenga la histéresis (diferencia entre la cota de desconexión y la cota de intervención).

**d) CALCULO DEL ERROR DE REPETIBILIDAD.**

- Repita 5 veces el experimento (e).
- Anote los datos en la Tabla 4.

n	INDUCTIVO		CAPACITIVO	
	L (mm)	$\Delta L$	L (mm)	$\Delta L$

Tabla 4

- El máximo valor absoluto de L define el error de repetibilidad.

**EXPERIMENTO 3. CARACTERISTICAS DEL DETECTOR DE PROXIMIDAD CAPACITIVO.**

- Repita los experimentos (e), (f) y (g), contestando las mismas preguntas para el detector de proximidad capacitivo.

**EXPERIMENTO 4. CARACTERISTICAS DE LOS DETECTORES DE PROXIMIDAD PARA UN ACTUADOR NO METÁLICO.**

- Enrosque la barra de plexiglás en el actuador y repita todos los experimentos anteriores.

**ANALISIS DE DATOS Y RESULTADOS**

1. Investigue en que consiste el método de pares de puntos para la aproximación a una recta de un conjunto de datos.
2. ¿ En qué difiere un transductor de proximidad de un indicador de posición normal?
3. ¿ Cuáles son los dos tipos principales de detectores de proximidad?
4. ¿Cuál es la diferencia entre un detector de proximidad lineal y un detector de proximidad con salida dos niveles?
5. ¿ Qué ventaja presenta un detector de proximidad capacitivo contra un detector de proximidad inductivo con salida dos niveles?
6. Grafique la distancia contra el voltaje de los datos obtenidos en las tablas 1 y 2. ¿Qué representa la primer gráfica?
7. ¿ En las gráficas 1 y 2 se nota siempre una relación lineal? ¿Por qué?

- 8.- Con los datos de la Tabla 1, dibuje los puntos correspondientes, sin unirlos, a la distancia contra voltaje. Utilizando el método de pares de puntos calcule la recta ideal (de la forma  $V = mL + b_0$ ) y grafíquela.
- 9.- Haga la gráfica distancia contra voltaje con los datos de la Tabla 3. ¿Qué representa esta gráfica?
- 10.- Respecto al valor de corriente obtenido en el experimento 2(a) en presencia del actuador ¿Es su valor cómo lo indica el fabricante? Considere el 10% como límite de aceptabilidad.
- 11.- Para el mismo experimento, en ausencia del actuador ¿Es el valor de la corriente cómo lo indica el fabricante? Considere el mismo porcentaje que en el punto anterior como límite de aceptabilidad.
12. Para el experimento 2(b) ¿Corresponde el valor obtenido de la cota de intervención con el que ofrece el fabricante? ¿Cuánto varía?
13. Para el experimento 2(c) ¿Difiere el valor obtenido de histéresis con el proporcionado por el fabricante?
14. En el experimento 2(d) ¿Difiere el valor obtenido del error de repetibilidad con el que ofrece el fabricante?
15. Conteste las preguntas 12, 13 y 14 para los experimentos realizados con el detector de proximidad capacitivo.
16. Para los experimentos realizados con la barra de plexiglás ¿Por qué funciona sólo el detector de proximidad capacitivo?

#### NOTAS

Los siguientes son algunos datos que proporciona el fabricante sobre el detector de proximidad inductivo con salida de dos niveles y sobre el detector de proximidad capacitivo.

#### Detector de proximidad inductivo con salida de dos niveles:

<b>CORRIENTE CON ACTUADOR</b>	$\leq 1.1 \text{ mA}$
<b>CORRIENTE SIN ACTUADOR</b>	$\geq 2.2 \text{ mA}$
<b>COTA DE INTERVENCION</b>	<b>5 mm</b>
<b>CARRERA DIFERENCIAL (HISTERESIS)</b>	$\leq 0.5 \text{ mm}$
<b>ERROR DE REPETIBILIDAD</b>	$\leq 0.02 \text{ mm}$

#### Detector de proximidad capacitivo:

<b>COTA DE INTERVENCION</b>	<b>9 mm *</b>
<b>CARRERA DIFERENCIAL (HISTERESIS)</b>	$< 1.35 \text{ mm}$
<b>ERROR DE REPETIBILIDAD</b>	$< 0.9 \text{ mm}$

En este caso la cota de intervención puede variar algunos milímetros por medio de un tornillo situado en la parte posterior del detector. Si se diera el caso de que sus resultados difieran demasiado del valor nominal que se especifica en este anexo, utilice como valor nominal la media de los valores obtenidos, como histéresis el 15% de este valor y como error de repetibilidad el 10%.

## TRANSFORMADOR DIFERENCIAL DE VARIACION LINEAL

### TRANSDUCTORES DE POSICION

Para determinar una posición lineal o angular se requiere medir la longitud de un segmento, o bien un ángulo comprendido entre dos segmentos. Dichas longitudes se pueden medir eléctricamente por medio de una amplia gama de transductores.

Un transductor es un dispositivo que normalmente absorbe energía de un sistema para regresarla después en otra forma a otro sistema. Los transductores de posición, dependiendo del principio físico en el que se basen, se pueden dividir en tres grupos principales:

a) Los que se basan en los principios eléctricos, sin la intervención del campo magnético.

Estos transductores convierten la posición en una magnitud eléctrica. Dentro de este tipo de transductores se pueden mencionar los transductores capacitivos de placas planas y paralelas cuya capacitancia es función de sus dimensiones.

Este tipo de transductores se utiliza en la medición de vibraciones, similares a los micrófonos de condensador, o bien los dispositivos para la determinación del nivel alcanzado por los líquidos dieléctricos en los tanques metálicos.

Otros transductores que se basan en los principios eléctricos son los transductores "resistivos" o "potenciométricos", los cuales permiten expresar la resistencia eléctrica de un conductor en función de sus dimensiones.

En el caso de transductores de mayor precisión y mayor tamaño, se utilizan los sensores potenciométricos rectilíneos y circulares.

Otro fenómeno eléctrico utilizado en los transductores de posición es el de la piezorrestividad, que es la propiedad que poseen ciertos materiales para poder cambiar su propia resistencia cuando se deforman.

Los sensores que se basan en este principio se denominan extensómetros y se usan frecuentemente para convertir la deformación de una superficie (en una dirección prefijada) en una variación de la resistencia del elemento.

b) Los que se basan en las máscaras codificadas.

Estos transductores cumplen la función de generar una señal de salida digital en correspondencia con un desplazamiento angular o lineal de tipo analógico.

El transductor está compuesto normalmente de un disco móvil o de una barra, en los que están impresos o perforados una sucesión de números conforme a un código adecuado. La rotación del disco o el desplazamiento de la barra son proporcionales al desplazamiento angular o lineal.

Una característica de todos los transductores de este tipo es el paso de la cuantificación, con el cual está realizada la conversión digital de la entrada.

c) Los que se basan en los principios eléctricos, con la intervención del campo magnético.

Los transductores que se basan en los principios electromagnéticos para la determinación de un ángulo, funcionan como medidores de flujo concatenado y tienen un circuito cerrado, el cual está constituido por un conductor eléctrico. Esta medición consiste en determinar la diferencia de potencial que existe entre los extremos de dicho circuito eléctrico.

Dependiendo de la forma de funcionar, los transductores que se basan en los fenómenos electromagnéticos se pueden dividir en:

- "Sincro". Con el nombre de sincro se conoce o se denomina a una familia de elementos, cuya acción es similar a la de un transformador variable.

Los sincro se dividen en varias categorías dependiendo de su función precisa, estos dispositivos generalmente se utilizan para transmitir y recibir posiciones angulares por medios eléctricos.

-Solucionadores "sincro". Dentro de la familia de los elementos síncronos, el transformador de control es un dispositivo de gran utilidad cuando se desea seguir la posición angular en forma eléctrica. Esta necesidad se debe a que no siempre se transmite la posición en forma directa. Por ejemplo: si se trata de un servomecanismo de muy alta potencia se usan los elementos síncronos para transmitir y detectar las señales de posición y después de ser amplificados accionan al elemento actuador.

- Transformadores diferenciales lineales (LVDT). Este tipo de transductores se estudiarán en forma más completa en el transcurso de la práctica, debido a que son el objeto de la misma.

### TRANSDUCTOR LVDT

El transformador diferencial de variación lineal (LVDT) mide fuerza en términos del desplazamiento del núcleo ferromagnético de un transformador. La construcción básica del LVDT se muestra en la figura 1.

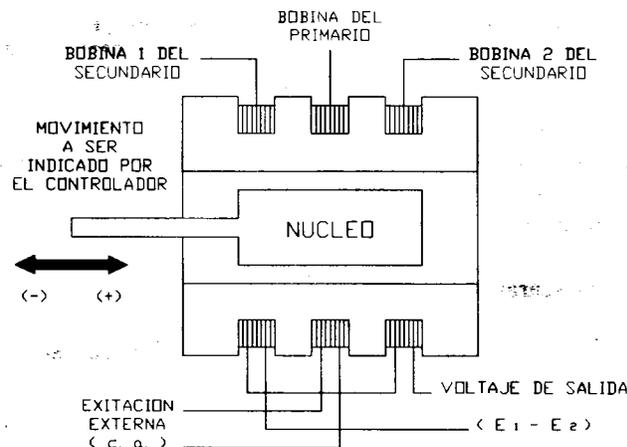


Figura 1

El transformador consiste de un embobinado primario y dos embobinados secundarios, los cuales están en contrafase con el primario. Los secundarios tienen igual número de vueltas, están conectados en serie y en oposición de fase, con lo cual, las fems inducidas en las bobinas se oponen. La posición del cursor

determina el flujo concatenado entre el voltaje alterno de excitación del primario y el correspondiente a los embobinados del secundario.

Con el cursor en el centro o posición de referencia, las fems inducidas en los secundarios son iguales, y como son opuestas una con otra, el voltaje de salida será de 0 V. Cuando una fuerza externa aplica un movimiento al cursor hacia la izquierda habrá más líneas de flujo magnético en la bobina izquierda que en la bobina derecha, y por lo tanto la fem inducida en la bobina izquierda será mayor. La magnitud del voltaje de salida es entonces igual a la diferencia entre los dos voltajes del secundario y estará en fase con el voltaje de la bobina izquierda. En forma análoga, cuando el cursor es movido a la derecha, existirán más líneas de flujo de la bobina derecha y la magnitud del voltaje de salida estará ahora en fase con la fem de la bobina de la derecha. Dichas magnitudes serán iguales y de fase opuesta mientras que la diferencia entre las dos fems inducidas sean las mismas y de fase opuesta. La figura 2 muestra la salida de voltaje del LVDT en función de la posición del cursor.

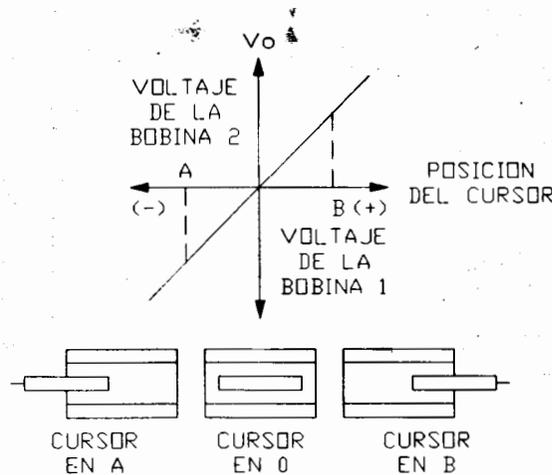


Figura 2

El LVDT provee resolución continua y presenta baja histéresis. Puede usarse en desplazamientos relativamente largos. El instrumento es sensible a las vibraciones. Los instrumentos receptores deben ser seleccionados para operar con señales de corriente alterna o con un demodulador si se requiere salida de corriente continua.

Las características fundamentales que determinan el campo de empleo y la calidad de estos dispositivos son las siguientes:

- i) Voltaje de entrada nominal: es el valor eficaz del voltaje senoidal con que se debe alimentar al primario del LVDT.
- ii) Margen de frecuencias: es el rango en el que se hallan comprendidas las frecuencias admisibles para el voltaje de entrada.
- iii) Campo nominal de desplazamiento: es el valor del desplazamiento máximo que cada transductor puede convertir manteniendo las características de medición.
- iv) La impedancia del primario y del secundario.
- v) El campo de temperaturas de trabajo y de almacenamiento.

Las características relativas a la calidad de la conversión son las siguientes: linealidad, sensibilidad y variación de fase.

La linealidad, cuando es referida al valor a plena escala, se puede calcular por medio de la siguiente ecuación:

$$\text{Linealidad} = \frac{V_2 - V_1}{F.S.O.} \left( \pm \frac{1}{2} \right)$$

El valor de la linealidad normalmente se expresa en porcentaje y F.S.O. (Full Scale Output) indica la salida a plena escala, es decir, la variación del voltaje que sufre la salida cuando el desplazamiento varía de acuerdo a una cantidad que es igual al valor total de su escala,  $V_1$  y  $V_2$  son los voltajes respectivos, tal como se muestra en la figura 3.

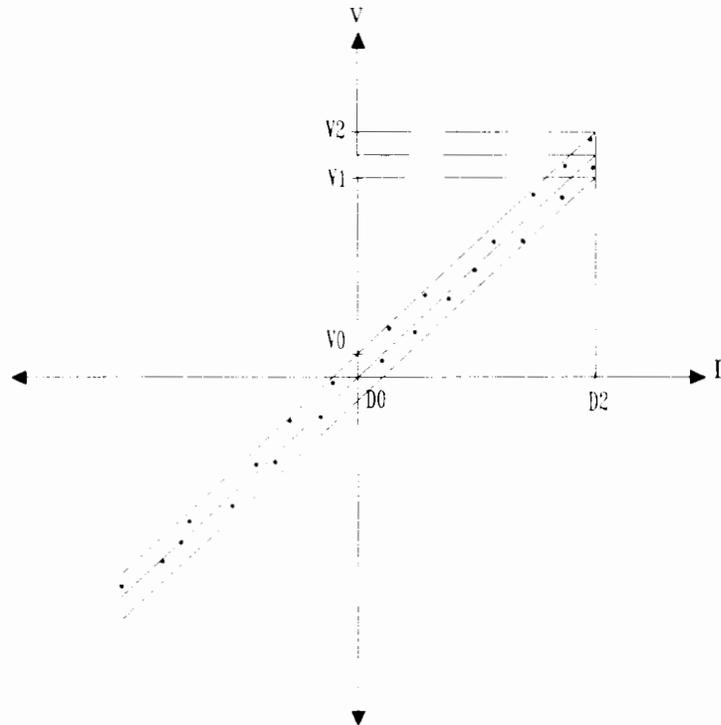


Figura 3

La sensibilidad es la relación que existe entre la variación de voltaje que se obtiene a la salida con respecto a la variación del desplazamiento de entrada, es decir:

$$S = \frac{V_2 - V_0}{D_2 - D_0}$$

En donde  $S$  representa la sensibilidad,  $(V_2 - V_0)$  la variación de voltaje a la salida y esta dada en volts y  $(D_2 - D_0)$  es el desplazamiento a la entrada en mm.

#### APLICACIONES DEL TRANSFORMADOR DIFERENCIAL DE VARIACION LINEAL (LVDT)

Una aplicación común que se le da al LVDT es como componente de un servo sistema fuerza-balance. Esto es indicado esquemáticamente en la figura 4. Las terminales de salida de un transformador de entrada y un transformador balanceado se conectan en serie y en oposición. La suma algebraica de los dos voltajes alimenta a un amplificador que maneja un motor de dos fases. Cuando los dos transformadores están en sus

posiciones de referencia, la suma de sus voltajes de salida es cero y no hay voltaje hacia el servomotor. Cuando se mueve el cursor del transformador de entrada de su posición de referencia, existirá un voltaje de salida, que será enviado al amplificador, provocando que el motor gire. El motor está mecánicamente acoplado al núcleo del transformador balanceado. Cuando la salida del transformador balanceado se opone a la salida del transformador de entrada el motor girará, hasta que las salidas de los dos transformadores sean iguales. El indicador en el motor se calibra para leer el desplazamiento del transformador balanceado, e indirectamente el desplazamiento del transformador de entrada.

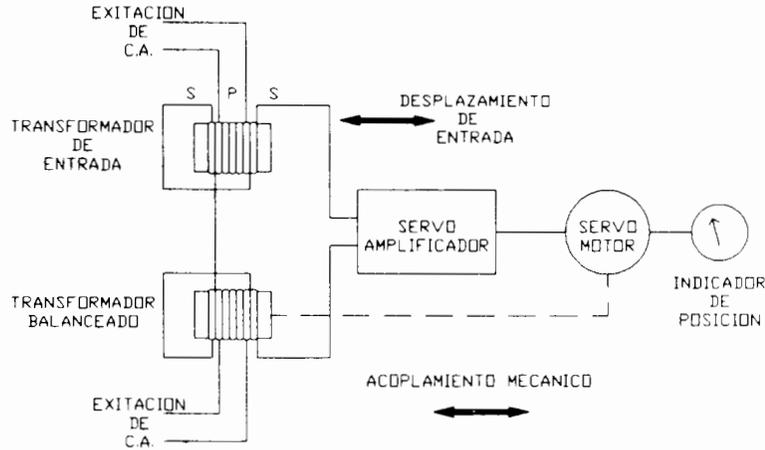


Figura 4

Una variación en la posición del cursor del LVDT es mostrado en la figura 5. El embobinado del primario está montado en la parte central del núcleo tipo 'E', y los embobinados del secundario están en las partes externas del núcleo tipo 'E'. La armadura se encuentra girando debido a la aplicación de una fuerza externa en un punto pivote a lo largo de la pata del centro del núcleo. Cuando la armadura es desplazada de su posición de referencia, la reluctancia del circuito magnético a través de una bobina del secundario disminuye, mientras que simultáneamente, la reluctancia del circuito magnético a través de la otra bobina del secundario aumenta. Las fems inducidas en los embobinados del secundario son iguales en la posición de referencia de la armadura, y serán diferentes en magnitud como resultado del desplazamiento aplicado. Las fems están en fase opuesta una con respecto de la otra y el transformador opera de la misma manera que el desplazamiento del cursor del transformador de la figura 5.

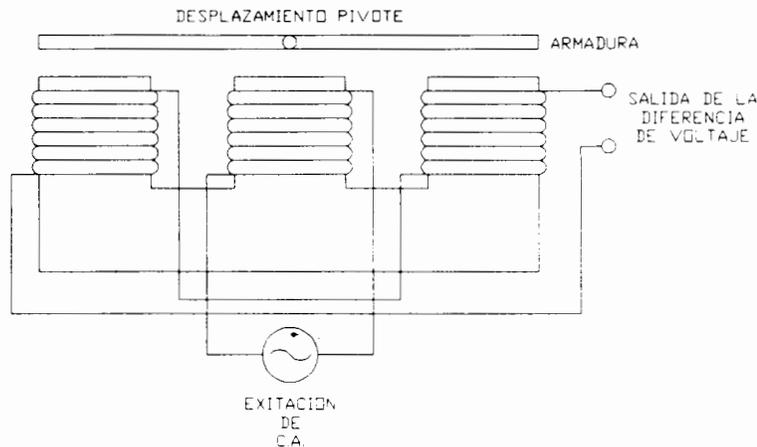


Figura 5

## ACONDICIONADORES DE SEÑAL EMPLEADOS CON LOS TRANSDUCTORES DE POSICION

Los circuitos acondicionadores de señal empleados en los transductores capacitivos, son muy complejos, pues están constituidos por un oscilador 'chopper' y un demodulador (para proporcionar una señal de salida continua). Estos también deben ser capaces de determinar y elaborar pequeñísimas variaciones de voltaje y capacitancia.

El sistema de interfase para los transductores del tipo piezorresistivo comprende un amplificador diferencial para instrumentos (de alta ganancia en el caso de extensómetros resistivos) de un generador de voltaje con estabilidad térmica elevada.

Resultan más sencillos los acondicionadores de señal empleados con los transductores resistivos y potenciométricos, ya que deben poder suministrar un voltaje de alimentación muy estable y desconectar el sistema de lectura si dicho sistema presenta una resistencia de entrada igual a la del transductor.

Los dispositivos de interfase que se utilizan con los 'sincro' son muy complejos ya que deben de extraer la información de la posición correspondiente al ángulo del par de los voltajes senoidales que salen del transductor. Esto se realiza recurriendo a un sistema de cálculo que efectúa todos los tratamientos necesarios para dar resultados directamente en forma digital.

Los acondicionadores de señal para los transductores del tipo LVDT generalmente comprenden un generador de ondas senoidales destinado a alimentar el primario del LVDT, un demodulador síncrono para convertir la amplitud y la fase de la señal de salida de los LVDT en una información de posición y un amplificador de salida para obtener la ganancia y el filtrado que sean requeridos. La figura 6 muestra el esquema básico de un acondicionador de señal para transductores del tipo LVDT.

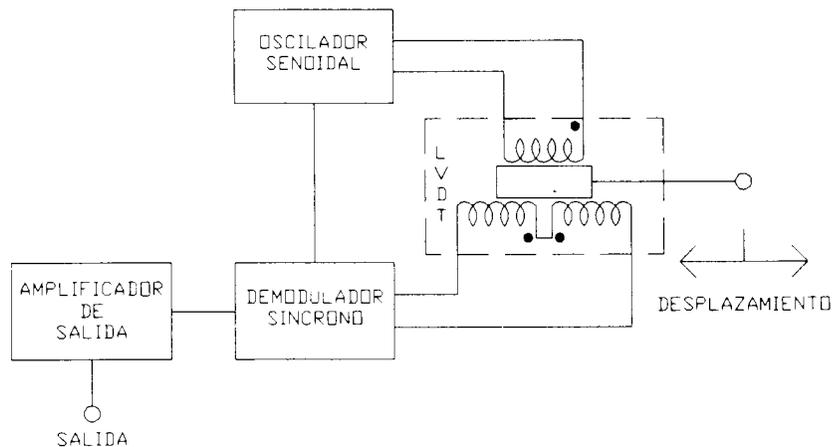


Figura 6

### DESCRIPCION DEL MODULO TRANSDUCTOR Y ACONDICIONADOR G27

La figura 7 muestra el diagrama del módulo G27, el cual incluye el LVDT, el acondicionador y el circuito que genera los voltajes de referencia.

En el circuito de interfase, que se encuentra representado íntegramente en el panel didáctico (figura 7), el transductor está conectado internamente al acondicionador de señal.

**Voltajes de Referencia.** Se generan voltajes de referencia de 8 V que son necesarios para el funcionamiento del acondicionador de señal.

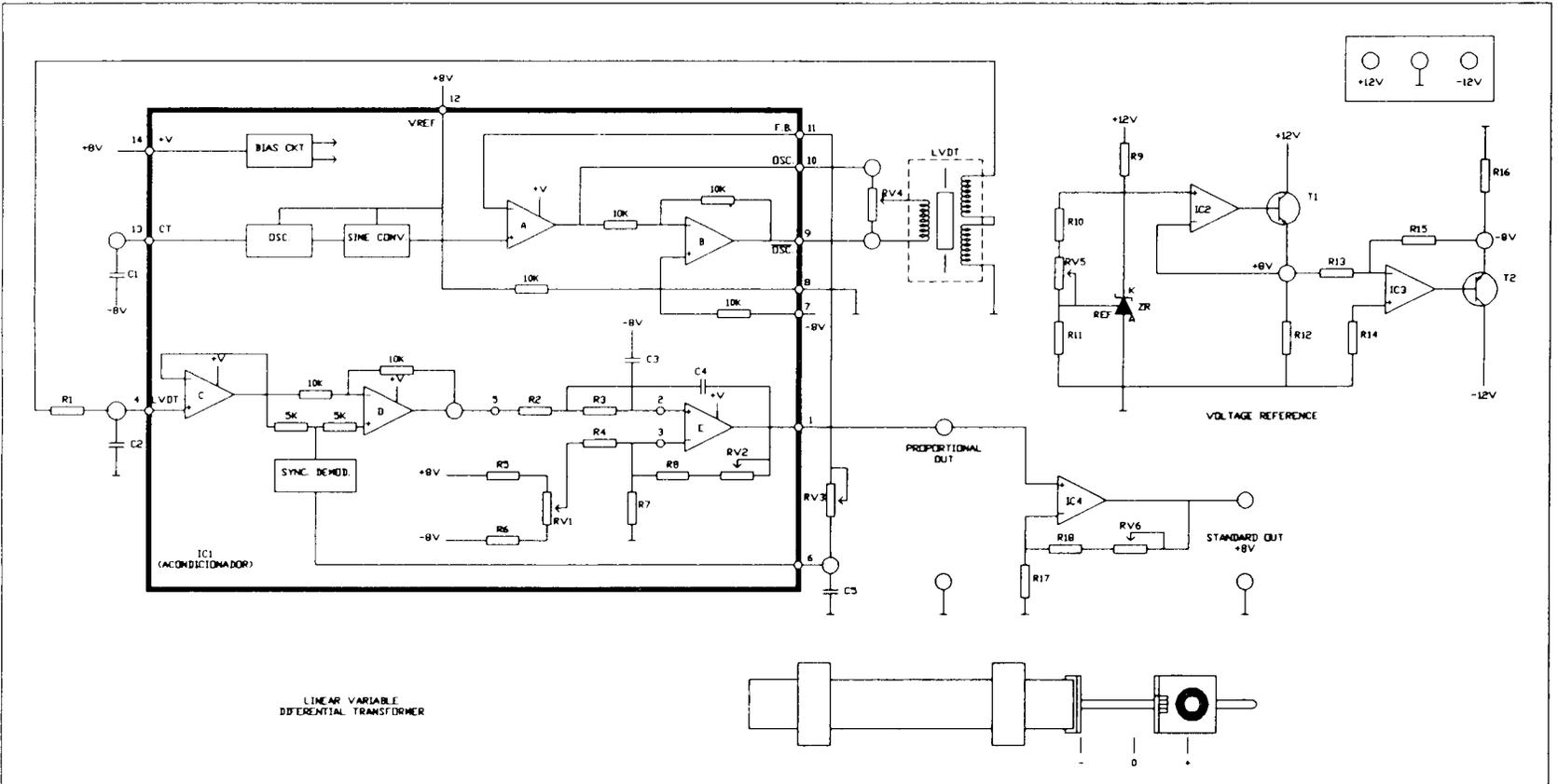


Figura 7

**Acondicionador del LVDT.** Este grupo en el modulo G27 está delimitado por un recuadro de trazo grueso y está diseñado con base a un circuito integrado. Tiene la función de suministrar una señal de salida analógica cuyo voltaje es proporcional al desplazamiento del núcleo del transductor. Este acondicionador está compuesto de las siguientes partes principales:

**Oscilador.** Consiste en un generador de ondas triangulares. La frecuencia de oscilación esta relacionada con el capacitor conectado al contacto 13 (CT).

**Convertidor Senoidal.** Este elemento, constituido por una carga no lineal, transforma la onda triangular de entrada en una onda senoidal de baja distorsión (borne 4).

**Amplificadores Operacionales A y B.** Estos amplificadores separan la señal senoidal que sale del convertidor senoidal, presentandola entre los contactos 9 (OSC) y 10 (OSC) en oposición de fase con respecto a la del Convertidor Senoidal. La señal que está presente en dichos contactos es la alimentación al primario del LVDT.

**Demodulador Sincro.** Este dispositivo se encarga de efectuar la rectificación de doble semionda (contacto 6) en sincronía de fase con la salida del oscilador.

**Amplificador Operacional C.** Este amplificador sirve para separar la señal diferencia proveniente del secundario del transductor.

**Amplificador Operacional D.** Según sea que la salida del Demodulador Sincro tenga un valor alto o el valor de tierra (salida en fase con el primario o viceversa), este amplificador operacional (D) presentará en su salida un 'OFFSET' de voltaje continuo, positivo o negativo según sea el caso (Demodulador de salida o contacto 5).

**Amplificador Operacional E (Amplificador Auxiliar).** Con los capacitores y resistencias adecuados este dispositivo actúa como un filtro que elimina la señal portadora que sale del Demodulador de Salida, suministrando en el contacto 1 una señal continua proporcional al desplazamiento.

## **OBJETIVOS**

- Conocer el funcionamiento básico del Transformador Diferencial de Variación Lineal (LVDT).
- Aprender el procedimiento de calibración para el acondicionador de señal.
- Obtener la recta óptima o ideal del transductor.
- Determinar el porcentaje de linealidad del sistema formado por el transductor y el acondicionador.
- Determinar la sensibilidad del sistema.

## EQUIPO Y MATERIAL

- Módulo G27 (transductor LVDT).
- Fuente de alimentación tipo PS1EV.
- Un voltmetro digital de tres dígitos y medio.
- Un osciloscopio de doble traza.
- Un Vernier o pic de rey.

## DESARROLLO

### EXPERIMENTO 1. CALIBRACION DEL ACONDICIONADOR DEL LVDT

- Sin encender la fuente, conecte los bornes de  $\pm 12.0$  V, así como el de 0 V del módulo G27 a la fuente regulada.
- Conectar el voltmetro digital entre el borne marcado con +8 V y alguno de los bornes de tierra.
- Verificar las conexiones y encender la fuente.
- Regular RV5 hasta que el voltmetro indique exactamente +8 V; y verificar que en el borne indicado como -8 V exista ese voltaje.
- Observar que en el borne 13 se encuentre presente una señal triangular, de aproximadamente 8 Vpp de amplitud y de 4300 Hz de frecuencia.
- Colocar el cursor del LVDT en la posición marcada con '+' y regular RV4 tratando de que en el borne 4 este presente una señal senoidal de 1 Vpp.
- Conectar el canal 1 del osciloscopio al borne 4 y el canal 2 al borne 6. Regular RV3 (error de fase) hasta observar dos señales defasadas 180 grados, si el cursor del LVDT, se encuentra en la posición '-'; o bien, exactamente en fase, si el cursor se encuentra en la posición '+'.  
 — Verificar que la señal presente en el borne 5 este rectificadas positivamente si el cursor se halla en la posición '+'; o en caso de estar en la posición '-' deberá ser una rectificación negativa.
- La máxima amplitud tendrá que ser de 0.5 Volts para un recorrido de 12.5 mm.
- Colocar el cursor en la posición 0 y observar que el valor del voltaje en el borne 5 sea de 0 Volts (de ser necesario, ajustar el cuerpo del LVDT); regular RV1 (ZERO) hasta que el voltaje de salida en el borne 1 (salida proporcional) sea de 0 Volts.
- Colocar el cursor del LVDT a +12.5 mm de la posición 0 y regular RV2 (GAIN) de tal forma que el voltaje de salida en el borne 1 sea de +1.25 V.

- Situar el cursor del LVDT en la posición de -12.5 mm y medir el voltaje de salida (aproximadamente de -1.25 Volts).
- Conectar el voltmetro digital en la salida standard y regular RV6 tratando de obtener -8 Volts cuando el voltaje en la salida proporcional es de -1.25 Volts respectivamente.

**EXPERIMENTO 2. OBTENCION DE LA CURVA CARACTERISTICA DISTANCIA-VOLTAJE DEL SISTEMA FORMADO POR EL ACONDICIONADOR Y EL TRANSDUCTOR LVDT**

- Efectuar la calibración del acondicionador como se indicó en el experimento I.
- Conectar el voltmetro digital entre el borne 1 y alguno de los bornes de tierra.

**NOTA:**

Para obtener mejores resultados tenga cuidado al situar el cursor en la posición deseada, fije el cursor con el tornillo y asegurese que las láminas de medición estén perfectamente paralelas.

- Mover el cursor partiendo de la posición 0 hacia los valores positivos en intervalos de 2 mm, registrando los valores observados en el voltmetro en la Tabla 1.

L (mm)	Vo (Volts)	L (mm)	Vo (Volts)
14.0		14.0	
12.5		12.5	
12.0		12.0	
10.0		10.0	
8.0		8.0	
6.0		6.0	
4.0		4.0	
2.0		2.0	
0.0		0.0	
-2.0		-2.0	
-4.0		-4.0	
-6.0		-6.0	
-8.0		-8.0	
-10.0		-10.0	
-12.5		-12.5	
-14.0		-14.0	

Tabla 1

- Repita el paso anterior, pero ahora regresando el cursor hacia la posición cero, los valores de voltaje que obtenga anótelos en la Tabla 1.
- Desplazar el cursor en sentido negativo, con saltos de 2 mm, haciendo un registro de los valores de voltaje que obtenga, y anótelos en la Tabla 1.
- Repetir el paso anterior, pero ahora en sentido opuesto, es decir, regresando el cursor a la posición cero, los voltajes obtenidos en el voltmetro se deben anotar en la Tabla 1.

**ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS**

1. ¿ Cuáles fueron los voltajes de calibración que midió en el experimento I ?
2. Dibuje la forma de onda observada en el borne 13.
3. Dibuje la señal que observó en el borne 4.
4. Dibuje las señales observadas en el paso 7 del experimento I.
5. Muestre las formas de onda que observó en el paso 8 del experimento I.
6. Anóte los valores de voltaje que observó en los pasos 10, 11 y 12 correspondientes al experimento I.
7. Traslade sobre el plano cartesiano los datos obtenidos en la tabla 1, donde el desplazamiento corresponde al valor de las abscisa y el voltaje al de las ordenadas.
8. Repita el paso anterior, pero ahora con los datos de la tabla 1 que van en sentido descendente.
9. Trazar la línea que más se aproxime a los valores determinados por los puntos para obtener la recta óptima del transductor. A continuación, trácese dos rectas paralelas y equidistantes a la recta óptima, de tal forma, que entre las dos primeras queden contenidos todos los puntos que se marcaron en la gráfica.
10. En base al punto 9, obtenga el modelo matemático del transductor.
11. Trace una recta paralela al eje de las ordenadas y mida los valores del voltaje en los puntos de intersección, con las dos rectas que delimitan todos los puntos de medición, para obtener  $V_1$  y  $V_2$ .
12. Calcule la linealidad del sistema formado por el transductor y el acondicionador, de acuerdo con la teoría.
13. De acuerdo con los datos de la tabla 1, calcule la sensibilidad del sistema.
14. Proponga un sistema que utilice un LVDT y que sea distinto del que se mencionó en la teoría.
15. ¿ Presenta histéresis el transductor ? Explique.
16. Reporte sus observaciones y conclusiones.

## TRANSDUCTOR DE ACELERACION Y VELOCIDAD

La necesidad de tener que medir y analizar las vibraciones que se producen en muchas clases de estructuras en situaciones particulares ha fomentado el desarrollo de ciertos tipos de transductores, capaces de transformar las aceleraciones mecánicas en señales eléctricas. En forma análoga, debido a la gran difusión de la electrónica en las máquinas industriales, hoy en día son de uso común también, los transductores de velocidad angular. En particular, existen transductores (detectores o sensores) de aceleración llamados acelerómetros y transductores de velocidad angular llamados dínamos tacométricos. A fin de que las señales eléctricas analógicas obtenidas en las salidas de los transductores puedan ser utilizadas correctamente, es necesario emplear también sistemas de interfaces eléctricas, los cuáles se denominan acondicionadores de señal.

### TRANSDUCTORES DE ACELERACIÓN: ACELEROMETROS.

Los acelerómetros son transductores electromecánicos en cuya salida suministran una señal eléctrica proporcional a la aceleración vibratoria a la cuál se les somete.

El elemento activo de un acelerómetro está constituido por uno o varios discos (o barras) piezoeléctricos sometidos en la parte superior o lateralmente a cargas representadas por una o varias masas sísmicas y mantenido en posición mediante un soporte rígido; esto se representa en la figura 1.

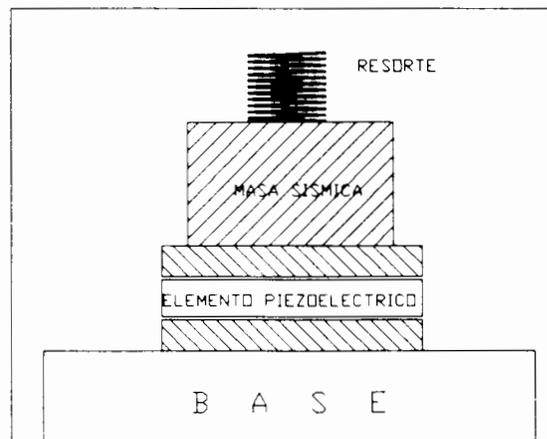


Figura 1

Cuando el acelerómetro se halla sujeto a vibraciones, la masa sísmica ejerce una fuerza variable sobre los discos o barras que, debido al efecto piezoeléctrico, generan una carga eléctrica.

La señal eléctrica producida por el elemento piezoeléctrico será proporcional a la aceleración a la que se halle sometido dicho transductor.

Esta señal eléctrica podrá medirse electrónicamente en los bornes de salida del acelerómetro y utilizarse para determinar con gran precisión la amplitud de la vibración, la frecuencia y la forma de onda.

## CARACTERISTICAS ELECTRICAS DE LOS ACELEROMETROS.

Sensibilidad (referida a las cargas eléctricas o a voltajes).

Un acelerómetro piezoeléctrico puede ser considerado como una fuente de carga o de voltaje. Su sensibilidad depende de la relación entre la señal eléctrica presente en su salida y la aceleración que provoca dicha señal, puede expresarse en unidades de carga por unidades de aceleración:

$$S_q = \left[ \frac{pC}{m s^2} \right]$$

donde: pC corresponde a picoCoulombs

y también en unidades de tensión por unidades de aceleración:

$$S_v = \left[ \frac{mV}{m s^{-2}} \right]$$

donde: mV corresponde a milivolts

La sensibilidad no sólo depende del tipo y tamaño del elemento piezoeléctrico, sino también del peso de las masas sísmicas que actúan como carga.

Los acelerómetros son relativamente sensibles a las aceleraciones que se producen sobre el plano perpendicular a su eje principal de sensibilidad, como se muestra en la figura 2. Esto se debe a pequeñas irregularidades de la estructura, de la alineación y de la polarización del elemento piezoeléctrico.

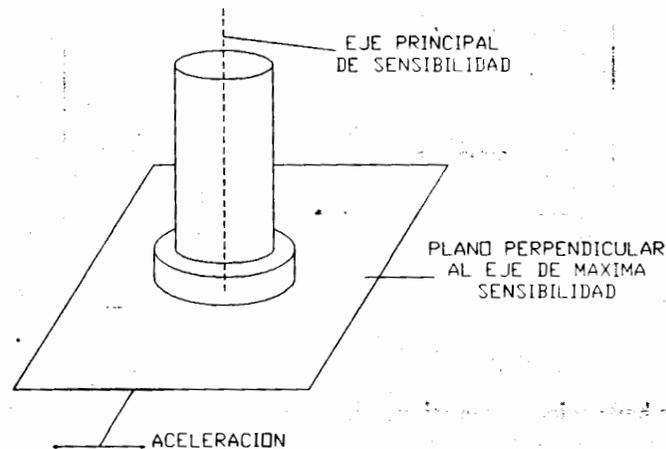


Figura 2

Los valores típicos de la máxima sensibilidad transversal varían del 3 al 5% de la sensibilidad correspondiente al eje principal.

### Respuesta en Frecuencia.

La curva característica de la respuesta en frecuencia de un acelerómetro se muestra en la figura 3. Se considera normalmente el límite de frecuencia superior igual a un tercio de la frecuencia de resonancia, con un error inferior al 12%.

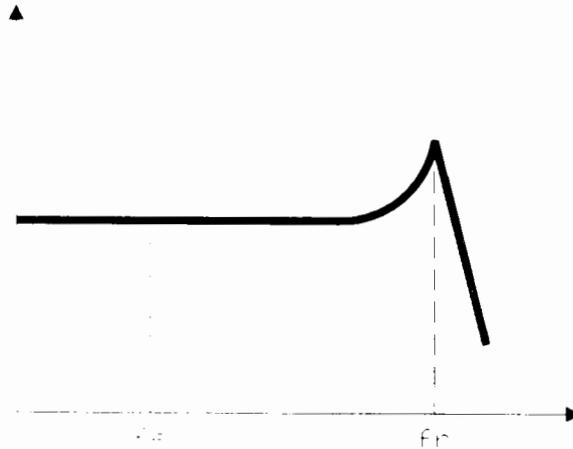


Figura 3.

La respuesta en frecuencia de un acelerómetro a bajas frecuencias depende, principalmente del tipo de preamplificador utilizado en el acondicionador.

En el caso de preamplificadores de voltaje, la resistencia de entrada de los mismos hace disminuir la constante de tiempo eléctrica del acelerómetro. Por esta razón, si se desean realizar mediciones a bajas frecuencias, es necesario utilizar preamplificadores de voltaje con resistencias de entrada muy elevadas.

Este problema no existe con los preamplificadores de carga, ya que la realimentación capacitiva hace que aumente la constante de tiempo del acelerómetro, permitiéndolo así, efectuar mediciones a frecuencias muy bajas.

### Campo Dinámico.

El campo dinámico de un acelerómetro define el margen dentro del cual la señal eléctrica de salida es directamente proporcional a la aceleración aplicada en su base. Los límites son determinados por la robustez mecánica y por la eventual precarga del elemento piezoeléctrico. Los acelerómetros piezoeléctricos pueden usarse para medir niveles de vibración muy bajos.

Teóricamente, el valor de la salida de los mismos es lineal hasta cero, pero en el nivel de ruido del sistema de medición y el ambiente en que se realizan las mediciones impone un límite práctico. En consecuencia, cuando se realizan mediciones con bajos niveles de vibración es importante utilizar un preamplificador con un nivel de ruido reducido y además, habrá de efectuar las conexiones con cables cortos y fijos, para hacer que el ruido introducido por el movimiento mecánico sea mínimo.

### Sensibilidad Ambiental.

Al escoger un acelerómetro se debe tomar en cuenta las condiciones ambientales bajo las cuales se utilizará, tales como:

Temperatura. Los acelerómetros poseen temperaturas límite de funcionamiento. A bajas temperaturas, la sensibilidad sufre variaciones. En la figura 4 se muestran los distintos niveles de sensibilidad en función de la temperatura, para el caso de un acelerómetro provisto de un elemento activo de material piezoeléctrico tipo PZ 23.

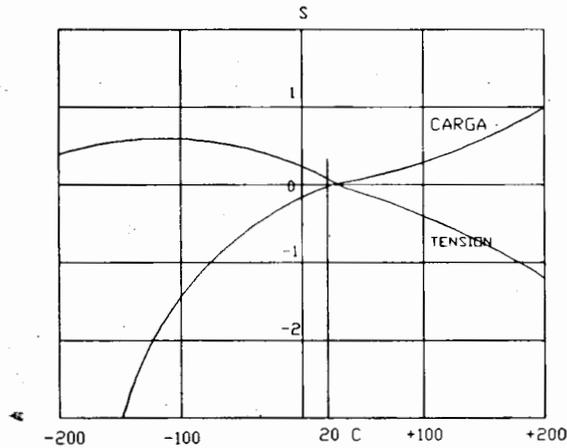


Figura 4

Los acelerómetros piezoeléctricos son sensibles también a los cambios de temperatura y esta característica es muy importante en las mediciones con bajas frecuencias y niveles.

**Presión acústica.** La sensibilidad acústica de los acelerómetros es mínima y se le puede despreciar en la mayor parte de las aplicaciones. Normalmente, la vibración acústica introducida por una estructura es mucho mayor que la señal provocada por la sensibilidad acústica del transductor receptor de la vibración.

**Voltajes en la base.** Pueden llegar a originarse a causa de deformaciones de la estructura en la que está montado el acelerómetro. Es importante que las bases de estos sean muy rígidas, para reducir la sensibilidad a las tensiones generadas.

**Montaje de un acelerómetro.** En altas frecuencias, es importante que el acelerómetro esté bien sujeto al objeto a probar. La precisión de mediciones está vinculada sobre todo a la solidez de la montura del acelerómetro.

La respuesta en frecuencia depende de la calidad del montaje. El mejor de todos es el que se realiza fijándolo sobre una superficie plana y lisa mediante un tornillo y tuerca de acero. Usando otros sistemas la frecuencia de resonancia será inferior.

#### ACONDICIONADORES DE SEÑAL PARA ACELERÓMETROS.

En los sistemas de medición basados en el uso de un acelerómetro, el acondicionador de señal cumple 2 funciones:

- a) Transformar la elevada impedancia de salida del acelerómetro en otra inferior.
- b) Amplificar la señal de entrada, relativamente débil, del acelerómetro cuando los instrumentos que le siguen no poseen una sensibilidad suficientemente alta. En este caso, existen dos posibilidades de amplificación representadas por:
  - los amplificadores de voltaje.
  - los amplificadores de carga.

Los primeros actúan presentando la máxima resistencia posible al acelerómetro y manteniendo baja la capacidad de entrada, para evitar pérdidas de sensibilidad. Los segundos presentan valores elevados de capacidad y de resistencia de entrada, por lo que no altera las características de sensibilidad.

## TRANSDUCTORES DE VELOCIDAD: DINAMO TACOMETRICO.

El modo más simple de calcular la velocidad de un cuerpo rígido es el de medir el desplazamiento de uno de sus puntos en un cierto tiempo, ó el calcular el tiempo necesario para que uno de sus puntos recorra un determinado espacio.

Entre los transductores de velocidad se encuentra la dínamo tacométrica, el codificador (encoder), y el resolucionador sincro (synchro resolver). Siendo el transductor que se analizará en ésta práctica el primero en mención.

Dínamo Tacométrica. Para la medición de velocidades angulares se utilizan con frecuencia las dínamos tacométricas.

En ellas, el campo magnético se obtiene por lo general por medio de un imán permanente de herradura con 2 piezas polares entre sus ramas. La espira del inducido, situada en el entrehierro, gira a una velocidad angular  $\omega$ . Dicha espira es atravesada por un flujo magnético que varía según la relación  $\Phi = \Phi_0 \cos \omega t$ ; por lo que la tensión en sus extremos resulta ser :  $e = \Phi_0 \omega \sin \omega t$  cuyo valor máximo es proporcional a la velocidad angular. Lo anterior se muestra en la figura 5.

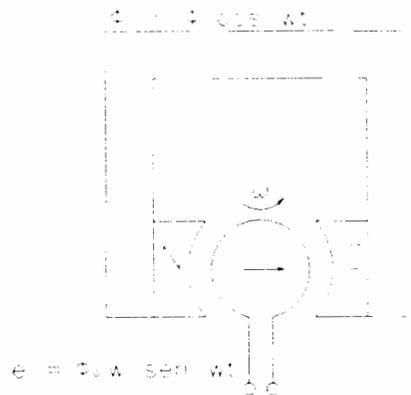


Figura 5

Realmente la dínamo está construída por un estator donde está el imán y por un rotor, en el que están arrolladas  $N$  espiras, separadas entre sí por un ángulo eléctrico cuyo valor es de  $2\pi/N$ .

La señal de salida se obtiene a través de 2 escobillas que, del colector, se obtienen los voltajes senoidales.

Constante Tacométrica. Es parámetro fundamental que caracteriza una dínamo tacométrica el cual indica la variación de voltaje por radianes/segundo. Para la dínamo utilizada, la constante tacométrica es de 14.5 mV/rpm.

$$K_T = \frac{60V}{2\pi N}$$

donde:

$N$  - Valor nominal del número de revoluciones por minuto (rpm)

$V$  - Voltaje nominal (Volts)

$K_T$  - Constante tacométrica ( $V/\text{rad } s^{-1}$ )

Los valores que normalmente proporciona el fabricante son  $N$  y  $V$ .

## LINEALIDAD

La linealidad referida al valor de plena escala está dada por:

$$\text{linealidad} = \left( \pm \frac{1}{2} \right) \frac{|V_1 - V_2|}{F.S.O.}$$

Este valor se expresa normalmente en porcentaje. El término F.S.O. indica la salida a plena escala (Full Scale Output), es decir, la variación de voltaje que sufre la salida cuando la aceleración varía según la cantidad igual al valor total de su escala y V1 y V2 son los valores de voltaje máximo y mínimo respectivamente cuando el valor de la aceleración está a plena escala. En este caso la linealidad especificada por el fabricante es de 0.2 %.

## DESCRIPCION DEL EQUIPO.

El equipo consta de dos partes principales:

- Unidad MIL 28.
- Acondicionadores de señal

### Unidad MIL 28

La unidad MIL 28, ilustrada en la figura 6, está constituida por un mecanismo de transmisión 'biela-manivela' para generar la aceleración, por un motor de cc, una dínamo tacométrica y un sistema óptico para generar y determinar la velocidad angular, respectivamente.

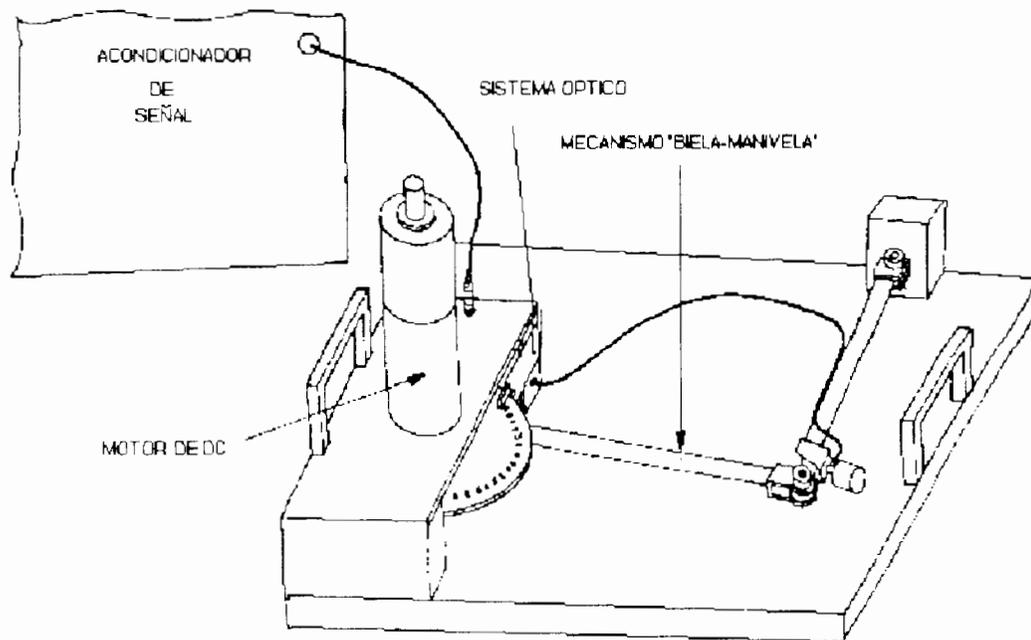


Figura 6

El motor de cc de imanes permanentes se utiliza para generar la rotación de la dínamo tacométrica y del mecanismo 'biela-manivela'. La velocidad máxima del motor sin el acoplamiento de la biela es de 3200 rpm con un voltaje de alimentación de aproximadamente 22 V.

Cuando se usa el mecanismo de la 'biela-manivela', éste presenta una fuerte carga dada por los movimientos extremos de la biela (puntos muertos) por lo que el motor sólo puede alcanzar una velocidad máxima de 600 rpm (4.5 V de alimentación y hasta 1.5 A).

Por lo anterior, para analizar la dínamo tacométrica en todo el campo de velocidades, se tiene que desacoplar el mecanismo de la biela del disco al cual esta atornillado.

Mecanismo de 'biela-manivela' para generar la aceleración.

Para obtener la relación que vincula la velocidad del motor con la aceleración a la que está sometido el acelerómetro, éste se coloca al pie de la biela y se considera que su movimiento es a lo largo de la recta Po y P1, es decir, punto muerto exterior e interior respectivamente, esto se ilustra en la figura 7.

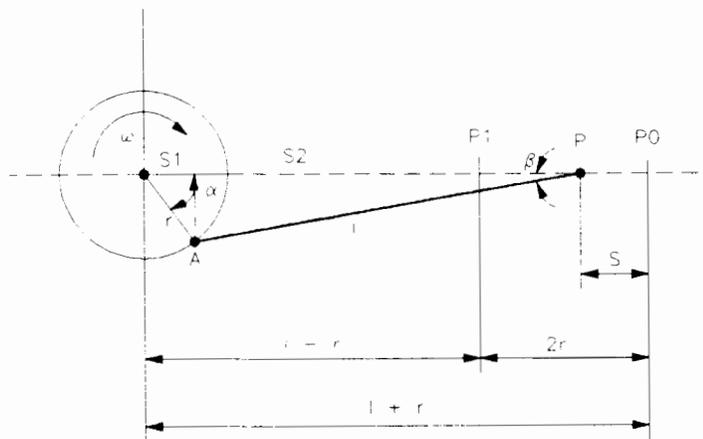


Figura 7.

Por otro lado, la fracción del recorrido del pie de la biela cuando la manivela gira en sentido horario un ángulo  $\alpha$  desde el punto muerto exterior, es:

$$S = P_0 - P = r + l - (s_1 + s_2)$$

esto es:

$$S = r + l - r \cos \alpha - l \cos \beta$$

$$S = r(1 - \cos \alpha) + l(1 - \cos \beta)$$

Aplicando las dos siguientes identidades trigonométricas:

$$\frac{\sin \beta}{\sin \alpha} = \lambda$$

siendo  $\lambda = \frac{r}{l}$

y

$$\cos \beta = \sqrt{(1 - \text{sen}^2 \beta)}$$

se obtiene:

$$\cos \beta = \sqrt{(1 - \lambda^2 \text{sen}^2 \alpha)}$$

completando cuadrados de:

$$(1 - \lambda^2 \text{sen}^2 \alpha) = \left(1 - \frac{\lambda^2}{2} \text{sen}^2 \alpha\right)^2 - \frac{\lambda^4}{4} \text{sen}^4 \alpha$$

por lo que:

$$\cos \beta = \sqrt{\left(1 - \frac{\lambda^2}{2} \text{sen}^2 \alpha\right)^2 - \frac{\lambda^4}{4} \text{sen}^4 \alpha}$$

y considerando que:

$$\frac{\lambda^4}{4} \text{sen}^4 \alpha \approx 0$$

$$\cos \beta = 1 - \frac{\lambda^2}{2} \text{sen}^2 \alpha$$

y por tanto, la expresión del desplazamiento s queda:

$$S = r (1 - \cos \alpha) + l \left(\frac{\lambda^2}{2} \text{sen}^2 \alpha\right)$$

o bien:

$$S = r \left[ (1 - \cos \alpha) + \frac{\lambda}{2} \text{sen}^2 \alpha \right]$$

Esta ecuación representa el desplazamiento del pie de la biela, la cual si se deriva con respecto al tiempo y considerando  $\alpha = \omega t$ , se obtiene la ecuación de la velocidad del pie de la biela, esto es:

$$S = r - r \cos \omega t + \frac{r\lambda}{2} \text{sen}^2 \omega t$$

$$V_p = \frac{dS}{dt} = \left[ -r (-\text{sen} \omega t) (\omega) \right] + \frac{r\lambda}{2} \left[ 2 \text{sen} \omega t (\cos \omega t (\omega)) \right]$$

Simplificando, se obtiene la expresión de la velocidad:

$$V_p = r \omega \left( \text{sen} \alpha + \frac{\lambda}{2} \text{sen} 2\alpha \right)$$

y volviendo a derivar  $V_p$  con respecto al tiempo se obtiene la aceleración del pie de la biela:

$$V_p = r \omega \operatorname{sen} \omega t + \frac{\lambda r \omega}{2} \operatorname{sen} 2 \omega t$$

$$Q_p = \frac{dV_p}{dt} = r \omega \left[ \cos \omega t (\omega) \right] + \frac{\lambda r \omega}{2} \left[ \cos 2 \omega t (2 \omega) \right]$$

Simplificando, se obtiene la expresión de la aceleración:

$$Q_p = r \omega^2 \left( \cos \alpha + \lambda \cos 2 \alpha \right),$$

Evaluando  $Q_p$  en los puntos muertos exterior ( $\alpha = 0$ ) e interior ( $\alpha = 180$ ), y considerando  $\omega = 2 \Pi N$ ,  $K = (2 \Pi / 60)^2 r$  se tiene:

$$Q_{p \alpha 0} = N^2 \left( \frac{2 \Pi}{60} \right)^2 r \left( 1 + \frac{r}{l} \right) \quad [m s^{-2}]$$

$$Q_{p \alpha 180} = -N^2 \left( \frac{2 \Pi}{60} \right)^2 r \left( 1 - \frac{r}{l} \right) \quad [m s^{-2}]$$

$$Q_{p \alpha 0} = N^2 K \left( 1 + \frac{r}{l} \right)$$

$$Q_{p \alpha 180} = -N^2 K \left( 1 - \frac{r}{l} \right)$$

donde:

$N$  = número de rpm del motor

$r$  = 5.5 cm - radio de la manivela (en metros)

$l$  = 50 cm - longitud de la manivela (en metros)

La aceleración entre los puntos extremos queda dada por:

$$Q_p = Q_{\alpha 0} - Q_{\alpha 180}$$

que es la ecuación que relaciona la aceleración del pie de la biela (o bien la del acelerómetro) y la velocidad del motor en los puntos muertos exterior e interior.

Evaluando la aceleración  $Q_p$  en los puntos interior y exterior, se tiene que:

$$Q_p = 2 n^2 603 * 10^{-6} \quad [m s^{-2}]$$

y la aceleración (g) estará dada por:

$$g = \frac{Q_p}{9.81} \quad [ \text{unidad de aceleración} ]$$

Evaluando  $Q_{\alpha 0}$ ,  $Q_{\alpha 180}$  y  $Q_p$  a una aceleración de 600 rpm:

$$Q_{\alpha 0} = 246.8 \text{ m s}^{-2} = 26.1 \text{ g} \quad \Rightarrow \quad Q_{\alpha 0} = 2.61 \text{ V}$$

$$Q_{\alpha 180} = -177.28 \text{ m s}^{-2} = -18.07 \text{ g} \quad \Rightarrow \quad Q_{\alpha 180} = -1.8 \text{ V}$$

$$Q_p = Q_{\alpha 0} - Q_{\alpha 180} = 434.08 \text{ m s}^{-2} = 44.24 \text{ g} \quad \Rightarrow \quad Q_p = 4.42 \text{ V}$$

### Acondicionador de Señal

El acondicionador de señal, módulo G28, se muestra en la figura 8, esta dividido en tre partes principales:

- Sistema óptico para determinar la velocidad angular.
- Acondicionador de la dínamo tacométrica.
- Acondicionador para el acelerómetro.
- Circuito para determinar la velocidad angular

En la unidad MIL 28 está acoplado al eje del motor de cc un disco con 60 perforaciones, las cuales se encuentran dispuestas en forma radial. Un sistema óptico genera un pulso en presencia de cada perforación del disco. Dichos pulsos son enviados al módulo G28 a través del cable de interconexión y detectados en el borne 7. La señal de pulsos pasa a un comparador y a través del diodo D se fija la amplitud de los pulsos, por un lado a C-MOS compatible y por otro, mediante el transistor T y el diodo zener Z se obtiene la salida TTL compatible.

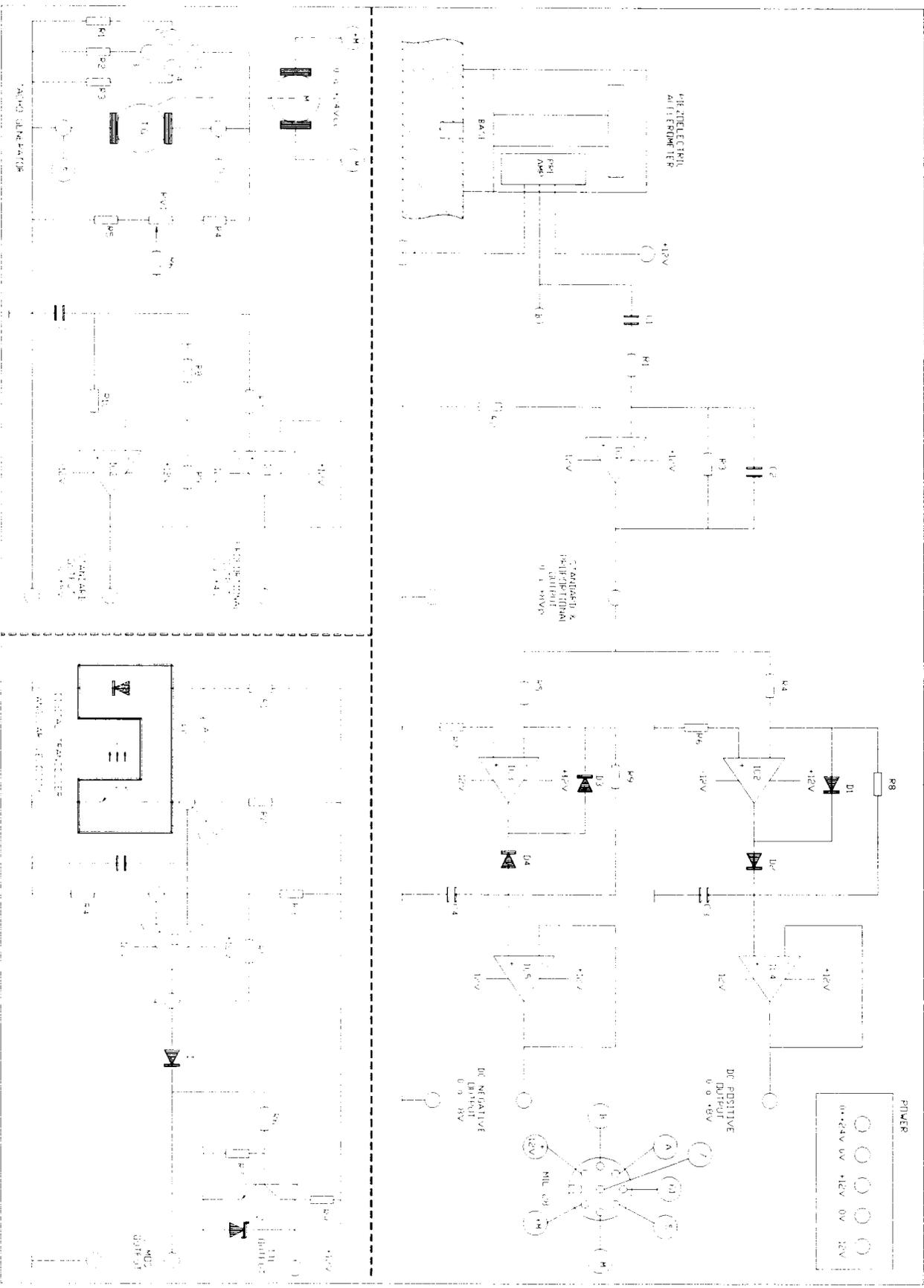
### Acondicionador de la Dínamo Tacométrica

Consiste en un divisor de voltaje (R4, R5 y RV1) para poder aplicar los voltajes de la dínamo tacométrica a los operacionales IC1 e IC2, los cuales funcionan como seguidor y amplificador de voltaje para obtener una salida proporcional de 4000rpm = 4V, o bien, estandard de 4000rpm = 8V respectivamente.

Acondicionador de señal para el Acelerómetro

La señal proveniente del acelerómetro se preamplifica ahí mismo y pasa al acondicionador, aquí el capacitor C1 elimina la componente de directa presente en la salida del preamplificador, de aquí pasa al amplificador operacional IC1, el cual amplifica la señal para obtener una salida de 8Vpp y además actúa como filtro de altas frecuencias.

Los amplificadores operacionales IC2 e IC3 detectan las vibraciones en el campo positivo y negativo repectivamente, mientras que IC4 e IC5 conectados como seguidores de voltaje funcionan como elementos de acoplamiento para el instrumento de medición.



## **OBJETIVO**

- Familiarizar al alumno con los transductores de aceleración y velocidad angular.
- Trazar la recta de cada transductor y obtener el modelo matemático de cada transductor.
- Obtener el valor de la linealidad del sistema transductor - acondicionador.
- Determinar el valor de la constante tacométrica, es decir, la cifra que indica la variación de tensión en función del número de rpm.

—

## **MATERIAL EMPLEADO**

- Osciloscopio.
- Frecuencímetro.
- Fuente voltaje (PS1).
- Vóltmetro digital.
- Unidad MIL-28.
- Módulo G28.

—

## **DESARROLLO**

### **EXPERIMENTO 1: DETERMINACIÓN DE LA CURVA CARACTERÍSTICA "ACELERACIÓN-TENSIÓN", SALIDA STANDAR & PROPORCIONAL.**

En el panel del módulo G28 correspondiente al acondicionador de señales de los transductores, realizar las siguientes conexiones:

- Conectar los bornes de +12V, -12V y 0-24 V (variable), con sus respectivas tierras, del panel a una fuente de alimentación estable PS1 (NOTA: Asegurarse que la fuente variable esté en 0V y que esté apagada).
- Conectar el módulo G28 a la unidad MIL-28 por medio del cable correspondiente, como se muestra en la figura 6.
- Conectar el frecuencímetro entre el borne marcado C-MOS y el borne de tierra, situándolo en la posición 1 SEC, de modo que pueda leerse directamente la velocidad del motor en rpm.
- Verificar el cableado y encender la fuente.

- Aumentar el voltaje de alimentación del motor (de la fuente de 0 - 24 V) desde 0 V, de forma que el motor gire a velocidades crecientes con saltos indicativos de aproximadamente 50 rpm. La velocidad máxima que se puede alcanzar el motor con la biela es de 600 rpm.
- Medir con el osciloscopio el voltaje Standard y Proporcional con el multímetro la Salida positiva de ( $\alpha_0$ ) y la Salida negativa de ( $\alpha_{180}$ )

RPM <sup>1</sup>	Salida Estandard Proporcional <sup>2</sup>	Salida CD Positiva ( $Q_{\alpha 0}$ ) <sup>3</sup>	Salida CD Negativa ( $Q_{\alpha 180}$ ) <sup>4</sup>
0			
50			
100			
200			
300			
400			
500			
600			

Tabla 1

- 1 Medición en el frecuencímetro.
- 2 Medición en el osciloscopio.
- 3 y 4 Mediciones con el vóltmetro digital.

**EXPERIMENTO 2: DETERMINACIÓN DE LA CURVA CARACTERÍSTICA VELOCIDAD ANGULAR - VOLTAJE DEL TRANSDUCTOR**

**NOTA:**

Para poder abarcar todo el rango de operación del transductor de velocidad, es muy importante desacoplar la biela-manivela del mecanismo de rotación, quitando el tornillo que une el disco y la biela.

- Conectar los bornes de +12V, -12V y 0-24 V (variable), con sus respectivas tierras, del panel a una fuente de alimentación estable PS1 (NOTA: Asegurarse que la fuente variable esté en 0V y que esté apagada).
- Conectar el módulo G28 a la unidad MIL-28 por medio del cable correspondiente, como se muestra en la figura 6.
- Conectar el frecuencímetro entre el borne C-MOS y el borne de tierra.
- Verificar las conexiones y encender la fuente.
- Variar la velocidad del motor, mediante el voltaje de la fuente variable a partir de cero, con saltos indicativos en el frecuencímetro de 100 rpm y en correspondencia con cada uno de dichos saltos, medir con el vóltmetro digital los siguientes puntos:
  - Salida Standard
  - Salida Proporcional

- Salida del tacogenerador (en los bornes 5-6)
  - a) En vacío (sin carga)
  - b) Con carga R1 (conectando bornes 1-2)
  - c) Con carga R2 (conectando bornes 1-3)
  - d) Con carga R3 (conectando bornes 1-4)

— Registrar los datos generados en la Tabla 2.

RPM	Salida Estandar	Salida Proporcional	Salida del Tacogen. (vacío)	Salida del Tacogen. (carga R1)	Salida del Tacogen. (carga R2)	Salida del Tacogen. (carga R3)
0						
100						
200						
300						
2900						
3000						

Tabla 2

**ANALISIS DE DATOS Y RESULTADOS**

1. Calcular los valores teóricos de  $Q_{\alpha 0}$ ,  $Q_{\alpha 180}$ , g y el voltaje correspondiente a la aceleración g.
2. Con base a los cálculos del punto anterior, graficar la curva teórica que caracteriza al transductor de aceleración, esto es, V vs aceleración.
3. Con base a los datos de la tabla I, calcular la aceleración g y graficar la curva real en la misma gráfica del punto 2.
4. Con base a las gráficas teórica y real del transductor de aceleración, determine la linealidad del transductor-condicionador en ambos casos.
5. Determinar el modelo matemático del transductor de aceleración incluyendo el error máximo de operación.
6. Analizar y explicar el funcionamiento del acondicionador de señales del transductor de aceleración.
7. Con base a los datos de la tabla II, grafique las diferentes curvas características del transductor de velocidad, teniendo en el eje de las abscisas los valores de rpm y en el eje de las ordenadas los voltajes de la dínamo tacométrica en vacío y con cada una de sus cargas, así como el voltaje en la salida estándar y proporcional.
8. Explique cada una de las curvas del punto anterior, mencionando como afectan las cargas en la respuesta.
9. Determinar la constante tacométrica  $K_T$ , interpretarla y comparala con la especificada con el fabricante.

10. Determinar la linealidad del transductor de velocidad y comparela con la que especifica el fabricante.
11. Expresar el modelo matemático de dicho transductor.
12. Analizar y explicar el funcionamiento del acondicionador de señal del transductor de velocidad, así como el circuito detector de rpm.
13. Investigue y presente una aplicación de los transductores utilizados en la práctica.



## CODIFICADOR INCREMENTAL

### Transductores de posición

Los transductores de posición son dispositivos que convierten una magnitud física de posición en otra magnitud que generalmente es una señal eléctrica. Se pueden clasificar en dos grupos principales: **Analógicos y Digitales**.

Dentro de los analógicos se encuentran los potenciométricos, los sincros, los resolver, los inductosyn y los micros<sup>1</sup>.

Los transductores de posición digitales o numéricos convierten posiciones angulares y desplazamientos lineales en una representación numérica; éstos se subdividen en dos clases:

- a) Transductores de posición numéricos del tipo absoluto llamados codificadores absolutos. En ellos está codificado (en código Gray, BCD o binario) cada uno de los incrementos de posición, a partir de una referencia que es cero, de modo que la posición puede ser determinada directamente. En la figura 1 se muestra un disco codificado en código Gray de 16 posiciones.

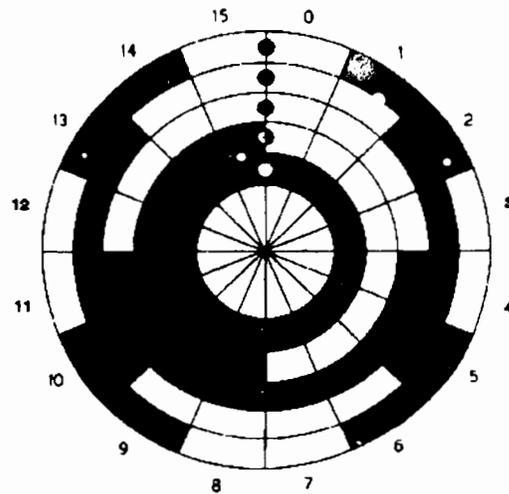


Figura 1

- b) Transductores de posición numéricos del tipo incremental, llamados codificadores incrementales y son el objetivo de estudio de esta práctica. En estos no se tiene una referencia para todos los puntos, sino que cada posición constituye un origen para el siguiente punto.

El principio de funcionamiento de los codificadores incrementales se basa en proporcionar en su salida una serie de pulsos, donde cada pulso corresponde a un desplazamiento mecánico, que puede ser de un disco o una varilla, para desplazamientos angulares o lineales respectivamente.

<sup>1</sup> Para más detalles sobre estos transductores, ver la Práctica de Aceleración y Velocidad.

Tanto el disco como la varilla están divididos en sectores equidistantes y girando (o desplazándose) delante de un dispositivo de lectura fijo produce una señal eléctrica en correspondencia con cada sector. La figura 2 muestra los elementos móviles, angular y lineal del codificador incremental.

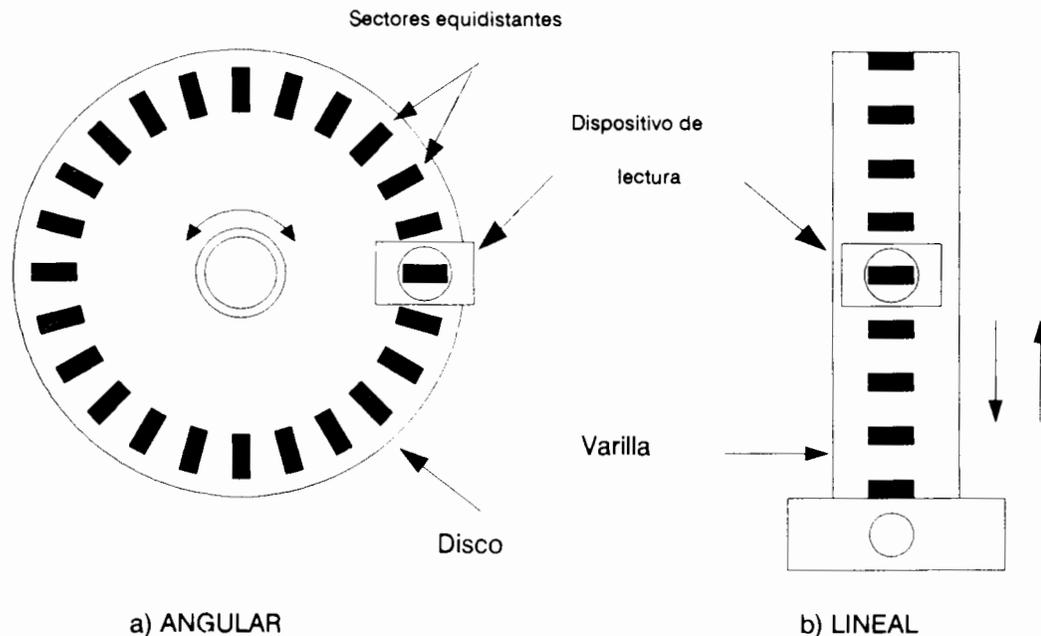


Figura 2

Los codificadores incrementales se acoplan a un contador para obtener una señal proporcional a la posición registrada, de esta forma la señal puede expresarse en forma digital siendo los pulsos de salida de forma cuadrada. Sin embargo, no se logra lo anterior con el dispositivo de lectura por lo que se tiene que incluir un cuadrador de señal después del de lectura.

Los codificadores incrementales más usados utilizan dispositivos de lectura fotoeléctricos. En este caso el disco (o la varilla) está constituido por sectores opacos que se alternan con sectores transparentes.

El dispositivo de lectura está compuesto por un par emisor de luz - detector de luz (un led y un fototransistor) colocados como se muestra en la figura 3.

Cuando un sector transparente se intercala entre la fuente luminosa y el detector de luz, la señal que se obtiene a la salida del detector es máxima, contrariamente, cuando se interpone un sector opaco la salida es mínima. En las posiciones intermedias se obtienen valores de iluminación del detector también intermedios, por lo que la onda de salida es senoidal.

Para obtener una señal numérica, del tipo 1/0 a partir de la señal senoidal se utiliza un circuito cuadrador que proporcione una salida numérica de 1 cuando se pase por un sector transparente, y un 0 cuando pase por un sector opaco.

El sistema de lectura del codificador utilizado en la práctica consta de dos discos, uno fijo y el otro móvil, y tres emisores-detectores, esto con el fin de poder tener mayor discriminación de los sectores transparentes y opacos. La disposición esquemática es la que se muestra en la figura 4.

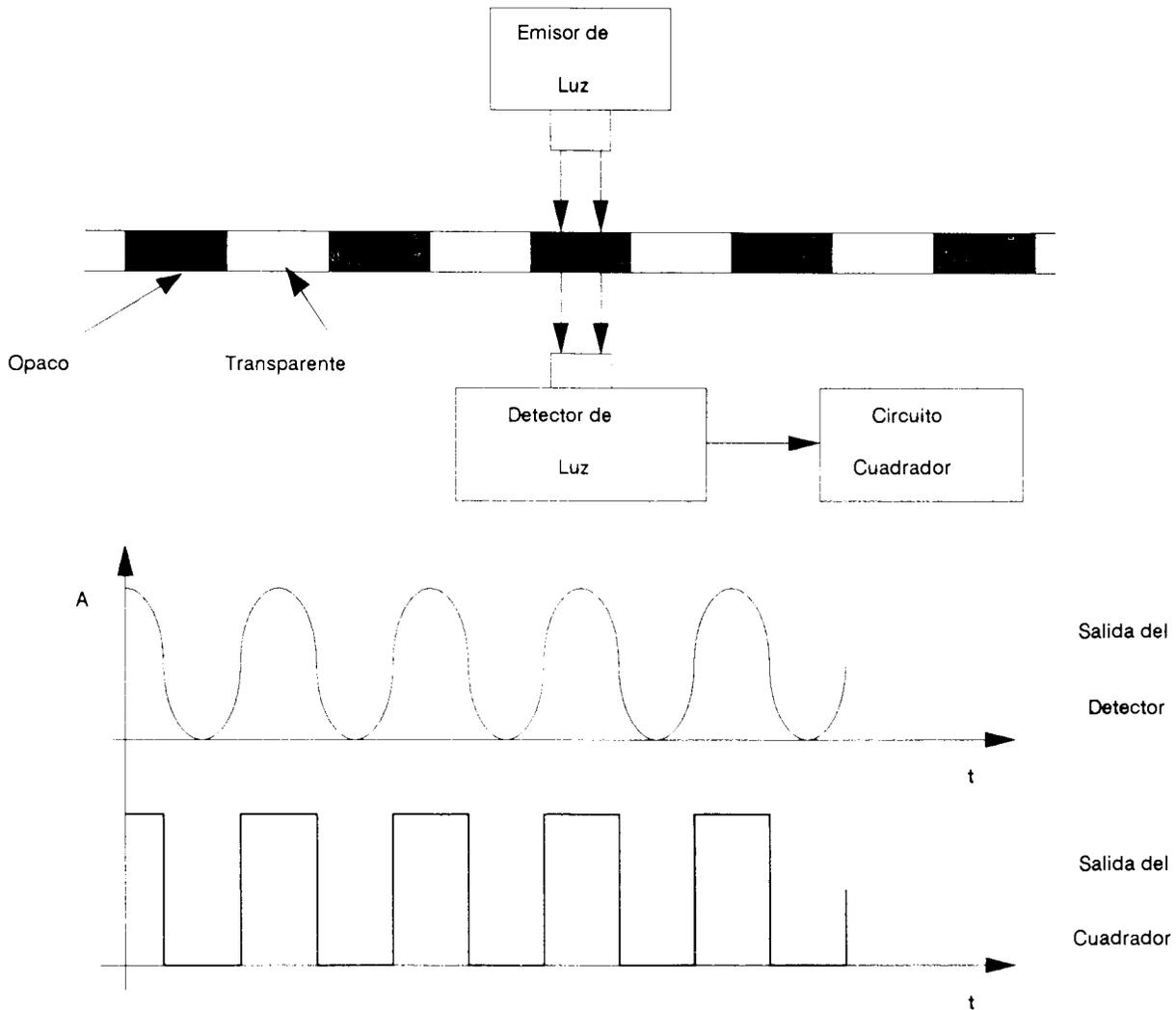


Figura 3

El par emisor-detector 1 se utiliza de referencia, ya que los sectores opacos y transparentes quedan alineados en ambos discos, proporciona 250 pulsos por revolución. Con el par 2 se obtiene una señal defasada  $90^\circ$  con respecto al par 1, esto es, si la señal 2 está atrasada con respecto a la señal 1  $90^\circ$ , corresponderá a un sentido de rotación horario y viceversa; y el par 3 suministra un pulso por cada revolución cuando el sector transparente del disco móvil coincide con el correspondiente del disco fijo.

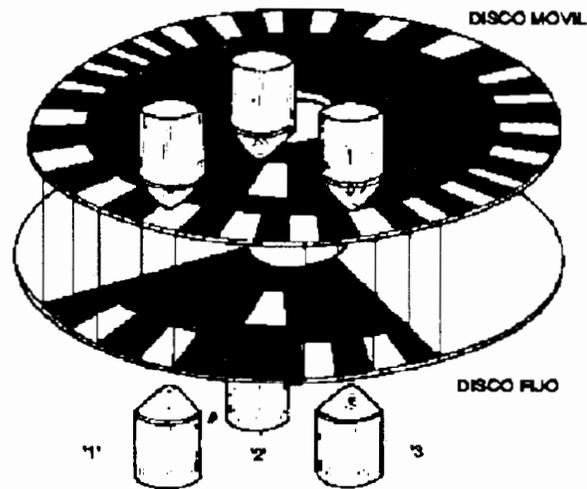


Figura 4

## DESCRIPCION DEL EQUIPO

El codificador incremental completo consta básicamente de dos partes: la parte mecánica, que corresponde al sistema de pares emisor-detector, cuyo principio de funcionamiento se detalló anteriormente, y la parte electrónica que corresponde al circuito de control y visualización (módulo etiquetado F09) que se muestra en la figura 5.

Para su funcionamiento se debe conectar el codificador al conector *Encoder* del módulo F09. El sistema también puede o no conectarse directamente a una computadora a través de los puertos *Computer A/B* y *Computer C/D* para procesamiento y análisis de datos.

Dependiendo de las conexiones realizadas, el módulo F09 realiza tres funciones principales que son:

- Acondicionador de señal para el transductor de posición angular.
- Frecuencímetro.
- Determinación de la velocidad de un motor de cc.

En la figura 6 se muestra el diagrama de bloques del módulo F09, el cual consta de tres grupos fundamentales:

- De interfase con el codificador
- De conteo y visualización
- De oscilador - base de tiempos.

### Interfase con el codificador

Los pulsos provenientes de los pares emisor-detector del codificador llegan a los puntos *CH A*, *CH B* y *CH R*, con una amplitud de 12 V (compatibles CMOS) los cuales son filtrados mediante un filtro paso bajas y posteriormente pasan a un circuito cuadrador.

A la salida del filtro-cuadrador se tiene por un lado, un sistema de conversión CMOS/TTL que convierte las señales del codificador en TTL compatibles y permite enviarlas a la computadora, y por otro lado a los tres circuitos siguientes:

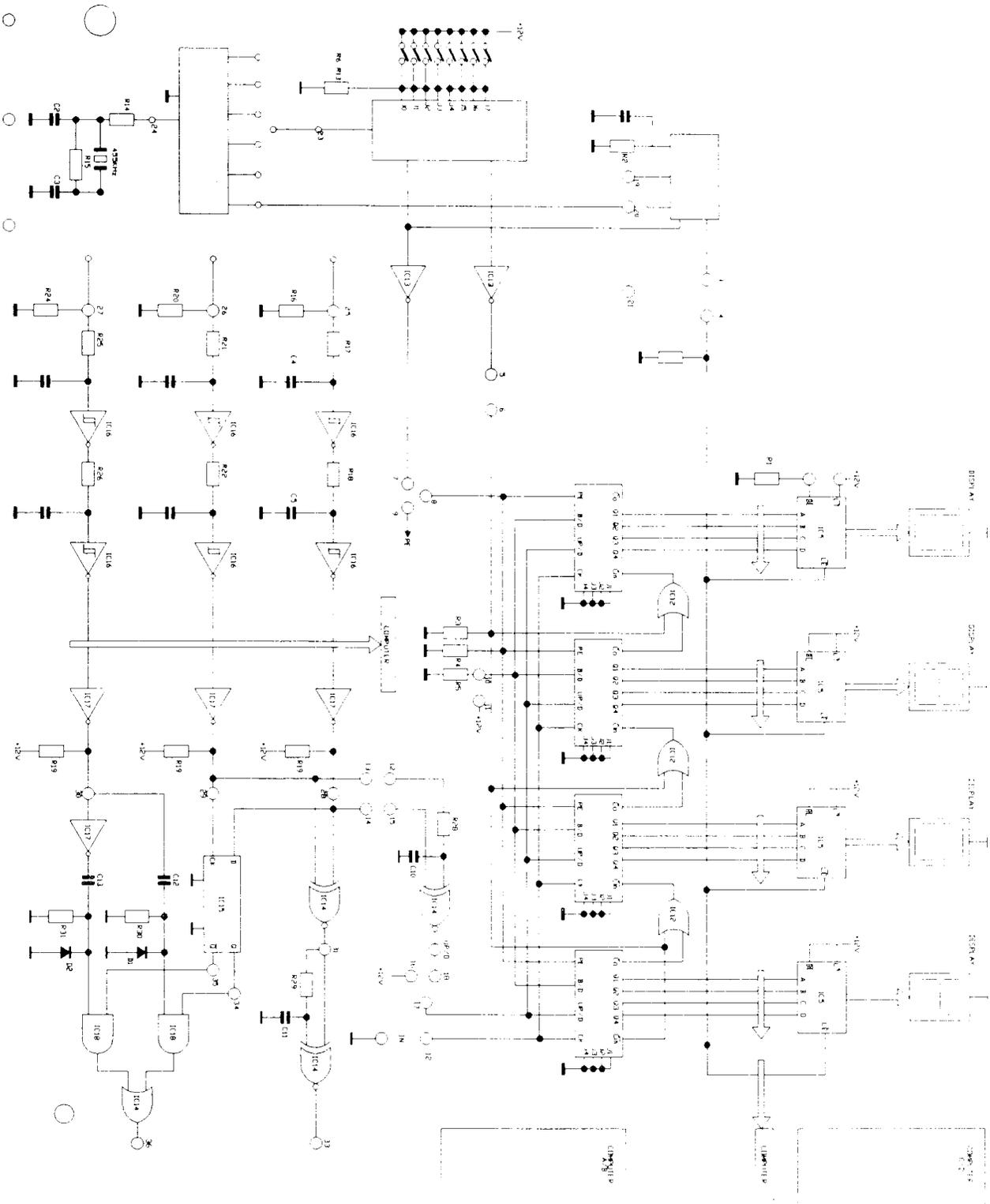


Figura 5

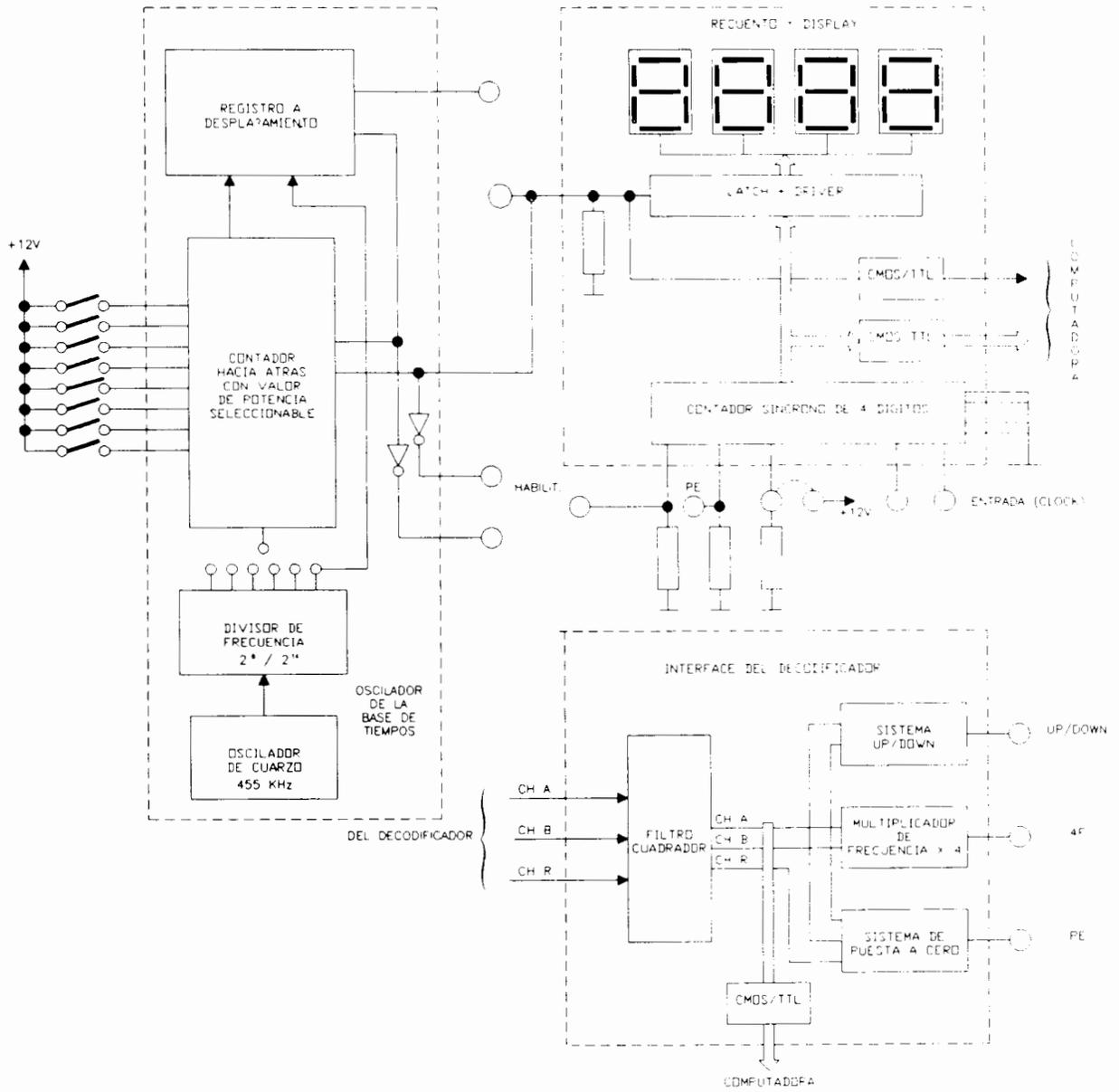


Figura 6

**Multiplicador de frecuencia.** Este multiplica por cuatro el número de pulsos de las señales  $A$  y  $B$  que provienen del codificador, por lo que aumenta su resolución. En el borne 31 se tendrá una señal de frecuencia doble y en el borne 33 una frecuencia cuádruple con respecto a la del codificador.

**Conteo UP/DOWN, hacia adelante y hacia atrás (sentido de rotación).** Este circuito activa el sentido de rotación. En un sentido, conectando la señal  $A$  mediante los bornes 14 a 15 y la señal  $B$  a través de los bornes 12 a 13; y en el otro sentido, cruzando la conexiones, es decir, la señal  $A$  del borne 14 al 13 y la señal  $B$  del borne 12 al 15. La señal hacia arriba o hacia abajo se tendrá en el borne 18.

**Señal de posición de cero (Reset) del codificador.** A partir de la señal  $CHR$  se genera un pulso positivo cuando el codificador pasa por cero. En el borne 36 se tiene un pulso positivo  $PE$  cada vez que el codificador pasa por cero.

### Conteo y Visualización

Este circuito tiene la función de contar y presentar los pulsos provenientes de los circuitos de interfase del codificador. Este grupo está constituido por cuatro contadores síncronos (IC2, IC4, IC6 e IC8) conectados en paralelo, en configuración de reloj. A través de IC8 se aplican los pulsos provenientes del borne 33 correspondientes a 4F o de una fuente externa en el caso de que se utilice como frecuencímetro. El conteo se realiza hacia arriba o hacia abajo dependiendo de la conexión, a través del borne 18 a 17.

Si se utiliza como frecuencímetro o medidor de velocidad, el conteo tiene que ser positivo, por lo que un voltaje de +12V se aplica a la entrada del circuito de conteo, es decir, se conecta el borne 16 a 17.

El conteo normal se realiza en modo decimal (BCD), sin embargo, si se aplica un voltaje de +12V a la entrada B/D de los contadores, éstos contarán en binario (hexadecimal), conexión borne 10 a 11.

Si en las entradas  $PE$  de los contadores (borne 8) se les aplica un voltaje lógico 1, los contadores cargan el dato de dígito cero.

Con una señal de valor lógico 0 a la entrada  $\overline{CI}$  de los contadores (borne 6) se habilita el conteo en los contadores conectados en cascada.

Las salidas de los contadores pasan por un lado a un sistema de decodificación que sirve para el control del display de 7 segmentos y por otro lado a un sistema de conversión CMOS/TTL para poder enviar los datos a una computadora.

Cuando las entradas  $\overline{LE}$  del circuito de decodificación (borne 4) están a un potencial bajo, los datos pasan directamente a los despliegues.

### Oscilador - Base de tiempos

Cuando se utiliza el módulo F09 como frecuencímetro o como medidor de velocidad de un motor de c.c., se requiere de una base de tiempos, es decir, una señal que habilite el conteo en un cierto tiempo establecido previamente, de una señal de almacenamiento de datos y de reset de los contadores.

La base de tiempos se obtiene mediante un oscilador el cual es controlado por un cuarzo Q que funciona a la frecuencia de 455 kHz. La salida del oscilador pasa a un divisor de frecuencia cuyas salidas se obtienen con la siguiente relación:

$$f_{Qn} = \frac{f_Q}{2^n}$$

donde:  $f_Q$  es la frecuencia del oscilador, 455 KHz

$$n = 8, 9, \dots 14$$

Para  $n = 8$

$$f_{Q8} = \frac{f_Q}{2^8} = \frac{455 \cdot 10^3}{256} = 1777.3$$

La frecuencia requerida se obtiene del divisor mediante un puente físico colocado en la parte posterior del panel, para enviarse posteriormente a un contador IC10 cuya salida  $\overline{CO/ZD}$  se transfiere a Q1 del registro de desplazamiento IC9.

En el borne 24 se tiene la frecuencia del oscilador y en el borne 23 la salida del divisor de frecuencia.

Las salidas del contador y del registro de desplazamiento son comandos de control para la transferencia de datos de los drivers a los displays.

El contador cuenta hacia atrás a partir del valor preseleccionado en los interruptores a fin de obtener el tiempo de muestreo  $T_m$ , el cual se desea sea lo mas alto posible.

El tiempo de muestreo se obtiene de la siguiente relación:

$$T_m = \frac{C}{f_{Qn}}$$

donde:  $C$  es el valor inicial del contador fijado en los interruptores.

$f_{Qn}$  es la frecuencia a la salida del divisor de frecuencias.

La Tabla 1 muestra los diferentes parámetros para la medición de frecuencia externa. Para otras frecuencias de la base de tiempos, el valor del contador se determina a partir de la ecuación anterior, fijándose un determinado tiempo de muestreo.

Tiempo de Muestreo (seg)	Frecuencia (Hz)	Conexión del Puente	Valor del Contador	Rango de Medida (Hz)
1.0	111.1	Q12	111	10 - 999
0.1	887.7	Q09	89	100 - 9999
0.1	1777.3	Q08	178	100 - 9999

Tabla 1

## OBJETIVOS

- Conocer los diferentes tipos de transductores de posición angular y en especial el codificador incremental.
- Analizar el acondicionador de señales del transductor utilizado.
- Utilizar el codificador como contador
- Obtener la precisión del codificador.
- Utilizar el acondicionador como medidor de velocidad angular y de frecuencia.

## EQUIPO Y MATERIAL

- Unidad F09 y TYF09
- Fuente de alimentación PS1
- Frecuencímetro
- Osciloscopio
- Transductor de aceleración y velocidad, unidad G28 y TY28
- Motor de 12 V
- Cables de conexión

## DESARROLLO

### EXPERIMENTO 1. ANALISIS DE LAS SEÑALES CODIFICADOR - INTERFACE

- Conectar los bornes de alimentación de 12V y tierra del módulo F09 a una fuente de alimentación (**sin encenderla**).
- Hacer las conexiones indicadas en la figura 7.
- Conectar el codificador mediante el cable apropiado al conector *ENCODER* del módulo F09.
- Verificar las conexiones y encender la fuente.
- Variar la posición de codificador en sentido horario y observar en el osciloscopio las señales en los bornes indicados en la Tabla 2, e indicar las características de la señal obtenida en cada uno de los bornes.

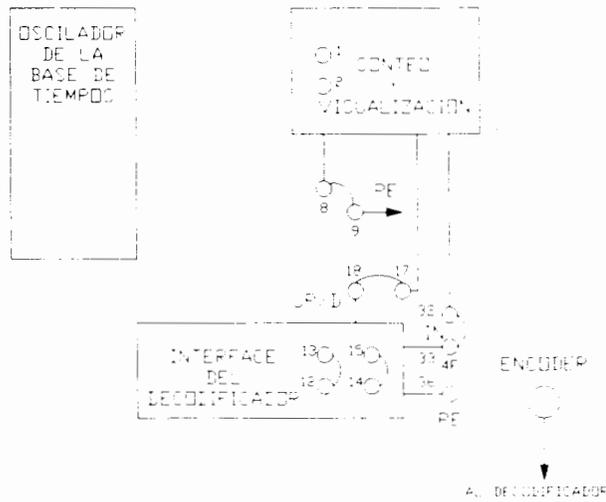


Figura 7

Canal A	Canal B
28	29
28	30
28	31
28	33

Tabla 2

### EXPERIMENTO 2. OPERACION DEL CONTADOR-VISUALIZADOR

- Conectar los bornes de alimentación de 12V y tierra del módulo F09 a una fuente de alimentación (**sin encenderla**).
- Conectar el codificador mediante el cable apropiado al conector *ENCODER* del módulo F09.
- Hacer las conexiones indicadas en la figura 7, excepto que se desconecta el borne 18 del 17.
- Verificar las conexiones y encender la fuente.
- Hacer girar el codificador y observar el conteo en el display cuando se conecta a +12V el borne 17 y cuando se conecta a tierra el borne 17.
- Conectar ahora los bornes 12 - 15 y 13 - 14. Volver a observar el conteo.
- Conectar los bornes indicados en la Tabla 3 y observar e indicar el efecto que repercute en la visualización.

Bornes de Conexión	Función que Realiza
1 - 2	-
1 - 4	
1 - 6	
1 - 8	
10 - 11	

Tabla 3

### EXPERIMENTO 3. PRECISION DEL CODIFICADOR

- Conectar los bornes de alimentación de 12V y tierra del módulo F09 a una fuente de alimentación (**sin encenderla**).
- Conectar el codificador mediante el cable apropiado al conector *ENCODER*.
- Hacer las conexiones indicadas en al figura 7, pero desconectar los bornes 8 - 9 y conectar ahora el 1 - 2.
- Verificar las conexiones y encender la fuente.
- Poner el indicador en cero, mediante la conexión **momentánea** del borne 8 al 11.
- Girar el codificador en sentido horario, 9 revoluciones exactamente y anotar la lectura del display.
- Volver a poner el indicador en cero y girar nuevamente el codificador en sentido antihorario, 9 revoluciones exactamente y anotar la lectura del display.

### EXPERIMENTO 4. MEDICION DE FRECUENCIA

- Conectar los bornes de alimentación de 12V y tierra del módulo F09 a una fuente de alimentación (**sin encenderla**).
- Hacer las conexiones de la figura 8. Seleccionar la frecuencia de 1778 Hz en la base de tiempos y fijar los interruptores del contador en el número 178.



Figura 8

- Aplicar al borne 32 una señal cuadrada de amplitud +10V (con nivel de cc para que siempre sea positiva) y frecuencia de 5000 Hz
- Verificar las conexiones y encender la fuente.
- Anotar la lectura del display

- Colocar el puente en Q12 y los interruptores del contador en 111.<sup>2</sup>
- Registre la lectura del display.
- Verificar la operación del módulo F09 como frecuencímetro variando la frecuencia del generador de 0 Hz hasta la máxima frecuencia que se pueda medir. Puede utilizar un frecuencímetro como instrumento patrón.
- Determine la posición del puente y el valor de los interruptores del contador para medir una frecuencia de 40,000 Hz y verificar la lectura.

**EXPERIMENTO 5. MEDICION DE LA VELOCIDAD DE UN MOTOR DE CC<sup>3</sup>**

- Conectar los bornes de alimentación de 12V y tierra del módulo F09 y 0-24 Vcc,  $\pm 12$  Vcc y tierra del módulo G28 a una fuente de alimentación (**sin encenderla**). La fuente de 0-24 Vcc debe estar en 0V, es con la que se varía la velocidad del motor.
- Conectar el tacogenerador TY20 al acondicionador correspondiente mediante el cable apropiado.
- Fijar el valor de los interruptores en 111 y colocar el puente en Q12 que corresponde a una frecuencia de 111.1 Hz.<sup>2</sup>
- Hacer la conexiones de la figura 9, conectando en el borne 32 la salida CMOS del módulo G28 del motor de cc.



Figura 9

- Verificar las conexiones y encender la fuente.
- Incrementar el voltaje de la fuente (0-24 Vcc) y medir el correspondiente valor de velocidad angular.

2 Si la salida de frecuencia de la base de tiempos no corresponde a la indicada, medirla y determinar el nuevo valor de los interruptores.  
 3 Para realizar esta práctica es conveniente haber realizado la Práctica de Transductores de Aceleración y Velocidad

- 
- Cambiar el valor de los interruptores a 178 y el puente a Q8 (frecuencia de 1778 Hz)<sup>3</sup>.
  - Repetir las variaciones de voltaje con las correspondientes en velocidad y observar las diferencias en ambos casos.

### ANALISIS DE DATOS Y RESULTADOS

1. Obtener en la medida de lo posible el diagrama de tiempos de las señales observadas en la Tabla II, indicando las características de cada una de ellas así como la función que realiza.
2. Explique como opera el contador-visualizador, indicando que función realizan las conexiones 12 - 13, 14 - 15, así como la señal UP/DOW.
3. Con base a las lecturas del experimento III determinar la precisión del sistema de posición y compararlo en los dos casos medidos.
4. ¿El sistema configurado como frecuencímetro se puede utilizar para la medición de señales con características diferentes a las utilizadas en la señal observada? Justifique su respuesta.
5. Al utilizar el módulo F09 como frecuencímetro, ¿Cuál fue el rango de operación y la precisión obtenida?
6. ¿Cuál fue la posición del puente de la base de tiempos y el valor de los interruptores para medir la frecuencia de 40,000 Hz ?
7. ¿Por qué es mejor tener un tiempo de muestreo alto ?
8. ¿Cuál es el tiempo de muestreo más bajo y más alto que se puede obtener con el oscilador e interruptores disponibles?
9. ¿Cuál fue la diferencia al cambiar la frecuencia e interruptores al medir la velocidad del motor?
10. Describa un sistema a nivel de diagrama de bloques en el que se pueda utilizar un codificador incremental.



## TRANSDUCTORES DE CAUDAL Y NIVEL

### TRANSDUCTORES DE CAUDAL

La medición del movimiento de los fluidos tiene una amplia gama de aplicaciones que van desde mediciones del flujo de la sangre hasta complejos sistemas industriales.

El movimiento de fluidos, caudal o gastos puede ser medido en unidades de volumen de masa en varias dimensiones, esto es, pulgadas cúbicas por minuto (in<sup>3</sup>/min), centímetros cúbicos por minuto (cm<sup>3</sup>/s); o bien, en unidades de masa, es decir, galones por minuto (gpm), libra masa/min, gramos/s, etc.

#### Flujómetros basados en la presión relativa o diferencial.

Estos medidores determinan la presión diferencial en una restricción al flujo. La presión se puede relacionar con la fuerza por unidad de área y la carga se convierte en una función de la velocidad de flujo y la densidad del medio fluyente. Estos medidores se subdividen en los siguientes:

- Placa de orificio
- Tubos Venturi
- Toberas
- Tubos Pitot
- Los fluxómetros de codo

**Placa de orificio.**- Son elementos de estrechamiento que más se utilizan para medir el caudal de líquidos y de gases. Van montados en los conductos en una posición perpendicular a la dirección del flujo. Se clasifican de acuerdo a la posición del orificio, como se muestra en la figura 1, y son:

- a) Placa de orificio concéntrico, la cual tiene el orificio en el centro de la placa. Se utiliza frecuentemente por su simplicidad, bajo costo y facilidad de instalación.
- b) Placa con el centro del orificio situado debajo del eje los cuales se usan generalmente para los fluidos que transportan sedimentos.
- c) Las que tienen el centro del orificio situado arriba del eje, éstos se emplean cuando sobre circulan vapores sobre los fluidos.
- d) Diafragmas con el orificio segmentado los cuales se usan frecuentemente para líquidos muy turbios, para gases y vapores que contengan líquidos. La medición se realiza mediante dos tomas situadas antes y después del orificio y medir las presiones en cada sección y mediante un transmisor de presión detectar la diferencia entre ambas presiones como se muestra en la figura 2.

Sin embargo, las placas de orificio no son prácticas para los líquidos fangosos o muy turbios esto se debe a la acumulación de sedimentos y el desgaste de los mismos orificios.

**Tubos Venturi.**- Se usan generalmente para líquidos. Sin embargo, pueden emplearse para medir caudales de gas cuando se desee no perturbar demasiado la presión o cuando las partículas en suspensión amenacen con crear problemas.

Están constituidos por una estrechamiento central y dos secciones cónicas empalmadas con el conducto, en donde la velocidad del fluido es mayor en la parte central.

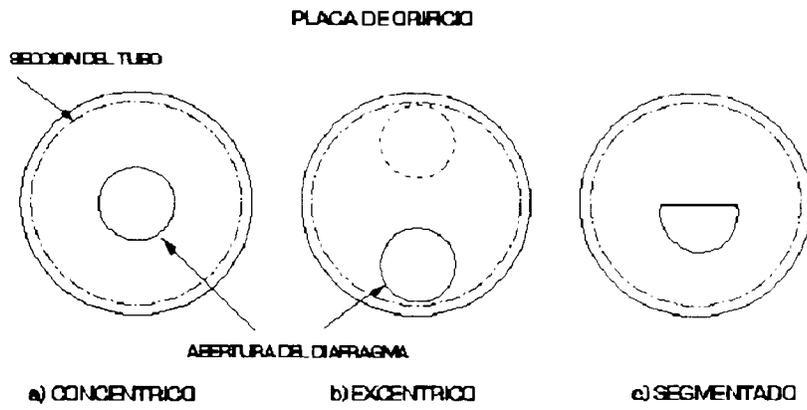


Figura 1

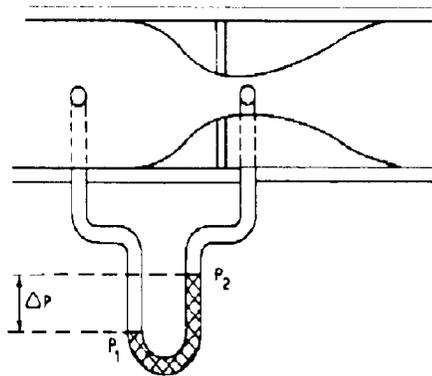


Figura 2

La presión diferencial se mide a través de dos tomas situadas en la sección de entrada y la parte central, como se indica en la figura 3.

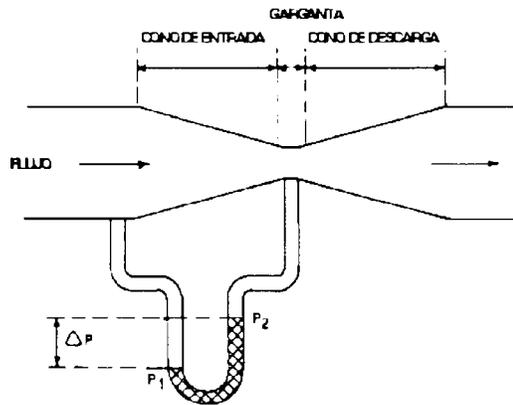


Figura 3

**Toberas.-** Es un dispositivo con un estrechamiento de forma casi o totalmente elíptica que termina tocando la pared interior del tubo de aflujo. Las tomas para la medición de presión diferencial se ubican antes y después de la sección de entrada de la tobera, según se indica en la figura 4.

Se usan principalmente para medir caudal de vapores y de otros fluidos de alta velocidad.

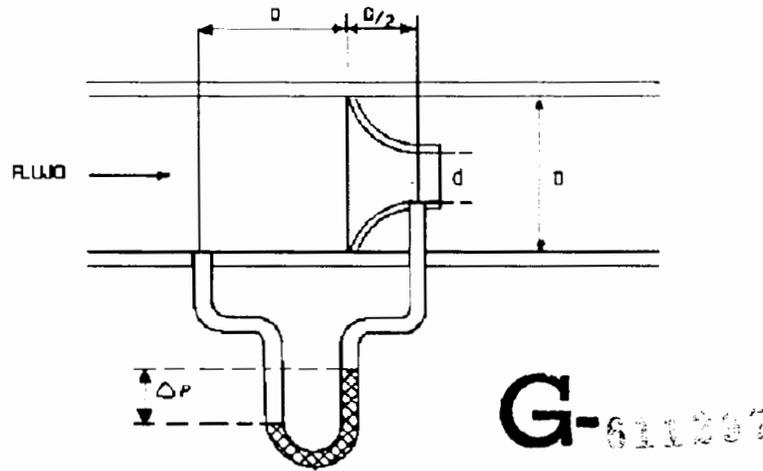


Figura 4

**Tubos Pitot.-** Consisten en una sonda cilíndrica que se introduce directamente en el fluido en movimiento.

La velocidad del flujo sobre la superficie expuesta de la sonda se reduce a prácticamente cero. Mediante dos pequeños agujeros en la sonda se obtiene la presión diferencial entre la presión de impacto y la estática. La figura 5 muestra la colocación en el conducto.

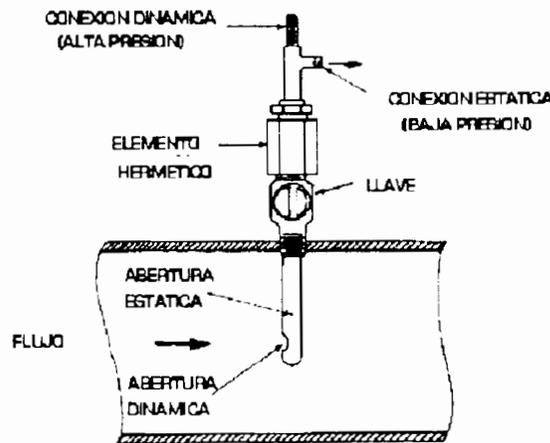


Figura 5



Tiene aplicaciones en los conductos de vapor, en las chimeneas y en las instalaciones de seguridad.

**Fluxómetros de codo.-** Funcionan sobre la base del principio de inercia que establece que para variar la dirección de un fluido en movimiento es necesario una fuerza. Dicha fuerza es proporcionada por la presión continua sobre las superficies interior y exterior del codo.

Por lo tanto para medir el caudal del fluido basta colocar dos tomas en el codo y calcular la presión diferencial existente entre la superficie del radio menor y la de radio mayor, la figura 6 muestra dicha colocación.

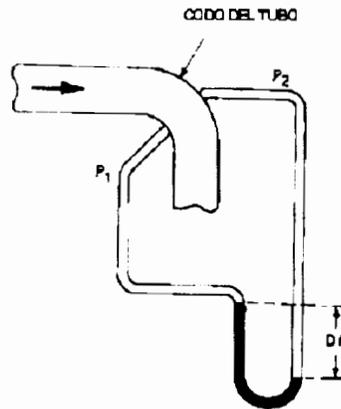


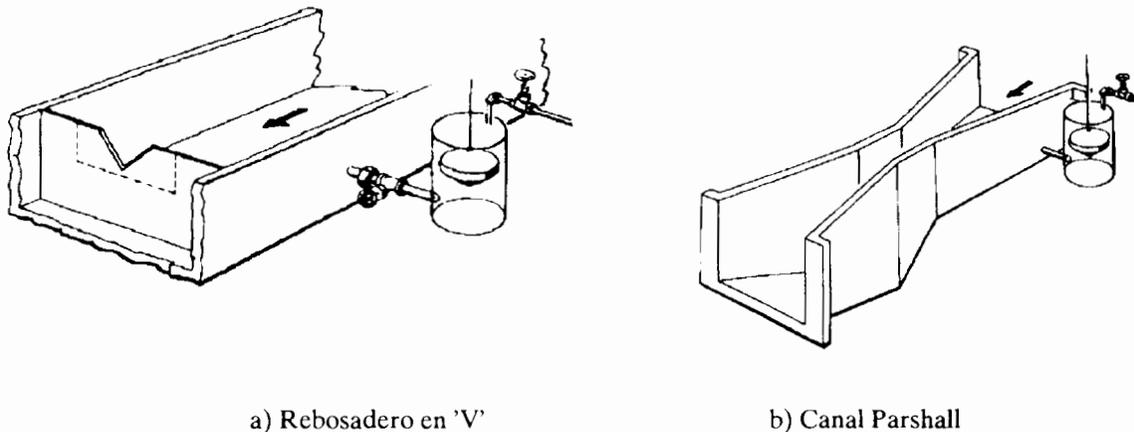
Figura 6

**Rebosaderos (vertedores) y canales.**

En los rebosaderos se provocan una elevación del nivel o la altura del líquido en movimiento con base en el cual se mide el caudal. Se utilizan en los sistemas hidráulicos para riegos agrícolas, en desechos industriales y en los sistemas de depuración.

El gasto se determina midiendo la carga de agua por encima del punto mas bajo de la abertura del rebosadero, mediante un flotador instalado en una caja que forma parte de la estructura total.

Los canales Parshall se auto limpian y funcionan con una pequeña pérdida de carga. Se utilizan cuando hay arena, cascajo ó sólidos pesados en la corriente del flujo a medir. La figura 7 muestra la disposición de estos dispositivos.



a) Rebosadero en 'V'

b) Canal Parshall

Figura 7

### Flujómetros de abertura variable: Rotámetros.

Son dispositivos de abertura variable que miden el flujo continuo de un fluido a través de un tubo cónico vertical (cuyo orificio es variable) en cuyo interior lleva alojado un flotador; éste se mueve hacia arriba o hacia abajo dependiendo de la intensidad de flujo. Si el rotámetro es transparente el caudal puede leerse directamente sobre una escala graduada en el mismo tubo. Esto se muestra en la figura 8.

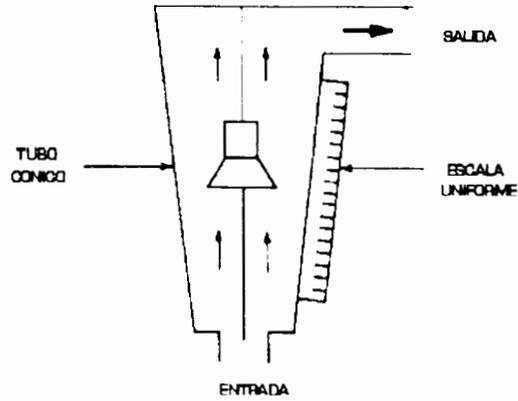


Figura 8

### Flujómetro magnético.

Se basa en la ley de Faraday o de la inducción magnética. Este fluxómetro, ilustrado en la figura 9, no tiene obstrucciones y está constituido por un tubo no magnético en el que corre el líquido conductor. Alrededor del tubo hay unas bobinas magnéticas que al excitarse generan un campo magnético a lo largo de todo el tubo.

Moviéndose en este campo magnético, el líquido genera una tensión detectada mediante dos electrodos proporcional a la velocidad del flujo.

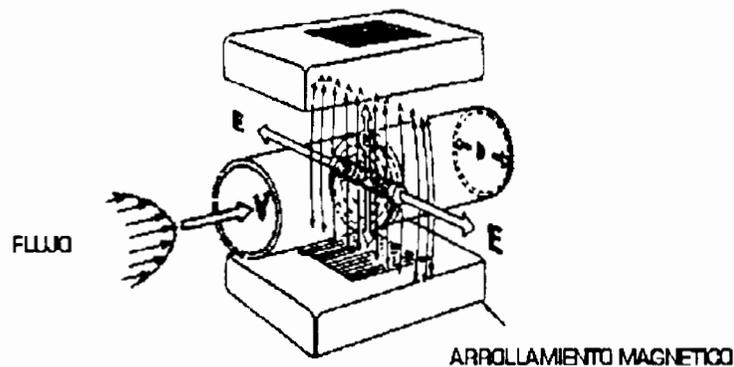


Figura 9

**Flujómetro de masa.**

Estos flujómetros miden directamente el peso del flujo y no su volumen.

Una clasificación general de estos medidores incluye:

- Métodos indirectos
- Métodos Directos

En los primeros se hace uso de algún tipo de medidor de volumen, un medio para medir la densidad y calcular el gasto de masa.

Los métodos directos operan con base en el principio de la conservación de la cantidad de movimiento angular.

El principio de funcionamiento para el medidor de flujo de masa de flujo axial, consiste en guiar un impulsor a una velocidad angular constante para que éste genere un momento angular en el fluido que se mide. Conforme sale del impulsor, la velocidad de cambio en la cantidad de movimiento angular dentro del fluido es proporcional a la velocidad de éste y a la masa nominal del flujo. El diagrama de bloques se muestra en la figura 10.

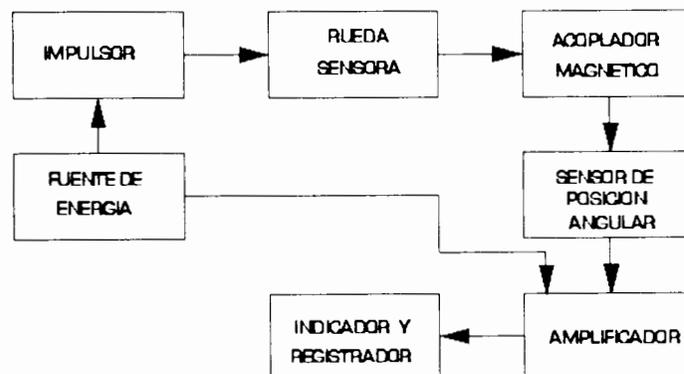


Figura 10

Otros medidores que utilizan el principio de momento angular en diferentes formas son: el medidor giroscopio vibrante, el medidor de Coriolis, el medidor giroscopio rotante, el medidor de tubo-S.

**Flujómetro de tipo oscilante.**

Existen básicamente tres tipos de flujómetros oscilantes que son:

- Los de precesión de vértice
- Los de estela vortiginosa
- Los fluidicos.

El primero se basa en el principio de la precesión de vértice, la cual se produce cuando un fluido que se haya en rotación entra en un ensanchamiento, la frecuencia del movimiento de precesión (de 50 a 2000 Hz) es proporcional al caudal del fluido.

Los de estela vortiginosa se basan en un fenómeno hidrodinámico. Si la sección transversal del fluido es constante, la frecuencia de desprendimiento de los vórtices resulta directamente proporcional al caudal volumétrico del fluido. Poseen un amplio campo de funcionamiento pero no pueden usarse en régimen del tipo laminar.

En lo que respecta a los fluídicos, el campo del medidor es un oscilador fluídico cuya frecuencia varía de modo lineal con el caudal volumétrico. El resultado es una oscilación continua autosostenida frecuencia está vinculada de modo lineal a la velocidad del líquido y en consecuencia al caudal volumétrico (para las bajas viscosidades).

### Fluxómetros sónicos y ultrasónicos.

Los dispositivos ultrasónicos pueden usarse para medir caudales en canales abiertos y cañerías. Los que se utilizan en cañerías pueden subdividirse en 2 tipos:

- Por impulsos (tiempos de ida y vuelta).
- Por desplazamiento de frecuencia (efecto Doppler).

Los dos tipos tienen un transductor (generador/receptor de ultra sonidos) el cual opera en la parte ultrasónica más baja del espectro para minimizar la absorción. Los fluxómetros de impulsos se utilizan solo en los líquidos puros, se les puede fijar en un tubo o se puede utilizar un par de transductores en contacto con el fluido que circula en dicho tubo, como se muestra en la figura 11.

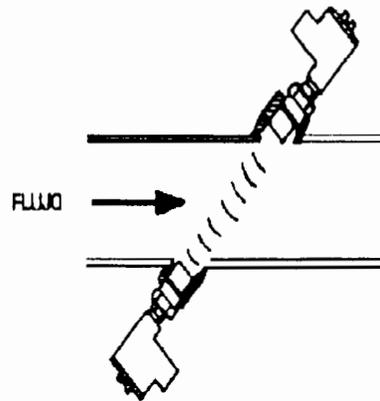


Figura 11

La energía ultrasónica se transmite en el mismo sentido y en sentido contrario al fluido. La diferencia existente entre los tiempos de transmisión está vinculada a la velocidad del líquido.

Los fluxómetros Doppler son dispositivos que funcionan dentro del margen de frecuencias comprendido entre 100 y 1500 Hz. Estos envían un sonido continuo de frecuencia fija y detectan la diferencia de frecuencias de la señal de retorno.

La variación de estas frecuencias, depende de la velocidad de las partículas líquidas y está vinculada al caudal.

Estos fluxómetros se pueden fijar exteriormente o ponerse en contacto con el fluido.

### Flujómetros de objetivo.

Los fluxómetros de objetivo son la combinación de un abertura anular con un transductor de equilibrio de fuerzas. En la figura 12 se muestra el diagrama esquemático de éste medidor.

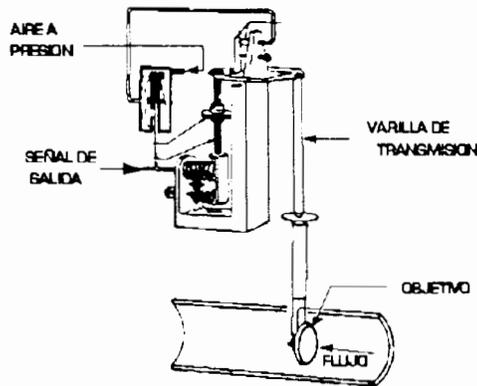


Figura 12

En su salida presenta una señal eléctrica o neumática proporcional al cuadrado del caudal que debe medirse. El orificio anular está formado por un disco fijado en el centro de la sección tabular, cuyo diámetro es igual al tubo por donde circula el fluido. El flujo (a través de la corona circular) genera sobre el disco un empuje que es proporcional a la altura cinética y en consecuencia, al cuadrado del caudal.

Se utilizan principalmente para mediciones difíciles como las de caudal de materiales calientes, aceitosos y con sedimentos.

### Flujómetro de Turbina.

Este tipo de fluxómetro, que se emplea en la práctica, aprovecha el fluido en movimiento para hacer girar el rotor de una pequeña turbina hidráulica (generadora de pulsos) cuya velocidad de rotación varía con el caudal. La figura 13 indica la configuración de este tipo de medidor.

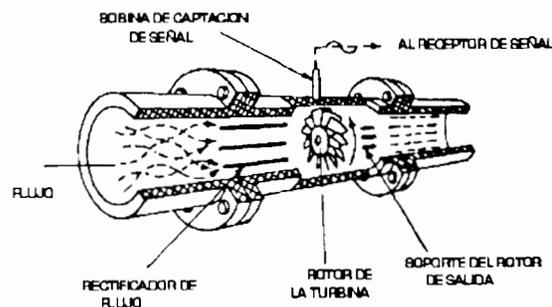


Figura 13

En una o en varias paletas de la turbina va colocado un imán permanente que al pasar cerca de un detector magnético de proximidad, hace que un contacto de éste último se cierre, generando pulsos de corriente o de tensión.

El caudal se mide contando el número e pulsos, generados en un cierto intervalo de tiempo, cada uno de los cuales corresponde con precisión a un determinado volumen del líquido desplazado entre dos paletas adyacentes del rotor.

Estos fluxómetros son muy difundidos por su gran campo de medición y por su comportamiento dinámico. Se usan principalmente para líquidos, aunque hay tipos específicos para gases y vapores.

Las características del medidor utilizado son las siguientes:

- Campo de trabajo: de 0.5 a 5 litros/min
- Constante k:310 pulsos/litro
- Error referido a plena escala:
- En el rango de 0.5 a 5 litros/min: 2%
- En el rango de 0.1 a 0.5 litros/min: 5%

### **TRANSDUCTORES DE NIVEL.**

Los transductores de nivel se clasifican según el principio físico con que actúan.

Pueden funcionar basándose en alguno de los siguientes efectos:

- Empuje hidrostático
- Presión
- Capacidad eléctrica
- Mediante ultrasonido
- Flotador

#### **Detectores basados en la presión**

Son los que se basan en que la presión en el fondo o en la pared de un recipiente que contiene líquido depende de la relación:

$$P = L * S$$

donde:

- P = Presión
- L = Nivel del líquido
- S = Peso específico .

Estos medidores se limitan a presiones inferiores a 15 psi aproximadamente. Las ventajas de estos transductores residen en su elevada precisión y reproductibilidad, además de la comodidad y facilidad de instalación que los caracterizan.

### **Detectores basados en el empuje hidrostático.**

Este tipo de transductores se basan en el principio de que un cuerpo sumergido en un líquido es desplazado. Esto es, si aumenta el nivel del líquido, aumenta también la fuerza que ejerce un flotador sobre el resorte antagonista; el cursor de un potenciómetro se desplaza provocando una variación del voltaje el cual es proporcional al nivel.

Con estos dispositivos es posible obtener indicaciones de nivel dentro de un campo bastante amplio (de 2 a 3 metros).

### **Detectores basados en la capacidad eléctrica.**

Se basan en el principio que establece que la capacidad eléctrica existente entre un conductor colocado verticalmente dentro de un recipiente y las paredes metálicas de este último depende del nivel del líquido contenido, ya que la constante dieléctrica del condensador varía en función de dicho nivel.

Se emplean para indicaciones continuas, así como para determinar el nivel de materiales de llenado sólidos y líquidos. Sin embargo, este método tiene algunas limitaciones debidas a cambios de humedad, compactibilidad o temperatura, causando que la constante dieléctrica del material sufra variaciones.

Las ventajas de este dispositivo son la buena reproductibilidad, el fácil montaje de los puntos de medición así como la facilidad de mantenimiento.

### **Detectores basados en los ultrasonidos.**

Se basan en la reflexión sonora de la superficie de los materiales. Determinando el tiempo  $t$  transcurrido entre el instante en que se envía el pulso y el instante de recepción del eco, presentando una señal de salida con un valor proporcional al nivel.

Se emplean sólo con aquellos materiales cuya superficie presenta una buena calidad de reflexión. La ventaja de ellos es que no existe ningún contacto físico con el material.

### **Detectores con flotador.**

Estos detectores de nivel están constituidos esencialmente, por un transductor de posición (normalmente potenciómetro) accionado por un flotador que sigue el nivel del líquido.

Las características que debe presentar el transductor de posición son las siguientes:

- Una linealidad óptima
- Una derivada térmica baja
- Un par de accionamiento reducido.

### **Indicadores de nivel (alarmas de nivel).**

Los dispositivos que sirven para señalar cuando el contenido de un recipiente ha alcanzado un determinado nivel se les llaman indicadores de nivel o alarmas de nivel, debido a que generalmente accionan un dispositivo de alarma o un circuito de bloqueo. Entre los más utilizados para líquidos conductivos se encuentran el sistema basado en un circuito eléctrico cerrado entre un electrodo y el mismo líquido cuyo nivel se desea indicar.

Otro dispositivo típico de alarma de nivel es el interruptor accionado por un flotador. En este caso los interruptores pueden ser del tipo de final de carrera o magnéticos, siendo éste el que se utiliza en la práctica.

#### Indicador de nivel de tipo magnético.

Los interruptores magnéticos de nivel se basan en el principio de funcionamiento propio de los detectores magnéticos de proximidad, en los que existe un contacto de láminas que actúa dentro de un campo magnético generado por un imán permanente. Este tipo de contactos está constituido por dos láminas de material magnético (hierro- níquel) de baja reluctancia, encerradas en una envoltura de vidrio que las protege contra el polvo, la oxidación y la corrosión en general, lo que garantiza una prolongada duración del contacto que lo hace trabajar respetando sus características.

Este contacto ofrece un breve tiempo de conmutación (normalmente de 0.5 a 3 ms, incluyendo los movimientos de retroceso).

En los sensores de proximidad, el contacto de láminas se hace trabajar mediante un imán permanente cuyo campo, por efecto de la inducción magnética, genera polaridades de signo contrario en las láminas. De este modo se origina una fuerza de atracción con un valor tal que, si el campo es suficientemente intenso (o sea, si el imán se haya bastante cerca), logra vencer la resistencia elástica de las láminas, las cuales al doblarse realizan el contacto eléctrico.

En el caso de los interruptores de nivel el accionamiento se efectúa, generalmente, por medio de un imán en anillo, como se muestra en la figura 14.

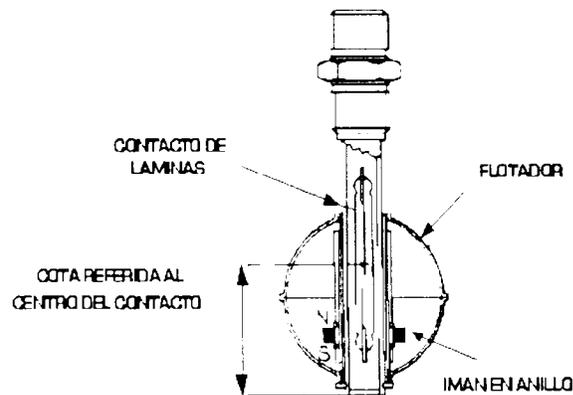


Figura 14

Al variar el nivel del líquido el flotador se desliza a lo largo de una varilla, la cual tiene incorporada un imán, que provoca un accionamiento del contacto de láminas situado en dicha varilla.

La posición del punto donde se cierra el contacto se llama cota de intervención de subida y la posición donde se abre el contacto se nombra cota de apertura en bajada.

Entre las dos opciones que asume el flotador cuando el contacto se cierra y cuando se abre existe una cierta distancia que se llama carrera diferencial. Esta distancia puede variar entre 2mm y 8mm.

Con base a las funciones que realizan, los contactos utilizados en los interruptores de nivel, pueden ser de los siguientes tipos:

- Normalmente abierto (NA)
- Normalmente cerrado (NC)
- De intercambio (S)

Es muy importante tener presente que las tensiones o las corrientes con valores superiores a los límites propios de los contactos provocan una sensible reducción de la vida eléctrica de los mismos, haciendo que se queden pegados o que se perforen.

### DESCRIPCION DEL EQUIPO

El equipo para medición de caudal y nivel está constituido básicamente de dos partes:

- Unidad MIL 30
- Acondicionadores de señal (de caudal y de nivel)

La unidad MIL 30 es un dispositivo mediante el cual es posible obtener y calcular caudales variables así como niveles hidráulicos.

Dicha unidad, mostrada en la figura 15, está constituida por dos depósitos para el líquido, conectados entre sí a través de un tubo en serie con el transductor del caudal, con una bomba y con un reductor de flujo (válvula de estrangulamiento).

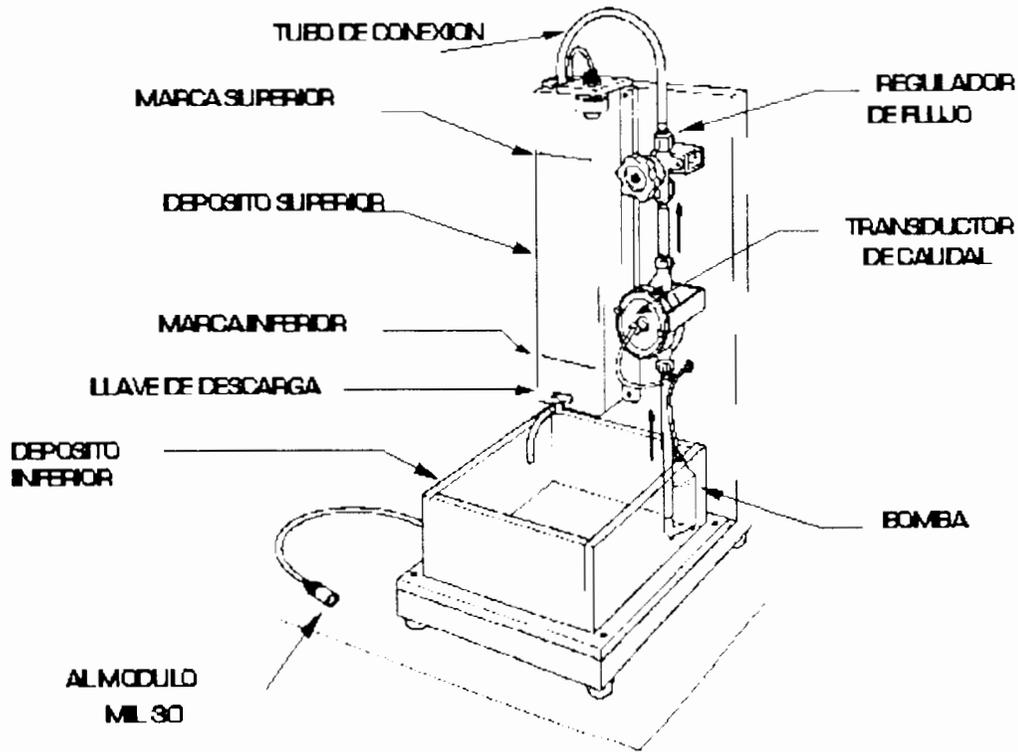


Figura 15

La bomba es del tipo centrífugo y es accionada por un motor de c.c. (12V - 1A). Al funcionar la bomba, el líquido pasa al transductor de caudal de turbina y de ahí a un regulador de flujo, y mediante un tubo de conexión entre los dos depósitos el nivel del depósito superior aumenta.

El volumen del líquido entre las marcas inferior y superior del depósito superior es de 1 litro y puede vaciarse a través de la llave de descarga.

Para determinar el valor del caudal Q sin el acondicionador se mide el tiempo transcurrido para que el depósito superior se llene entre las dos marcas de nivel, calculado mediante:

$$caudal = \frac{l}{t} \left[ \frac{\text{litros}}{\text{minutos}} \right] \quad (1)$$

Para conocer el nivel del líquido en correspondencia con el cual se produce la conmutación del contacto de láminas del transductor, se utiliza una escala graduada.

#### **Acondicionador de señal del transductor de caudal.**

Es un dispositivo capaz de contar los pulsos que se producen en un determinado intervalo de tiempo y de suministrar en su salida una indicación digital del flujo del líquido que pasa por el transductor. El diagrama esquemático se muestra en la figura 16.

El acondicionador se conecta a la unidad MIL 30 por medio de un cable.

La señal de pulsos (de 12V), proveniente del contacto de láminas del transductor del caudal (borne 4), es doblemente integrado a fin de obtener una señal con una frecuencia del doble respecto a la del transductor. Esta señal está disponible en el borne 7 y se utiliza como pulsos de reloj para los contadores IC4, IC6A, e IC6B, los cuales están conectados de manera asíncrona.

Situando el conmutador II (ACQUISITION TIME) en la posición 10s (contacto 10) los tres contadores permanecen activos, mientras que si se le coloca en la posición 1s, el contador IC6b resulta inhabilitado y sus salidas asumen el valor de cero.

El temporalizador IC2 (NE555) sirve para generar el tiempo de recuento.

La calibración de dos tiempos patrón se efectúa en el acondicionador de señal mediante los potenciómetros RV1 y RV2, obteniendo una o dos cifras significativas respectivamente.

El comienzo del período del recuento se visualiza en la red GATE a través del circuito monoestable, y a partir de ésta señal se obtiene la señal de RESET que envía a los contadores (borne 3) y la señal de enganche para fijar el dato visualizado en los display (borne 2).

La señal de salida BCD de los contadores se envía hasta el conector COMPUTER A/B a través de los buffer IC9 e IC10 los cuales hacen que la señal CMOS del acondicionador sea del tipo TTL compatible.

#### **Constante del transductor $K_T$**

Es el valor que relaciona los pulsos generados por la rotación de las paletas de la turbina y el volumen del líquido desplazado sobre dos paletas adyacentes al rotor.

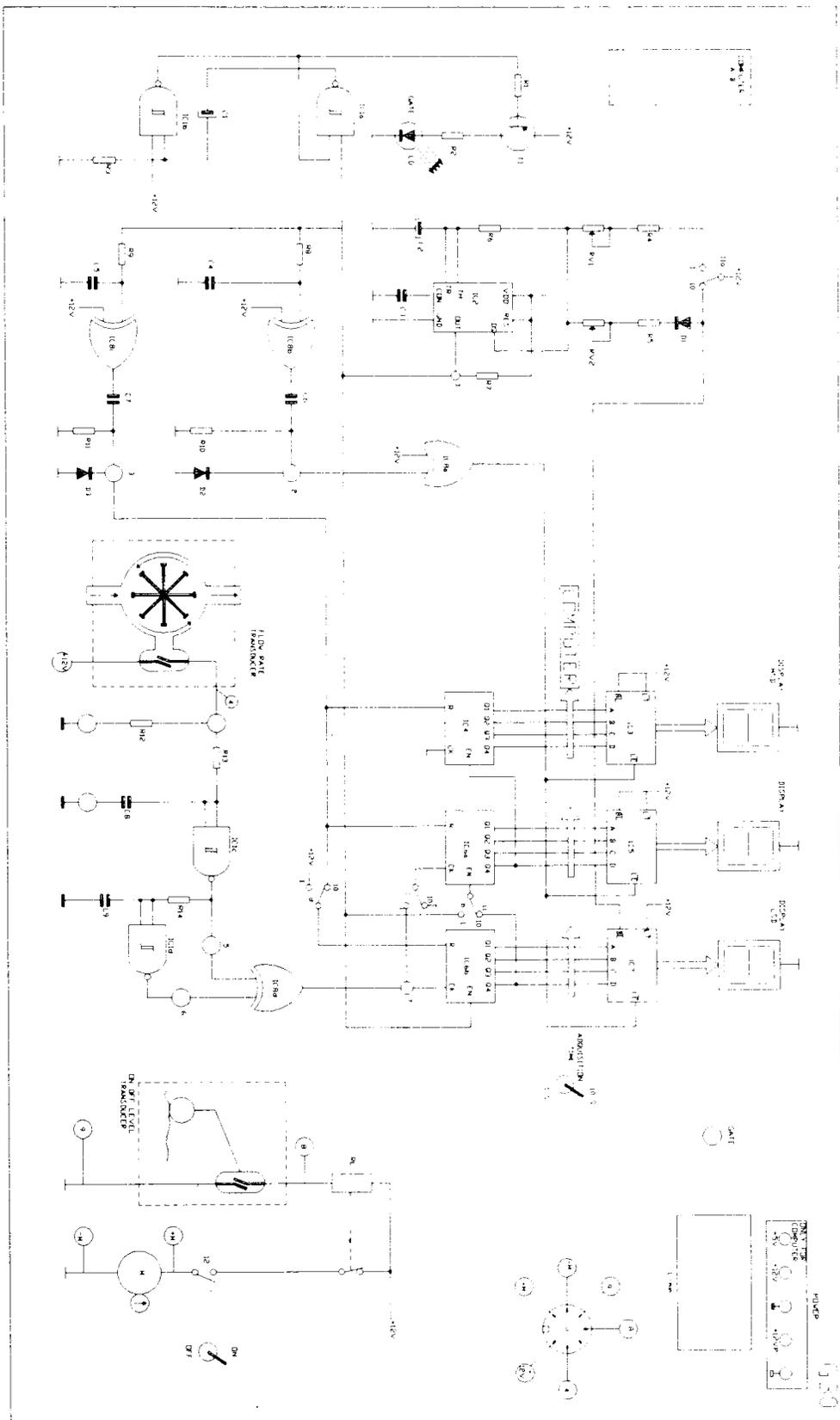


Figura 16

Las unidades son:

$$K_T = \left[ \frac{\text{pulsos}}{\text{litros}} \right] \quad (2)$$

Para obtener la  $K_T$ , se determina el caudal  $Q$  en l/seg, posteriormente se mide con un frecuencímetro la frecuencia  $F_Q$  correspondiente a dicho caudal. La  $K_T$  estará dada por:

$$K_T = \frac{F_Q}{Q} \quad \left[ \frac{\text{pulsos}}{l} \right] \quad (3)$$

### Ajuste del tiempo de conteo

Dado que cada turbina tiene una constante en particular, es necesario ajustar el tiempo el tiempo de conteo para que el caudal real corresponda con la lectura del display.

El tiempo de conteo en la escala de 1 seg está dada por :

$$T_c = \frac{Q_{\text{display}} \times 10}{2 F_Q} \quad \{ \text{segundos} \} \quad (4)$$

Donde  $Q_{\text{display}}$  tiene unidades de pulsos y es el calor real que debe aparecer en el display.

Dicho tiempo se ajusta con el potenciómetro RV1 (escala de 1 segundo), o bien:

$$T_c = \frac{Q_{\text{display}} \times 100}{2 F_Q} \quad \{ \text{segundos} \} \quad (4a)$$

Para la escala de 10 seg, ajustandose el tiempo con el potenciómetro RV2.

Ambos tiempos pueden ser medidos en el punto 1 del acondicionador.

### Linealidad del transductor-acondicionador.

En la mayoría de los sistemas es deseable que la respuesta sea lineal; sin embargo muchos transductores operan linealmente en un rango bien definido.

Para el caso del transductor de caudal utilizado, el fabricante garantiza su operación lineal dentro del siguiente rango con el error indicado a plena escala:

RANGO (litros/minuto)	ERROR (%)
0.5 / 5	< 2
0.1 / 5	< 5

Prácticamente se puede calcular la linealidad el transductor-acondicionador a partir del modelo de respuesta, que para este caso es una línea recta.

Trazando dos rectas paralelas a la recta del sistema de medición, como se muestra en la figura 17, en las cuales queden contenidos todos los puntos de medición, se puede obtener los valores límites  $L_1$  y  $L_2$  a plena escala y calcular la linealidad, esto es:

$$Linealidad = \pm \frac{1}{2} \frac{(L_1 - L_2)}{Escala_{max}} \quad (5)$$

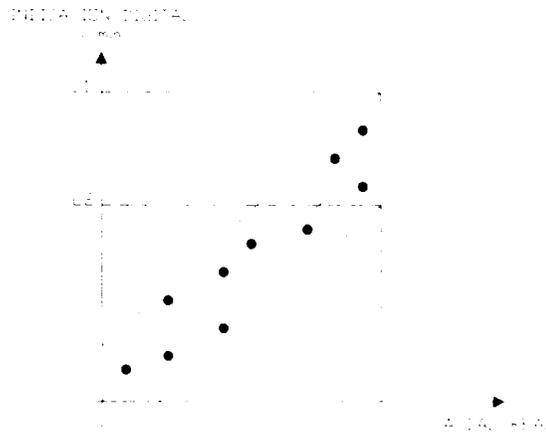


Figura 17

#### Acondicionador de señal del transductor de nivel.

El circuito acondicionador de señal para el indicador de nivel, se haya esquematizado en el módulo, consiste de un relevador cuya bobina se acciona a través de los contactos de lámina. Una vez accionado el relevador hace que la bomba deje de funcionar para evitar que el agua contenida en el depósito superior empiece a desbordar.

#### OBJETIVOS

- Hacer del conocimiento del alumno los diversos transductores de caudal y nivel así como de los respectivos acondicionadores de señal.
- Presentar una aplicación práctica sobre dos de los transductores en estudio.
- Calibrar el acondicionador del transductor de caudal.
- Obtener la curva característica del Transductor-Acondicionador.
- Determinar las cotas de operación del transductor de nivel.

#### EQUIPO Y MATERIAL

- Unidad G30 y TY30

- 
- Cronómetro
  - Generador de Funciones
  - Osciloscopio de memoria

## DESARROLLO

### EXPERIMENTO 1. OPERACION DEL ACONDICIONADOR DE SEÑAL DEL TRANSDUCTOR DE CAUDAL.

La calibración se realiza al hacer coincidir la indicación del caudal que proporciona el indicador visual con un caudal simulado.

- Conectar los bornes +12V-0V, +12VP-0V/1.5A del panel a una fuente de alimentación estabilizada sin encenderla aún.
- No colocar el cable de conexión entre el panel y la unidad externa MIL 30.
- Por medio del generador de funciones aplicar entre el borne 4 y el de tierra una señal cuadrada con una amplitud de 10V positivos y una frecuencia de 25 Hz.
- Encender la fuente de alimentación.
- Con el interruptor Acquisition Time en la posición 1s regular RV1 hasta que en el display se lea el valor 5.0
- Situar el interruptor Acquisition Time en la posición 10s y regular RV2 hasta que en el display se lea el valor 5.00 .

### EXPERIMENTO 2. CALIBRACION DEL MEDIDOR DE CAUDAL

- Conectar los bornes de +12V-0V y 12VP-0V/1.5A del panel a una fuente de alimentación estabilizada sin encenderla aun. Conectar el cable de la unidad MIL30 al acondicionador.
  - Fijar la base de tiempo en un segundo.
  - Abra completamente la válvula reguladora de flujo (totalmente en sentido antihorario).
  - Verificar las conexiones, encender la fuente y accionar la bomba.
  - Determinar el caudal  $Q$  [ l/min ] es decir, con el cronómetro medir el tiempo en que se llena el depósito superior (entre las marcas = 1 litro) y calcular  $Q$ .
  - Paralelamente medir con el osciloscopio la frecuencia (en el borne 4) correspondiente al caudal medido.
  - Calcular el tiempo de conteo  $T_c$  con la expresión (4).
-

- Observar con el osciloscopio la señal en el borne 1 y ajustar con RV1 el periodo  $T_c$ , calculado previamente.
- Verificar que el caudal real corresponda a la lectura del display.

**NOTA: Por ningún motivo cierre completamente la válvula estando la bomba encendida.**

**EXPERIMENTO 3. DETERMINACION DE LA CURVA CARACTERISTICA "CAUDAL REAL / INDICACION DIGITAL DE SALIDA DEL TRANSDUCTOR-ACONDICIONADOR".**

Para la determinar la curva característica es necesario haber realizado la calibración.

- Con la fuente apagada, conectar el panel a la unidad externa MIL 30.
- Verificar que el depósito superior esté vacío, en caso contrario utilice la llave de descarga; y que el depósito inferior contenga suficiente agua.
- Girar el regulador de flujo en el sentido contrario a las agujas del reloj hasta llegar al tope.
- Poner el interruptor time acquisition en 1 segundo.
- Encender la fuente y situar el interruptor I2 de encendido de la bomba en la posición ON. Medir el tiempo que tarda en llenarse el depósito superior entre las dos marcas de nivel.
- Calcular el valor del caudal con la expresión (5).
- Paralelamente observar la lectura del display y asentar ambos valores en la Tabla 1.
- Repetir los dos últimos pasos para diferentes posiciones de la llave reguladora de flujo, hasta obtener 8 pares de datos.
- Repita la tabla con el interruptor time Acquisition en 10 segundos.

CAUDAL REAL CALCULADO (l/min)	INDICACION DIGITAL DEL CAUDAL (l/min)

Tabla 1

**EXPERIMENTO 4. DETERMINACION DE LA COTA DE INTERVENCION EN SUBIDA Y BAJADA.**

- Conectar los bornes +12V-0V, +12Vp-0V/1.5A del panel a una fuente de alimentación estabilizada sin encenderla.
- Colocar el cable que conecta al panel a la unidad externa MIL 30.
- Verificar que esté descargado el depósito superior así como las conexiones realizadas.
- Encender la fuente de alimentación y la bomba, y medir con un metro la cota de intervención de subida y bajada.

**ANALISIS DE DATOS Y RESULTADOS**

1. Por qué para el funcionamiento del acondicionador del Experimento I, se utiliza una señal cuadrada con las características de forma, amplitud y frecuencia especificadas ?
2. Con base a los datos del experimento II, determine la constante del transductor  $K_T$ .
3. Qué valor de  $K_T$  se deberá tener para no calcular un  $T_c$  ?
- 4.Cuál es la función de los potenciómetros RV1 y RV2 ?
5. Con base a los datos de la tabla I, determine el error en cada caso y grafique en un plano de coordenadas cartesianas la indicación digital y el caudal real medido, en las ordenadas y abscisas respectivamente.
6. Trace o calcule la recta óptima del sistema, en ambos casos (1 seg y 10 seg).
7. Calcular el modelo matemático.
8. A partir de la cota de intervención de subida y la de apertura en bajada, determine la carrera diferencial. Compárela con la especificada por el fabricante.
9. Determine la linealidad del sistema y compárela con la especificada por el fabricante.
10. Presente un cuadro comparativo de transductores de nivel y caudal, indicando tipos, rangos, aplicaciones, etc.
11. Presente un sistema a nivel de diagrama de bloques, en el que se utilice los transductores de nivel y caudal.



## TRANSDUCTOR DE FUERZA

Un transductor es un dispositivo que convierte variables físicas tales como fuerza, posición, presión, temperatura, velocidad, aceleración, etc; en una señal generalmente eléctrica para propósitos de medición o control.

La fuerza y las magnitudes directamente asociadas a ella (como el par, la presión y aceleración) pueden medirse eléctricamente por medio de una gran diversidad de tipos de transductores.

Muchos transductores de fuerza se basan en la conversión de una fuerza aplicada la cual provoca un desplazamiento mecánico, típicamente la deformación de un elemento elástico, y dependiendo del transductor se convierte en una señal eléctrica de salida.

De acuerdo al principio físico en que se basan, los transductores de fuerza se pueden clasificar en tres grandes categorías:

- Transductores basados en las leyes de la estática.
- Transductores basados en el fenómeno piezoeléctrico.
- Transductores basados en el fenómeno de la reacción elástica.

### TRANSDUCTORES BASADOS EN LA APLICACION DE LAS LEYES DE LA ESTÁTICA

Se sabe que disponiendo de una serie de distintas magnitudes de fuerza, siempre es posible medir una fuerza incógnita recurriendo a la ley fundamental de la mecánica dada por la relación:

$$\sum F - ma = 0$$

la que indica que en un sistema de fuerzas  $\sum F$  (incluyendo las activas y reactivas) aplicadas a un cuerpo de cierta masa "m", proporciona una aceleración "a". En forma análoga con un sistema rotacional, examinando la aceleración angular  $d\omega/dt$  de un cuerpo, con un momento de inercia axial J alrededor del eje de rotación relativo, bajo la acción de un sistema de pares  $\sum M$  cuya dirección es la de dicho eje; se obtiene la siguiente relación:

$$\sum M - J \frac{d\omega}{dt} = 0$$

Por lo general, en las mediciones industriales, los transductores que se basan en las leyes definidas por las ecuaciones anteriores, están empleados en condiciones de carga constante.

Una aplicación, bajo dichas condiciones, está representada por la balanza automática de contrapesos cuyo principio de medición está ilustrado en la figura 1.

Pasando por alto los pesos de los brazos con respecto al peso patrón  $P_c$  y al peso incógnito P, puede obtenerse la relación:

$$P = P_c \frac{b_2}{b_1} \tan \theta$$

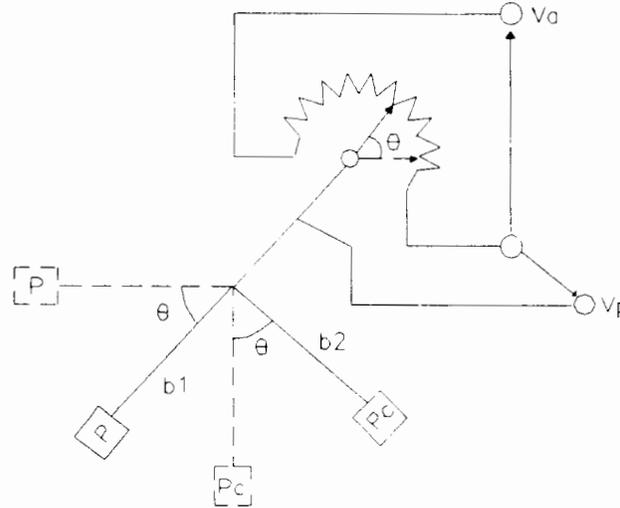


Figura 1

Ya que utilizando el potenciómetro puede leerse un voltaje proporcional al ángulo , la balanza de contrapesos viene a ser un sensor de rotación angular con característica no lineal.

### TRANSDUCTORES BASADOS EN EL FENOMENO DE LA PIEZOELECTRICIDAD

Dichos transductores se emplean sobre todo cuando las fuerzas que hay que medir son dinámicas, estos dispositivos aprovechan un fenómeno descubierto por Pierre y Jacques Curie en 1880 en el que las variaciones de carga se presentan en algunos materiales cuando estos están sujetos a fuertes acciones físicas.

Estos dispositivos piezoeléctricos se usan en instrumentos, como acelerómetros, utilizados para el estudio de las vibraciones <sup>1</sup>. Los materiales con que están hechos estos transductores son cerámicos (materiales de síntesis), como lo son el titanato de bario o el de plomo. Entre los cristales se utiliza la turmalina, sal de "seignette" (titrato de sodio y potasio) y el cuarzo, siendo este último el más común.

### TRANSDUCTORES BASADOS EN EL FENOMENO DE LA REACCION ELASTICA

Considerando un cuerpo homogéneo e isótropo de forma prismática, como el de la figura 2, que tenga una de sus bases (de cierta área A) apoyada en un soporte de material con rigidez infinita, mientras que a la otra base se le aplica una fuerza F perpendicular a la misma. El cuerpo sufre una deformación al aplicarle una fuerza la cual puede medirse como la relación entre el cambio de dimensión y el valor total de la dimensión en la que ocurre el cambio.

La ley que rige estas deformaciones es la ley de Hook, la cual se define como :

$$E = (\text{constante}) = \frac{S}{\epsilon}$$

1 Para más detalles ver la Práctica de Aceleración y Velocidad.

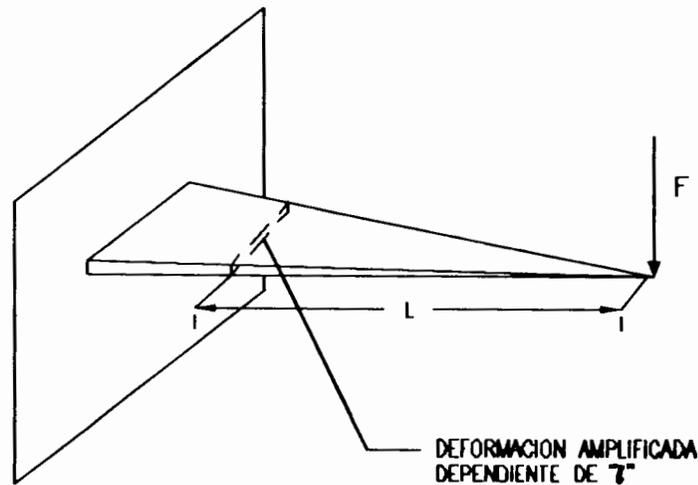


Figura 2

donde  $E = >$  módulo de elasticidad o módulo de Young en  $\frac{Kg}{cm^2}$

$S = >$  esfuerzo (en tensión o compresión) en  $\frac{Kg}{cm^2}$

$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} = >$  deformación, adimensional.

Entonces, al aplicar una fuerza  $F$  el cuerpo se deforma produciendo una fuerza reactiva  $F_r$ , mientras que el comportamiento resulta ser puramente elástico.

En el punto de equilibrio, es decir cuando  $F$  es igual a  $F_r$ , y a partir de la ley de Hook, se tiene una relación lineal de la deformación longitudinal  $\epsilon_l$  dada por:

$$\epsilon_l = \frac{\Delta L}{L} = \frac{F}{EA} = KF$$

donde  $F =$  fuerza (en tensión o compresión)

$A =$  Area de la sección (normal a la dirección de aplicación de la fuerza)

$L =$  Longitud original del sólido.

De aquí, todo cuerpo que satisfaga la ley de Hook, puede constituir un sensor lineal de fuerza en función de la deformación longitudinal.

En correspondencia con la deformación longitudinal  $\epsilon_l$ , se tiene la deformación transversal  $\epsilon_v$  relacionadas mediante el coeficiente de Poisson  $\nu$ , por lo que se tiene también una relación lineal entre la fuerza aplicada y la deformación transversal dentro del campo de la ley de Hook dada por:

$$\epsilon_v = -\nu \epsilon_l \quad \epsilon_l = \frac{-\nu}{EA} F = -K' F$$

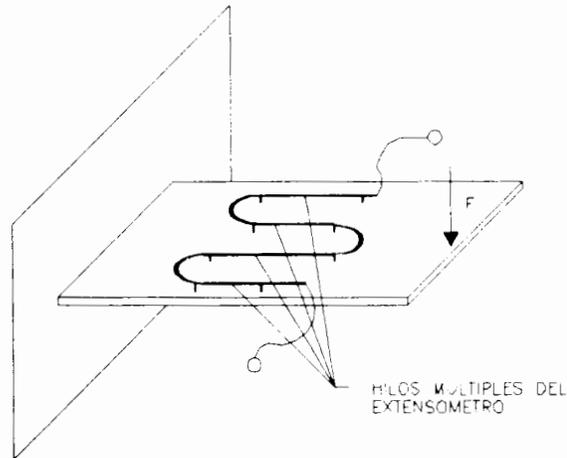


Figura 3

De lo anterior se puede obtener una conversión lineal "Fuerza/Deformación" determinando la deformación y transformandola en una señal eléctrica proporcional a la fuerza.

Para determinar las deformaciones producidas por una fuerza se utilizan los siguientes sensores:

- "Strain gage" resistivos
- "Strain gage" de semiconductor

#### Transductores en los que se emplean "Strain gage" resistivos

Estos sensores, también llamados galgas extensométricas o extensómetros, tienen dos características de deformación elástica que se utilizan en la transducción de fuerzas: la deformación local y la deflexión. Un valor máximo de cada uno se detecta en algún punto del elemento sensor, aunque no necesariamente siempre en el mismo punto, y es este valor el que da la magnitud transducida (ya sea la deformación o la deflexión). Los elementos sensores de fuerza están fabricados con materiales de homogeneidad controlada, normalmente de algún tipo de acero, y una serie de tolerancias muy cuidadosamente dimensionadas.

Como parámetros básicos de diseño de los elementos sensores de fuerza se tiene: tamaño y forma, densidad del material, módulo de elasticidad, sensibilidad a la deformación y a la deflexión, respuesta dinámica y los efectos de la carga del transductor sobre el sistema a medir.

De modo particular puede decirse que:  $\frac{dR}{R} = K \frac{dL}{L}$ . El coeficiente de proporcionalidad K se llama también "factor de calibración o factor de galga", y puede asumir valores comprendidos entre -11 y 4.5 según los materiales empleados (níquel, manganina, constantán, platino, tungsteno). Un elevado factor de calibración de un material hace que este sea más sensible a la temperatura y menos estable que los materiales con factor de calibración menores.

La forma más sencilla en como trabajan los extensómetros consiste en medir la variación de la resistencia de un alambre metálico cuyos extremos están sujetos en los dos puntos entre los cuales se desea medir la variación de distancia  $dL$  y en consecuencia la fuerza.

Para tener valores de  $dR$  fácilmente medibles, se adicionan varias longitudes útiles del hilo metálico como se muestra en la figura 3.

En la mayoría de los casos, los extensómetros se utilizan para medir la deformación de una superficie en una dirección preestablecida.

Cabe señalar que los tramos curvos tienen una sección mucho mayor que la de los tramos rectilíneos, y por lo tanto una resistencia despreciable. Los valores de  $L$  pueden variar de 2 a 20 mm aproximadamente.

En los transductores de fuerza, los extensómetros ya se encuentran pegados en el dispositivo que se deforma cuando se le aplica la fuerza a medir.

Estos sensores tienen el inconveniente de depender de la temperatura, esto es, si existe una variación de temperatura, se provoca una variación en la resistencia y una variación del volumen del material (lo cual se puede definir como una deformación no presente).

Para evitar esto, se requieren dos extensómetros, uno deformado y otro no, y medir la diferencia de la resistencia existente entre los dos. También se puede recurrir a extensómetros termocompensados, es decir, elementos que tengan materiales con coeficiente de temperatura igual y opuesto al coeficiente de dilatación térmica del material alterable.

### **Sensores en los que se emplean "Strain gages" de semiconductor**

Debido a que la piezoresistividad (variación de la resistencia eléctrica al cambio de volumen) se hace muy intensa en los semiconductores, el coeficiente de calibración  $K$  logra alcanzar valores muy elevados (entre 40 y 200) haciéndose presente un fuerte incremento en la sensibilidad, pero así mismo una fuerte dependencia de la temperatura, por este motivo dichos dispositivos se emplean solamente en casos en los que la sensibilidad es muy elevada y las variaciones de temperatura son casi nulas.

Los transductores "strain gages" proveen tiempos rápidos de respuesta, buena resolución, mínimo movimiento mecánico, y buena exactitud. Compensación predecible por los efectos de temperatura, fuente de baja impedancia.

Los bajos niveles de salida pueden causar problemas de ruido y generalmente se requiere aislamiento de la tierra de excitación con la tierra de salida.

### **Celdas de Carga**

La celda de carga es el tipo de transductor de fuerza dotado de extensómetros de tipo resistivo que más se usa en la rama industrial. Su configuración es la de un puente de extensómetros, que es la que se utiliza en esta práctica.

La celda convierte una fuerza aplicada (peso) en una variación del voltaje presente en la salida del puente.

Las celdas de carga que emplean "strain gages" del tipo resistivo tienen una impedancia de aproximadamente 350 ohms y una sensibilidad de  $2 \frac{mV}{V}$  a plena escala, es decir, por cada volt que se aplique al puente, la salida será de 2 mV.

Debido a que la variación de temperatura es una fuente de errores, es posible usar una de las siguientes técnicas para reducirlos:

1. Especificando la exactitud sobre el total de errores en lugar de hacerlo en una base de parámetros individuales.

2. Usando técnicas en la calibración del sistema que funcionen por reducción de datos.
3. Monitoreando los cambios ambientales y corrigiendo los datos conforme ocurran.
4. Controlando artificialmente el medio ambiente del transductor para minimizar estos errores.

### PARAMETROS QUE CARACTERIZAN UN TRANSDUCTOR DE FUERZA

Las características fundamentales en el empleo de un transductor de fuerza y que definen su calidad son las siguientes:

- El margen o campo de medidas, (expresado en Kg, N ó Ton); es decir, el campo de las fuerzas que el sensor es capaz de convertir sin alterar sus características de medición. El margen de medidas puede ser unipolar (compresión) o bipolar (compresión y tensión).
- El valor de sobrecarga estática admitido (expresado en Kg, N ó Ton), es decir, el valor de la máxima fuerza que puede soportar el dispositivo sin dañarse.
- El campo de temperaturas de funcionamiento (expresadas en °C ).
- El campo de temperaturas de almacenamiento (expresado en °C).
- El campo de precisión primaria (expresado en °C ), o sea el margen de temperaturas dentro del cual los datos de medición satisfacen valores determinados.

Con lo que respecta a la exactitud de las medidas pueden darse algunas especificaciones relativas al campo de precisión primaria, que son :

- Linealidad, es una medida del comportamiento diferencial de la curva de calibración respecto a una línea recta especificada, la linealidad se expresa en porcentaje del valor de plena escala, dada por la expresión:

$$\text{Linealidad} = \pm \frac{1}{2} \frac{|V_1 - V_2|}{V_2}$$

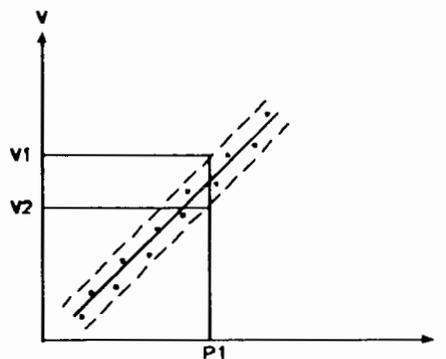


Figura 4

Para obtener estos valores de voltajes se tiene que determinar la recta óptima del transductor y obtener una gráfica como la que se muestra en la figura 4; donde P1 es el valor de fuerza máxima dentro del rango de operación.

- De la misma manera, la variación relativa  $V_r$  al voltaje de plena escala en porcentaje es:

$$V_r = \frac{V_2 - V_1}{V_1}$$

- Resolución; es la más pequeña variación detectada de la magnitud de salida. Este parámetro se expresa como el inverso del valor de la señal de salida para una determinada entrada unitaria.
- La repetibilidad, expresada en porcentaje del valor a plena escala, indica la capacidad que tiene el transductor de reproducir la señal de salida cuando a la entrada se presenta, en tiempos sucesivos, la misma muestra de magnitud a medir.

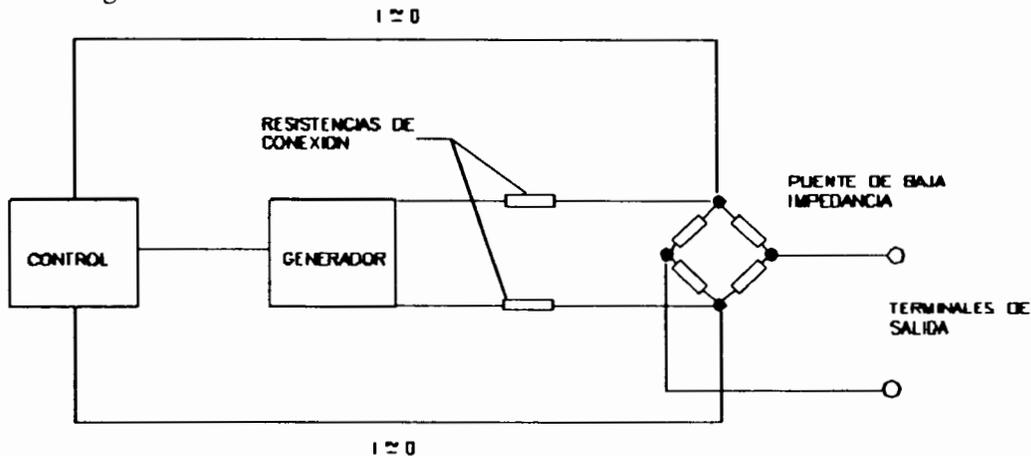


Figura 5

- La estabilidad, expresada en porcentaje del valor de plena escala, indica la capacidad que tiene el transductor de mantener el valor de la señal de salida cuando en la entrada se mantiene fijo el valor de la fuerza a convertir.
- La histéresis, la cual representa la diferencia entre dos indicaciones dadas por el transductor, para un mismo valor de fuerza, cuando este es alcanzado desde direcciones opuestas.

### ACONDICIONADORES DE SEÑAL EMPLEADOS CON LOS TRANSDUCTORES DE FUERZA

Para los transductores de fuerza que emplean extensómetros del tipo resistivo (Celdas de carga), el sistema de interface debe ser capaz de excitar el transductor con un voltaje constante.

Dado que la resistencia ohmica del extensómetro es baja, a menudo se recurre a las terminales de salida del puente para controlar si el voltaje aplicado es constante, como se indica en la figura 5.

Dado que el voltaje a la salida del transductor es pequeño, se amplifica a través de un amplificador diferencial para instrumentos de alta ganancia, como se muestra en la figura 6.

La elección del amplificador diferencial habrá que hacerla de tal modo, que al variar la temperatura la desviación del voltaje será el mínimo posible.

Además se suele utilizar un potenciómetro para eliminar el voltaje de "offset" y un potenciómetro de calibración para regular la salida en correspondencia con su valor exacto a plena escala.

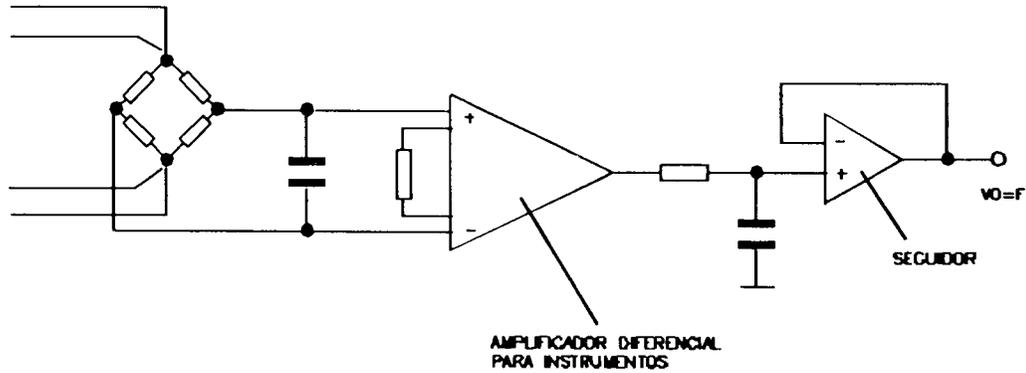


Figura 6

Algunas celdas de carga están dotadas también de una terminal de verificación, con la cual es posible hacer que el puente se desequilibre; a fin de poder obtener a la salida por ejemplo el 50 % del valor a plena escala.

Normalmente los transductores de fuerza dotados de extensómetros resistivos se calibran durante la fase de producción y, muchas veces, están dotados de un circuito de compensación térmica.

Debido a que estos sensores están montados en dispositivos en los que no se presentan rápidas variaciones de fuerza, a fin de reducir el ruido se utiliza un filtro de paso bajo de segundo orden.

Los transductores de fuerza provistos de extensómetros de semiconductor presentan señales eléctricas de salida de alto nivel; requiriendo, por ello, sistemas de interface muy simples con lo que respecta al "offset" y a las escalas.

En cuanto a los transductores de fuerza del tipo piezoeléctrico el sistema de interface está constituido por un amplificador de carga, cuyo esquema teórico está representado en la figura 7.

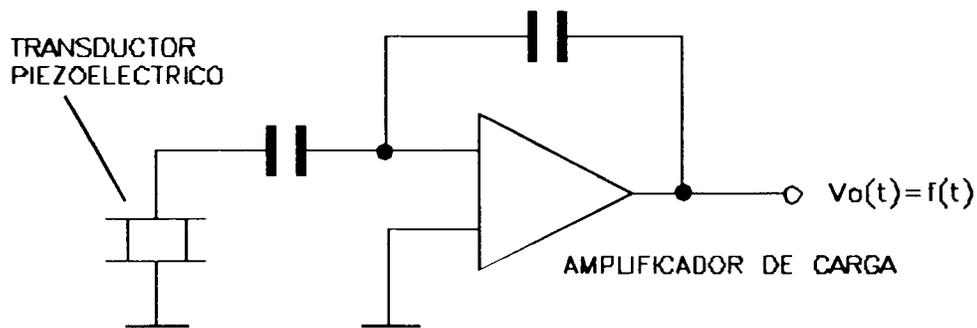


Figura 7

## DESCRIPCION DEL EQUIPO

El equipo, representado por un sistema didáctico para la conversión de la fuerza, está constituido por dos partes fundamentales, que son: El módulo G25, que contiene el acondicionador de señal, y el transductor de fuerza. Como se muestra en la figura 8.

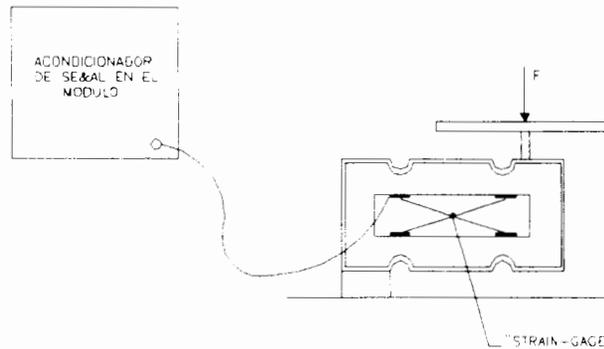


Figura 8

## EL Transductor de fuerza

El transductor empleado es una celda de carga dotada de extensómetros resistivos. Al aplicarse al dispositivo una fuerza se obtiene una deformación de la estructura metálica como la ilustrada en la figura 9.

La precisión de la conversión, y por lo tanto de la medida de la fuerza, depende notablemente de la calidad de las conexiones entre la celda de carga y sus planos de apoyo. Estos últimos han de ser rígidos, muy planos y deben crear un contacto lo más extenso posible que no sea variable según la posición y el valor de la carga. Esta óptima rigidez permite una mayor extensión del área del plano de carga del transductor, es decir, que el transductor de fuerza conviene mucho para convertir cargas que se hallan fuera del eje; esto es, que puede aceptar planos de ponderación que alcancen una superficie de 15 X 20 cm.

Ya que, debido a las sobrecargas, las celdas pueden dañarse (aunque no estén conectadas eléctricamente), deberá prestarse mucha atención durante la fase de montaje de las celdas con bajo valor de plena escala (por ejemplo, de 0.5 a 20 kg); en este caso, es absolutamente necesario evitar torsiones y sobrecargas superiores al valor de plena escala.

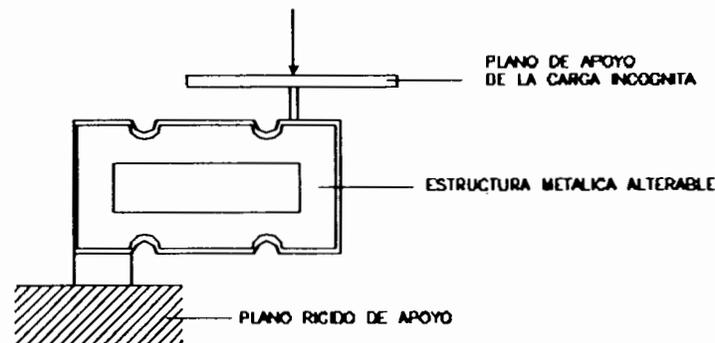


Figura 9

La fuerza resulta ser siempre el producto de la masa y de la aceleración (es decir  $F = m a$ ); por ello, si se golpea la celda, esta podría ser sometida a acciones fuera de su campo de tolerancia. En el caso de ciclos de ponderación rápidos o de caídas de carga sensibles, se prefiere escoger celdas con valores de plena escala sobreexcedentes.

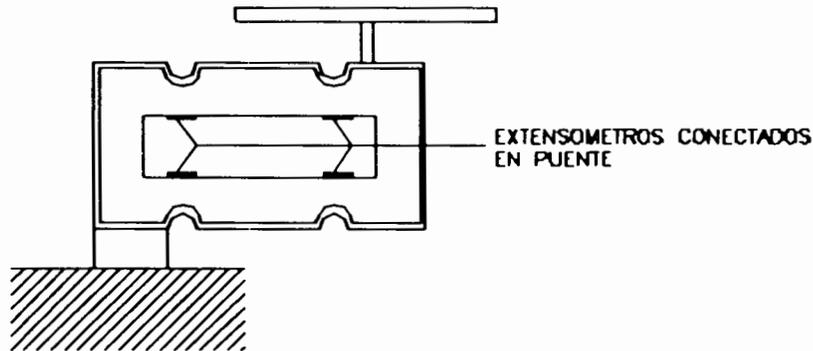


Figura 10

En el dispositivo, hay cuatro extensómetros utilizados para determinar las deformaciones de la estructura mecánica al aplicarse las cargas; éstos son del tipo resistivo y están conectados en puente.

En la figura 10 se halla representada la disposición de los extensómetros.

La celda de carga procede a la compensación térmica automática y a la eliminación del efecto de rigidez de los conductores de interconexión.

Además los extensómetros están protegidos generalmente contra la humedad, esto para obtener parámetros eléctricos más constantes y una estabilidad de medición mejor.

Debe observarse que en el transductor falta el tornillo de regulación de la sobrecarga; por lo tanto habrá que poner atención en no superar el valor límite del dispositivo, pues, de otro modo, podría ocurrir la ruptura de la celda.

Cabe mencionar que la polaridad de la señal de salida es negativa en condiciones de compresión, y positiva en condiciones de tensión.

#### **Acondicionador de Señal para el Transductor de Fuerza con Extensómetros Resistivos.**

Debido al transductor utilizado (celda de carga), la señal de salida del transductor es muy baja, por lo que el acondicionador tendrá que encargarse de efectuar una amplificación elevada, con el fin de poder obtener una señal de salida de fácil manipulación. Además deberá proporcionar un "offset" adecuado que permita la adaptación de las escalas ( variaciones de amplificación ), para poder obtener una correspondencia numérica entre la fuerza y el voltaje. El circuito de interface, íntegramente reproducido en el panel didáctico (módulo G25), es el que se muestra en la figura 11.

El voltaje de referencia de 10 V. se consigue por medio del regulador de voltaje IC1. En este circuito integrado la variación del voltaje de referencia, en función de la temperatura, es muy baja (siendo el máximo de 0.015%/C); de esto resulta que para una variación de temperatura de 50C, se obtiene una variación de

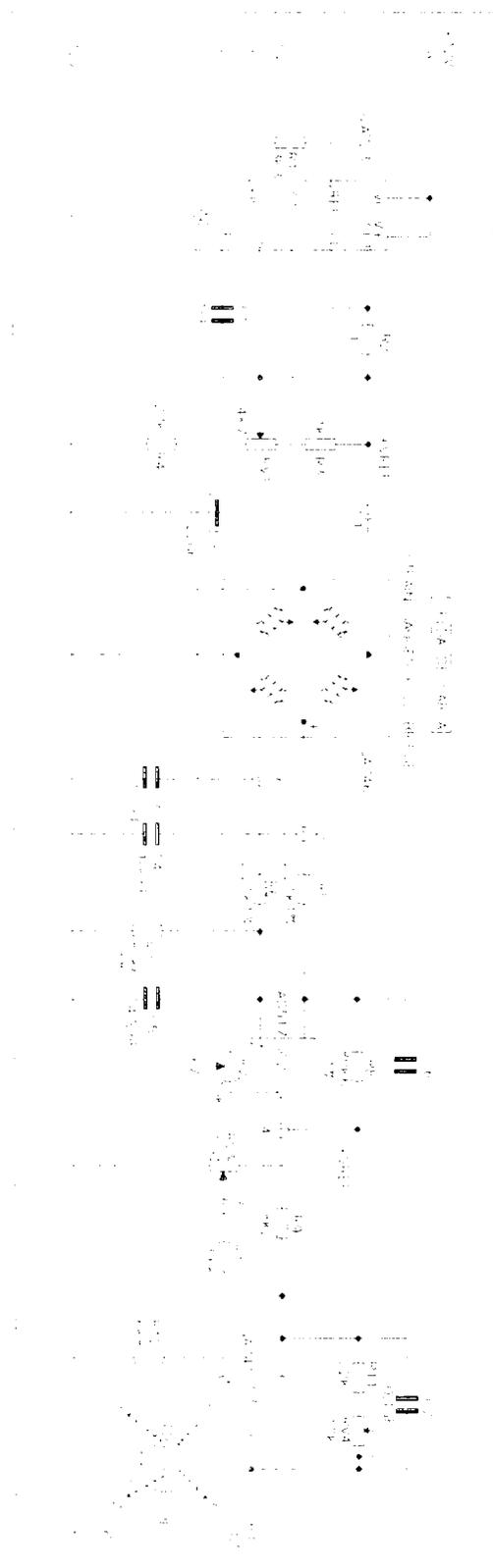


Figura 11

excitación igual a 0.075 Volts, esta variación resulta notablemente despreciable respecto a la variación vista en el transductor.

La regulación del voltaje de referencia se realiza mediante el potenciómetro RV1.

El voltaje de referencia alimenta a la celda de carga en configuración de puente y su salida está conectada a la entrada diferencial de la etapa amplificadora.

La etapa de amplificación está constituida por un amplificador diferencial (amplificador operacional IC2 en conexión diferencial). El operacional empleado presenta, al variar la temperatura, una baja desviación del voltaje de "offset" en la entrada.

Este operacional indica un valor de  $3 \frac{\mu V}{^{\circ}C}$ ; con el cual se obtiene una variación del voltaje de "offset" de  $150 \mu V$  para una variación de la temperatura de  $50^{\circ}C$ . Debido a que  $2mV$  corresponden a  $1 Kg$ , se obtiene un error total de  $75$  gramos ( $\frac{150 \mu V}{2mV} \times 1000gr$ ), el cual corresponde aproximadamente al error de no linealidad del transductor y es netamente inferior a la desviación de la medida debido a la variación de temperatura del transductor.

El amplificador diferencial ofrece una ganancia de  $36.5$  y está provisto de un potenciómetro (RV2) para la puesta a cero del voltaje de "offset" del transductor.

La salida del amplificador diferencial entra a otra etapa de amplificación (IC3) cuya función es la de adaptar las escalas y eliminar el "offset".

Para esto, se ha previsto una amplificación regulable por medio del potenciómetro RV4 (amplificación de  $2.7$  a  $3.9$ ) y una regulación de "offset" variable entre  $0$  y  $6.8$  Volts mediante el potenciómetro RV3.

De este modo, a la salida se obtendrá un voltaje que será proporcional a la fuerza según la relación:  
 $100mV = 1Kg$ .

Los amplificadores del acondicionador realizan también una función filtrante (Filtro paso bajo), para eliminar los ruidos de alta frecuencia.

#### **OBJETIVO:**

- Familiarización con el uso del transductor de fuerza, tipo celda de carga resistiva, y determinación de la linealidad del propio transductor, la linealidad del transductor-acondicionador así como el análisis y calibración del acondicionador de señal.

#### **EQUIPO Y MATERIAL:**

- Voltmetro digital.
- Fuente de voltaje (PS1).
- Módulo G25 (Acondicionador de fuerza).
- Celda de carga.

- Pesos patrón
- Cables de conexión.
- Lámpara incandescente.

## DESARROLLO

### EXPERIMENTO 1. CALIBRACION DEL ACONDICIONADOR DE SEÑAL.

- Conectar los bornes +12,-12 y 0 V del panel a la fuente de voltaje (apagada).
- Utilizando el conector apropiado, conectar la celda de carga al panel.
- Conectar el voltmetro digital entre el borne 1 y el borne de tierra.
- Encender la fuente.
- Regular el potenciómetro RV1 hasta que se lea un voltaje de 10.0 V en el voltmetro digital .
- Conectar ahora el voltmetro digital entre el borne 4 y el borne de tierra.
- Conectar a tierra los bornes 2 y 3 del panel.
- Regular el potenciómetro RV2 hasta que se lea 0 V en el voltmetro digital.
- Desconectar los bornes 2 y 3 de tierra.
- Conectar el voltmetro digital en la salida "out".
- Regular el potenciómetro RV3 hasta que se lea 0 V en el voltmetro digital.
- Cargar la celda de carga con un peso patrón menor o igual a 20 Kg.
- Regular el potenciómetro RV4 hasta obtener una lectura correspondiente a una sensibilidad de  $\frac{0.1V}{Kg}$

### EXPERIMENTO 2. DETERMINACION DE LA CURVA DE CALIBRACION DEL TRANSDUCTOR.

- Llevar a cabo la calibración del acondicionador.
- Conectar el voltmetro digital con la salida "out".
- Cargar la celda con pesos de valor conocido (en saltos de 250 gr.) y medir el voltaje de salida.
- Anotar los resultados en la tabla 1

N	F [Kg]	Vout [V]

Tabla 1

### EXPERIMENTO 3. DETERMINACION DE LA CURVA DEL TRANSDUCTOR BAJO EFECTO DE TEMPERATURA.

- Llevar a cabo la calibración del acondicionador.
- Calentar la celda de carga (mediante una lámpara incandescente) y en estas condiciones de temperatura, obtener los datos en forma similar que en el experimento 2 y registrarlos en una tabla similar a la tabla 1.

### EXPERIMENTO 4. DETERMINACION DE LA CURVA DEL TRANSDUCTOR BAJO EL EFECTO DE CALENTAMIENTO DEL TRANSDUCTOR.

- Llevar a cabo la calibración del acondicionador.
- Calentar el acondicionador de señal mediante una lámpara incandescente y en estas condiciones de temperatura obtener los datos de forma similar que en el experimento 2 y registrarlos en una tabla semejante a la tabla 1.

### ANALISIS DE DATOS Y RESULTADOS

1. Mencione cual es el objeto de la calibración, especificando las funciones de los potenciómetros utilizados.
2. Hacer una grafica de fuerza contra voltaje a partir de los datos obtenidos en el experimento 2.
3. Trazar la recta óptima del transductor por medio de un método gráfico, como el de pares de puntos, o analíticamente con un método de ajuste de curvas.
4. Obtener la linealidad del transductor bajo las condiciones del experimento 2.
5. Obtenga el modelo matemático del transductor.
6. Obtenga los siguientes parámetros:
  - Resolución.

-Sensibilidad.

-Rango de operación.

7. Con base a los datos del experimento 3 repita los puntos 2, 3 y 6.
8. Dibujar en una misma gráfica la recta óptima obtenida del experimento 2 y la recta óptima del experimento 3.
9. Con base a los datos de la gráfica anterior, calcular la variación relativa al voltaje de plena escala, expresada en valores porcentuales, donde  $V_1$  es el voltaje a una fuerza dada a la temperatura ambiente y  $V_2$  el voltaje a la misma fuerza con la celda calentada.
10. Con base a los datos del experimento 4 repita los puntos 2, 3 y 6.
11. Dibujar en una misma gráfica las rectas óptimas obtenidas de los experimentos 2 y 4.
12. Con base a los datos de la gráfica anterior, calcular la variación relativa al voltaje de plena escala, expresada en valores porcentuales, donde  $V_1$  es el voltaje a una fuerza dada a la temperatura ambiente y  $V_2$  el voltaje a la misma fuerza con el acondicionador calentado.
13. Explique como afecta la temperatura en la respuesta del transductor y compárela con la variación teórica.



## TRANSDUCTORES DE PRESION

La presión se define como fuerza por unidad de superficie, y se expresa en diversas unidades. La unidad estandarizada es el pascal (Pa) que corresponde a  $1 N/m^2$ , sin embargo en la mayoría de los procesos industriales se utilizan unidades tales como el bar, la atmósfera, mmHg y cmH<sub>2</sub>O, etc. En el Apéndice A se presenta una tabla de conversión de unidades de presión.

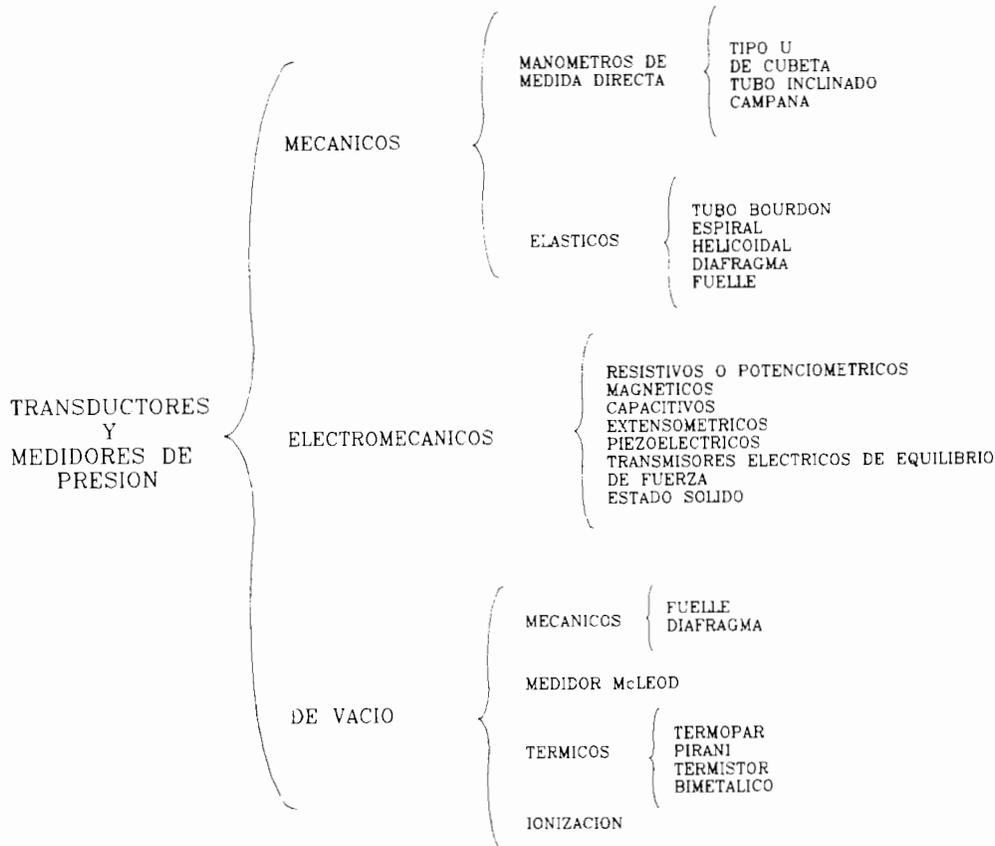
Existen básicamente dos tipos de valores en los que se puede medir la presión, dependiendo de la referencia que se tome, la cual puede ser el cero absoluto o la presión atmosférica, de manera que bajo estas referencias se tiene:

- Presión absoluta.
- Presión diferencial.

**Presión absoluta.** Es la que se mide en relación al cero absoluto de presión, es decir, con respecto al vacío perfecto, por lo que los transductores de presión absoluta son dispositivos que miden la presión absoluta del medio ambiente o de una fuente de presión, teniendo como referencia el vacío.

**Presión atmosférica.** Es la que ejerce la atmósfera sobre la superficie terrestre y varía dependiendo del lugar, a nivel del mar la presión atmosférica es de 760 mmHg o 1 atmósfera.

**Vacío.** Se le llama vacío a todas las presiones por debajo de la presión atmosférica.



Presión diferencial. Es la diferencia entre dos presiones existentes, medidas con transductores o medidores que tienen dos entradas de presión independientes.

Presión relativa o manométrica. Es un caso especial de la presión diferencial, solo que una de las fuentes de presión es el medio ambiente, midiéndose así la diferencia entre la presión absoluta y la atmosférica propia del lugar donde se efectúa la medición. Esta presión corresponde a una medición que toma como referencia la presión atmosférica.

Una clasificación de los transductores y medidores de presión es como la indicada en el cuadro sinóptico.

**Elementos Mecánicos**

Dentro de la clasificación de los elementos mecánicos se tiene por un lado los elementos de medida directa que funcionan mediante la comparación de la presión a medir con la ejercida por un líquido de densidad y altura conocida.

En este grupo se encuentran el manómetro tipo U, el de cubeta, el tubo inclinado, el de campana. Algunos de ellos se ilustran en la Figura 1.

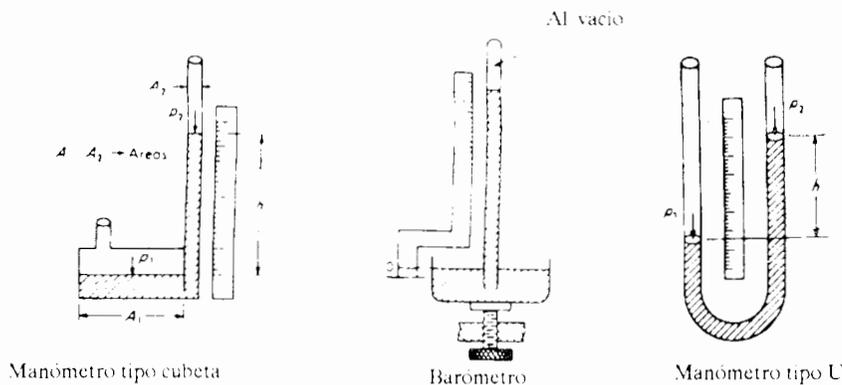


Figura 1

Por otro lado, los elementos primarios elásticos, mostrados en la Figura 2, se basan en aplicar la presión a medir en el interior del dispositivo, el cual tiende a expandirse o comprimirse y este movimiento es transmitido a una aguja indicadora u otro mecanismo de acoplamiento.

Los transductores más representativos de este tipo son el tubo de Bourdon, el diafragma y el fuelle, entre otros.

**El tubo de Bourdon.** Es un tubo de sección elíptica que forma un anillo casi completo, cerrado por un extremo. Al aumentar la presión en el interior del tubo, éste comienza a enderezarse y el movimiento es transmitido a una aguja indicadora por un sector dentado y un piñón. Para el tubo de Bourdon los materiales más usados son: el acero inoxidable, y la aleación de cobre. El elemento en espiral se forma enrollando el tubo de Bourdon en forma espiral alrededor de un eje.

**El diafragma.** Consiste en uno o varios discos circulares que se encuentran conectados rígidamente de forma tal que al aplicar una presión, cada disco se deforma, y la suma de éstos pequeños desplazamientos es amplificada por un par de palancas. Los materiales utilizados en los diafragmas son la aleación de níquel o inconel, la cerámica, el aluminio, y el silicio. Existen diversos tipos de diafragmas tales como corrugado, plano, horizontal, de cápsula, etc.

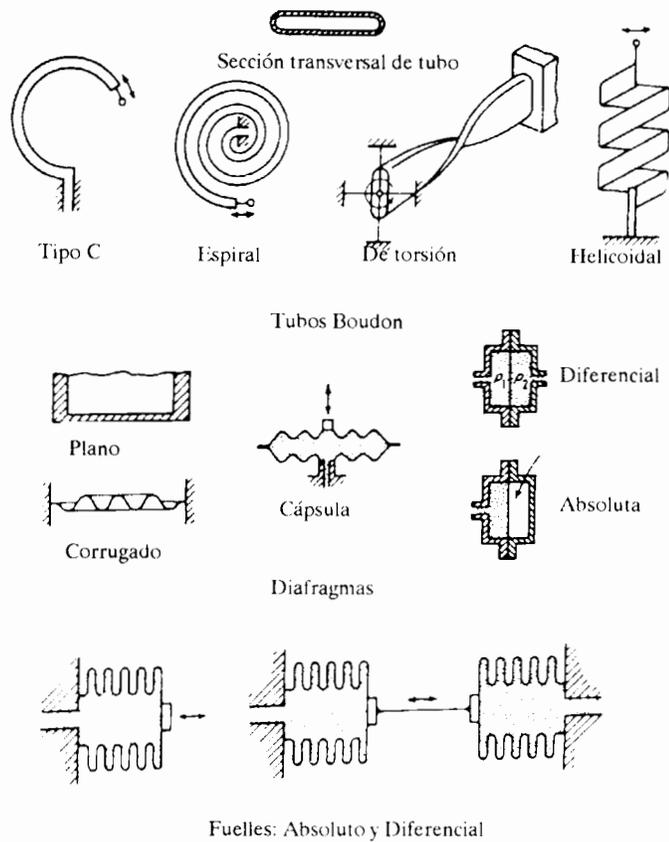


Figura 2

El diafragma de tipo horizontal consiste en un disco circular metálico cuyos bordes se encuentran fijos dentro de una cámara, donde una de las caras del diafragma está en contacto con el fluido que está bajo presión, lo cual provocará una deformación en el diafragma, que es proporcional a la presión ejercida. Si se utilizan dos diafragmas de este tipo se obtiene un diafragma de cápsula, el cual soporta mayores presiones, ocasionando mayores deformaciones debido a que se conectan en serie los diafragmas, permitiendo medir presiones absolutas y diferenciales.

**El fuelle** es parecido al diafragma de cápsula, pero es una sola pieza flexible axialmente y puede dilatarse y contraerse con un desplazamiento considerable.

### Elementos Electromecánicos.

Los elementos electromecánicos utilizan un elemento mecánico elástico en combinación con un transductor eléctrico el cual genera una señal eléctrica de salida. El elemento mecánico convierte la presión a medir en una fuerza o en un desplazamiento el cual es detectado con el transductor eléctrico.

Dentro de la clasificación de los transductores y/o transmisores utilizados en los elementos electromecánicos se encuentran los Resistivos o Potenciométricos, Magnéticos, Capacitivos, Extensométricos, Piezoeléctricos, Transmisores de equilibrio de fuerza y de Estado sólido

**Transductores resistivos o potenciométricos.** Estos se basan en que el desplazamiento provocado por un elemento elástico el cual hace variar la resistencia de un potenciómetro en función de la presión. Existen varios tipos de potenciómetros a utilizar: de grafito, de resistencia embobinada, de película metálica y plástico moldeado. La señal de salida de estos transductores es bastante potente, por lo que no es necesario una etapa de amplificación a la salida, sin embargo son insensibles a pequeñas variaciones del cursor y son sensibles a vibraciones.<sup>1</sup>

**Transductores magnéticos.** Los transductores magnéticos básicamente son de dos tipos:

- Transductores de inductancia variable en los que el desplazamiento de un núcleo móvil dentro de una bobina varía la inductancia casi proporcional al desplazamiento del núcleo. Dentro de este tipo de transductores también se utiliza el LVDT.<sup>2</sup>
- Transductores de reluctancia variable, en este caso se tiene un imán permanente que crea un campo magnético dentro del cual se mueve una armadura de material magnético. Al cambiar la posición de la armadura varía la reluctancia y por consiguiente el flujo magnético, esta variación del flujo provoca una corriente inducida en la bobina que es proporcional al desplazamiento de la armadura.

Al aplicar la presión al elemento elástico, éste desplaza el núcleo de la bobina o la armadura, generándose una señal eléctrica proporcional a la presión. Un diagrama esquemático de estos transductores se muestra en la Figura 3.

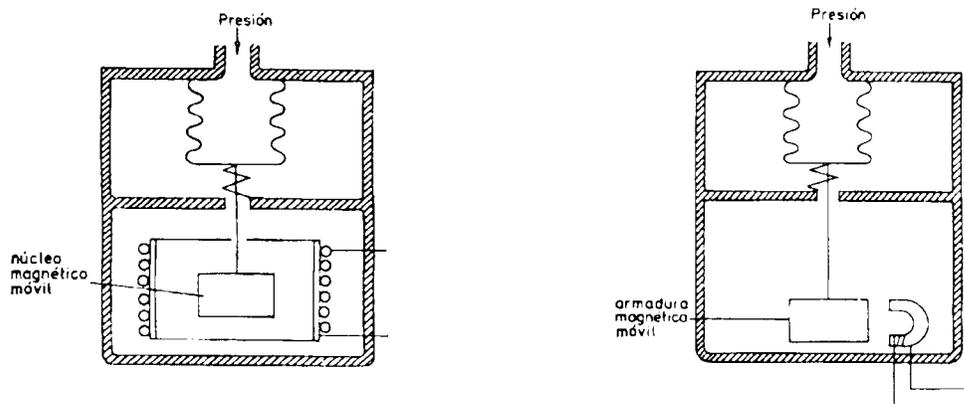


Figura 3

**Transductores capacitivos.** Se basan en la variación de capacidad que se produce en un capacitor al desplazarse una de sus placas por la aplicación de una presión. La placa móvil tiene forma de diafragma y se encuentra situada entre dos placas fijas del transductor, de este modo se tienen dos capacitores, uno de capacidad fija y otro de capacidad variable los cuales pueden medirse con un circuito en configuración puente de ca. Una configuración es la que se muestra en la Figura 4.

Se caracterizan por ser de tamaño pequeño y su robusta construcción, son adecuados para mediciones estáticas y dinámicas, su señal de salida es débil por lo que se requiere una etapa amplificadora a la salida del transductor, son sensibles a la temperatura.

1 Para más detalles ver la Práctica de Transductores de Desplazamiento.

2 Para más detalles ver la Práctica del LVDT.

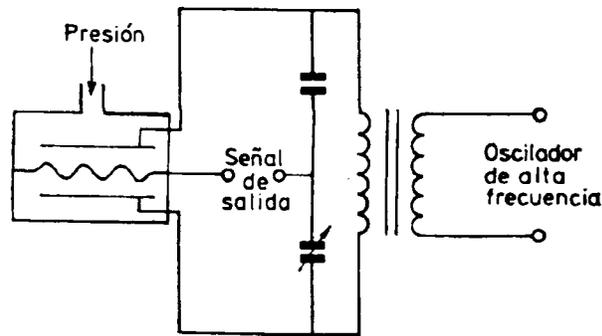


Figura 4

**Transductores extensométricos.** También llamados galgas extensométricas o strain gage. Se basan en la variación de longitud y de diámetro, por lo tanto de resistencia, que tiene lugar cuando un hilo de alambre se encuentra sometido a una tensión mecánica por la acción de la presión.<sup>3</sup>

**Transductores piezoeléctricos.** Estos elementos eléctricos, mostrados en la Figura 5, son materiales cristalinos que al deformarse físicamente por la acción de una presión, generan una señal eléctrica. La señal de respuesta varía en forma lineal con la presión de entrada, son adecuados para medidas dinámicas ya que son capaces de responder a frecuencias del orden de 1 MHz. Son elementos pequeños de construcción robusta sin embargo son sensibles a cambios de temperatura; requiere de amplificadores.<sup>4</sup>

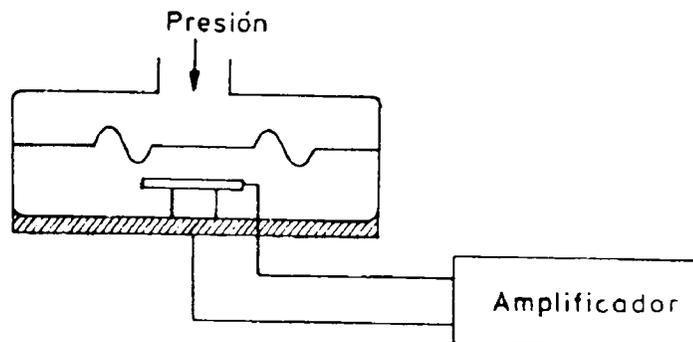


Figura 5

**Transmisores Electrónicos de Equilibrio de Fuerza.** Este tipo de dispositivos utilizan un circuito realimentado, como el de la Figura 6 y básicamente consta de un elemento elástico para detectar la señal de presión, este está acoplado a una barra móvil, el desplazamiento de la barra se detecta mediante un transductor de desplazamiento o de proximidad, la señal eléctrica alimenta a un oscilador del cual se obtiene por un lado la salida proporcional a la presión y por otro también se alimenta a una unidad magnética que reposiciona o equilibra la barra a su posición normal. Un circuito típico es el que se encuentra en la Figura 7.

3 Ver la práctica de Transductores de Fuerza.

4 Una aplicación de este transductor se presenta en la práctica de Aceleración y Velocidad.

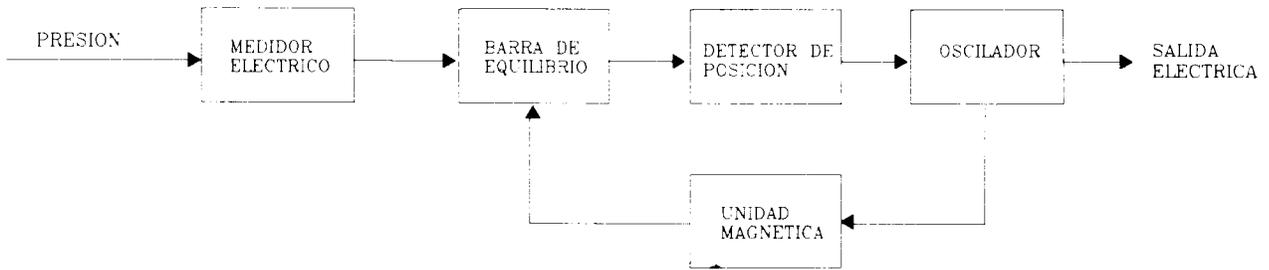


Figura 6.

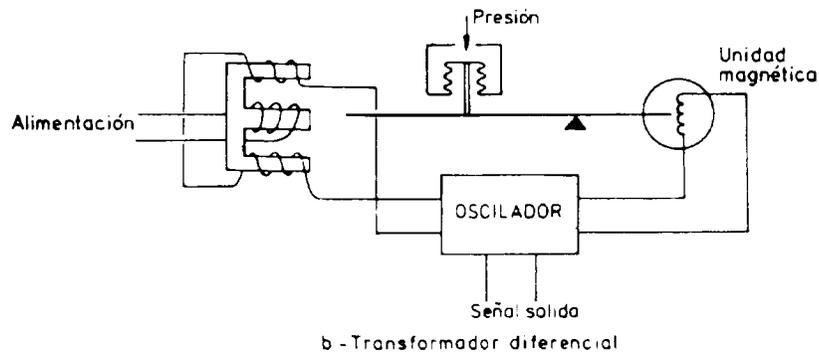
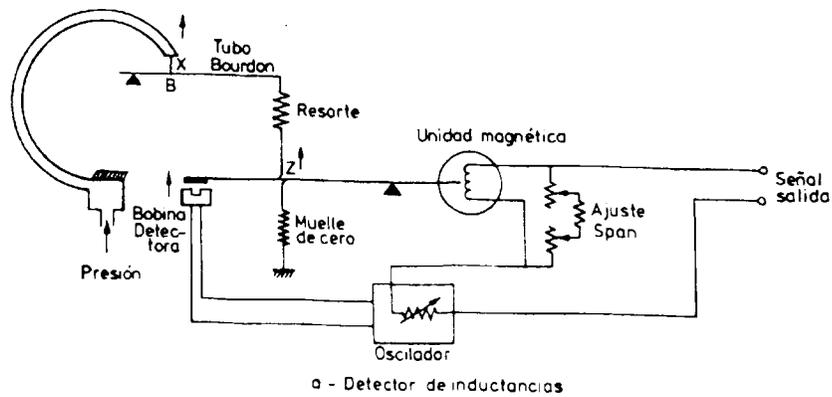


Figura 7

**Transductores de Presión de Estado Sólido o Monolítico.** Estos dispositivos reúnen en un solo dispositivo las funciones de conversión presión-desplazamiento-voltaje y se basan en principios tales como capacitivos, piezoeléctricos, piezorresistivos y de semiconductor, el funcionamiento de algunos de ellos se ha explicado anteriormente, la diferencia radica en que son elementos de estado sólido y por tanto de tamaño reducido.

Dentro de esta clasificación se encuentran los transductores de presión de semiconductor del tipo diferencial, que es el utilizado en esta práctica.

Su funcionamiento se basa en el fenómeno de la piezorresistividad; que es la propiedad que poseen ciertos materiales de cambiar la propia resistencia cuando sufren deformaciones.

En estos dispositivos se tienen resistencias conectadas en configuración de puente de Wheatstone, las cuales se obtienen mediante difusión sobre un soporte de silicio; cuya parte inferior - en una segunda fase- es sometida a una reacción química para crear el diafragma

La celda constituida por el puente va soldada electrostáticamente a un soporte de vidrio, de manera que quede desacoplada mecánicamente del ambiente exterior. El voltaje de salida del puente variará al cambiar la presión ejercida sobre el diafragma de silicio.

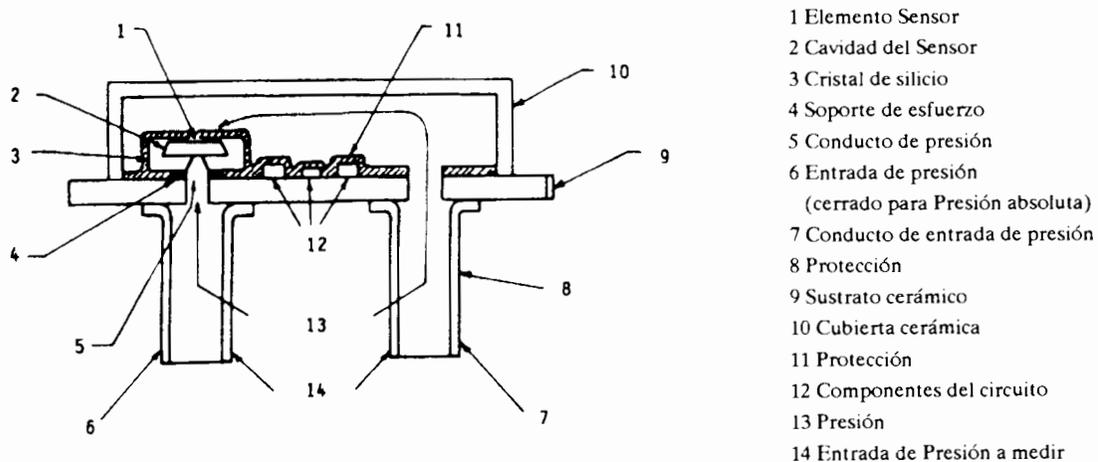


Figura 8

La Figura 8 muestra la estructura básica de un transductor de presión diferencial de semiconductor.

Las ventajas que ofrece este sensor son las reducidas dimensiones (cerca de un décimo en relación con otros transductores monolíticos), las buenas características eléctricas y el bajo costo del elemento sensible.

Las desventajas residen en la elevada variación de sensibilidad en función de la temperatura y en el hecho de que la parte sensible queda expuesta al fluido que se está midiendo.

Para evitar estas limitaciones, los transductores incluyen resistores trimer (realizados normalmente con los láser) que reducen las tolerancias de cero y la sensibilidad.

Para mejorar la linealidad, los cuatro resistores se conectan en configuración de puente (activo); el cual opera con voltaje constante.

Por otro lado, las características del transductor utilizado son las siguientes:

- Diferencial, con la posibilidad de funcionar como manómetro si se deja una de las entradas a la presión atmosférica.

## Práctica 8

- Campo de medidas comprendido entre 0 y 15 psi (o sea, entre 0 y 1.02 atm).
- Linealidad más elevada de  $\pm 0.25\%$  a plena escala.
- El transductor sólo puede emplearse para mediciones con gases.

**Transductores y Medidores de Vacío.** Los transductores electrónicos de vacío son muy sensibles y se emplean para medidas de alto vacío. Se tienen del tipo mecánico, medidor McLeod, térmicos y de ionización.

**Transductores mecánicos de fuelle y de diafragma.** Estos transductores miden la presión diferencial de la atmósfera y del proceso y por ser mecánicos están limitados a mediciones que no son de alto vacío, esto es, abarcan valores hasta de  $1\text{mmHg}_{\text{abs}}$ . Están acoplados a un transductor elástico como el extensómetro o el capacitivo para detectar el desplazamiento provocado por la presión diferencial.

**Medidor McLeod.** Se utiliza como aparato de precisión en la calibración de los restantes instrumentos. Se basa en comprimir una muestra de gas de gran volumen conocido a un volumen más pequeño y a una presión suficientemente alta para leerla con un manómetro, la Figura 9 muestra la configuración básica. No se recomienda usarlo para mediciones a base abajo de  $10^{-4}\text{mmHg}$ , pero usando técnicas de división de presión se puede utilizar como estándar de rangos más bajos.

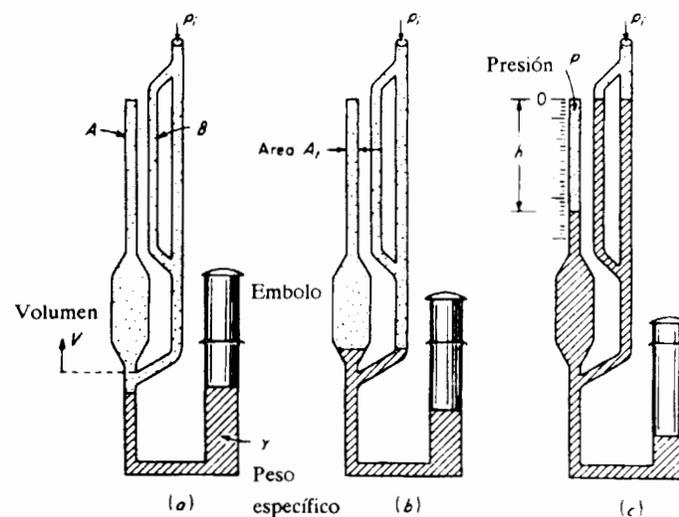


Figura 9.

**Transductores térmicos.** Se basan en el principio de la proporcionalidad entre la energía disipada desde la superficie caliente de un filamento calentado por una corriente constante y la presión del gas ambiente cuando el gas está a bajas presiones absolutas.

**Transductor de vacío de termopar.** Cuando la presión de un gas es suficientemente baja de manera que la trayectoria libre de moléculas es grande comparada con las dimensiones del medidor, existe una relación lineal entre la presión y la conductividad térmica. Las dimensiones adecuadas del medidor están dadas por el espaciamiento entre las superficies caliente y fría.

El Transductor de termopar se muestra en la Figura 10, tiene una superficie caliente que es una lámina delgada de metal cuya temperatura varía de acuerdo con una corriente que pasa a través de ella. Dependiendo del gas y la corriente, la temperatura se mide con un termopar soldado a la superficie caliente. Por otro lado la superficie fría es el tubo de vidrio que está a la temperatura ambiente.

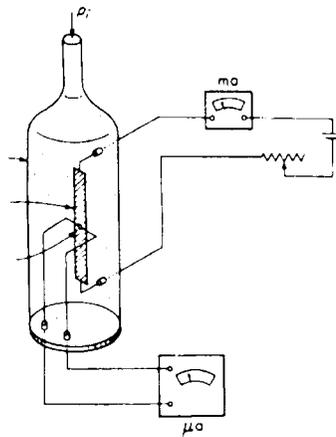


Figura 10.

**Transductor Pirani o de Resistencia** . Se muestra en la Figura 11 y utiliza un puente Wheatstone que compara las resistencias de los dos filamentos de tungsteno, uno sellado en alto vacío dentro de un tubo y el otro en contacto con el gas medido. La corriente que fluye por la resistencia la calienta a una temperatura que depende de la presión del gas. La resistencia eléctrica del elemento cambia con la temperatura y este cambio causa que el puente quede desbalanceado. El puente se utiliza como un dispositivo de deflexión en lugar de un detector de cero. Cualquier cambio en la presión causará un desbalance en el puente.

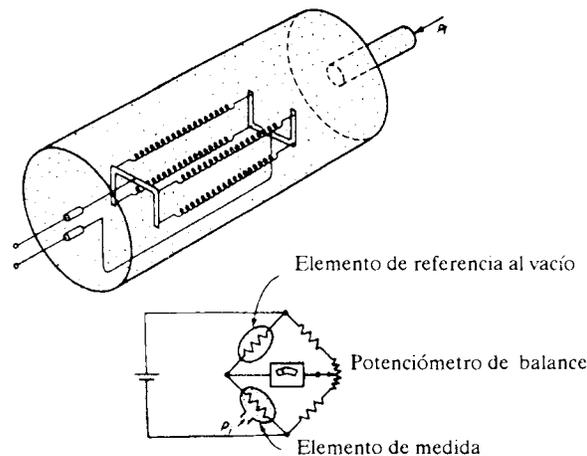


Figura 11

Tiene la ventaja de ser compacto y sencillo de funcionamiento, utilizándolo también a la presión atmosférica sin peligro de combustión. Tiene el inconveniente de que su calibración depende de la composición del gas medido, su intervalo de medida es de  $2 \times 10^{-3} \text{ mmHg}$  .

**Transductor de vacío de termistor.** Opera bajo el mismo principio que el Pirani excepto que los elementos de resistencia son materiales semiconductores sensibles a la temperatura llamados termistores. Son usados en el rango de  $10^{-4}$  a  $1 \text{ mmHg}$ .

**Transductor bimetalico.** Utiliza una espiral bimetalica calentada por una fuente de voltaje estabilizada. Cualquier cambio en la presión produce una deflexión de la espira, que a su vez está acoplada a un índice que señala en la escala el vacío, su intervalo de medida es de  $1 \times 10^{-3} \text{ mmHg}$ .

**Medidores de Ionización.** En un medidor de ionización se emite un flujo de electrones de un cátodo, algunos de ellos chocan con las moléculas del gas, haciendo que electrones secundarios abandonen las moléculas del gas como iones positivos. El número de iones positivos formados es directamente proporcional a la corriente de electrones  $i_e$  y directamente proporcional a la presión del gas.

Si la corriente  $i_e$  se mantiene fija, la velocidad de producción de iones positivos (generadores de la corriente de ión  $i_i$  de un gas es una medida directa del número de moléculas de gas por unidad de volumen y por tanto de la presión. Los iones positivos son atraídos a un electrodo cargado negativamente el cual los recolecta y genera la corriente de ion  $i_i$ .

En la Figura 12 se muestran los elementos básicos de un medidor de ionización de cátodo caliente. Cubre un rango de  $10^{-10}$  a  $1 \text{ mmHg}$ .

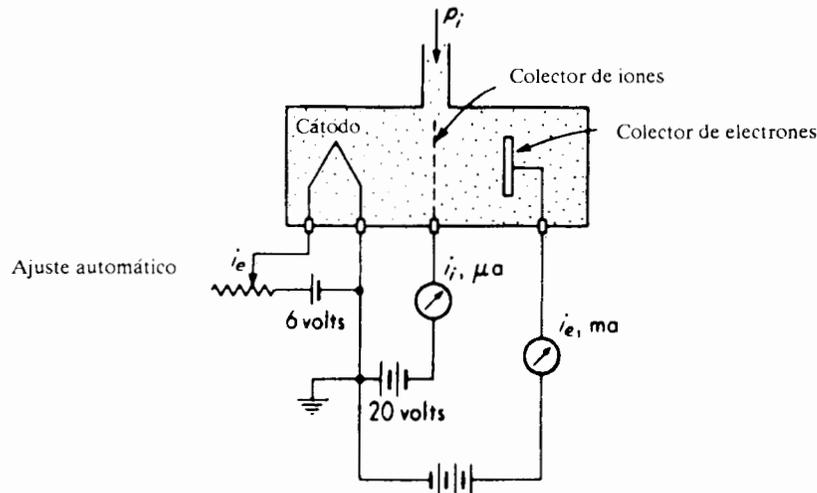


Figura 12

**PARAMETROS DEL TRANSDUCTOR DE PRESION.**

Existen diversas características que son importantes conocer a fin de darle al transductor el mejor empleo, entre ellas se encuentran:

- Tipo de presión a medir (absoluta o diferencial).
- Sustancia (líquida o gas) con la que el transductor puede estar en contacto.

- Rango de medida, que corresponde al cambio de presiones que el sensor es capaz de medir sin alterar la medición.
- Sobrepresión, que es el valor de presión máxima aplicada al transductor sin que sufra daños.
- Temperatura de operación, que es el rango de temperatura especificado por el fabricante para que el transductor opere adecuadamente, también se debe tomar en cuenta que la temperatura de la sustancia no exeda este rango.
- Linealidad es la desviación de la respuesta del transductor con respecto al modelo ideal.
- Resolución es la menor variación de la magnitud de entrada para la cual es posible tener variaciones apreciables en la salida.
- Estabilidad es la capacidad del transductor para mantener el valor de la señal de salida cuando el de la entrada se mantiene constante, se expresa en porcentajes de escala máxima .
- Repetibilidad es la capacidad de transductor para reproducir la señal de salida cuando se presenta a la entrada una misma señal en diferentes instantes.
- Voltaje de excitación es el valor de excitación al transductor.
- Sensibilidad que indica la relación entre la variación del voltaje de salida con respecto a las variaciones de presión, se expresa en  $V/psi$  o  $V/mmHg$ .

#### DESCRIPCION DEL EQUIPO.

El equipo está constituido por 2 partes fundamentales, el módulo acondicionador de la señal G24 y la unidad MIL 27 en la cual están montados el transductor de presión y el compresor manual el cual genera la presión patrón. Las dos partes quedan interconectadas a través de un cable. La Figura 13 muestra la disposición del equipo.

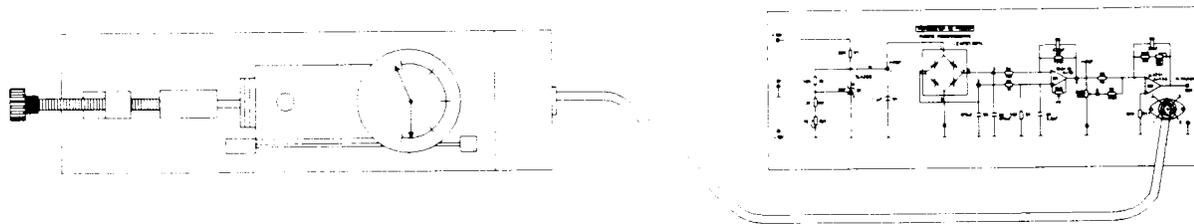


Figura 13

**UNIDAD MIL 27**

La unidad MIL 27 se muestra en la Figura 14 que está compuesto por un compresor de aire manual, el cual comprime el aire dependiendo de la posición de la perilla; un manómetro que indica la presión del aire y se toma como lectura de referencia; una válvula de escape y el transductor de presión.

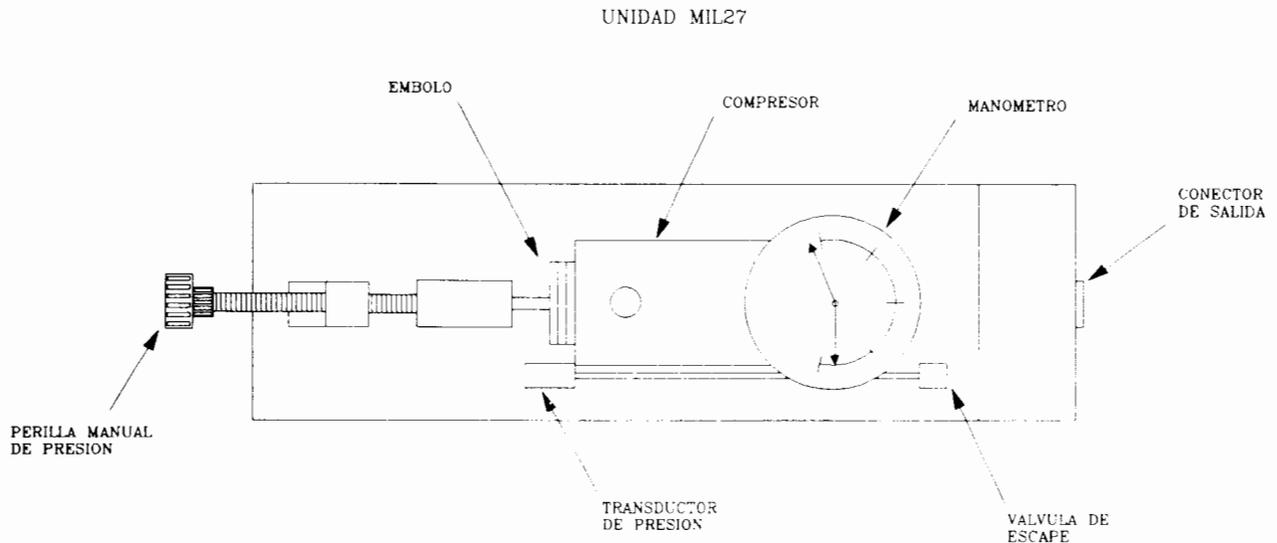


Figura 14

La unidad MIL 27 genera presiones de 0 a 2 bar, con límite en 2.5 bar. La perilla manual se utiliza para empujar el émbolo, en sentido horario se comprime el aire y la presión se indicará en el manómetro. La válvula de escape se utiliza para dejar salir totalmente el aire contenido en el compresor, desatornillando la cubierta y presionando el pivote en el interior.

**ACONDICIONADOR DE LA SEÑAL.**

El acondicionador de la señal para el transductor monolítico de semiconductor es simple, debido a que la señal que el sensor proporciona a la salida es suficientemente elevada. El acondicionador incluye potenciómetros para calibrar a cero y realiza una pequeña amplificación con el fin de adaptar las escalas. El diagrama esquemático se muestra en la Figura 15.

La señal de excitación se logra por medio de un regulador TL430C, cuya variación de voltaje con respecto a la temperatura es de 0.1%, por lo que resulta despreciable respecto a la variación porcentual de la salida del transductor, la regulación del voltaje de excitación se realiza mediante el trimmer Rv1.

La etapa de lectura está constituida por un amplificador diferencial, (CA3140) con una ganancia de 10.

El operacional IC1 está provisto de un potenciómetro Rv2 para ajustar a cero el voltaje de "offset", la señal de salida del amplificador diferencial pasa a una etapa de amplificación (operacional IC2  $\mu A741$ ) cuya función es la de adaptar las escalas y la de anular el "offset" del transductor, para lo cual está previsto una amplificación regulable por medio del potenciómetro Rv4 (con ganancia de 1 a 3) y una regulación de "offset" variable de 0 a 1.2 V mediante el trimmer Rv3, obteniéndose a la salida un voltaje que es proporcional a la presión con relación  $100 \text{ mV} = 1 \text{ psi}$ .

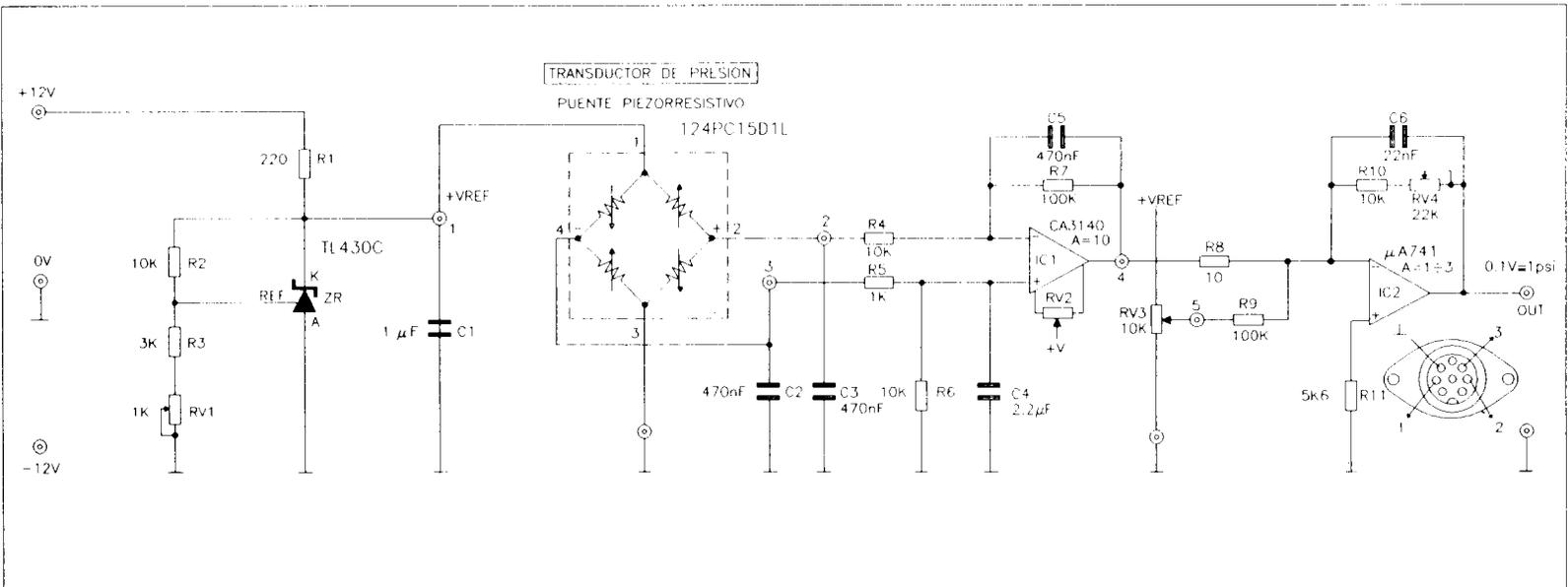


Figura 15

Los amplificadores del acondicionador también realizan una función filtrante, con el fin de eliminar ruidos presentes en la salida, la presencia de este filtro no afecta el funcionamiento del sistema, ya que las variaciones de presión son siempre muy lentas, las frecuencias de corte de los filtros es de aproximadamente 30 Hz.

### **OBJETIVOS**

- Conocer el principio de funcionamiento de los transductores y medidores de presión
- Analizar y comprender al comportamiento del transductor de presión de estado sólido, así como su acondicionador de señal.
- Determinar la respuesta y parámetros principales del medidor de presión.

### **MATERIAL**

- Unidad MIL27
- Módulo G24
- Fuente de alimentación PS1
- Voltmetro digital
- Termómetro
- Banco de focos
- Circuitos de lámparas incandescentes
- Cables de conexión

### **EXPERIMENTO 1: CALIBRACION**

- Alimentar al módulo con  $\pm 12V$  y tierra con la fuente PS1.
- Verificar que el voltaje  $V_{ref}$  en el borne 1 sea de 11 V, de lo contrario ajustar con el potenciómetro Rv1 hasta ajustar dicho voltaje.
- Conectar las entradas del amplificador diferencial IC1 a tierra (bornes 2 y 3) y verificar que el voltaje a la salida del amplificador diferencial IC1 (en el borne 4) sea 0 V, de no ser así ajuste con el potenciómetro RV2.

- Girar la perilla manual de presión en sentido antihorario, de manera que quede lo más afuera posible.
- Abrir la válvula de seguridad de la unidad MIL27 y oprimir su pivote para asegurarse de que no haya aire almacenado en el compresor.
- Verificar que la aguja del manómetro indique 0 bar de presión.
- Verificar que el voltaje a la salida del amplificador diferencial IC2 sea de 0V, de no ser así ajustarlo con el potenciómetro RV3.
- Quitar los cables de los bornes 2 y 3 a tierra.
- Colocar la válvula de seguridad y generar una presión de 0.14 bar.
- Verificar que el voltaje de salida del módulo Vout sea de 200mV con respecto a tierra, de lo contrario ajustarlo con el potenciómetro RV4. Si no se consigue, utilizar el potenciómetro RV3 y nuevamente el potenciómetro RV4 para una ajuste más fino.

**EXPERIMENTO 2: OBTENCION DE LA CURVA PRESION- VOLTAJE**

- Una vez calibrado el módulo del acondicionador de la señal, colocar el voltmetro digital a la salida Vout.
- Asegurarse de que esté puesta la válvula de seguridad y generar la presión en intervalos de 0.2 bar hasta el máximo valor de presión que se consiga. Es importante tomar la temperatura ambiente.
- Tomar los datos del voltaje en Vout y asentarlos en la Tabla 1.
- Determine cuál es el valor mínimo de presión aplicada que produce un voltaje de salida.

PRESION	VOLTAJE

Tabla 1.

---

**EXPERIMENTO 3: DETERMINACION DE LA CURVA PRESION-VOLTAJE AL VARIAR LA TEMPERATURA DEL TRANSDUCTOR DE PRESION.**

- Una vez calibrado el módulo del acondicionador de la señal, calentar por 25 minutos el transductor de presión mediante focos o lámparas.
- Colocar el voltmetro en Vout y tomar la temperatura del transductor.
- Tomar las lecturas de los voltajes con intervalos de 0.2 bar y asentarlas en la Tabla 2.

Temperatura	PRESION	VOLTAJE

Tabla 2

**ANALISIS DE DATOS Y RESULTADOS.**

- 1.- ¿Qué tipo de presión mide el transductor utilizado?
- 2.- ¿Cuál es la sustancia (líquido o gas) que mide el transductor?
- 3.- ¿Cuál es el rango de medida?
- 4.- Grafique la curva característica del medidor presión-voltaje.
- 5.- Con base a la gráfica anterior determine la linealidad.
- 6.- ¿Cuál es la resolución del medidor?
- 7.- Determine la sensibilidad del medidor de presión.
- 8.- ¿En qué afecta la temperatura?.
- 9.- Compare los datos obtenidos con los especificados por el fabricante, incluidos en el Apéndice A.

## TRANSDUCTORES DE LUMINOSIDAD

Los componentes optoelectrónicos han tenido una amplia difusión en la electrónica moderna. Se han usado en gran medida en el proceso de conversión de energía mecánica en señales electrónicas y, por su funcionamiento como transformadores de señales ópticas en señales o energía eléctrica (corriente o voltaje) ayudando en la solución de muchos problemas. Como ejemplos de algunas aplicaciones clásicas se pueden mencionar las siguientes:

Barreras luminosas para el control de producción.

Dispositivos de protección

Aparatos de control y regulación luminosa.

Alarmas de incendio

Exploración de fichas y cintas perforadas

Posicionadores de máquinas herramientas (medición de longitudes, ángulos y posiciones)

Inspección de instrumentos ópticos y de procesos de encendido

Conversión de la energía luminosa en energía eléctrica.

Los transductores de luminosidad son fabricados de elementos semiconductores (silicio, germanio o arseniuro de galio), existen en particular tres tipos: fotodiodos, fotorresistencias y fototransistores.

Estos transductores son capaces de variar sus condiciones de operación eléctrica de acuerdo a la cantidad de luminosidad que incide sobre el semiconductor produciendo señales eléctricas que pueden ser interpretadas y manipuladas si son conectados adecuadamente a circuitos electrónicos.

El tipo radiación luminosa que pueden detectar los sensores varía de acuerdo con el material con el que se fabrican, de aquí que se puedan tener transductores que respondan al rango de la radiación ultravioleta, de la luz visible o del infrarrojo. La radiación luminosa se encuentra localizada en una región del espectro electromagnético cuyas velocidades de propagación son iguales en el vacío, diferenciándose por sus longitudes de onda y por consiguiente por su frecuencia ( $C_0 = \lambda \gamma$ , donde  $C_0$  es la velocidad de propagación en el vacío,  $\lambda$  la longitud de onda y  $\gamma$  la frecuencia de la onda). Parte del espectro electromagnético en el que se encuentran las ondas de frecuencias mencionadas se muestra en la figura 1.

En la zona marcada como radiación luminosa de la figura 1 se hayan comprendidas las regiones infrarroja, visible y ultravioleta, en donde la región visible es la que detecta el ojo humano, estando sus límites en aproximadamente las longitudes de onda de  $0.43 \mu m$  y  $0.63 \mu m$ .

## Práctica 9

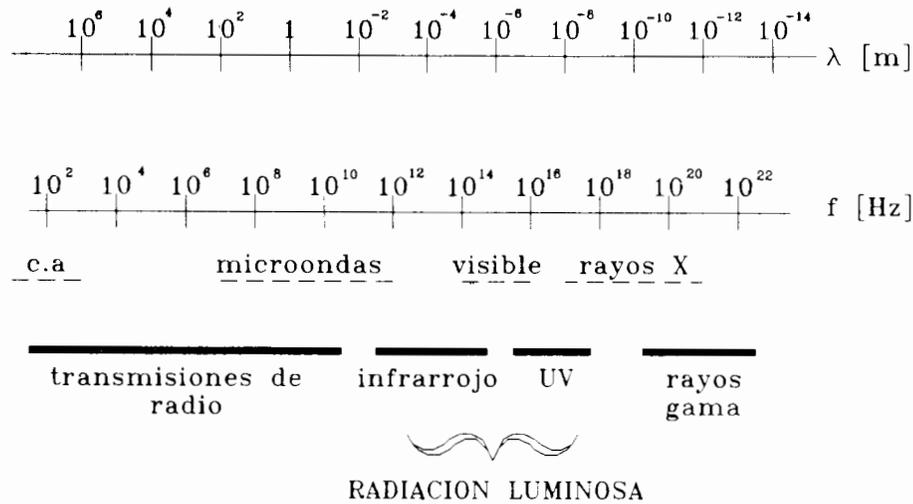


Figura 1. Espectro en frecuencia algunas ondas electromagnéticas.

### Materiales semiconductores

En general los elementos se pueden clasificar en tres grupos:

- Materiales aislantes
- Materiales conductores
- Materiales semiconductores

Los átomos de éstos materiales forman estructuras cristalinas y sus electrones se agrupan en niveles de energía, los cuales a su vez forman dos bandas: la banda de valencia y la banda de conducción.

La banda de valencia está formada por los electrones que necesita el átomo del material para ser eléctricamente neutro; mientras que la banda de conducción esta compuesta por los electrones que pertenecen a átomos que habiendo completado su último orbital, compartiendo sus electrones con los átomos cercanos, se pueden desprender del átomo con una pequeña energía. En la figura 2 se muestran las bandas de niveles de energía para los tres tipos de materiales, en la que se observa que para los aislantes la banda de conducción se encuentra vacía y la de valencia llena, para los conductores la banda de valencia se encuentra llena y la banda de conducción contiene una gran cantidad de electrones con posibilidad de moverse, y para los materiales semiconductores se observa que la banda de valencia se encuentra semillena, encontrándose el resto de los electrones en la banda de conducción.

Hay que mencionar que para los tres tipos de materiales en estado puro, el potencial necesario para arrancar del átomo a un electrón de la banda de valencia debe ser muy grande, con lo que, antes de mover al electrón se rompería la estructura cristalina. En el caso particular de los conductores, en la banda de conducción se encuentran una gran cantidad de electrones, por lo que al someter el material a un potencial éstos pueden moverse fácilmente.

Los átomos de los materiales semiconductores son de valencia 4, por lo que la red cristalina que forma es en forma de un tetraedro, completando su último orbital con la formación de enlaces covalentes con los átomos vecinos. En la figura 3 se muestra la estructura cristalina para los átomos de los materiales semiconductores. Los materiales semiconductores, en particular, tienen poca capacidad de conducción en estado puro, sin embargo si se modifica la estructura cristalina agregando átomos de otros elementos (por difusión) durante el

proceso de fabricación (de forma tal que los átomos de la mezcla pertenezcan del todo al cristal), se puede lograr que la distancia energética que existe entre las bandas de valencia y de conducción se reduzca y por tanto el salto de los electrones de la banda de valencia a la de conducción puede ser provocado por potenciales pequeños (en el caso de los dispositivos optoelectrónicos es posible por medio de radiación luminosa).

El comportamiento del material semiconductor puede cambiar de acuerdo con el elemento que se agregue, de tal forma que si el material es de valencia 5 (comunmente se usan antimonio, azufre ó fósforo), en la estructura cristalina se formarán con los átomos de ambos materiales cuatro enlaces con los electrones de ambos y un electrón del átomo de impureza quedará atado con menos fuerza; si esto sucede con todos los átomos de la estructura, entonces el material contendrá una gran cantidad de portadores (donores ó cargas libres); este material recibe el nombre de material tipo N.

Cuando al material semiconductor se le agrega un material de valencia 3 (comunmente se usan aluminio, boro, galio o indio), en la estructura cristalina se formarán, con los electrones de los átomos de ambos materiales, tres enlaces, quedando sin cubrir una carga positiva, con lo que el material contará con una gran cantidad de átomos aceptores (huecos); el material descrito es llamado material tipo P.

El material tipo N se dice que contiene cargas positivas fijas y cargas negativas móviles, mientras que el material tipo P tiene cargas negativas fijas y cargas positivas móviles. Por lo general con los semiconductores se elaboran dispositivos electrónicos a partir de la unión de dos o más de estos materiales, como ejemplos se pueden mencionar los diodos con unión P-N y los transistores con uniones P-N-P y N-P-N. Otra manera de hacer que en el material semiconductor existan mayor número de portadores libres es aumentando la temperatura del cristal, sin embargo, la cantidad de donores o aceptores producidos es muy pequeño.

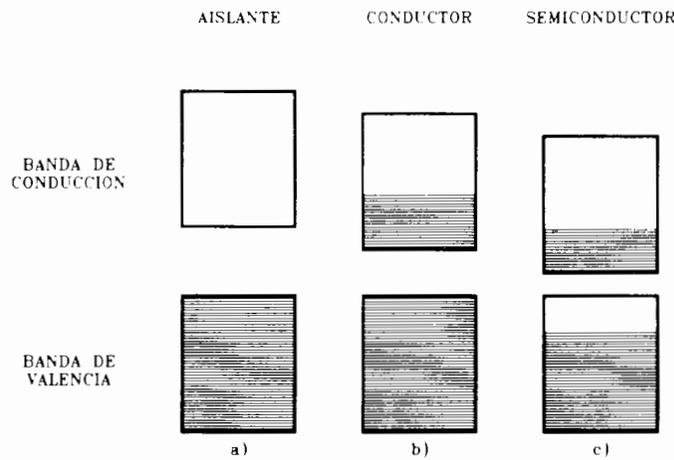


Figura 2. Bandas de niveles de energía para los aislantes (a), los conductores (b) y los semiconductores (c)

### Fotoconductividad

Los potenciales usados para hacer que los materiales semiconductores entren en la región de conducción, son obtenidos de fuentes de voltaje de corriente continua, sin embargo en el caso particular de los transductores de luminosidad se usa el "Efecto Fotoeléctrico", que consiste en la generación de pares electrón-hueco en los semiconductores cuando estos materiales se hallan expuestos a radiaciones luminosas, aumentando de esta forma la propia conductividad (fotoconductividad).

La fotoconductividad se explica considerando que la conductividad de un material es proporcional a la concentración de portadores de carga presentes.

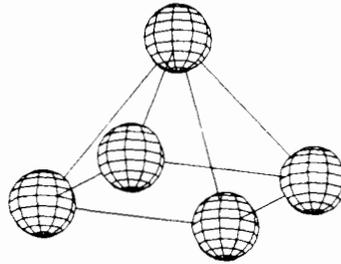


Figura 3. Formación cristalina de los semiconductores, en forma de tetraedro

La energía radiante que llega hasta un elemento de material semiconductor provoca la ruptura de los enlaces covalentes, generando pares hueco-electrón en exceso respecto a los que se crean por agitación térmica.

El incremento de los portadores de carga hace disminuir la resistividad del material; aumentando de este modo la conductividad.

Si un material semiconductor con impurezas (ya sea donoras o aceptoras) es alcanzado por un fotón (de suficiente nivel energético), se producen pares electrón-hueco; dando lugar, así, a la excitación intrínseca, un fotón puede excitar a un electrón donador a la banda de conducción, del mismo modo que un hueco de valencia puede ser llevado al nivel de aceptor, conociéndose estos dos fenómenos como transición de impurezas. Las transiciones provocadas por un fotón de suficiente nivel energético se indican en el diagrama de energía de la figura 4.

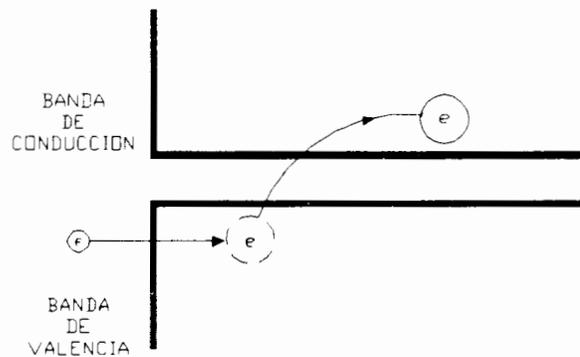


Figura 4. Fotoexcitación en un semiconductor.

### Fotorresistencias.

También se les llama fotoconductores o celdas fotoconductoras, son componentes pasivos de semiconductores privados de uniones. Cuando son expuestos a una radiación luminosa su resistencia varía debido al efecto fotoconductorivo.

En la obscuridad los fotorresistores se comportan como aislantes, presentando valores de resistencia del orden de los megaohms, por el contrario si son iluminados intensamente su resistencia decrece al orden de los ohms, aumentando así su conductividad.

En el caso de esta práctica se usa la fotorresistencia NSL-467, sus principales características son las siguientes:

1. La respuesta espectral corresponde a una longitud de onda de  $0.55 \mu$  (zona del espectro visible)

2. La Resistencia sin radiación luminosa (resistencia oscura)  $4\text{ M}\Omega$ .
3. Voltaje máximo de pico 250 volts y potencia máxima 100 mW.

### Fotodiodos

Los fotodiodos son dispositivos semiconductores que contienen una unión p - n. En la obscuridad se comporta como un diodo normal, tanto polarizado en directa como en inversa. Al exponer la unión (con polarización inversa) a una radiación luminosa, se puede observar un aumento de portadores minoritarios (huecos en el material n y electrones en el material p) por lo que la corriente inversa aumenta proporcionalmente a la intensidad luminosa.

El fotodiodo usado es el TIL 38 con las siguientes características:

1. Corriente oscura  $50\text{ nA}$ , con un voltaje de inversa de 10 V
2. Potencia disipada 150 mW.

### Fototransistor

El fototransistor es un dispositivo cuya base es fotosensible, encontrando su mayor sensibilidad espectral próxima al extremo infrarrojo del espectro visible, de aquí que sean usados para detectar la luz emitida por lámparas incandescentes.

Cuando uno de estos dispositivos se expone a una radiación, a través del colector circula una corriente proporcional a dicha radiación.

El fototransistor usado en la práctica es un transistor tipo NPN TL 81, sus principales características son:

1. Corriente oscura  $20\text{ }\mu\text{A}$  a una polarización de 10 V y con corriente de base de  $I_B = 0$ .
2. Voltaje colector emisor de saturación 0.2 V.

### DESCRIPCION DEL EQUIPO.

La práctica se desarrollará en dos etapas, en la primera se estudiará la respuesta de una fotorresistencia, un fotodiodo y un fototransistor, mientras que en la segunda se emplea un control de luminosidad usando los fotosensores.

El equipo a usar en la primera parte es el módulo G11 (que contiene los circuitos de polarización) y la unidad luminosa TY 12/EV (donde están los sensores y la fuente de iluminación).

Los fotosensores están colocados en la unidad luminosa TY 12/EV, el conector usado permite que no sean polarizarlos accidentalmente en inversa. La fuente de radiación luminosa es una lámpara incandescente, que puede ser desplazada y con ello variar la intensidad luminosa que incide sobre los sensores. Para reducir los efectos causados por la reflexión, las paredes de la unidad TY 12/EV son de color negro. La figura 5 muestra la posición de los sensores de iluminación y las posiciones en las que es posible colocar la fuente de radiación.

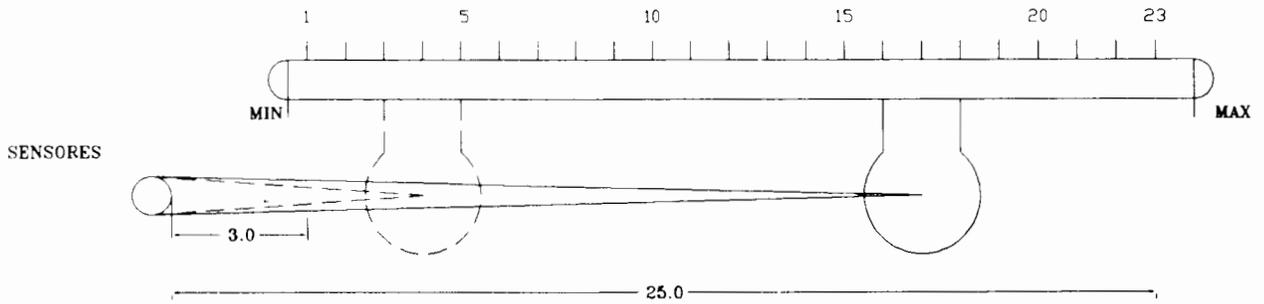


Figura 5. Posición de los sensores de iluminación y de la fuente de radiación en la unidad TY12/EV.

La lámpara usada tiene filamento de tungsteno y se alimenta con 24 Volts dc, la intensidad luminosa que presenta es de 3 candelas ( $1 \text{ candela} = 1 \frac{\text{lumén}}{\text{esterorradián}}$ ), tiene 3 mm de lado, por lo que se puede considerar como puntual cuando se halle a más de 3 cm del sensor. Tomando esta hipótesis y la potencia que absorbe la lámpara (3.696 watts) puede calcularse el valor de la irradiación de la siguiente forma:

$$H_T = \frac{P_{\text{irr}}}{4 \pi d^2} = \frac{3.5}{4 \pi d^2}$$

Donde:  $H_T$  es la irradiación  
 $P_{\text{irr}}$  es la potencia irradiada

En la unidad TY 12/EV se indican las distancias que separan la lámpara del sensor. La posición 1 corresponde a una distancia efectiva de 3 cm y la posición 23 a 25 cm. En la tabla 1 se muestran los valores de iluminación que corresponde a cada posición de la lámpara.

Los circuitos de polarización y conexiones están en el módulo G11 en el que se tienen las conexiones que se muestra en la figura 6.

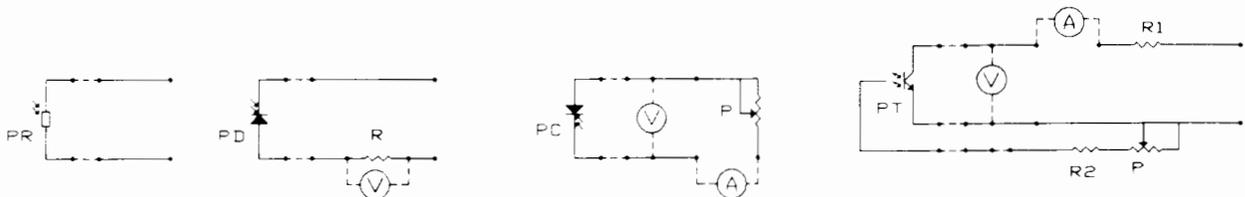


Figura 6. Circuitos de polarización del módulo G11.

Para el transductor foterresistivo PR no es necesario un circuito de polarización, debido a que se medirá la variación de la resistencia al variar la intensidad luminosa que incide sobre éste.

El fotodiodo PD ha sido polarizado en inversa (0-30 Volts) con una resistencia en serie de 100 KΩ como carga. Los cambios de corriente inversa debidos a las variaciones de irradiación provocan en la resistencia una variación en la caída de voltaje, la que puede medirse con el voltmetro.

El fototransistor PT está conectado como emisor común, como carga se conectó al colector una resistencia R1 de 560 Ω y puede ser polarizado entre 0 y 30 V.

POSICION DE LA LAMPARA	DISTANCIA EFECTIVA (mm)	IRRADIACION ( $\frac{\mu W}{mm^2}$ )
30	22.92	5.599
35	27.90	3.778
40	31.36	2.991
45	37.08	2.139
50	45.15	1.655
55	47.40	1.309
60	52.11	1.083
65	56.15	0.933
70	62.37	0.756
75	67.48	0.646
80	72.25	0.563
85	77.11	0.495
90	80.63	0.452
95	85.69	0.401
100	90.51	0.359
105	95.93	0.320
110	100.66	0.290
115	106.03	0.262
120	110.35	0.242
125	115.96	0.219
130	120.18	0.204
135	126.19	0.185
140	130.53	0.173
145	136.37	0.158
150	140.80	0.148
155	145.92	0.138
160	151.20	0.129
165	155.10	0.122
170	160.12	0.115
175	164.73	0.108
180	170.49	0.101
185	175.48	0.096
190	180.30	0.090
195	185.73	0.085
200	190.15	0.081
205	195.17	0.077
210	201.43	0.072
215	205.17	0.070
220	210.27	0.067
225	215.28	0.063
230	220.45	0.061

Tabla 1.

## Práctica 9

La base se conecta a tierra a través de una resistencia  $R_2$  de  $3900 \Omega$  en serie con el potenciómetro  $P$  de  $1 M\Omega$ . La corriente del colector y el voltaje colector - emisor (dependen de la irradiación) se miden con el amperímetro y voltímetro respectivamente. Al variar el valor del potenciómetro se puede variar la sensibilidad del fototransistor.

La segunda parte de la práctica se desarrollará usando el módulo G12, el cual se muestra en la figura 8, consiste en la aplicación de los fotosensores en un controlador de luminosidad de malla cerrada. La función principal de estos controladores es lograr una iluminación lo más estable posible en relación a una de referencia.

En la figura 7 se muestra el diagrama a bloques del sistema de control a usar, en él se puede observar que la señal "s", se obtiene de los fotosensores, y es proporcional a la luminosidad del ambiente que se controla. Dicha señal después de pasar por un codificador, es comparada con una señal de referencia "r"; a la diferencia entre estas señales se le denomina señal de error "e" ( $e = r - s$ ). La señal de error se introduce al regulador  $R$ , del que se obtiene la señal de control "m", misma que se suministra al actuador (Interface y Grupo de Potencia) con el objeto de proporcionar una mayor o menor cantidad de luminosidad.

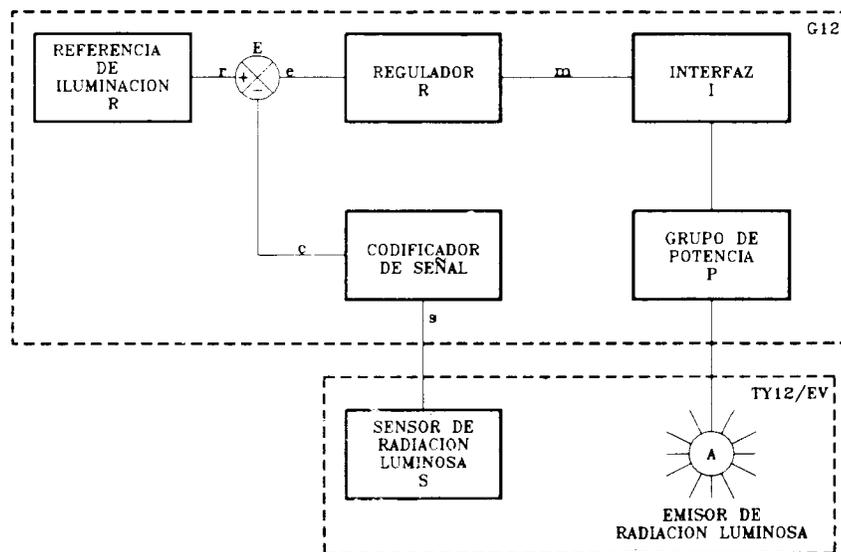


Figura 7. Diagrama de bloques del controlador de intensidad luminosa.

El controlador de luminosidad empleado (módulo G12) es del tipo Proporcional-Integral (PI), implementado con un amplificador operacional, cuya configuración se muestra en la figura 9.

El actuador genera la señal que se proporciona a la fuente de iluminación (que es la lámpara incandescente de 3 candelas LX1), que se ubica en el módulo de luminosidad TY12/EV, éste a su vez, contiene otra lámpara que se alimenta con una fuente variable de 0 a 24 V de corriente directa (LX2), que se usa para simular cargas de diferentes intensidades, así como para ver el comportamiento del controlador cuando se le conecta como sensor una fotorresistencia o fototransistor.

En el módulo G12 se controla un dispositivo electrónico llamado triac, el cual mediante un pulso (que es generado por el actuador), permite el paso de una señal de potencia de corriente alterna, la cual alimenta a la lámpara LX1. El pulso generado tiene una duración variable, la que dependerá de la intensidad luminosa en el fotosensor, la señal que se observaría en el osciloscopio sería una señal senoidal recortada (como la mostrada en la figura 10), la señal original tiene un período de 180 grados de tal forma que la señal recortada se estudia de acuerdo al ángulo de disparo en el cual la señal está presente en la lámpara. La unidad luminosa TY 12/EV cuenta con una lámpara marcada con LX2, que servirá para dar perturbaciones al sistema.

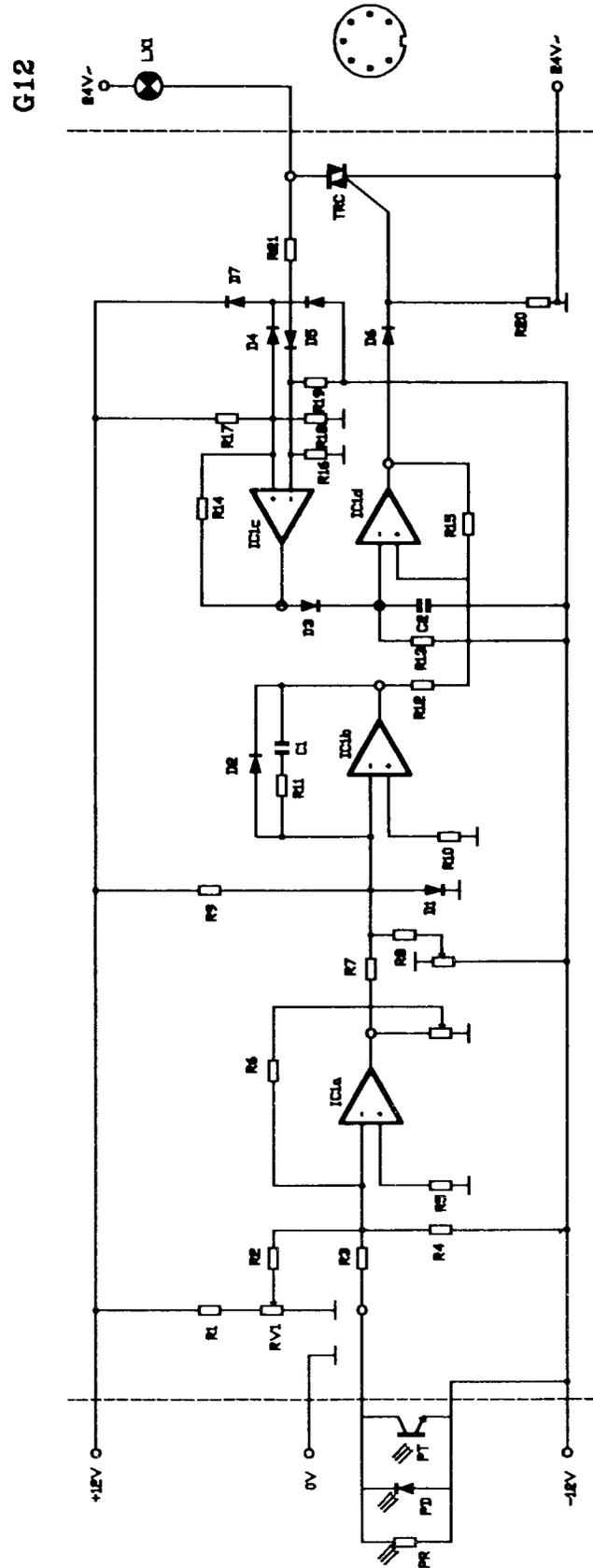


Figura 8

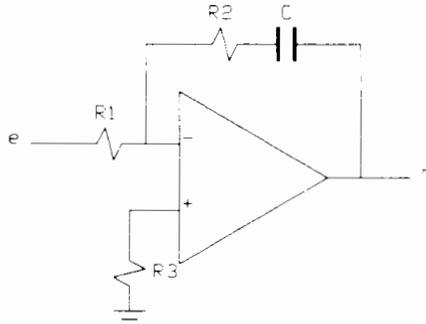


Figura 9. Circuito de control PI

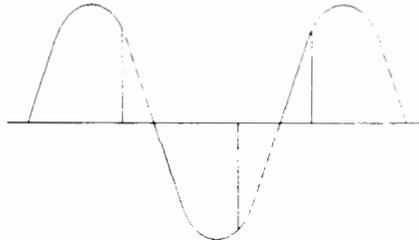


Figura 10. Señal senoidal recortada

**OBJETIVO:**

Relacionar al alumno con transductores de radiación luminosa, así como con sus principales características y aplicaciones.

**EQUIPO.**

1 Fuente de alimentación PS1

2 Multímetros digitales.

1 Unidad luminosa TY 12/EV

1 Módulo G11

1 Módulo G12

1 Osciloscopio

Cables de conexión.

**DESARROLLO.**

- Conecte los bornes de la lámpara LX1 de la unidad luminosa TY 12/EV a las terminales de 12 y -12 volts de la fuente PS1 para alimentar la lámpara con 24 Vcd.
- Una vez que esté seguro de que las conexiones pedidas son las correctas para cada experimento, encienda la fuente y deje funcionar el equipo durante 3 minutos, con el fin de que los componentes alcancen la estabilidad térmica.

**EXPERIMENTO 1. DETERMINACION DE LA CURVA CARACTERÍSTICA RESISTENCIA - IRRADIACIÓN DEL FOTORRESISTOR.**

- Conecte el multímetro digital, como óhmetro, en los bornes 1 y 2 del módulo G11.
- Conecte el módulo G11 a la unidad luminosa TY 12/EV, mediante el cable correspondiente, a la terminal marcada como Photo Resistor.
- Coloque la lámpara LX1 en la posición marcada con 230 mm.
- Mida el valor de resistencia y repita la medición de resistencia, acercando 10 mm la lámpara LX1 hasta la posición 30 mm, anote los datos en la Tabla 2.

Posición de la Lámpara	Resistencia ( $\Omega$ )
230	
220	
210	
200	
190	
180	
170	
160	
150	
140	
130	
120	
110	
100	
90	
80	
70	
60	
50	
40	
30	

Tabla 2

**EXPERIMENTO 2. DETERMINAR LA CURVA CARACTERISTICA CORRIENTE INVERSA - IRRADIACIÓN DEL FOTODIODO.**

- Conecte los bornes 4 (+) y 5 (-) a una fuente variable de 30 Vcd.
- Conecte el multímetro digital, como voltmetro, a los bornes 3 y 5 (resistencia R).
- Cambie el cable de conexión entre los dos módulos a la terminal marcada como "Photo Diode" de la unidad luminosa.

## Práctica 9

- Coloque la lámpara LX1 en la posición marcada con 230 mm.
- Mida el valor de voltaje a partir de 230 mm, acercando la lámpara al transductor 10 mm cada vez, anotando los datos y calcule el valor de la corriente que pasa por la resistencia R en la Tabla 3, tome en cuenta que el valor de la resistencia es de  $100\text{ K}\Omega$ .

LAMPARA	V	I $\mu A$
230		
220		
210		
200		
190		
180		
170		
160		
150		
140		
130		
120		
110		
100		
90		
80		
70		
60		
50		
40		
30		

Tabla 3

### EXPERIMENTO 3. DETERMINAR LA FAMILIA DE CURVAS CARACTERISTICAS CORRIENTE DE COLECTOR EN FUNCION DEL VOLTAJE COLECTOR-EMISOR CON IRRADIACION CONSTANTE DEL FOTOTRANSISTOR.

- Conecte los bornes marcados con 14 (+) y 15 (-) a una fuente variable de 30 Vcd.
- Cambie la conexión a la terminal marcada como "Photo Transistor", en la unidad luminosa.
- Conecte un multímetro, como amperímetro, entre los bornes 9 y 13 del panel, en él se medirá la corriente de colector, y entre los bornes 9 y 10 coloque otro multímetro, como voltímetro, en el que se medirá el voltaje colector-emisor.
- Coloque la lámpara en la posición de 60 mm.
- Varíe el valor del voltaje como se indica en la Tabla 4 y complete los valores de voltaje y corriente.
- Repita las mediciones para las siguientes posiciones de la lámpara, 100 mm, 150 mm y 230mm.

POSICION DE LA LAMPARA =											
Vcc	Vce	Ic									
0			0			0			0		
1			1			1			1		
2			2			2			2		
3			3			3			3		
4			4			4			4		
5			5			5			5		
6			6			6			6		
7			7			7			7		
8			8			8			8		
9			9			9			9		
10			10			10			10		
11			11			11			11		
12			12			12			12		
13			13			13			13		
14			14			14			14		
15			15			15			15		
16			16			16			16		
17			17			17			17		
18			18			18			18		
19			19			19			19		
20			20			20			20		
21			21			21			21		
22			22			22			22		
23			23			23			23		
24			24			24			24		
25			25			25			25		

Tabla 4

**EXPERIMENTO 4. APLICACION DE FOTOSENSORES EN UN PROCESO DE CONTROL DE LUMINOSIDAD.**

**Nota:** Este experimento deberá ser realizado en su totalidad por el profesor.

- Para calibrar el módulo G12, conecte la fuente de corriente alterna a los bornes marcados con + 24 V y -24 V.
- Polarice con las fuentes correspondientes las terminales marcadas con + 12 V, -12 V y 0 V.
- Conecte la fuente variable de corriente directa a los bornes marcados como LX2 del módulo TY12/EV
- Conecte con el cable correspondiente los módulos G12 y TY12/EV, a la terminal que corresponde a la fotorresistencia.

## Práctica 9

- Conecte el multímetro al borne 2 del módulo y coloque el cursor de la unidad luminosa en la posición de 130 mm (la calibración se realiza del mismo modo para los tres fotosensores).
- Regule RV1 hasta que el voltaje en el borne 2 sea de 0V (observar esto en el multímetro), con el cursor del potenciómetro P todo a la izquierda.
- Desplace el potenciómetro P del módulo G12 todo a la izquierda (posición mínima, 0%) siempre que cambie de transductor.
- Con la fuente variable de voltaje en posición de 0 V y con la fuente apagada separe la tapa del módulo TY12/EV (girando los seguros en forma de tornillo), colocando el cursor a 5 cm de los transductores aproximadamente.
- Encienda la fuente y gire el potenciómetro P del módulo G12, muy lentamente a la derecha de forma tal que la lámpara LX1 encienda a una intensidad tal que no lastime la vista.
- Sin mover la posición de las lámparas aumente el voltaje de la fuente variable lentamente y anote sus observaciones.
- Repita el experimento para el fotodiodo y el fototransistor.

### ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS

- 1.- Con base en los datos obtenidos de la Tabla 2 trace la curva característica del fotorresistor (resistencia contra irradiación).
- 2.- Con base en los datos obtenidos de la Tabla 3 trace la curva característica del fotodiodo (corriente inversa contra irradiación).
- 3.- Con base en los datos obtenidos de la Tabla 4 trace las curvas características del fototransistor (corriente de colector en función del voltaje colector-emisor con irradiación constante) indicando en cada caso el valor de irradiación correspondiente.
- 4.- Explique brevemente el proceso de control de iluminación de el experimento 4.
- 5.- Reporte sus comentarios y conclusiones del desarrollo de la práctica.

## CONVERTIDORES ANALOGICO/DIGITAL Y DIGITAL/ANALOGICO

El gran desarrollo de la electrónica digital y con ello el de la computación, hace que prácticamente ningún campo de la actividad humana quede al margen de aplicaciones con fines de facilitar tareas muy diversas.

En particular en el área de la instrumentación, medición y control de procesos o variables, se cuenta con equipo altamente sofisticado, que basa su funcionamiento en circuitos digitales, con lo que se puede lograr precisión rapidez y confiabilidad en los resultados.

Para que se pueda implementar cualquier tipo de aplicación de control o medición, con ayuda de sistemas computarizados, hay que contar con circuitos especiales, esto es, convertidores Analógico/Digital, que se encargan de convertir variables eléctricas analógicas a variables discretas, que pueden ser interpretadas por los sistemas digitales. Para el proceso inverso se debe tener un convertidor Digital/Analógico, el cual transforma una señal representada mediante un código binario a una señal analógica.

Algunos ejemplos en los que se necesita tener tarjetas convertidoras son: el análisis y almacenamiento de señales de origen biológico, la transmisión de datos y el control de procesos industriales como son los manipuladores o las bandas de producción.

### CONVERSION ANALOGICO/DIGITAL (A/D)

Este tipo de conversión se basa en cuantificar la amplitud de una señal de voltaje y representarla de una forma binaria, por lo que los datos que arroja un convertidor A/D son del todo disponibles para poder ser manipulados y analizados por cualquier equipo de cómputo.

Los convertidores A/D se clasifican de acuerdo a su operación y características eléctricas, así, se tiene convertidores de una y doble rampa, de aproximaciones sucesiva y de tipo ráfaga.

### CONVERTIDOR A/D DE UNA RAMPA.

Este tipo de dispositivos realizan la conversión utilizando un método indirecto que consiste en la comparación del voltaje de entrada con una rampa generada internamente, el tiempo de conversión estará determinado por el intervalo en el que la rampa alcanza la amplitud de la señal de entrada. En la Figura 1 se muestra el diagrama a bloques de un convertidor de una rampa. La señal de entrada ( $V_i$ ) la cual debe ser convertida, debe ser un voltaje exclusivamente positivo.

La conversión se inicia con un pulso de mando que establece el inicio de la conversión, el cual provoca la puesta a cero del contador, permitiendo que la salida del Flip-Flop RS (que es un circuito lógico que a su salida puede tener un nivel alto "1" o bajo "0") se coloque en "1", haciendo que (al quedar habilitada la compuerta AND) llegue la señal de reloj de frecuencia  $F_c$  al contador, generando la base de tiempos mediante el reloj (clock). La rampa ( $V_R$ ), es generada mediante el uso del contador y en algunos casos, también puede ser generada por un convertidor D/A. El reloj incrementa el contador un paso a la vez hasta que el voltaje de rampa sea mayor o igual que el voltaje de entrada, la comparación se realiza mediante un circuito comparador. Mientras el voltaje de rampa se mantenga inferior a  $V_i$  la salida del comparador será baja; en el momento en que  $V_R$  supera a  $V_i$ , el comparador efectúa la conmutación a un nivel alto, de modo que el Flip-Flop RS pasa al nivel "0" bloqueando así la compuerta AND y suspendiendo la operación del contador al interrumpir la señal de reloj. La cuenta del mismo, será el resultado de la conversión.

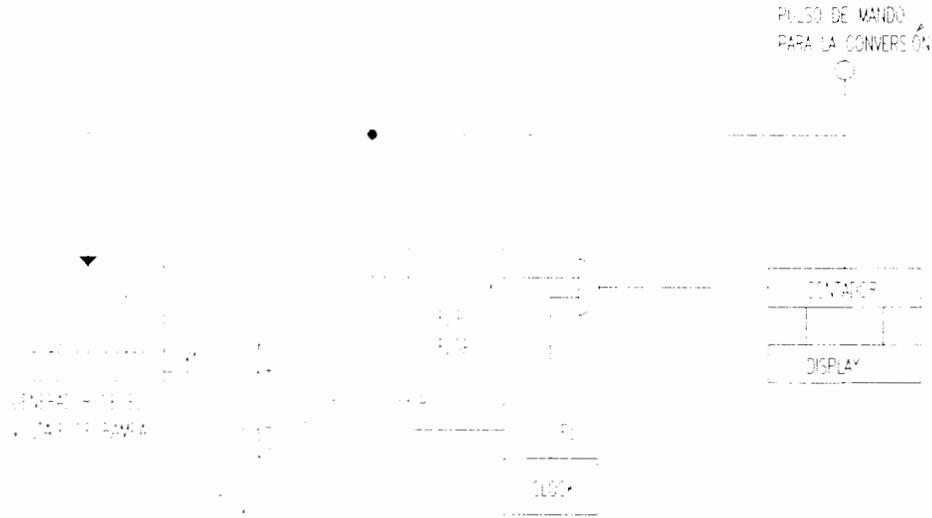


Figura 1.

Al ser enviado un nuevo pulso de mando comienza otro ciclo de conversión. Generalmente los convertidores de este tipo se encuentran dotados de circuitos que, al final de una conversión, se encargan de iniciar automáticamente la siguiente cuenta.

La linealidad y precisión depende del cuidado con el cual se implementa el generador de voltaje de rampa y de la estabilidad de la base de tiempos del reloj. Los errores que más hacen sentir su efecto se deben a fenómenos de "no linealidad" del generador de voltaje de rampa, a imprecisiones durante la comparación y a los retrasos introducidos por el comparador. Este tipo de convertidores es muy sensible a fenómenos exteriores.

### CONVERTIDORES A/D DE DOBLE RAMPA.

Para aumentar la precisión de los convertidores A/D de rampa, se efectúa una doble integración que permite eliminar los errores debidos a diversas variaciones. Un sistema de conversión A/D de doble rampa se observa en la Figura 2.

El voltaje  $V_1$  que debe ser convertido, se aplica a un circuito integrador durante un intervalo de tiempo constante ( $T_0$ ), determinado por una red secuenciadora basada en la frecuencia del reloj.

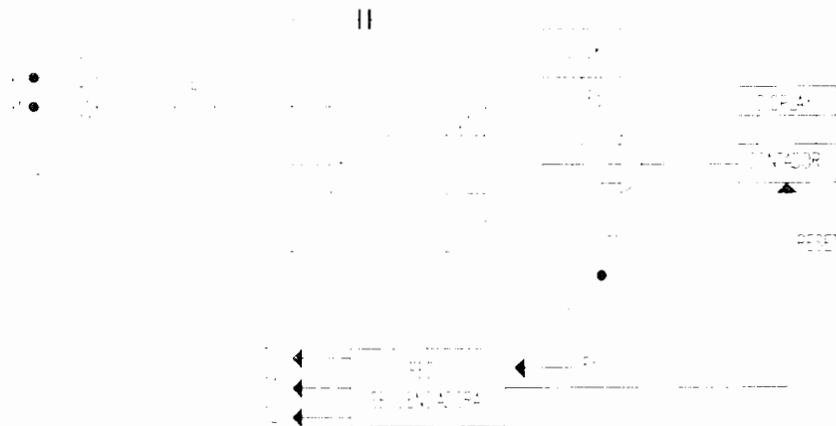


Figura 2.

Después de un tiempo  $T_0$  el voltaje de salida del integrador será igual a un valor proporcional al voltaje de entrada  $V_i$  (formandose la rampa ascendente), según la siguiente relación:

$$V_1 = \frac{1}{C} \int_0^{T_0} I_C(t) dt = \frac{1}{RC} \int_0^{T_0} V_i(t) dt$$

Si  $V_i$  es constante se obtendrá:

$$V_1 = \frac{1}{RC} V_i T_0$$

Al final del intervalo de tiempo  $T_0$  se desconecta el voltaje  $V_i$  y se aplica en la entrada del integrador un voltaje de referencia constante ( $-V_R$ ) de polaridad opuesta a la de el voltaje  $V_i$ . Este voltaje de referencia resulta integrado por el integrador, dando origen a una rampa decreciente; durante este segundo intervalo de tiempo  $T_2$  la compuerta AND queda habilitada y los pulsos de reloj pueden llegar hasta el contador. El ciclo se interrumpe una vez que la salida del integrador alcanza el valor de cero. El secuenciador después de un intervalo de tiempo  $T_1$ , se encarga de suministrar señales temporizadas para la siguiente conversión, en la Figura 3 se muestra el diagrama de tiempos de estas señales.

Analizando el funcionamiento del circuito se observa que existe una proporcionalidad directa entre el número de pulsos que llegan al contador y el voltaje  $V_i$  que debe ser convertido. Cuanto más elevado sea  $V_i$ , mayor será el valor de el voltaje de salida del integrador después de un tiempo  $T_0$ . En consecuencia el valor del intervalo de tiempo  $T_2$  será mayor para llevar el voltaje de salida del integrador hasta el valor cero.

Las siguientes expresiones muestran la representación numérica de lo anterior:

- Voltaje de salida del integrador después del intervalo de tiempo  $T_0$  :

$$V_1 = \frac{1}{RC} V_i T_0$$

- Voltaje de salida del integrador al alcanzar el valor de cero

$$V_1 - \frac{1}{RC} V_R T_2 = 0$$

$$\frac{1}{RC} V_i T_0 - \frac{1}{RC} V_R T_2 = 0$$

$$T_2 = T_0 \frac{V_i}{V_R}$$

El número de pulsos que cuenta el contador durante el tiempo  $T_2$  es:

$$N = T_2 F_C = T_0 F_C \frac{V_i}{V_R}$$

Este tipo de convertidores poseen una linealidad y una precisión mayor que la del convertidor visto anteriormente. En cuanto a los errores y a la imprecisión del comparador, quedan compensados junto con la repercusión ya sea durante la rampa ascendente como la descendente.

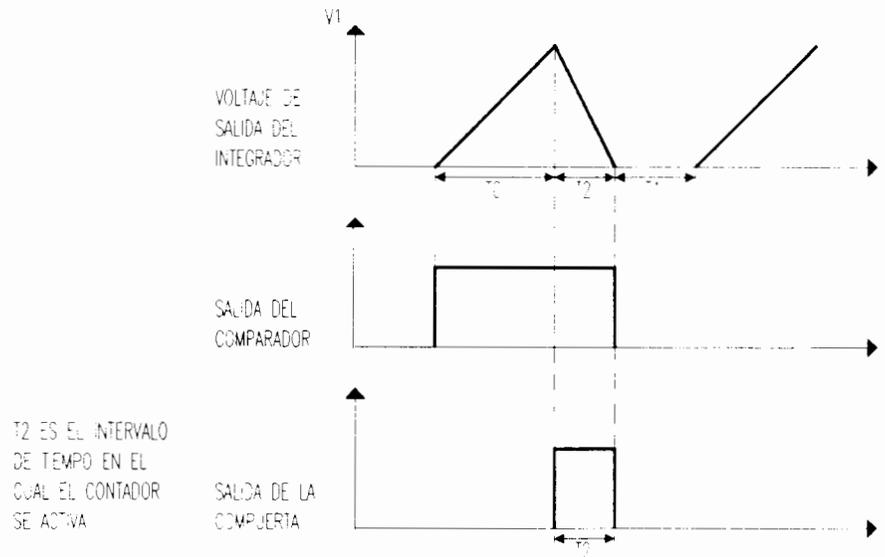


Figura 3.

La ventaja más importante que ofrece este tipo de convertidores esta representada por la inmunidad que tiene sobre los efectos del ruido o a las perturbaciones de la red (Tiempo de conversión prolongada).

### CONVERTIDOR A/D DE APROXIMACIONES SUCESIVAS

El diagrama de bloques de este convertidor se muestra en la Figura 4, su funcionamiento es el siguiente:

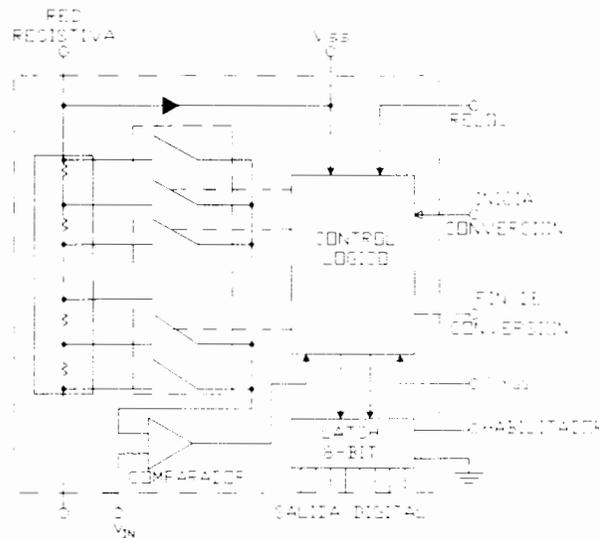


Figura 4. Convertidor ADC0800

Básicamente consiste en comparar una muestra de la señal de entrada con valores de voltaje fijados por el convertidor hasta que el resultado entre los dos sea muy semejante, la manera en la que se llega al resultado es evaluando si la comparación fue menor o mayor al voltaje de entrada hasta que la diferencia es la menor posible.

Considerando que se tiene un valor muestra de la señal de entrada de  $A$  volts de amplitud que es aplicada a un convertidor A/D de ocho bits de salida, los bits del convertidor se numeran a partir del cero y hasta el siete, en donde el menos significativo es el bit cero y el más significativo es el siete.

En la primera comparación se compara del bit siete con la muestra  $A$ , si el resultado es que el voltaje correspondiente al bit siete es menor, entonces el bit permanece encendido y se pasa a la siguiente comparación; pero, si por el contrario el voltaje de este resulta ser mayor, entonces se apaga el bit y se pasa a la siguiente comparación. Independientemente de que el bit anterior permanezca encendido o apagado, se enciende el siguiente de menor significancia, en este caso el bit seis, repitiendo el mismo procedimiento sucesivamente hasta haber terminado de comparar el bit cero, en este momento se da por finalizada la conversión y es cuando se presenta el resultado en la salida digital. Hay que señalar, que si algún bit permanece encendido después de que ha sido comparado, el voltaje que le corresponde es sumado a las demás comparaciones hasta terminar con el procedimiento de conversión actual. En la Figura 5 se muestra la evolución en el tiempo de la salida del convertidor de aproximaciones sucesivas.

En el ADC0800 se tienen ocho switches analógicos internos que se controlan mediante un bloque de control y es el que proporciona la secuencia de comparación y la salida del A/D de acuerdo con los resultados de las comparaciones. Existen algunas variantes en las que la red resistiva es sustituida por capacitancias, en este tipo de convertidores se logra disminuir significativamente el área, por lo que son usados en circuitos de muy alta escala de integración como en los microcontroladores que incluyen algún convertidor.

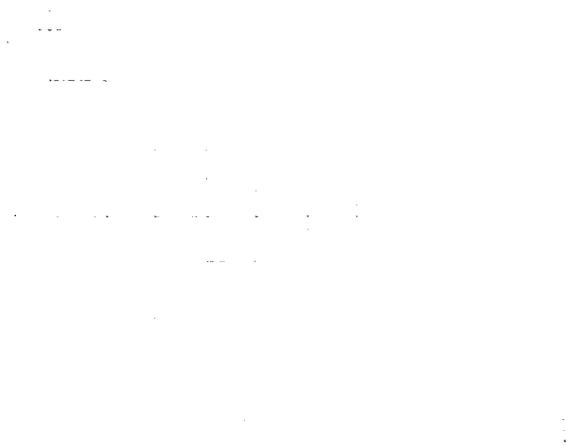


Figura 5. Evolución en el tiempo de una conversión en aproximaciones sucesivas.

La conversión A/D tiene características importantes que deben tomarse en cuenta en el momento de emplearla, como pueden ser los niveles de cuantificación del convertidor, esto es, los posibles niveles de voltaje que pueden ser representados con la cantidad de bits con los que cuente el convertidor. Por ejemplo si se tiene un convertidor de 8 bits, podrán cuantificarse 256 niveles diferentes, pero si la cantidad de bits se aumenta en uno, la cantidad de niveles de cuantificación aumenta a 512, por lo que el error que se puede obtener en la conversión es menor a medida que aumente la cantidad de bits. Un parámetro muy importante de este tipo de convertidores es la frecuencia de muestreo, que se refiere a la periodicidad con la que el convertidor tomará muestras de la señal a convertir, por lo que si la cantidad de muestras no es suficiente no se podrá obtener una aproximación fiel de la señal de entrada, de acuerdo con el teorema de Nyquist se hace necesario que la frecuencia de muestreo sea cuando menos el doble de la frecuencia de la señal a convertir. De no tomar en cuenta esto, el resultado de cualquier conversión será erróneo al tener una frecuencia mayor en la señal de entrada.

## CONVERTIDORES RAFAGA

Se les llama convertidores ráfaga, a los capaces de convertir las señales analógicas que tienen un ancho de banda del orden de MHz. La característica más importante de estos dispositivos es el tiempo de conversión (intervalo de tiempo entre la aplicación del pulso y la presencia del dato digital a la salida). La base de conversión A/D esta constituida por un conjunto de comparadores, los cuales tienen un voltaje preciso y prefijado. Las salidas de los comparadores son enviados hasta un sistema de codificación apropiado, y la señal analógica que debe convertirse es aplicada simultáneamente a todos los comparadores.

El sistema de codificación, constituido por una red combinatoria, efectúa la codificación de las entradas con base a la configuración de las salidas de los comparadores. La Figura 6 muestra la estructura de un convertidor ráfaga. El mayor inconveniente de este tipo de convertidores, es la complejidad de los circuitos debida a la gran cantidad de comparadores.



Figura 6.

## PARAMETROS DEL CONVERTIDOR ANALOGICO/DIGITAL

### Resolución

La resolución de un convertidor se define como la menor variación que puede ocurrir en la salida como resultado de un cambio en la entrada. La resolución es igual al valor del LSB (bit menos significativo) y también se conoce como tamaño de etapa, ya que es la cantidad de voltaje de salida que variará cuando el código de entrada pase de una etapa a la siguiente.

Aunque la resolución puede expresarse como la cantidad de voltaje o corriente por etapa, resulta más útil expresarla como un porcentaje de salida a plena escala, por lo tanto es sólo el número de bits el que determina la resolución porcentual.

Los fabricantes de convertidores tienen varias maneras de especificar la precisión. Las dos más comunes se les llama error de escala y error de linealidad, que normalmente se expresan como un porcentaje de salida a plena escala del convertidor (%F.S.).

Algunos de los convertidores más costosos tienen errores de escala y de linealidad en el intervalo de 0.01-0.1 %. En consecuencia el error que se tenga, indica que tanto el resultado del convertidor puede alejarse de su valor esperado, debido a la incidencia de componentes no ideales.

**Error de escala (Error a plena escala):**

En los convertidores el error de escala representa la variación que se puede tener a la salida del convertidor con respecto al de su valor esperado (teórico). Los errores de escala pueden ser provocados por errores en los voltajes de referencia, en los valores de las resistencias, en la escala, en la ganancia de los amplificadores, etc. Los errores de escala podrán corregirse regulando la salida de la ganancia del amplificador o el voltaje de referencia.

$$E_e = \frac{V_s - V_e}{V_e} * 100$$

donde:  $V_s = 2^{-4}D + 2^{-3}D + 2^{-2}D + \dots + 2^3D$

D = 1 (encendido).

D = 0 (apagado).

$V_e$  = Voltaje de entrada.

**Error de offset (Error de cero):**

Es el voltaje de salida de un convertidor D/A con entrada de código cero, o el valor significativo del voltaje de entrada de un convertidor A/D necesario para obtener a la salida el código cero. Generalmente, el error de offset es provocado por el voltaje o corriente de offset de entrada del amplificador o comparador. Frecuentemente, la regulación a cero de estas magnitudes se efectúa mediante un potenciómetro de regulación a cero offset ubicado fuera del convertidor.

**Error de linealidad:**

Es el que se presenta cuando a cada incremento de un bit de entrada debe producir el aumento de un nivel determinado de voltaje, el cual debería ser constante a lo largo de toda la escala operativa del convertidor. Sin embargo, se producen ciertas variaciones en estos incrementos en determinados estados consecutivos, lo que produce una falta de continuidad al final de la misma.

$$V_{prom} = \frac{V_{m\acute{a}x} + V_{m\acute{i}n}}{2}$$

$$E_L = \frac{V_{prom} - V_{m\acute{i}n}}{2^n}$$

Donde  $V_{m\acute{a}x}$  y  $V_{m\acute{i}n}$  son los voltajes máximo y mínimo de entrada cuando está encendido el led  $2^n$

**Frecuencia de conversión ( Tiempo de conversión ):**

La frecuencia de conversión representa la velocidad con la que el convertidor realiza la conversión del dato; indicada directamente por el número de conversiones por segundo.

En algunos tipos de convertidores el tiempo de conversión no es constante, sino que depende del dato que debe convertirse. A veces, los tiempos de conversión señalados no corresponden al valor máximo; por lo tanto habrá que tener cuidado a fin de evitar resultados no deseados. La frecuencia de conversión depende del reloj, que puede ser externo, es decir, de la frecuencia a la cual trabaja la lógica que regula la conversión.

**CONVERSION DIGITAL/ANALOGICA (D/A)**

La conversión digital analógica (D/A) es el proceso inverso a la conversión A/D, ya que consiste en transformar una magnitud numérica (codificada en binario) a una amplitud eléctrica. Los convertidores D/A pueden dividirse en dos grupos:

- Convertidores serie.
- Convertidores paralelo.

En los primeros, la conversión se verifica según el número de pasos igual al número a convertir; este tipo ya no es usado, pues aunque sus circuitos son muy sencillos cuentan con poca resolución y precisión.

Los convertidores en paralelo suelen alcanzar altas velocidades de conversión, gran precisión y resolución. La Figura 7 muestra el diagrama de bloques del convertidor DAC0800 (usado en la tarjeta empleada en esta práctica), su operación se basa en hacer pasar una corriente proporcionada por una fuente de corriente fija a una red resistiva, a diversos puntos de la red se conectan switches analógicos, por uno de sus extremos, mientras que el otro extremo de cada uno de ellos son conectados a un amplificador operacional, que se encarga de sumar los voltajes producidos por la caída de potencial en cada resistencia. El número de interruptores (marcados como switches) es igual al número de bits del convertidor los cuales son controlados por la secuencia binaria a convertir.

Las resistencias se calculan de tal manera que por su valor y posición con respecto a la fuente de corriente tengan los pesos binarios necesarios, es decir, que la primera resistencia por la que circula la corriente es la más significativa, mientras que la última o la más alejada es la menos significativa, el arreglo resistivo es de forma de malla, tal que el paso de la corriente a través de ellas sea menor cada vez.

Un parámetro importante para ambas conversiones, es la resolución, mencionada anteriormente y representa la variación más pequeña en el código de entrada que puede incrementar el nivel de la salida en un DAC y para un ADC es la variación que debe sufrir la señal de entrada para que exista un cambio de código a la salida en el bit menos significativo.

**DESCRIPCION DEL EQUIPO**

Se cuenta con dos tarjetas equipadas con convertidores A/D y D/A, en las Figuras 8 y 9 se muestran los diagramas de las tarjetas, en las que se puede hacer conversión de señales analógicas y conversión de señales digitales.

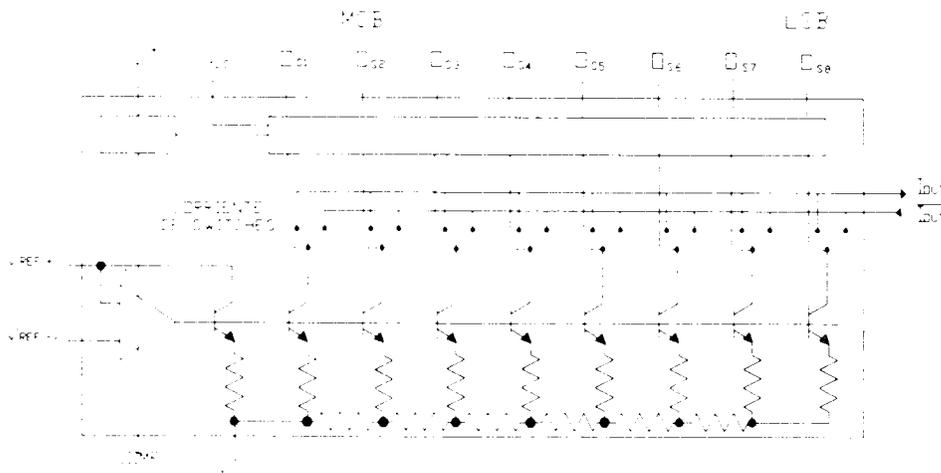


Figura 7. Convertidor DAC0800

### MODULO G19.

El módulo G19 constituye un convertidor analógico/digital de doble rampa de 8 bits. En éste la secuencia de conversión depende de un pulso de reloj exterior, para el cual se define el tiempo  $T_0$  correspondiente a la rampa ascendente:

$$T_0 = \frac{256}{F_{ck}}$$

mientras que el tiempo de conversión está sujeto al valor del voltaje que debe ser convertido:

$$T_{conv} = T_0 \left( 1 + \frac{V_{IN}}{V_{REF}} \right) + \frac{2}{F_{ck}}$$

$$T_1 = \frac{2}{F_{ck}}$$

por lo que la frecuencia de conversión es

$$F_{conv} = \frac{1}{T_0 \left( 1 + \frac{V_{IN}}{V_{REF}} \right) + \frac{2}{F_{ck}}}$$

En donde  $F_{ck}$  es la frecuencia de reloj,  $T_0$  el tiempo de integración de la primer rampa,  $T_{conv}$  el tiempo en el cual se producen las conversiones y  $T_1$  tiempo de restablecimiento.

La descripción del funcionamiento del convertidor A/D se hará con base al diagrama eléctrico de la figura 8. Primero se considera el momento en el cual la señal de "reset" se aplica a las dos secciones del contador IC7 y Q del Flip-Flop 2 de IC6. A partir de este instante el contador empieza a contar los pulsos de reloj, mientras que la salida del comparador IC4 (LM311) queda inhabilitada, ya que Q de Flip-Flop 4 (IC5) resulta ser bajo.

El conmutador 2 de IC2 (DG201A) se cierra, en tanto que 1 y 3 se abren (se cierran cuando el pulso de mando se encuentra a un nivel bajo).

## Práctica 10

El voltaje de entrada  $V_{IN}$  (invertido en IC1a) resulta integrado por C1 a través de R11. El voltaje de salida de IC3 será considerado un voltaje V constante:

$$V_{T_0} = \frac{V_{IN} T_0}{R_{11} C_1}$$

en donde  $T_0 = \frac{256}{F_{ck}}$

Cuando el contador recibe el pulso número 256 pasa del estado FFH(256) al estado 00H(00). La salida  $Q_{4B}$  provoca el cierre del conmutador 4 de IC2, utilizado como inversor, y en R18 se observará un estado alto. La transición bajo-alto funciona como un pulso de reloj para el Flip-Flop 4 de IC5 y las salidas del Flip-Flop D cambian de estado, el conmutador 2 de IC2 se abre y el 1 se cierra. Ahora, el voltaje presente en la entrada del integrador es la referencia (positiva); mientras que en la salida, la rampa cambia de signo (con pendiente negativa y fija).

La rampa alcanzará el valor de cero volt en un tiempo proporcional a el voltaje inicial (al final de la rampa ascendente).

$$V_{T_2} = V_{T_0} - \frac{V_{REF} T_2}{R_{11} C_1}$$

$$V_{T_0} = \frac{256 V_{IN}}{F_{ck} R_{11} C_1}$$

$$V_{T_2} = \frac{256 V_{IN}}{F_{ck} R_{11} C_1} - \frac{V_{REF} T_2}{R_{11} C_1}$$

$$T_2 = \frac{256 V_{IN}}{F_{ck} V_{REF}}$$

El tiempo ( $T_2$ ) que emplea la rampa descendente para alcanzar los cero volt es directamente proporcional a el voltaje de entrada. Durante este intervalo el contador se incrementa.

$$n = T_2 F_{ck}$$

Por lo tanto, "n" indica el contenido del contador al final de la rampa descendente.

$$T_2 = \frac{n}{F_{ck}}$$

$$n = 256 \frac{V_{IN}}{V_{REF}}$$

Es decir, que el dato existente a la salida del contador resulta directamente proporcional a  $V_{IN}$  inversamente proporcional a  $V_{REF}$  e independientemente de la frecuencia de reloj y de los valores de los componentes de circuito. Naturalmente, si los valores de la frecuencia de reloj o de los componentes ( $R_{11}$  o  $C_1$ ) llegaran a provocar un desplazamiento de la rampa ascendente fuera del campo de trabajo del integrador, el convertidor ya no podría funcionar correctamente. Con los parámetros actuales:  $C_1 = 0.15 \mu F$ ,  $R_{11} = 33K$ ; y dando a la rampa y al voltaje de entrada un valor máximo de 8 V, se tendrá:

$$8 = \frac{8 T_0}{33 \times 10^3 \times 150 \times 10^{-9}}$$

en donde  $T_0 = 4.95\text{ms}$ .

luego:

$$\frac{256}{F_{ck}} = 4.95 \times 10^{-3}$$

Obteniéndose

$$F_{ck} = \frac{256}{4.95} 10^3 \text{ Hz} = 51.7\text{kHz}$$

Esta frecuencia nos indica, que el valor de la frecuencia utilizada para el convertidor debe ser mayor o igual a la del valor encontrado, ya que de lo contrario al aplicar una frecuencia menor, el convertidor no funcionaría correctamente. Para nuestros fines prácticos podríamos utilizar una frecuencia de reloj de 100 KHz. Cuando el voltaje de la rampa descendente alcanza el valor cero, el comparador IC4 efectúa la conmutación y la entrada D de Flip-Flop 1 de IC6 pasa al estado alto. Al primer reloj que se produce después de la conmutación del comparador se verifica también la conmutación de Flip-Flop 1. La salida Q de Flip-Flop 1 sigue los siguientes pasos:

- 1) A través de D1 bloquea el reloj en IC7 (que cuenta en el frente negativo).
- 2) Habilita a Flip-Flop 3, luego el conmutador 3 se cierra bloqueando al integrador en el valor cero.
- 3) Inhabilita a Flip-Flop 4, así el conmutador 1 se abre y el 2 se cierra.
- 4) Si el conmutador RUN/HOLD se encuentra en la posición RUN, traslada el dato presente a la salida del contador IC7 hasta la salida de los registros IC8 y IC9.

Durante el pulso de reloj sucesivo, el Flip-Flop 1 vuelve al estado bajo, mientras que el Flip-Flop 2 de IC6 pasa al estado alto, de este modo, se produce el restablecimiento del contador IC7.

Al pulso de reloj siguiente, Flip-Flop 2 vuelve a cero, y lo mismo ocurre con Flip-Flop 3 (encontrándose la entrada S (Set) al estado bajo), abriéndose el conmutador 3 de IC2.

Después de esto el integrador comienza un nuevo ciclo (con la rampa positiva vinculada al voltaje de entrada  $V_{IN}$ ), que finalizará cuando el contador cuente hasta agotar su capacidad (8 bits).

El estado de las salidas de los registros IC8 e IC9 queda visualizado en los indicadores luminosos (led) y se encuentra disponible en los bornes de salida correspondientes.

Si se desea efectuar la conversión de una señal en el campo de  $\pm 4V$  (con la referencia interna) bastará poner los puntos X y Y puenteados. R4 posee un valor equivalente al doble del de R5 provocando, por lo tanto, una polarización fija igual a:

$$\frac{V_{REF}}{2}$$

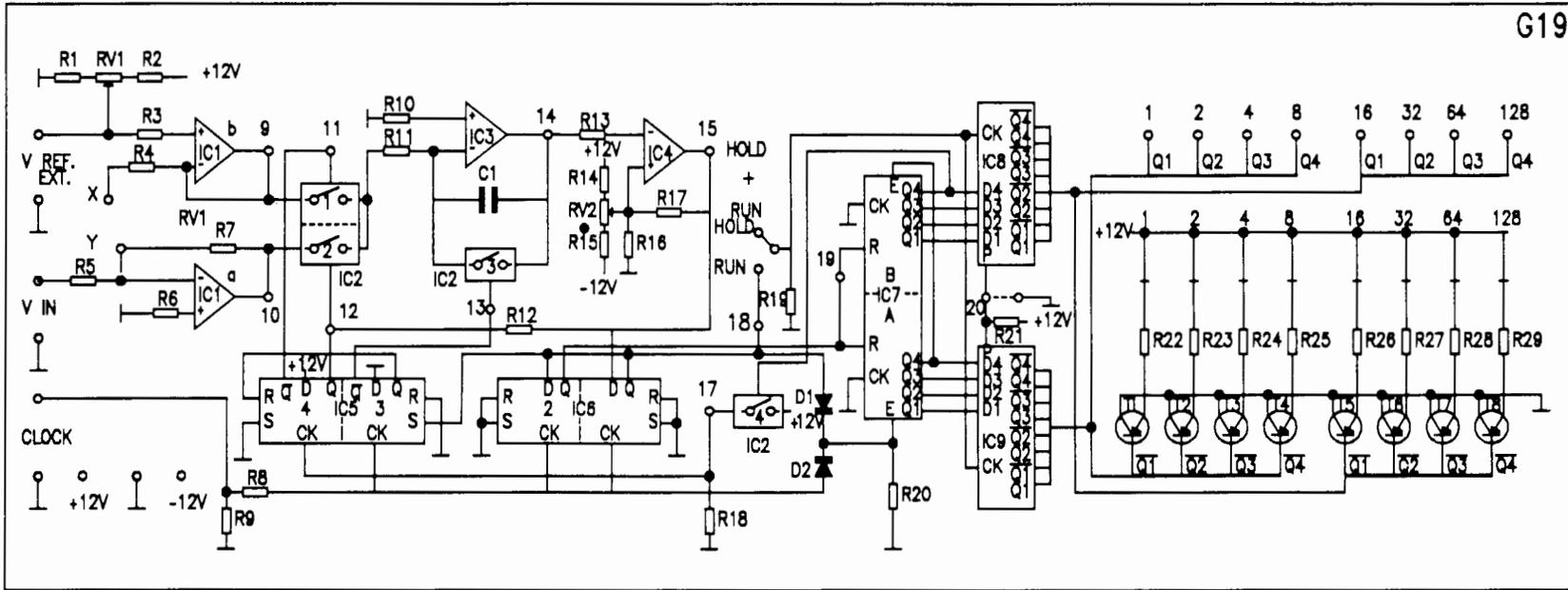


Figura 8.

De este modo será posible aceptar señales negativas de hasta -4 Volt.

### MODULO F03A.

El módulo F03A cuenta con convertidores A/D y D/A del tipo aproximaciones sucesivas, la figura 9 muestra el diagrama de la tarjeta. Las señales analógicas una vez que son convertidas a código binario pueden ser mandadas directamente al convertidor D/A o bien a la computadora por medio del conector situado en la parte superior.

También existe la posibilidad de mandar de la computadora una señal digital al convertidor D/A para obtenerla en forma analógica.

Se tienen además una serie de interruptores (marcados como switches) situados en la parte media, con los que se puede generar código binario manualmente para ser convertido por el D/A, en resumen se tienen tres funciones principales:

- a) La primera es la conversión de una señal analógica a su representación digital y la conversión simultánea del código generado nuevamente a forma analógica.
- b) La segunda es la posibilidad de interacción de los convertidores con una computadora convencional.
- c) La tercera es el uso del convertidor D/A generando código binario desde los interruptores. El interruptor marcado con S2 sirve para seleccionar la función deseada (A/D, COMPUTADORA o SWITCHES), el interruptor S1 tiene la función de dar a la señal de entrada un nivel adecuado de voltaje, por medio de un circuito basado en amplificadores operacionales, que proporciona una ganancia de voltaje, por lo que se pueden introducir señales de niveles bajos o altos encargándose de amplificar o atenuar la amplitud.

Adicionalmente, para poder hacer que la tarjeta interactúe con la computadora es necesario contar con dos elementos adicionales, el programa y la interface.

El primero de ellos permite mandar datos de la computadora al convertidor D/A o recibirlos del convertidor A/D. Para ello se diseñó el programa ADCDAC, escrito en lenguaje C, el cual permite tener las siguientes funciones.

Prueba de los puertos de la interface. En esta se reciben o mandan datos a los puertos de la interface, para comprobar su correcto funcionamiento.

Genera tres tipos de señales. Es un algoritmo que permite tener en memoria la señal deseada (senoidal, triangular y cuadrada) a una frecuencia fija.

Recepción de datos desde el convertidor AD. Permite el acceso a señales analógicas.

Lectura de señales digitalizadas almacenadas en disco.

Grafica en el monitor la señal con la que se trabaja.

Manda al convertidor DA los datos de las señal digitalizadas.

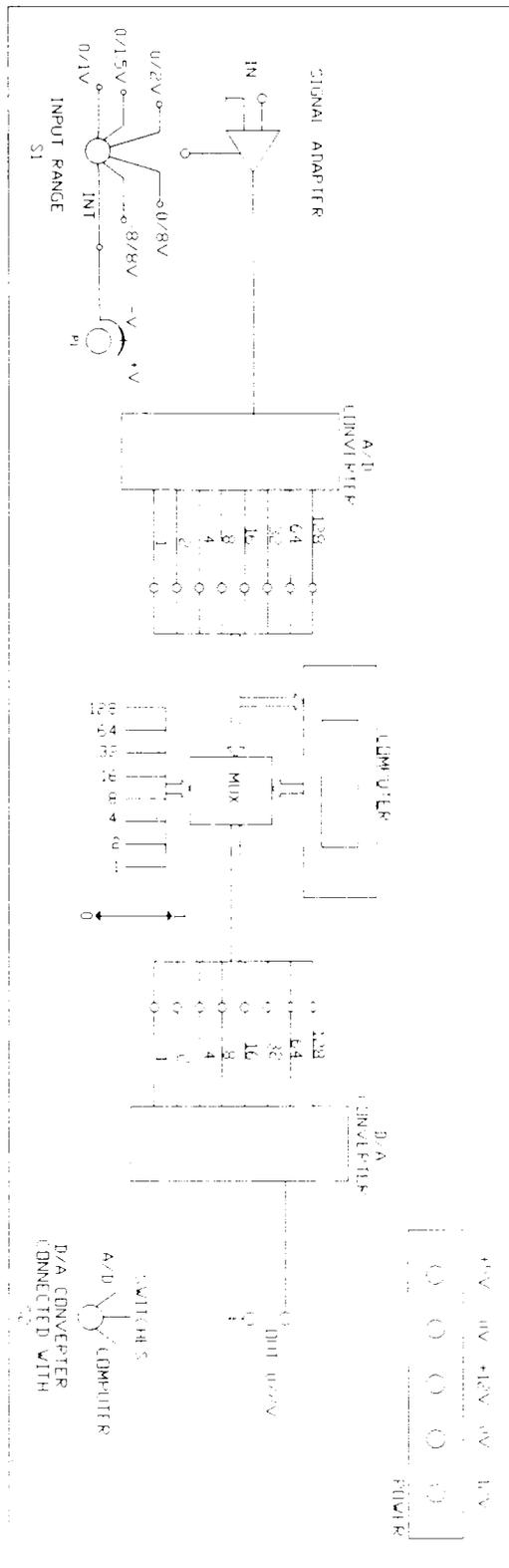


Figura 9

Interacción simultánea con ambos convertidores. Función que permite observar una señal senoidal que cambia de frecuencia de acuerdo al nivel de la señal de entrada.

Graba en disco los datos deseados.

**OBJETIVO:**

- Familiarizar al alumno con el uso de convertidores Analógico/Digital y Digital/Analógico, observando las características propias y sus aplicaciones en sistemas computarizados.

**EQUIPO Y MATERIAL:**

- Tarjeta convertidora (FO3A).
- Modulo G19.
- Fuente de voltaje (PS1).
- Fuente de voltaje bipolar.
- Generador de funciones.
- Multímetro.
- Osciloscopio.
- Cables de conexión.
- Cable plano.
- Programa ADCDAC.
- 1 Capacitor de 9nf o un valor aproximado.

**NOTAS:**

**Antes de encender la fuente debe observar que la polarización sea la correcta ya que cualquier equivocación en la conexión provocará que los dispositivos contenidos se quemen de inmediato.**

**Al conectar la tarjeta convertidora a la computadora o al querer hacer algún cambio en esta, asegúrese de apagar la fuente de alimentación y la computadora.**

**Al encender el equipo asegúrese de prender en primer lugar la fuente de alimentación y luego la computadora, y al terminar primero apague la computadora y después la fuente.**

**Se sugiere colocar S1 en posición de 0v/8v al introducir cualquier señal externa al convertidor**

Hay que tomar en cuenta, que la amplitud de la señal de entrada al convertidor A/D, debe adecuarse para que la conversión sea lo más aproximada posible, es por ello, que si la señal observada a la salida presenta recortes en su forma, debe variar la posición del switch S1 de tal forma que obtenga la forma de onda completa a la salida.

**EXPERIMENTO 1. CONVERTIDOR A/D.**

- Sin encender la fuente, polarice la tarjeta G19 con los voltajes indicados en sus bornes de polarización, conectando todas las tierras comunes.
- Suministre la señal de reloj de onda cuadrada (con un tiempo de subida inferior a  $1\mu S$ ) con una frecuencia de 100kHz de 0 a +10V, en los bornes marcados como clock.

**Nota: tener cuidado de no sobrepasar los +12V.**

- Para calibrar conecte en los bornes  $V_{IN}$  la fuente variable de corriente directa. Ajustando el voltaje de entrada hasta un valor de 8V, y regular RV1 tratando de que todos los indicadores luminosos (led) se enciendan.
- Una vez calibrado, varíe el voltaje de la señal de entrada de tal forma que encienda un solo indicador (led), a la vez mida con el multímetro y registre en la Tabla 1 el voltaje de entrada en cada caso.

V ENTRADA		$2^{-4}$	$2^{-3}$	$2^{-2}$	$2^{-1}$	$2^0$	$2^1$	$2^2$	$2^3$	V PROM
V MIN	V MAX	1	2	4	8	16	32	64	128	
		●								
			●							
				●						
					●					
						●				
							●			
								●		
									●	

Tabla 1.

- Aplique ahora una señal de -4 a 4V y verifique el voltaje de salida digital de acuerdo a la Tabla 2.

V ENTRADA	$2^{-4}$	$2^{-3}$	$2^{-2}$	$2^{-1}$	$2^0$	$2^1$	$2^2$	$2^3$	V SALIDA
	1	2	4	8	16	32	64	128	
-4									
-3									
-2									
-1									
0									
1									
2									
3									
4									

Tabla 2.

- Disminuya la frecuencia de reloj en un rango de 52kHz y observe el comportamiento del dispositivo.
- Vuelva a dejar la frecuencia de 100kHz y cambie el capacitor C1 por uno de 9nf y observe la salida del convertidor a una entrada dada.
- Aplique en la entrada  $V_{IN}$  una señal senoidal (siempre positiva) con un valor de pico inferior al de  $V_{ref}$  (aproximadamente de 6Vpp) y con una frecuencia de alrededor de 0.1Hz. Observe el voltaje en el osciloscopio y determine por puntos (mediante el conmutador RUN/HOLD) la curva, mediante el valor digital de voltaje. Para facilitar esto, llene la Tabla 3.

TIEMPO (CUADROS)	$2^{-4}$	$2^{-3}$	$2^{-2}$	$2^{-1}$	$2^0$	$2^1$	$2^2$	$2^3$	$V_{SALIDA}$
	1	2	4	8	16	32	64	128	
0									
0.5									
1.5									
2									
2.5									
3									

Tabla 3.

### EXPERIMENTO 2. USO DE LOS PROCESOS DE CONVERSION

- Sin encender la fuente, polarice la tarjeta F03A con los voltajes indicados en sus bornes de polarización, conectando todas las tierras comunes.
- Coloque el S2 en posición de computadora.
- Conecte a los puertos CD el cable de conexión, según se muestra en la Figura 10.

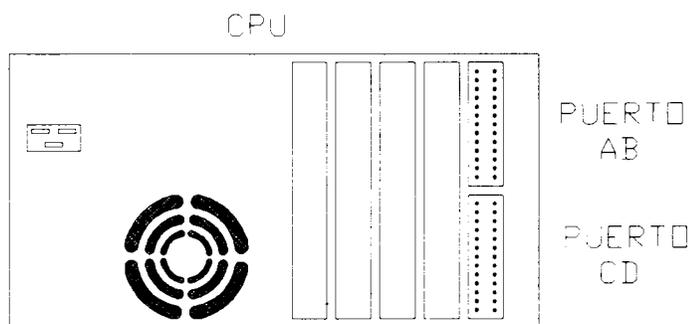


Figura 10. Distribución de puertos

- Encienda la fuente y computadora, de acuerdo a lo mencionado en las notas, con el disco en el drive A y ejecute la opción "Prueba de puertos".

## Práctica 10

---

- Aplicando un voltaje de CD en los bornes de entrada (IN) seleccione la rutina de prueba de puertos, siga las indicaciones ue marca el programa y anote lo observado en los indicadores luminosos de la tarjeta y en el monitor de la computadora.
- Repita la prueba con los puertos AB.
- Seleccione la opción "Generar onda" y seleccione "Senoidal". Con la opción de Graficar vea la forma de la señal en pantalla y mande al convertidor la señal con todos los elementos que la componen, observe en el osciloscopio la señal obtenida.
- Mande al menos tres fragmentos distintos de la señal al DAC, y observe que pasa con la señal.
- Repita para una señal triangular y una cuadrada.
- Coloque en los bornes marcados como IN una señal senoidal, con amplitud de 3 Vpp a una frecuencia de 500 Hz.
- Seleccione la opción "Recibir del ADC" para hacer una lectura del A/D. Asegúrese de que el interruptor S2 esté en posición de Computadora.
- Grafique la señal obtenida del convertidor en el monitor y mandela al convertidor D/A.

### **EXPERIMENTO 3. INTERACCION AMBIENTE-COMPUTADORA-AMBIENTE**

- Seleccione la opción "AD-COMPUTADORA-DA", colocando el interruptor S1 en posición de INT.
- Conecte un canal del osciloscopio a la salida de la tarjeta.
- Varíe la posición de P1 y observe lo que sucede en ambos indicadores luminosos de la tarjeta y en el osciloscopio.
- Conecte el generador de funciones a la entrada de la tarjeta, con una señal de baja frecuencia.
- Observe en el osciloscopio la señal de salida.
- Varíe la forma de onda de la señal de entrada.

**ANALISIS DE DATOS Y RESULTADOS**

1. Con base a los datos obtenidos en el experimento 1, obtenga el error de linealidad y el error de escala.
2. Indique los parámetros de operación de acuerdo a la Tabla 4.

RANGC		BITS DE SALIDA DIGITAL	FRECUENCIA DE RELOJ Y AMPLITUD
V.ENTRADA	V.SALIDA		

**Tabla 4.**

3. ¿Qué pasa con la salida digital al aumentar o disminuir la frecuencia de reloj?.
4. ¿En qué afecta el cambio de capacitor en el convertidor?.
5. De acuerdo a la Tabla 3 grafique la señal de salida (Vsal. vs tiempo).
6. Reporte un resumen de lo observado en el experimento 2.
7. Detalle lo observado en el experimento 3, para cada punto, tomando en cuenta que el arreglo usado trabaja como una unidad de proceso.
8. Reporte su opinión de las aplicaciones que puede tener este tipo de dispositivos.
9. Reporte sus observaciones y conclusiones.



## CONVERSION DE VOLTAJE A FRECUENCIA Y FRECUENCIA A VOLTAJE

### CONVERTIDORES V/F (CVF)

El término convertidor de voltaje a frecuencia (CVF) se refiere a que la frecuencia de alguna señal periódica se hace proporcional a un voltaje de control analógico. La salida en frecuencia puede ser de cualquier forma de onda periódica, como una onda cuadrada, un tren de pulsos, una onda triangular o una onda senoidal. Las salidas de tren de pulsos o de ondas cuadradas son las que generalmente se desean si la salida está destinada a activar un contador de cualquier clase.

### CONVERTIDOR V/F DE ONDA CUADRADA

El circuito básico que realiza esta conversión se ilustra en la Figura 1. Consta de un integrador (A1) y de un comparador (A2).

El comparador A2 invierte la salida cuando en su entrada no inversora el voltaje cambia de signo (inversión al cruzar por cero).

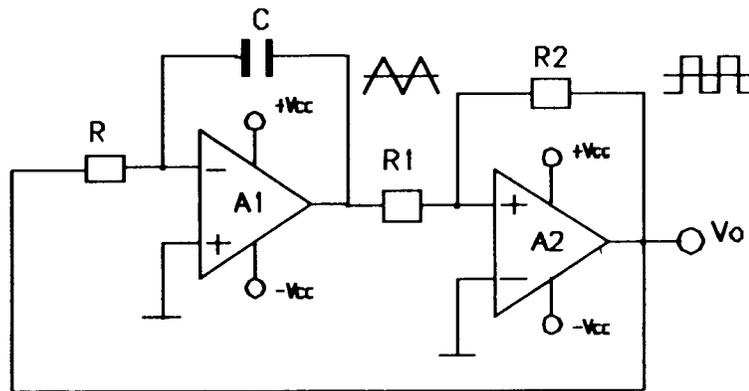


Figura 1

La amplitud del voltaje  $V_o$  está determinada por el voltaje de polarización, es decir, el tiempo necesario para que la salida de A1 (constante de integración RC) alcance el valor que da lugar a la conmutación de A2 depende del valor del voltaje de saturación. De este modo se obtiene una variación de la frecuencia de  $V_o$  proporcional al voltaje de polarización, logrando con este circuito un convertidor V/F.

### CVF DE SALIDA DE TREN DE PULSOS

Un circuito que ejecuta la conversión V/F de salida de tren de pulsos se muestra en la Figura 2. Se requieren solamente dos amplificadores operacionales para este convertidor, los cuales deben tener buenas características de saturación, elevada impedancia de entrada y buena capacidad de máxima rapidez de cambio. Los amplificadores operacionales del tipo J-FET cumplen con estas características.

Para entender el funcionamiento de este circuito, se considera primero el potenciómetro P de ajuste de amplitud. Si este potenciómetro está ajustado para una salida  $e_0$  de -8 V, la salida de A2 será negativa si  $e_2$  es más positivo que -8 V. Si A2 tiene salida negativa, el transistor Q1 tendrá por lo tanto en su base un voltaje negativo, lo cual indica que Q1 está en OFF.

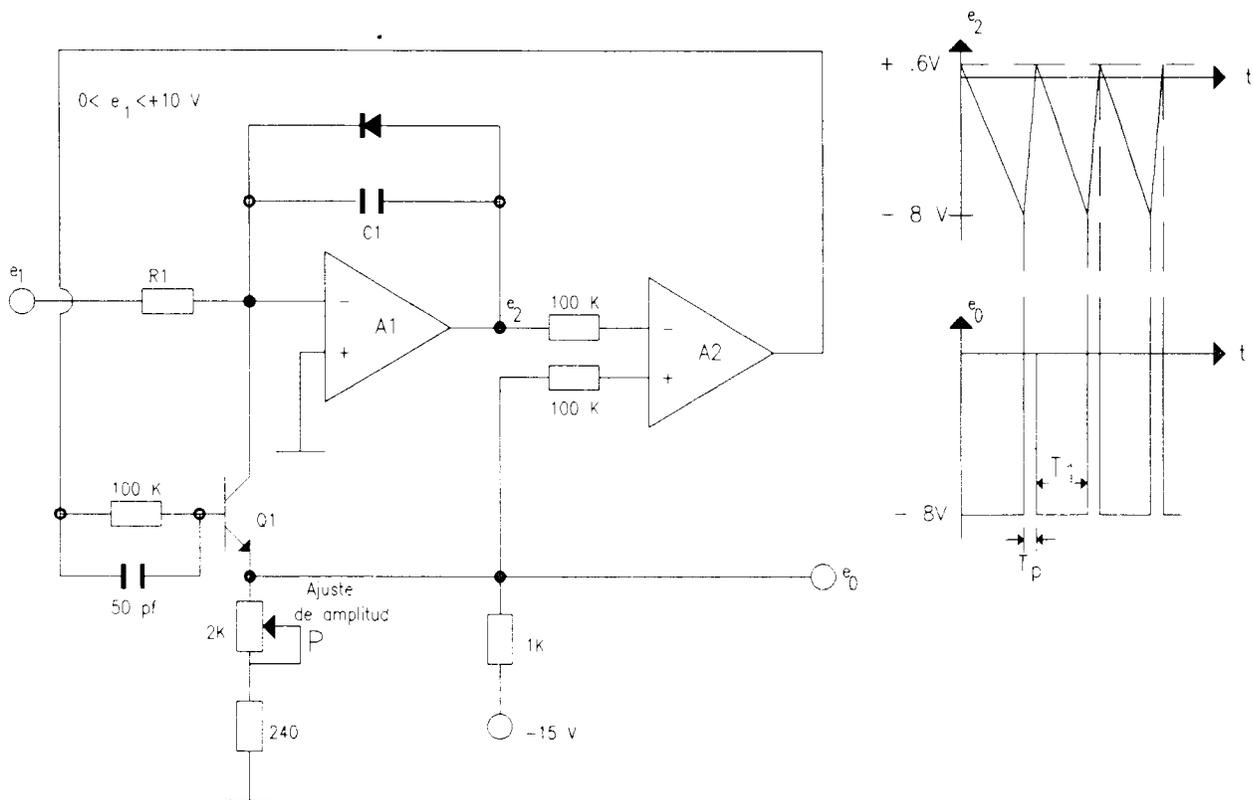


Figura 2

El voltaje de entrada  $e_1$  es positivo, y por ello, el integrador A1 integrará en la dirección negativa. Cuando la salida de A1 supere el valor de  $-8\text{ V}$ , la salida de A2 conmutará a un valor positivo. Esto llevará a Q1 al estado de conducción, y como el colector de Q1 está aproximadamente a  $0\text{ V}$ <sup>1</sup>, la salida  $e_0$  estará también muy cerca de  $0\text{ V}$ . Más exactamente, el transistor Q1 estará en su voltaje de saturación, es decir, cerca de  $0.1\text{ V}$ . Con Q1 en ON, funcionará como fuente de corriente en el punto de unión con el integrador y A1 integrará rápidamente en la dirección positiva. Cuando la salida del integrador excede de cero, el comparador A2 conmutará a la condición de saturación negativa. El diodo en paralelo con el integrador impide el sobretiro y reduce el tiempo de retraso. Al hacerse negativa A2, Q1 volverá a la condición de OFF. se completa entonces el ciclo y comenzará de nuevo.

El tiempo de retraso al conmutar A2 de un estado saturado al otro, limita el intervalo de frecuencia práctico de este circuito.

El factor de conversión de este circuito se determina de acuerdo a las siguientes ecuaciones

1 Para más detalles ver el Apéndice B

$$\frac{e_1 T_1}{R_1 C_1} = 8.6 \quad \text{y} \quad f = \frac{e_1}{T_1 + T_p}$$

sustituyendo

$$f = \frac{1}{\frac{8.6 R_1 C_1}{e_1} + T_p}$$

Si  $T_p < T_1$ , entonces

$$f = \frac{e_1}{8.6 R_1 C_1}$$

La linealidad de este circuito es bastante buena a bajas frecuencias, donde  $T_p$  es mucho menor que  $T_1$ , pero es mala a altas frecuencias.

### CVF DE ALTA CALIDAD

Un convertidor de voltaje a frecuencia lineal es el que usa dispositivos de alta calidad. Un circuito como éste, se muestra en la Figura 3a.

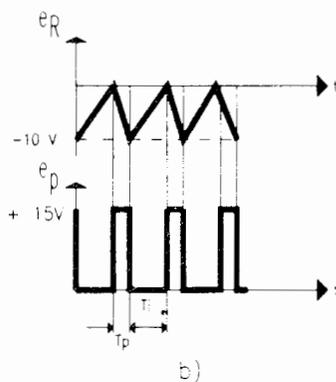
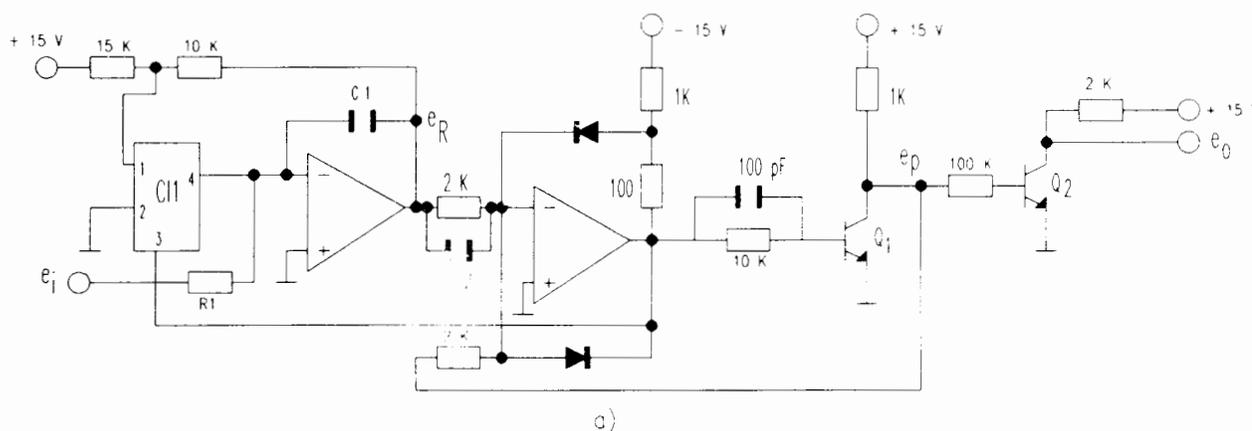


Figura 3

Básicamente este convertidor es igual al anterior (CVF de salida de tren de pulsos), sólo que ahora se le agrega a la entrada un amplificador de corriente conmutada (CI1) y un integrador de alta velocidad (A1) con facultad

## Práctica 11

para volver a poner en cero la corriente amplificada. Además, cuenta con arreglos de capacitores, resistencias y transistores que permiten que la linealidad del convertidor mejore.

El integrador A1 está controlado por el amplificador de corriente conmutada (CI1). Cuando el voltaje en el pin 3 es alto (aproximadamente +4 V), A1 integra con la rapidez determinada por R1, C1 y e1. Cuando el voltaje en el pin 3 es bajo (aproximadamente +0.6 V), el integrador volverá rápidamente a -10 V. El amplificador A2 y el transistor Q1 actúan como un comparador de alta velocidad. Q2 es una etapa de salida, separadora opcional. En la Figura 3b. se muestran formas de onda típicas de este convertidor. La resistencia de entrada R1 o el capacitor C1 pueden variarse para que proporcionen el factor de escala deseado de conversión.

Las ecuaciones de operación son:

$$\frac{e_1 T_1}{R_1 C_1} = 10 \quad \text{y} \quad f = \frac{1}{T_1 + T_p}$$

sustituyendo

$$f = \frac{1}{\frac{10 R_1 C_1}{e_1} + T_p}$$

El tiempo de reajuste,  $T_p$ , será de 3 a 4  $\mu\text{seg}$  usando los valores de los componentes mostrados. Si  $T_p = 3 \mu\text{seg}$  y  $C_1 = 0.01 \mu\text{Fd}$  entonces

$$f = \frac{e_1}{R_1 \times 10^{-7} + 3 e_1 \times 10^{-6}}$$

Si por ejemplo, se deseara un factor de escala de 1KHz/V, entonces,  $R_1$  debería ser aproximadamente de 10 K , por lo cual

$$f = e_1 \times 10^3 \text{ Hz}$$

$$\text{y } 0 < f < 10 \text{ KHz para } -10 \text{ V} < e_1 < 0$$

## CONVERTIDORES F/V

La conversión F/V es conocida sobre todo por los problemas derivados de los instrumentos, desde los tacómetros para automóviles hasta los dispositivos de detección de radioactividad.

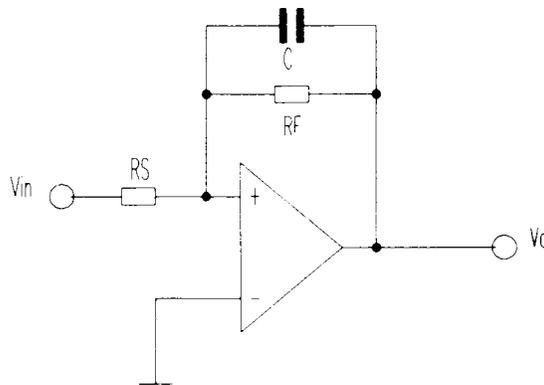


Figura 4

Un caso sencillo es aquel en el que la frecuencia de entrada está constituida por una secuencia de pulsos de forma y amplitud bien determinados con área constante. En dicho caso para realizar la conversión basta usar un filtro paso-bajas como el que se muestra en la Figura 4.

Las ecuaciones de operación son:

$$V_0 = - \frac{V_{in} R_F}{R_s (1 + 2 \Pi f R_F C)}$$

Con una constante de tiempo RC pequeña se tiene una respuesta rápida pero aumentará el rizo de la salida mientras que si la constante de tiempo RC es grande reducirá mucho la velocidad de respuesta del dispositivo.

Cuando la señal de entrada no sea un pulso (como puede ser una señal senoidal, triangular, etc.), basta con adoptar el esquema de la Figura 5 para realizar la conversión. En el esquema, el detector de cruce por cero genera un pulso que va a controlar un monoestable formador de pulsos cuya señal de salida se envía al filtro paso-bajas.

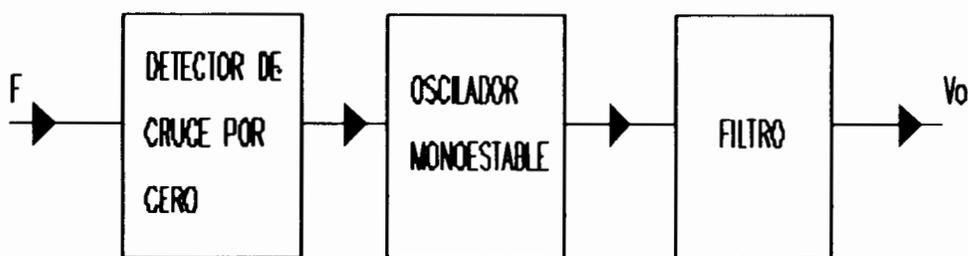


Figura 5

## DESCRIPCION DEL EQUIPO

En la Figura 6 se muestra el circuito electrónico de los convertidores V/F y F/V, los cuales constituyen el módulo G21. En dicho módulo se halla también representado el circuito de un fotoaislador con el cual se pueden llevar a cabo simulaciones de transmisión de datos analógicos aislando electricamente la parte transmisora de la parte receptora.

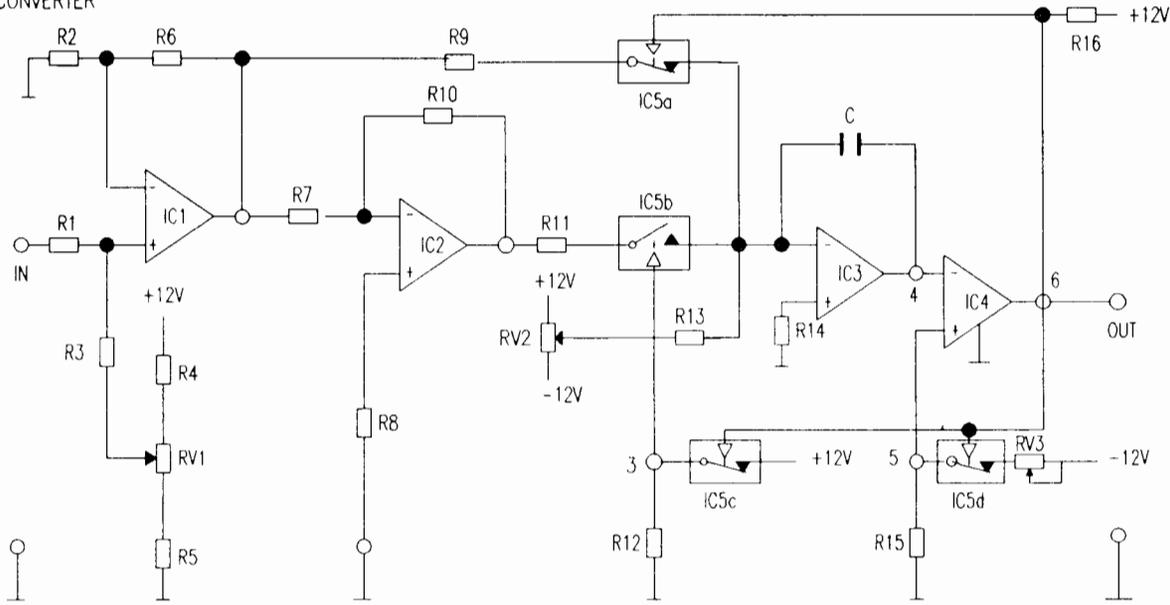
## CONVERTIDOR V/F

El circuito electrónico del convertidor V/F constituye el cuadro "V/F CONVERTER" del módulo G21. Para comprender el funcionamiento de este dispositivo se hará referencia al diagrama de la Figura 7. Para analizar el principio de funcionamiento del dispositivo se considerará, que la salida del comparador es 0 V (saturación inferior). En esta condición, la posición de los interruptores analógicos es la representada en dicha figura.

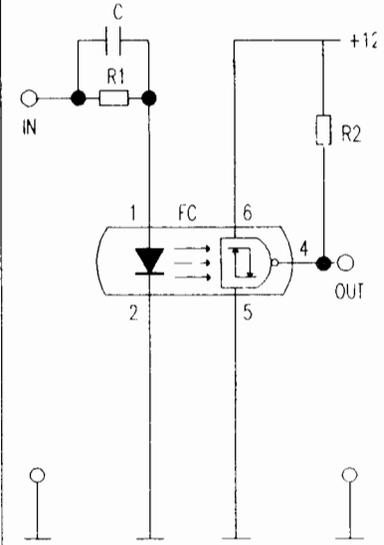
El voltaje de entrada  $V_{in}$  es aumentado por el amplificador no inversor, cuya salida se conecta al integrador inversor. En el comparador, la entrada no inversora se halla presente un voltaje de -8 V, e invierte su estado de salida cuando su entrada inversora es más negativa que -8 V. La señal de salida del integrador asume valores cada vez más negativos (rampa de bajada) hasta llegar por debajo de los -8 V. En este punto, el comparador invierte su estado de salida pasando a la condición de saturación superior (alrededor de 12 V).

Debido a esto los interruptores analógicos cambian de posición, por lo que la señal que llega al integrador será ahora el voltaje de entrada  $V_{in}$  amplificado e invertido, mientras que el nuevo valor de umbral del comparador será 0 V.

V/F CONVERTER



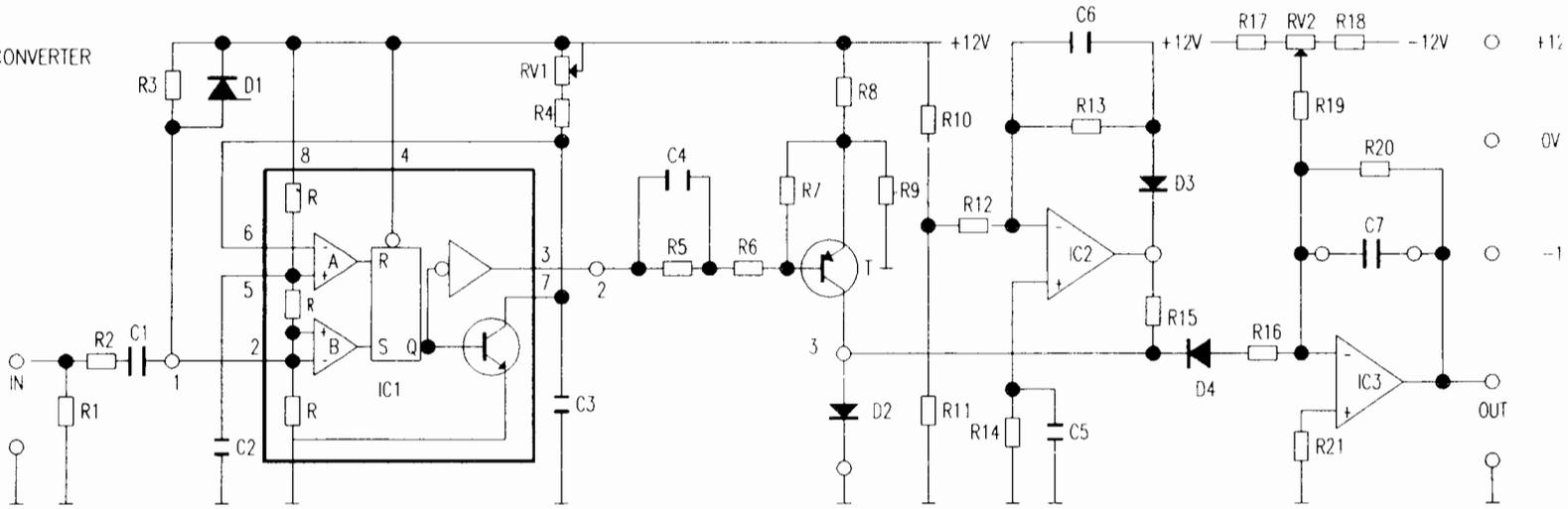
OPTOCOUPLER



G21

Figura 6

F/V CONVERTER



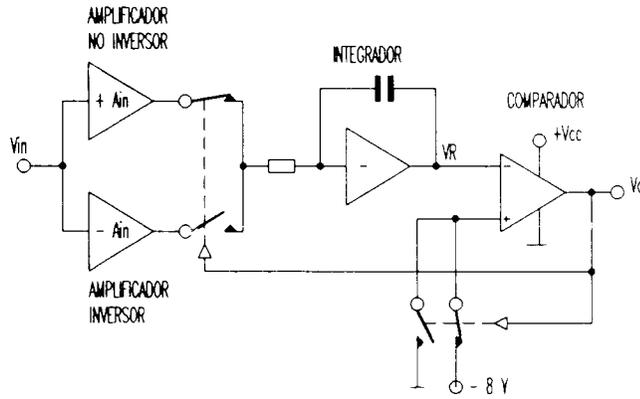


Figura 7

El voltaje de salida del integrador empieza a subir (rampa positiva) pasando de valores negativos al valor cero. Tan pronto como la rampa supera este último valor la salida del comparador cambia y va a cero. Seguidamente, se desarrolla otro ciclo como el anterior, obteniéndose en la salida una onda cuadrada.

La velocidad de subida de la rampa está dada por la ecuación  $(V_{in} \times A) / RC$ , es decir, que es función del voltaje de entrada.

Ya que el tiempo que transcurre entre dos conmutaciones del comparador depende de la velocidad de subida de la rampa, la frecuencia de la señal de salida  $V_o$  será directamente proporcional al voltaje de entrada.

Las formas de las señales que se encuentran en el convertidor están representadas en la Figura 8, en la que se observa que la entrada debe ser positiva.

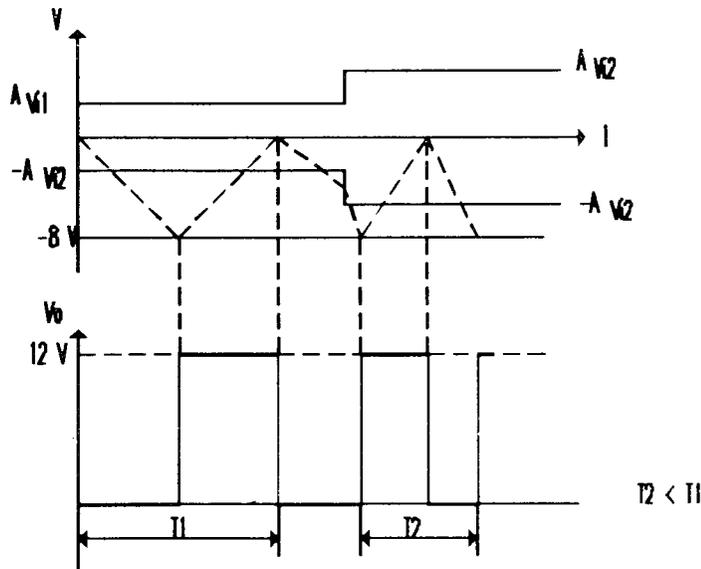


Figura 8

Con base en lo anterior, se describirá el convertidor V/F del módulo G21 que se muestra en la Figura 6.

Los amplificadores operacionales IC1 e IC2 (del tipo A741) constituyen, respectivamente, el amplificador de entrada no inversor e inversor. El potenciómetro RV1 junto con la resistencia R3 sirven para fijar la frecuencia

## Práctica 11

mínima del convertidor. Esto es útil cuando se requiere que a un voltaje de entrada nulo le corresponda una frecuencia de salida distinta de cero, para facilitar la operación inversa y para asegurar la transmisión del dato analógico "0". Para ello se introduce un voltaje de "offset" constante (mediante R3 y RV1) que permite obtener en la salida una cierta frecuencia.

El operacional IC3 constituye el integrador, con constante de integración igual a R9C o a R11C, según se trate de una rampa de bajada o de subida.

El potenciómetro RV2 sirve para equilibrar el "offset" de las dos señales (positiva o negativa) aplicadas al integrador, de modo que la onda cuadrada de salida resulte simétrica.

El comparador IC4 confronta la señal de salida del integrador con el voltaje de cero volts (rampa de subida) o con un voltaje negativo (rampa de bajada) adecuadamente escogida como para que la frecuencia de salida sea máxima. El valor de esta última se determinará variando el potenciómetro RV3.

Los interruptores analógicos de que consta el circuito integrado IC5 funcionan de la manera siguiente: cuando la salida del comparador IC4 está en cero, los interruptores "a", "c" y "d" se hallan en la condición de reposo (contactos cerrados). Ahora, en el punto 3 hay un voltaje de 12 V que sirve para controlar la apertura del contacto del interruptor "b". Por lo tanto, en la entrada del integrador IC3 se encuentra aplicada la señal de entrada  $V_{in}$  amplificada y sin invertir.

El umbral de conmutación del comparador IC4 está fijado en el valor del voltaje negativo establecido por el divisor R15-RV3.

Tan pronto como el voltaje del punto 6 alcanza 12 V (saturación superior) los contactos de los interruptores "a", "c" y "d" se abren, mientras que el interruptor "b" se cierra, ya que el voltaje del punto 3 es de 0 V. De este modo en la entrada del integrador se halla ahora aplicada la señal de entrada  $V_{in}$  amplificada e invertida, mientras que el umbral de conmutación del comparador es ahora de 0 V.

Se han elegido los valores de los componentes de forma que una frecuencia de salida de 1 KHz corresponda a un voltaje de entrada de 0 V, y que una frecuencia de salida de 9 KHz corresponda a un voltaje de entrada de 8 V.

### CONVERTIDOR FRECUENCIA/VOLTAJE

El diagrama electrónico del convertidor F/V constituye el cuadro "F/V CONVERTER" del módulo G21. Para comprender el funcionamiento de este convertidor, se hará referencia al diagrama a bloques de la Figura 9.

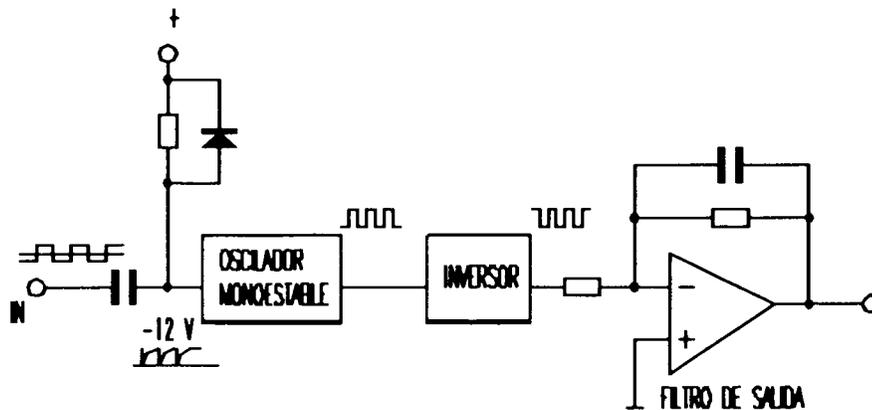


Figura 9

Se considera una señal de entrada con una cierta frecuencia, la cual pasa a través del capacitor de entrada y activa el oscilador sólo con los frentes de bajada, en correspondencia con los cuales se tendrá en la salida del oscilador un tren de pulsos, de duración constante y de frecuencia igual a la de la señal de entrada, que después de ser invertidos se envían hasta un filtro paso-bajas. La salida del filtro proporciona un voltaje cuya amplitud es proporcional a la frecuencia de la señal de entrada.

En la Figura 10 pueden observarse las formas de las señales detectadas en el convertidor.

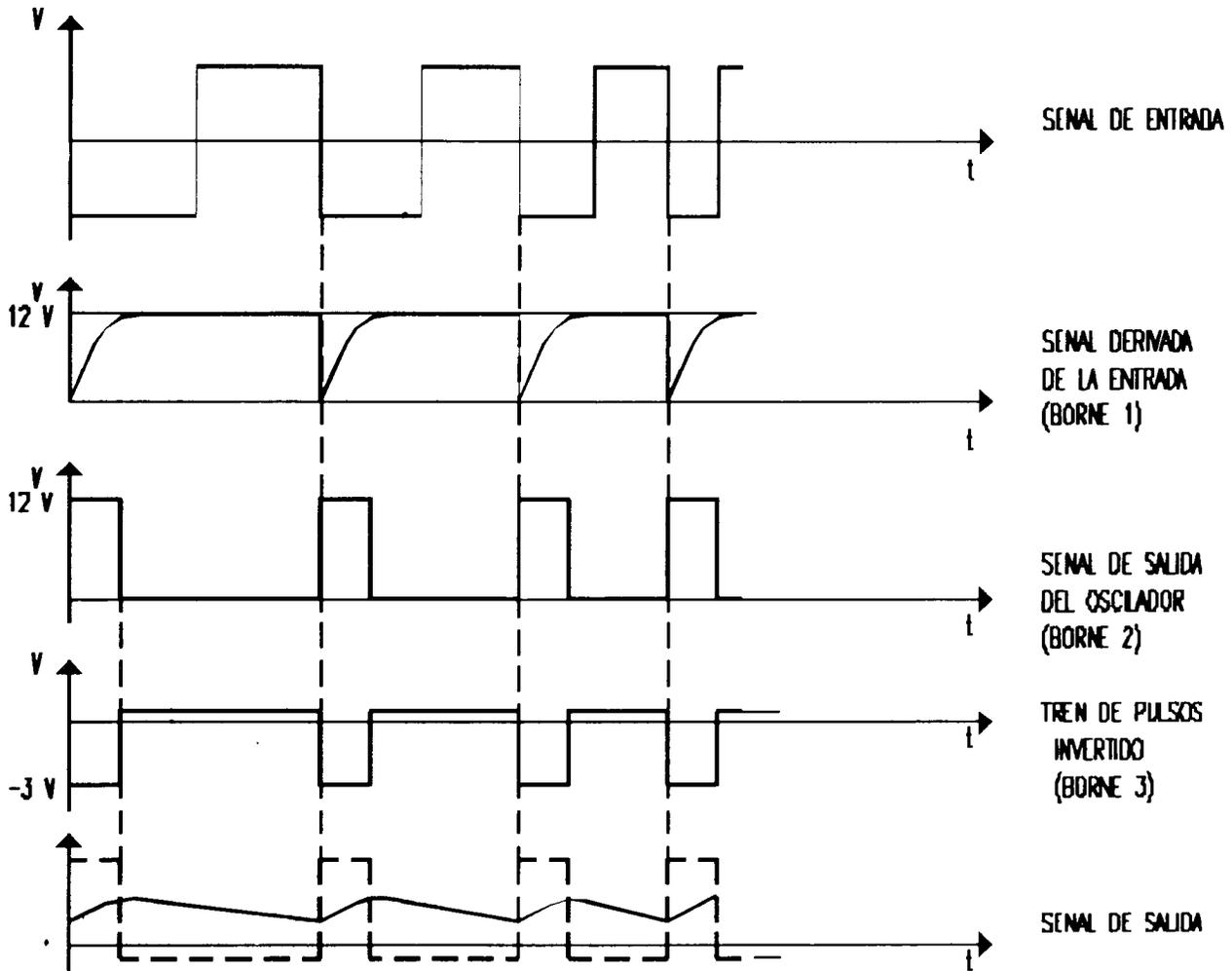


Figura 10

Con base a lo anterior, se describirá el convertidor de frecuencia/voltaje del módulo G21 mostrado en la Figura 6.

C1 es el capacitor de entrada; en correspondencia con el frente negativo de la señal de entrada, el punto 1 va a 0 V, pudiéndose así controlar el oscilador monoestable IC1 (SN555). En la salida del monoestable (punto 2 del módulo) habrá un pulso disponible cada vez que la señal de entrada presente un frente negativo. Dicho pulso tendrá una duración determinada por las resistencias RV1 y R4 y por el capacitor C3. Sin frente negativo, el punto 2 está a 0 V y el transistor T conduce. Por ello el diodo se polarizará directamente y se tendrá en el punto 3 un voltaje de + 0.6 V. En cambio, con un frente negativo, el voltaje en el punto 2 es positivo, llevando al transistor T al estado de corte.

En el punto 3 el voltaje de la señal alcanza un valor que depende de las resistencias R15 y R16. Dicha señal (ver la Figura 10 borne 3) es filtrada e invertida por el circuito auxiliar del operacional IC3 (A741).

El potenciómetro RV1 sirve para fijar la duración del pulso suministrado por el monoestable. Naturalmente, dicho pulso deberá durar menos que el período de la onda cuadrada de entrada correspondiente a la máxima frecuencia. Otra función del potenciómetro RV1 es la de regular el voltaje de salida para la frecuencia máxima, haciendo que ésta corresponda al máximo voltaje de salida. Con el potenciómetro de "offset" (RV2), se regula el voltaje de salida para la frecuencia mínima.

Normalmente a la mínima frecuencia de trabajo se le debe hacer corresponder un voltaje nulo.

Evidentemente, estas dos calibraciones son interactivas, por lo que habrá que repetir las hasta que se obtengan los valores deseados.

El transistor T y el amplificador operacional IC2 constituyen el bloque inversor de la figura 9.

### **FOTOACOPLADOR (O FOTOAISLADOR)**

Para llevar a cabo ensayos de transmisión de datos analógicos es necesario utilizar un sistema transmisor que resulte aislado eléctricamente de la parte receptora. Para ello el módulo G21 cuenta con un fotoacoplador. El diagrama electrónico de este dispositivo se halla reproducido en el cuadro "OPTOCOUPLER" del módulo G21.

Se puede conectar la salida del convertidor V/F con la entrada "IN" del fotoacoplador y, la salida "OUT" de éste a la entrada "IN" del convertidor F/V.

El fotoacoplador es del tipo disparador de Schmitt, de modo que en la salida se pueda disponer de una onda cuadrada bien definida.

Las gama de frecuencias útil debe ser tal que satisfaga los márgenes de los convertidores V/F y F/V.

### **OBJETIVOS**

- Conocer el principio de funcionamiento de los convertidores V/F y F/V.
- Aprender la técnica de calibración de los convertidores V/F y F/V que constituyen el módulo G21.
- Determinar la linealidad y rango de operación de los convertidores V/F y F/V.
- Simular un sistema de transmisión interconectando ambos convertidores. Así mismo, determinar su linealidad y rango de operación.

## **EQUIPO Y MATERIAL**

- Módulo G21
- Generador de funciones
- Osciloscopio
- Frecuencímetro
- Voltmetro digital
- Fuente de poder regulada
- Fuente de poder de +20 y -20 V
- Resistencia de 10 ohms
- Amplificador Operacional LM-741
- Capacitor de 0.22  $\mu F$
- Cables para conexiones

## **DESARROLLO**

### **EXPERIMENTO 1. CALIBRACION DEL CONVERTIDOR V/F**

- Conectar los bornes  $\pm 12 V$  y 0 V del módulo G21 a una fuente de poder regulada sin encenderla aún.
  - Conectar la fuente de poder regulada variable de 0 a 15 V (apagada), a la entrada "IN".
  - Conectar los canales A y B del osciloscopio al borne 4 y a la salida "OUT" (borne 6), respectivamente.
  - Conectar el frecuencímetro a la salida "OUT".
  - Verificar que el cableado sea el correcto; luego, encender la fuente de poder.
  - Aplicar 0 V a la entrada "IN".
  - Variar el potenciómetro RV1 hasta que el frecuencímetro indique 1KHz.
  - Variar el potenciómetro RV2 para hacer simétrica la onda triangular presente en el borne 4 (canal A del osciloscopio).
  - Aplicar 8 V a la entrada "IN".
-





## Práctica 11

- Con la señal de entrada de 9 KHz, vea en canal A del osciloscopio la señal de entrada y en el canal B vea las señales que se presentan en los bornes 1, 2 y 3 y también la señal del borne de salida. Dibuje la señales vistas.
- Aumente la frecuencia de la señal de entrada a más de 9 KHz hasta que el voltaje de salida sea constante. Anote el valor de la frecuencia a partir del cual el voltaje de salida no varía.

### EXPERIMENTO 5. SIMULACION DE UN SISTEMA DE TRANSMISION DE SENAL ANALOGICA CON LOS CONVERTIDORES DE V/F Y DE F/V

- Calibrar el equipo como se indica en los experimentos 1 y 3.
- Conectar en la entrada "IN" del convertidor V/F una fuente de alimentación regulada variable (apagada).
- Armar el circuito que se muestra en la Figura 11.
- Conectar la salida "OUT" del convertidor V/F a la entrada de la línea de transmisión.
- La salida de la línea de transmisión conectarla a la entrada "IN" del convertidor F/V.

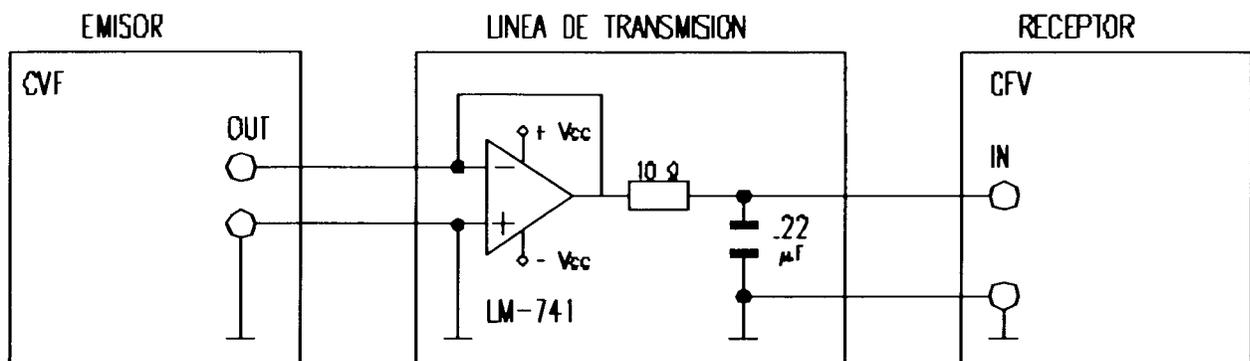


Figura 11

- Conectar un voltmetro digital a la salida "OUT" del convertidor F/V.
- Verificar el cableado, luego encender las fuentes de poder.
- Variar el voltaje de entrada de 0 a 8 V con saltos de 0.5 V y, en correspondencia con cada uno de ellos, leer y registrar el voltaje de salida.
- Apague las fuentes de poder.
- Ahora conecte la salida de la línea de transmisión a la entrada del fotoaislador y la salida del fotoaislador conéctela a la entrada del convertidor F/V como se ilustra en la Figura 12.



## Práctica 11

---

4. Explique cómo se podría aumentar el rango de operación del convertidor F/V.
5. Tomando de referencia la señal de entrada de 9 KHz, dibuje el diagrama de tiempos de acuerdo a las señales observadas en los bornes 1, 2 y 3 y en el borne de salida del convertidor F/V.
6. Con base a los datos de la Tabla 3, graficar la curva  $V_{in}$  vs  $V_{out}$ , asimismo, determinar la linealidad del circuito transmisor.
7. Comente por qué al conectar directamente ambos convertidores de V/F y de F/V no se registro ningún voltaje de salida.
8. En el esquema de la Figura 11, qué función realiza el amplificador operacional LM-741 ?
9. ¿Por qué la línea de transmisión está representada por una resistencia y un capacitor.
10. ¿Qué función realiza el fotoaislador ?

## CONVERTIDORES DE VOLTAJE A CORRIENTE Y CORRIENTE A VOLTAJE

En algunas aplicaciones, tales como en el control de bobinas (electroimanes) y en la transmisión de señales por líneas muy largas, a menudo es preferible adoptar una señal de corriente en lugar de una de voltaje; y en el caso de transmisión de señales de corriente muchas veces es necesario, para recibirlas, convertirlas en señales de voltaje.

Las conversiones se realizan básicamente con dos tipos de dispositivos, unos denominados "convertidores V/I" y "convertidores I/V", los cuales transforman un voltaje en corriente o bien una corriente en voltaje; y los llamados "transmisores".

Los transmisores son dispositivos que reciben la señal de un transductor o de un elemento primario y la convierten en una señal eléctrica o en una señal neumática, llamándose respectivamente, transmisores de salida eléctrica o de salida neumática. Los rangos estandarizados de las señales de salida son de 4 a 20 mA para la señal eléctrica y de 3 a 15 Psi para la neumática.

En relación con los convertidores V/I, al campo de voltajes de entrada le corresponden un margen de corriente de salida normalizado de 4 mA a 20 mA. Este rango de corriente desplazado de cero es de gran utilidad ya que se puede detectar fácilmente la condición de "alambre abierto o interrumpido" diferenciándose de la condición  $I=0$ .

El rango de salida del convertidor I/V se selecciona según la aplicación y normalmente es de 0 V a 8 V, de 0 V a 10 V, de -8 V a +8 V o de -10 V a +10 V.

Los convertidores de V/I e I/V se basan en las aplicaciones del amplificador operacional.

El amplificador operacional es un amplificador de alta ganancia y de acoplamiento directo. Generalmente está diseñado para amplificar señales que abarcan un amplio rango de frecuencia y normalmente se usa con redes realimentadas. Aunque muchos amplificadores operacionales usan una sola terminal de entrada, muchos otros utilizan la entrada diferencial, y todos tienen una sola terminal de salida. La mayoría de los amplificadores operacionales se representan por el símbolo de la Figura 1.

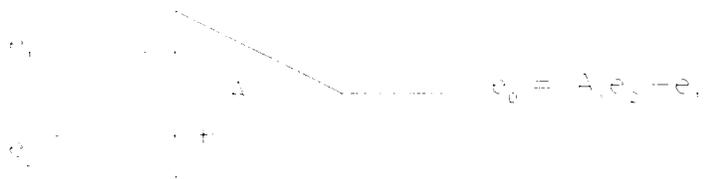


Figura 1

Existen propiedades ideales de los amplificadores operacionales hacia las cuales está dirigido su diseño. Estas propiedades no se realizan en la práctica, pero su consideración permite realizar análisis preliminares de los circuitos realimentados que se incluyen en todos los amplificadores.

## Práctica 12

Las propiedades idealizadas del amplificador son las siguientes:

Ganancia =  $\infty$  ( $A \rightarrow \infty$ )

$e_o = 0$  cuando  $e_1 = e_2$

Impedancia de entrada =  $\infty$  ( $Z_i \rightarrow \infty$ )

Impedancia de salida = 0 ( $Z_o \rightarrow 0$ )

Ancho de banda =  $\infty$  (retraso en la respuesta = 0)

Cuando se incluye una realimentación, las características del amplificador son determinadas principalmente por la red de realimentación.

### Convertidores de voltaje-corriente

Los convertidores V/I más sencillos son los que utilizan el amplificador operacional en su configuración de inversor y no inversor.

Los circuitos ilustrados en la Figura 2 a) y b) constituyen ejemplos de este tipo.

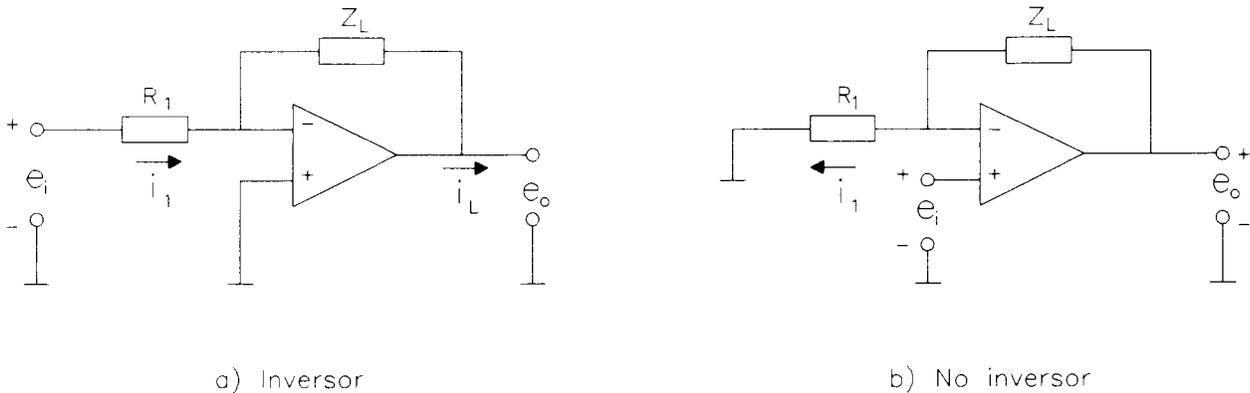


Figura 2

El circuito de la Figura 2a) es un simple inversor. La corriente de entrada es la corriente de carga y está dada por:

$$i_1 = \frac{e_i}{R_1} = K e_i = i_L$$

ya que  $R_1$  está conectada a la tierra virtual de la unión suma.

Esta misma corriente fluye a través de la impedancia de carga de realimentación  $Z_L$ . La corriente  $i_1$  es independiente del valor de  $Z_L$  y tanto la fuente de señal como el amplificador operacional deben ser capaces de suministrar la cantidad deseada de corriente de carga.

El circuito de la Figura 2b) opera en modo "no inversor" y presenta una alta impedancia a la fuente de excitación.

La corriente se sigue expresando mediante la ecuación:

$$i_1 = \frac{e_i}{R_1} = K e_i = i_L$$

donde  $i_1$  es de nuevo la corriente de carga. La corriente requerida por la fuente de señal es muy pequeña a causa de la alta impedancia del amplificador no inversor.

Otro convertidor V/I para cargas fluctuantes (esto es, cargas de variaciones pequeñas y rápidas) se ilustra en la Figura 3 que corresponde a un amplificador de corriente. En dicho convertidor la mayor parte de la corriente es suministrada por el amplificador operacional y sólo una pequeña parte por la fuente de señal de entrada<sup>1</sup>.

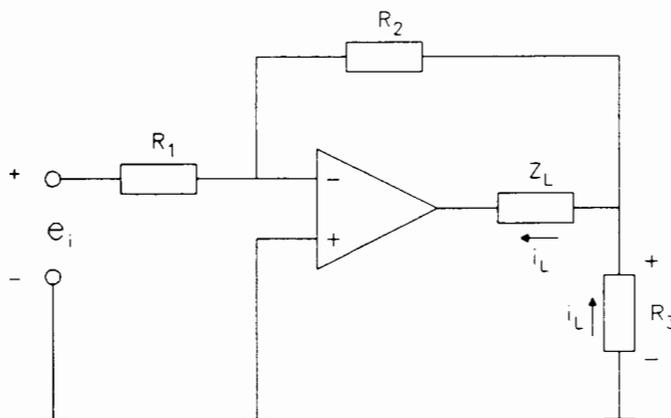


Figura 3

Para este circuito, la corriente de carga esta dada por la ecuación:

$$i_L = k e_i$$

donde

$$k = \frac{1}{R_1} \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right)$$

entonces

$$i_L = \frac{e_i}{R_1} \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right)$$

1 Las deducciones de las ecuaciones para  $i_L$  de los convertidores V/I se detallan en el Apéndice C.

## Práctica 12

$R_3$  es la resistencia de escalamiento de corriente. Para minimizar la carga de la fuente de señal es conveniente que  $R_1$  sea bastante grande. El amplificador debe ser capaz de proporcionar a la carga toda la corriente y presentar en su salida un voltaje igual a:

$$e_{O\text{máx}} = i_{L\text{máx}} (Z_L + R_3)$$

Para cargas que están conectadas a tierra, se tiene el circuito de la Figura 4. En éste, con un solo amplificador se tiene una fuente de corriente controlada por voltaje  $e_i$ .

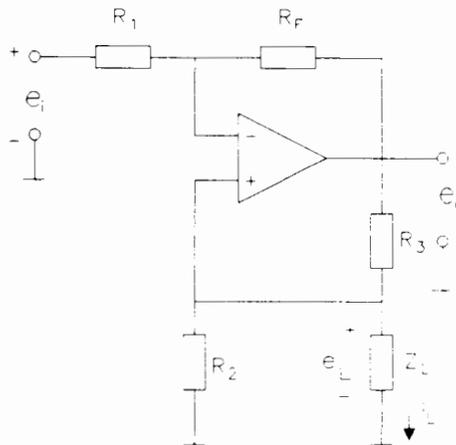


Figura 4

La expresión que vincula el voltaje con la corriente es:

$$i_L = -\frac{e_i}{R_L}$$

siempre que

$$\frac{R_3}{R_2} = \frac{R_F}{R_1}$$

Si estas relaciones de resistencia son iguales, el circuito funcionará como una fuente de corriente propiamente dicha con una impedancia interior muy alta. Si estas relaciones no se igualan, habrá un decremento de la impedancia de entrada de la fuente de corriente. En este circuito las pequeñas variaciones de la impedancia de la carga efectiva provocarán también pequeñas variaciones en el valor de la corriente de salida.

Este convertidor debe tener un rango de voltaje de salida suficiente para proporcionar el voltaje máximo de carga más la caída de voltaje a través de  $R_3$ . Normalmente,  $R_1$  y  $R_2$  deben ser suficientemente grandes como para que en ellas circulen pequeñas corrientes, mientras que  $R_F$  y  $R_3$  deberán ser pequeñas para reducir al mínimo las caídas de voltaje.

El circuito convertidor V/I de la Figura 5 utiliza dos amplificadores inversores para controlar la corriente de una carga conectada a tierra.

Esta corriente está dada por la ecuación:

$$i_L = e_i \frac{R_5 R_F}{R_4 R_1} \frac{1}{R_3 + Z_L \left[ 1 + \frac{R_3}{R_2} - \frac{R_5 R_F}{R_4 R_2} \right]}$$

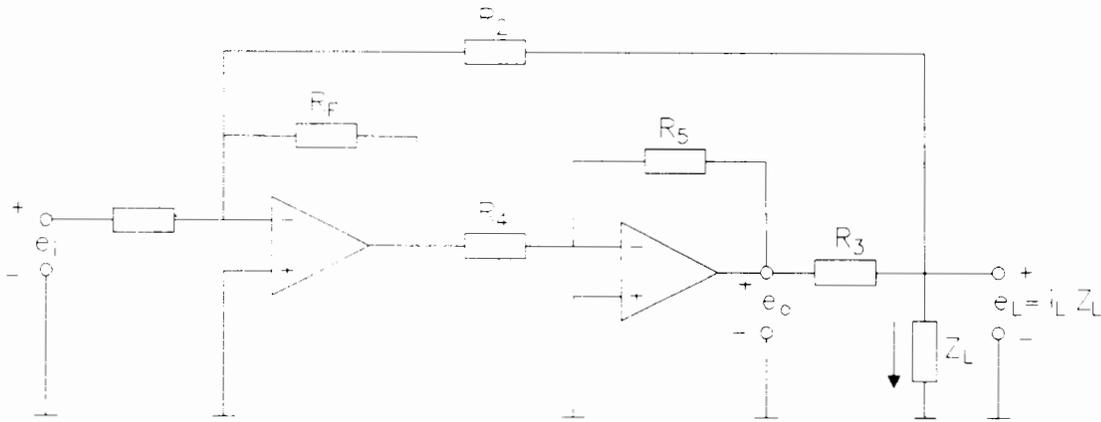


Figura 5

Si se escogen las resistencias de modo que

$$1 + \frac{R_3}{R_2} = \frac{R_5 R_F}{R_4 R_1}$$

se tendrá entonces:

$$i_L = \frac{e_i R_5 R_F}{R_3 R_4 R_1}$$

De modo particular, si

$$R_1 = R_F = R_4 = R_5$$

se obtendrá:

$$i_L = \frac{e_i}{R_3}$$

y

$$R_2 = R_F - R_3$$

Si  $R_1$  es grande, la corriente suministrada por la fuente será muy pequeña y muy poca circulará a través de los elementos de realimentación.

Entonces el voltaje de salida está dada por:

$$e_{O \text{ máx}} = i_{L \text{ máx}} (Z_L + R_3)$$

La Figura 6 representa una forma modificada del CVI anterior. Este circuito ofrece la característica adicional de tener una impedancia de entrada elevada.

La expresión de la corriente de salida en función del voltaje es la siguiente:

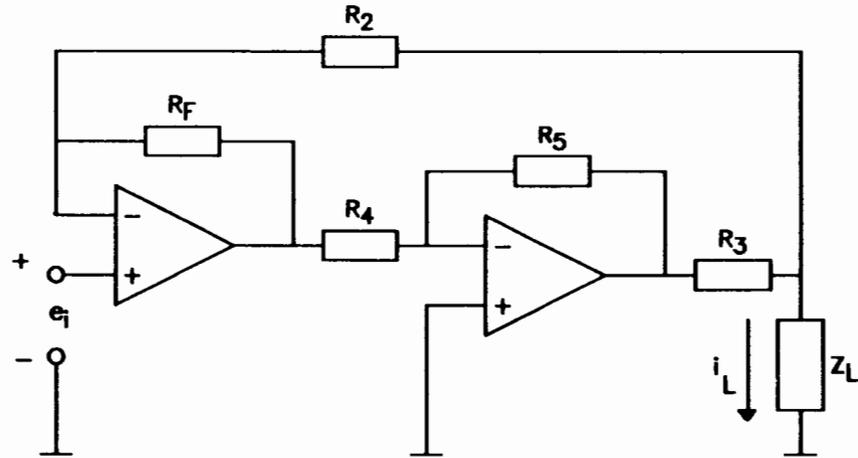


Figura 6

$$i_L = -\frac{e_i \left[ \frac{R_5}{R_4} \left( 1 + \frac{R_F}{R_2} \right) - \frac{R_3}{R_2} \right]}{R_3 + R_L \left( 1 + \frac{R_3}{R_2} - \frac{R_5 R_F}{R_2 R_4} \right)}$$

Si se escogen las resistencias de modo tal que

$$1 + \frac{R_3}{R_2} = \frac{R_5 R_F}{R_2 R_4}$$

y

$$R_F = R_4 = R_5$$

se obtienen:

$$i_L = \frac{2e_i R_F}{R_2 R_3}$$

y si

$$R_2 = R_F - R_3$$

$$i_L = -2 \frac{e_i}{R_3}$$

### Convertidores de corriente-voltaje

Los convertidores de corriente-voltaje o amplificadores de corriente son muy sencillos si se utilizan los amplificadores operacionales. Una fuente ideal de corriente tiene una impedancia de salida infinita y una corriente de salida independiente de la carga.

El convertidor de corriente-voltaje de la Figura 7 ofrece una impedancia de carga casi igual a cero ya que la entrada inversora está como tierra virtual.

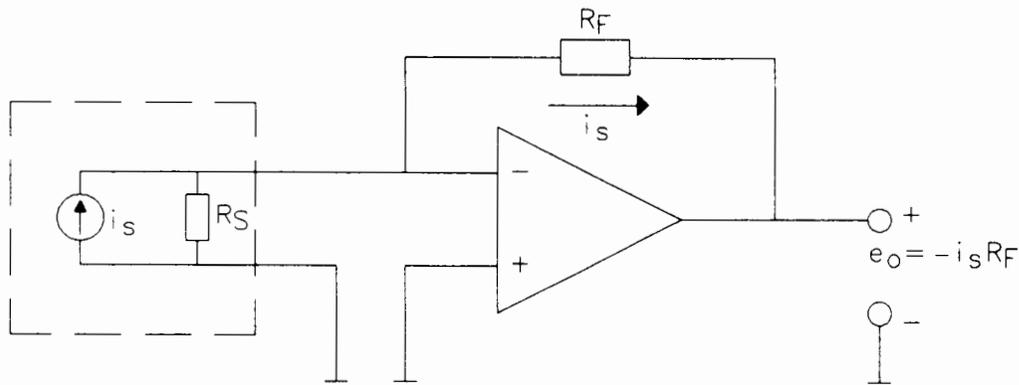


Figura 7

La corriente de entrada atraviesa la resistencia de realimentación  $R_F$  generando un voltaje de salida:

$$e_o = -i_s R_F$$

Si se tienen en cuenta la ganancia finita  $A$  y la impedancia de entrada diferencial  $Z_{iD}$  de lazo abierto, la impedancia de entrada actual  $Z_{in}$  del convertidor de corriente-voltaje es:

$$Z_{in} = \frac{Z_{iD}}{1 + \frac{Z_{iD}}{R_F}(1+A)} = \frac{R_F}{1+A}$$

El límite inferior de medición de la corriente de entrada lo determina la corriente de polarización de la entrada inversora. Para obtener resoluciones más grandes se emplean los FET.

Para el voltaje de "offset" de DC y para el voltaje de ruido, la ganancia del amplificador estará dada por:

$$\frac{R_F + R_s}{R_s} = 1.0 \quad \text{ya que} \quad R_s \gg R_F$$

De esta manera, los errores debidos a estos parámetros son muy pequeños. Sin embargo, el ruido de corriente puede constituir un factor importante a causa de la impedancia muy alta.

Ya que tales circuitos de medición se utilizan para señales de frecuencia muy baja, es común conectar un capacitor  $C_F$  en paralelo con la resistencia  $R_F$  para reducir el ruido de corriente de alta frecuencia. La impedancia de salida del convertidor será más bien baja.

#### Parámetros de los convertidores V/I e I/V

En el diseño o selección de un convertidor de voltaje-corriente, o bien, de un convertidor de corriente-voltaje se deben tomar en cuenta los parámetros siguientes:

- Campo de voltajes (o bien, de corrientes) de entrada. Es el rango de valores extremos correspondientes a la máxima y mínima corriente (ó voltaje) de salida.
- Margen de corrientes (o bien, de voltajes) de salida. Es el rango de valores que corresponden al campo de voltajes (ó corrientes) de entrada.

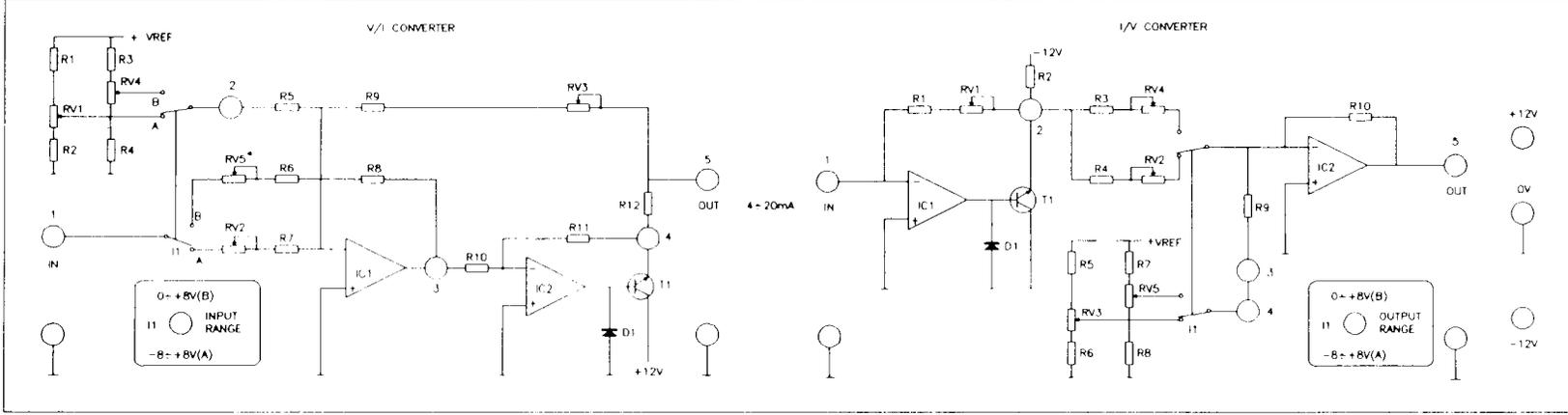


Figura 8

- Máxima impedancia de carga. Es el máximo valor de impedancia que puede presentar el convertidor (como generador de corriente).
- Curva característica de voltaje-corriente. Es la curva que vincula el voltaje de entrada con la corriente de salida.
- Curva característica de corriente-voltaje. Es la curva que vincula la corriente de entrada con el voltaje de salida.
- Por lo que respecta a las características de conversión, también hay que tomar en cuenta la precisión global y la linealidad.
- El margen de temperaturas de trabajo y eventuales coeficientes de dispersión térmica.

## DESCRIPCION DEL EQUIPO

El módulo G32 corresponde a los circuitos de conversión de voltaje-corriente y de corriente-voltaje y está ilustrado en la Figura 8.

Para su funcionamiento, el equipo debe ser alimentado con voltajes continuos estabilizadas de  $\pm 12$  V y 0 V.

El esquema electrónico del convertidor de voltaje-corriente representado en la Figura 9, tiene una configuración similar a la de la Figura 5 explicada anteriormente. A este circuito se le aplican dos voltajes, uno de entrada  $V_{in}$  (borne 1) y uno de referencia  $V_{REF}$  (borne 2).

El funcionamiento es el siguiente: conectando a tierra el borne 5 y considerando unitaria la amplificación de los dos circuitos integrados  $I_{C1}$  e  $I_{C2}$  se tiene que la corriente de salida  $i_L$  será la relación entre el voltaje del borne 4 y la resistencia  $R_{12}$ . Si se intercala una resistencia entre el borne 5 y el de tierra, el voltaje en el borne 5 aumenta (a causa de la caída en la resistencia de salida-carga), y este voltaje se lleva hasta la entrada a través de  $R_9 + R_{V3}$ , con lo que el voltaje en el borne 4 aumentará de modo que el valor de la corriente que fluya en la carga (resistencia) no cambie respecto a la condición de cortocircuito.

El transistor  $T_1$  funciona a modo de amplificador de corriente, mientras que  $D_1$  actúa como protección.

Con el interruptor  $I_1$  se selecciona y se fija el rango de entrada  $A$  para  $-8$  a  $+8$  V y  $B$  para  $0$  a  $8$  V. El voltaje de referencia puede variarse y medirse en el borne 2, esto para obtener 4 mA de salida en correspondencia con el valor más bajo de voltaje del rango de entrada.

El valor de  $R_{12}$  es igual a 253 ohms y el valor máximo de la resistencia de carga es de 150 ohms. Esto se verifica conectando en la salida (entre el borne 5 y tierra) dicho valor de resistencia. Con la máxima corriente (20 mA) el voltaje del borne 4 será:  $20 \text{ mA} \times (253 + 150) = 8 \text{ V}$ , que es el valor límite para no salir de la condición lineal.

Para el caso de que el rango de entrada sea entre 0 y 8 V, hay que conmutar  $I_1$  en la posición  $B$ . El amplificador IC1 amplifica 1/2, por lo que en el borne 3 se tendrá un voltaje de 4 V cuando la entrada sea de 8 V. Con el potenciómetro  $R_{V4}$  el voltaje de referencia desplaza la señal de entrada de modo que a un voltaje de entrada de 0 V le corresponda una corriente de salida de 4 mA.

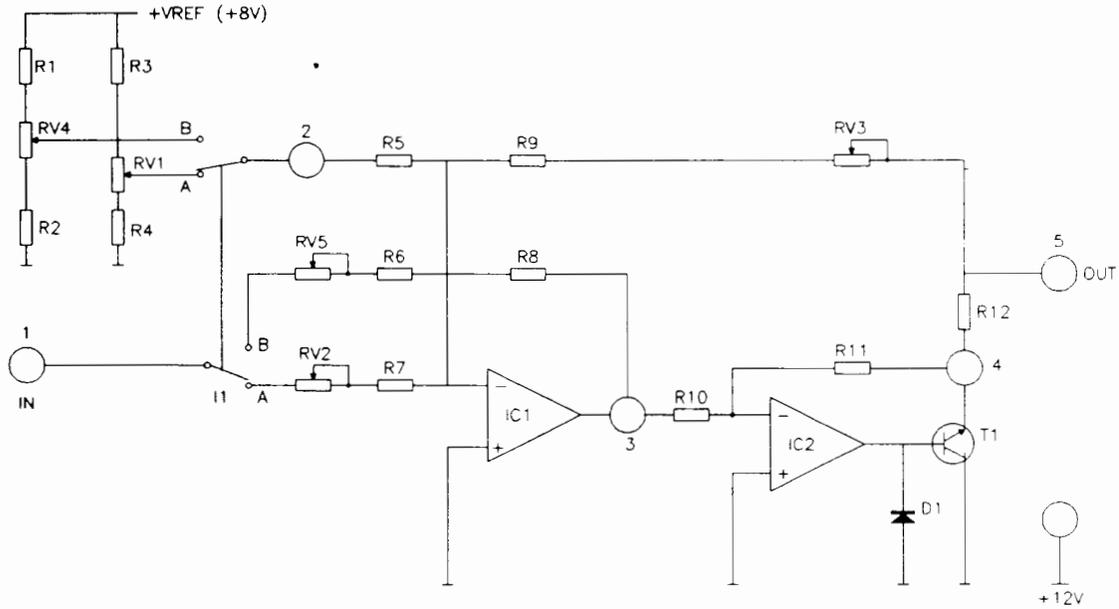


Figura 9

Conmutando en *A* el interruptor  $I_1$  el margen de entrada va de  $-8\text{ V}$  a  $+8\text{ V}$ , por lo que la amplificación de  $IC_1$  será aproximadamente  $1/4$  ( $4\text{ V}$  en el borne 3). Con  $RV_1$  se calibra el convertidor para obtener  $4\text{ mA}$  de salida en correspondencia con  $-8\text{ V}$  de entrada.

**Descripción y funcionamiento del convertidor I/V**

El esquema electrónico del convertidor de corriente-voltaje está representado en la Figura 10.

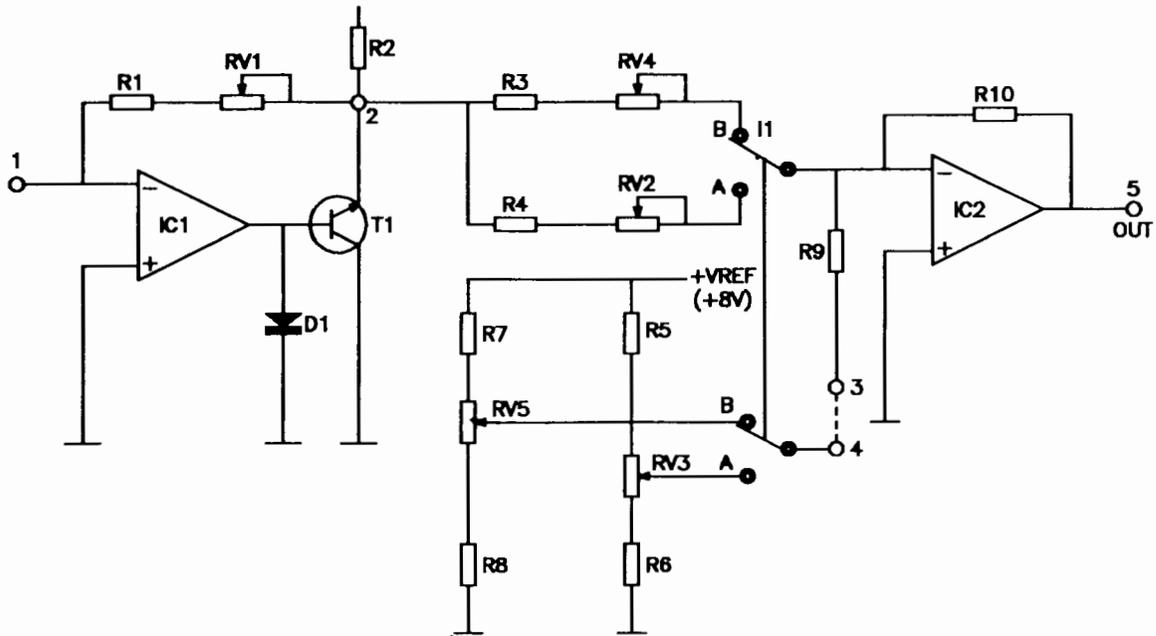


Figura 10

La corriente de entrada (borne 1) cuyo valor está comprendido entre 4 y 20 mA fluye a través del conjunto  $R_1 + R_{V1}$ , generando en el borne 2 un voltaje proporcional a la corriente [ $V_2 = -I_{in} (R_1 + R_{V1})$ ].

El amplificador operacional  $I_{C2}$  se encarga de amplificar y desplazar la señal de voltaje del borne 2; de este modo y con el conmutador  $I_1$  en la posición *A*, se obtiene en la salida un rango de voltaje de -8V a +8V ó de 0 a 8V en la posición *B*. En cualquiera de estos dos casos se tiene que hacer una conexión del borne 3 al 4.

El transistor  $T_1$  funciona a modo de amplificador de corriente, mientras que el diodo  $D_1$  actúa como protección. La resistencia que el convertidor de corriente-voltaje presenta en entrada es igual a cero, ya que la entrada inversora del amplificador operacional  $I_{C1}$  está conectada a tierra (virtual).

Como se indicó anteriormente el rango de voltajes de salida se selecciona con el conmutador  $I_1$ , que además de poder fijar el voltaje de referencia, también fija la amplificación específica para establecer el rango deseado de voltajes de salida.

## OBJETIVOS

- Calibrar el convertidor V/I para rangos de entrada de 0 V a 8 V y de -8 V a 8 V, ambas con salidas de 4 a 20 mA.
- Calibrar el convertidor I/V de manera que a un rango de corriente de entrada de 4 a 20 mA le correspondan rangos de salida de 0 a 8 V y de -8 V a +8 V.
- Simular la transmisión de una señal a través de los convertidores V/I e I/V.

## EQUIPO Y MATERIAL

- 2 Multímetros digitales.
- Fuente de alimentación estabilizada PS1.
- Fuente bipolar HP.
- Módulo G32.
- 1 resistencia de 1 K.
- 1 resistencia de 100 ohms.
- 1 resistencia de 200 ohms.
- Cables de conexión.

**EXPERIMENTOS**

**EXPERIMENTO 1: CALIBRACION Y DETERMINACION DEL RANGO DE OPERACION DEL CONVERTIDOR V/I DE 0 A 8 V / DE 4 A 20 mA**

- Conectar los bornes  $\pm 12$  V y 0 V del panel a una fuente de alimentación estabilizada.
- Ubicar el interruptor  $I_1$  en posición B.
- Conectar el miliampérmetro a la salida entre el borne 5 y tierra.
- Conectar la fuente de alimentación entre los bornes 1 y tierra, para obtener un voltaje variable entre 0 y +8 V proveniente de la fuente de alimentación.
- Fijar en 0 V el voltaje de entrada y regular el potenciómetro  $R_{V4}$  hasta obtener 4 mA en la salida.
- Aumentar a +8.0 V el voltaje de entrada y regular el potenciómetro  $R_{V5}$  hasta obtener 20 mA en la salida.
- Con la entrada en +8.0 V, conectar una resistencia de 100 ohms en serie con el miliampérmetro y regular el potenciómetro  $R_{V3}$  para obtener 20 mA en la salida.
- Verificar que a un voltaje de entrada de 0 V le corresponda una salida de 4 mA.
- Variar el voltaje de entrada, a partir de 0 V hasta +8 V, con saltos de 1 V y, en correspondencia con cada uno de ellos, medir la corriente de salida con el miliampérmetro.
- Registrar los datos obtenidos en la Tabla 1(a).

N	$V_{IN}$ 0 a 8 [volt]	$I_{OUT}$ [mA]
1	0	
2	1	
3	2	
4	3	
5	4	
6	5	
7	6	
8	7	
9	8	

(a)

N	$V_{IN}$ -8 a 8 [volt]	$I_{OUT}$ [mA]
1	-8	
2	-6	
3	-4	
4	-2	
5	0	
6	2	
7	4	
8	6	
9	8	

(b)

Tabla 1

**EXPERIMENTO 2: CALIBRACION Y DETERMINACION DEL RANGO DE OPERACION DEL CONVERTIDOR V/I DE -8 V A +8 V / DE 4 A 20 mA**

- Conectar los bornes  $\pm 12$  V y 0 V del panel a una fuente de alimentación estabilizada.
- Fijar el interruptor  $I_1$  en la posición *A*.
- Conectar el miliampermetro a la salida entre el borne 5 y tierra.
- Aplicar a la entrada, entre los bornes 1 y tierra, un voltaje variable entre -8 y +8 V proveniente de una fuente de alimentación.
- Llevar a -8V el voltaje de entrada y regular el trimer  $R_{V1}$  hasta obtener 4 mA de salida.
- Llevar a +8,0 V el voltaje de entrada y regular el trimer  $R_{V2}$  hasta obtener 20 mA de salida.
- Llevar a -8,0 V el voltaje de entrada y verificar que la salida sea de 4 mA.
- Estando la entrada en +8,0 V conectar una resistencia de 100 ohms en serie con el miliampermetro y regular el trimer  $R_{V3}$  para obtener 20 mA en la salida.
- Incrementar el voltaje de entrada, a partir de -8 V, con saltos de 2 V y, en correspondencia con cada uno de ellos, medir la corriente de salida con el miliampermetro.
- Agrupar los datos obtenidos en la Tabla 1(b).

**EXPERIMENTO 3: CALIBRACION Y DETERMINACION DEL RANGO DE OPERACION DEL CONVERTIDOR I/V DE 4 A 20 mA / 0 A 8 V**

- Conectar los bornes  $\pm 12$  V y 0 V del panel a una fuente de alimentación estabilizada.
- Ubicar el interruptor  $I_1$  en la posición *B*.
- Desconectar el cable de conexión de los bornes 3 y 4.
- Conectar el voltmetro a la salida entre el borne 5 y tierra.
- Para aplicar en la entrada, entre los bornes 1 y tierra, un voltaje variable entre 4 V y +20 V conecte en serie una resistencia de 1 K y un miliampermetro, como se muestra en la Figura 11.
- Varíe el voltaje de entrada hasta que en el miliampermetro se lea la corriente máxima que es de 20 mA, regular el trimer  $R_{V1}$  hasta obtener +8 V entre el borne 2 y tierra. Posteriormente regule el trimer  $R_{V4}$  para que a la salida, entre los bornes 5 y tierra se tengan 10 V.
- Conecte el cable de conexión entre los bornes 3 y 4 y con el trimer  $R_{V5}$  compare la diferencia de voltajes hasta obtener 8 V entre los bornes 5 y tierra.

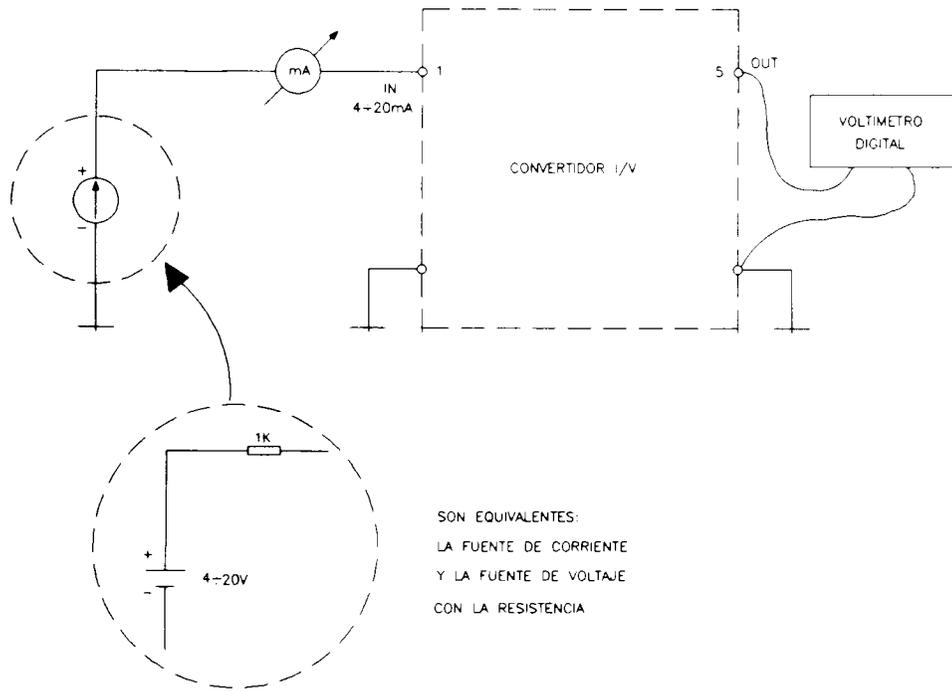


Figura 11

- Varíe el voltaje de entrada hasta que en el miliamperímetro se lea la corriente mínima, que es de 4 mA y verifique que a la salida, entre los bornes 5 y tierra se tengan aproximadamente 0 V.
- Incremente la corriente de entrada, (ajustando el voltaje de la fuente), a partir de 4 mA con saltos de 2 mA y en correspondencia con cada uno de ellos, leer en el voltímetro digital el voltaje de salida. Registre los datos obtenidos en la Tabla 2(a).

N	$I_{IN}$ [mA]	$V_{OUT}$ [Volt]
1	4	
2	6	
3	8	
4	10	
5	12	
6	14	
7	16	
8	18	
9	20	

(a)

N	$I_{IN}$ [mA]	$V_{OUT}$ [Volt]
1	4	
2	6	
3	8	
4	10	
5	12	
6	14	
7	16	
8	18	
9	20	

(b)

Tabla 2

**EXPERIMENTO 4: CALIBRACION Y DETERMINACION DEL RANGO DE OPERACION DEL  
CONVERTIDOR I/V 4 A 20 mA / DE -8 V A +8 V**

- Conectar los bornes  $\pm 12$  V y 0 V del panel a una fuente de alimentación estabilizada.
- Ubicar el interruptor  $I_1$  en la posición *A*.
- Para aplicar en la entrada, entre los bornes 1 y tierra, un voltaje variable entre 4 V y +20 V conecte en serie una resistencia de 1 K y un miliamperímetro, como se muestra en la Figura 11.
- Desconecte el cable de conexión de los bornes 3 y 4.
- Varíe el voltaje de entrada hasta que se lean 4 mA en el miliamperímetro. Verifique que entre el borne 5 y tierra se encuentre un voltaje de 4 V.
- Conecte el cable de conexión entre los bornes 3 y 4 y regule el trimer  $R_{V2}$  hasta obtener -8 V a la salida entre los bornes 5 y tierra.
- Aumente el voltaje de la fuente hasta leer 20 mA en el miliamperímetro. Posteriormente ajuste con  $R_{V3}$  hasta tener 8 V a la salida entre los bornes 5 y tierra.
- Varíe el voltaje de entrada hasta leer 4 mA en el miliamperímetro y verifique que se tengan aproximadamente -8 V en la salida.
- Incremente la corriente de entrada, (ajustando el voltaje de la fuente), a partir de 4 mA con saltos de 2 mA y en correspondencia con cada uno de ellos, lea en el voltmetro digital el voltaje de salida. Registre los datos obtenidos en la tabla 2(b).

**EXPERIMENTO 5: TRANSMISION DE UNA SEÑAL ELECTRICA A LARGA DISTANCIA.**

- Conectar los bornes  $\pm 12$  V y 0 V del panel a una fuente de alimentación estabilizada.
- Ubicar el interruptor  $I_1$  en la posición *B*.
- Teniendo calibrados los convertidores de V/I y de I/V de acuerdo a los experimentos anteriores, conecte el borne 5 del convertidor V/I al borne 1 del convertidor I/V y respectivamente la tierra del V/I con la tierra del I/V.
- Después conecte un voltmetro digital a la salida "OUT" del convertidor I/V.
- Verifique que a una entrada de 0.0 V se tengan aproximadamente 0.0 V y que a una entrada de +8.0 V se tengan aproximadamente +8.0 V.
- Posteriormente conecte entre los bornes 5 del convertidos V/I y 1 del convertidor I/V un cable de cobre muy largo, el cual representa una línea de transmisión. Verifique que los voltajes a la entrada y a la salida sean los mismos.

## Práctica 12

---

- Aplique tres valores de voltaje en el rango de 0 a 8 V al CVI y verifique si se recuperan los mismos valores en la salida del CIV.
- Mida la resistencia que presenta el cable de cobre y sustitúyalo ahora por una resistencia de 200 ohms. Observe qué ocurre al aplicar a la entrada los valores mínimo y máximo de voltaje que se aplicaron en los pasos anteriores.

### ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS

1. Investigue qué es un transmisor con salida eléctrica y con salida neumática.
2. ¿Cuáles son los rangos estandarizados de las salidas eléctricas y neumáticas ?
3. Presente un ejemplo o aplicación de un transmisor con salida eléctrica.
4. ¿Cuál es la ventaja principal que presenta el transmisor ?
5. ¿Qué semejanza o relación hay entre el convertidor V/I, el convertidor I/V y el transmisor eléctrico ?
6. Trazar las curvas de respuesta que establecen la relación entre el voltaje de entrada y la corriente de salida del CVI para los diferentes rangos de entrada.
7. Trazar las curvas de respuesta que establecen la relación entre la corriente de entrada y el voltaje de salida del CIV para los diferentes rangos de salida.
8. Cuando se utilizó el cable de cobre como línea de transmisión, ¿Se recuperó la señal de entrada?
9. Cuando se sustituyó el cable de cobre por la resistencia ¿Se recuperó la señal de entrada, porque?
10. ¿Como se podría determinar la distancia máxima a la cual responden los convertidores sin perturbar la señal?

# APENDICE A

## UNIDADES DE PRESION

	Psi	in H <sub>2</sub> O	in Hg	Atmósfera	kg/cm <sup>2</sup>	cm H <sub>2</sub> O	mm Hg	Bar	Pa
Psi	1	27.68	2.036	0.0680	0.0703	70.31	51.72	0.0689	7142
in H <sub>2</sub> O	0.0361	1	0.0735	0.0024	0.0025	2.540	1.868	0.0024	256.4
in Hg	0.4912	13.6	1	0.0334	0.0345	34.53	25.4	0.0333	3448
Atmósfera	14.7	406.79	29.92	1	1.033	1033	760	1.0131	1.01x10 <sup>5</sup>
kg/cm <sup>2</sup>	14.22	393.7	28.96	0.9678	1	1000	735.6	0.98	98100
cm H <sub>2</sub> O	0.0142	0.3937	0.0289	0.00096	0.0010	1	0.7355	0.0009	100
mm Hg	0.0193	0.5353	0.0393	0.0013	0.0013	0.0013	1	0.00133	133
Bar	14.5	408	29.99	0.987	1.02	1024	750	1	10 <sup>5</sup>
Pa	0.00014	0.0039	0.00029	0.987x10 <sup>-5</sup>	0.102x10 <sup>-4</sup>	0.01	0.0075	10 <sup>-5</sup>	1

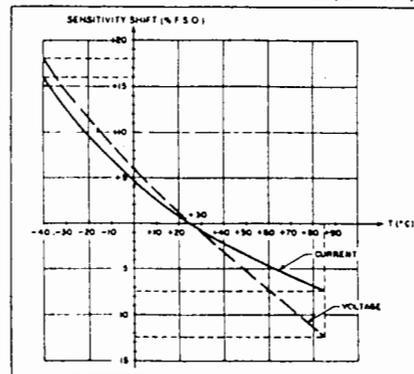
## ESPECIFICACIONES DEL TRANSDUCTOR DE PRESION

120PC SPECIFICATIONS at 10.0 ± 0.01 VDC Excitation, 25°C (unless otherwise noted)

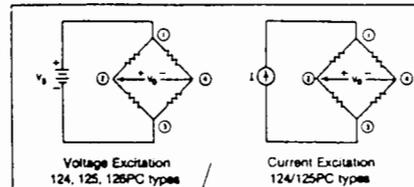
ALL TYPES, ALL RANGES

PARAMETER	120 PC TYPE*	Min.	Typ.	Max.	UNITS
Null Offset	124	0	-40	-80	mV
	125/6/G/D	-1	0	+1	
	125/6/A	-2	0	+2	
Response Time	All			1	msec
Recommended Excitation					
Voltage	124/5	10	12		VDC
Current	124/5	2	2.4		mA
Voltage	126	10	16		VDC
Temperature Error, 0-50°C					
Null Shift	All		±2		mV
Sensitivity Shift	124/5		±6.0		% F.S.O.
	124/5		±5.0		
	126		±1.5		
Repeatability & Hysteresis	All		±1		% F.S.O.
Stability over 3 years	All		±1.5		% F.S.O.
Bridge Resistance	124/5		5K		Ohms
Input Resistance	126		8K		
Shock	Qualification tested to 150g				
Vibration	Qualification tested to 0 to 2 kHz at 20g sine				
Operating Temperature	-55°C to +125°C (-65°F to +257°F)				
Media Compatibility	Contact MICRO SWITCH				
Weight	12 grams nominal				
Termination	0.025" nominal printed circuit board terminals				

NOMINAL SENSITIVITY SHIFT CHARACTERISTICS WITH VOLTAGE AND CURRENT EXCITATION (124/125PC)



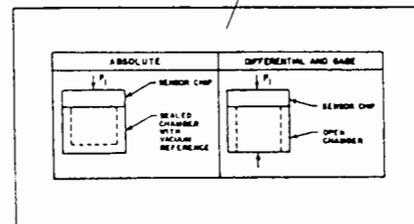
ELECTRICAL CONNECTIONS



### ABSOLUTE, DIFFERENTIAL, GAGE TYPES

Pressure may be applied to both sides of the sensing chip. P1 is the termination side, and only relatively clean gases such as air are recommended as measurands on this side. Fewer restrictions apply to the P2 side, except that media incompatible with RTV, silicon, or polyester should not be used.

In absolute devices, P2 is sealed, with a vacuum representing a fixed reference. The difference in pressure between the vacuum reference and the measurand applied at P1 causes the diaphragm to deflect, producing the output voltage change. Differential and gage devices measure one pressure with respect to another. In differential devices, measurands are applied to both ports. In gage devices, P1 is vented to atmospheric pressure, and the measurand is applied to P2.



120PC SPECIFICATIONS at 10.0 ±0.01 VDC Excitation, 25° C (unless otherwise noted)

GAGE AND DIFFERENTIAL TYPES

PARAMETER	120PC TYPE*	PRESSURE RANGES												UNITS
		0-5 psi			0-15 psi			0-15 psi, L Type						
		Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	Used over 0-15 psi			Used over 0-30 psi			
								Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	
F.S.O. (Full Scale Output)**	124	80	115	150	175	250	325	58	98	140	110	185	280	mV
	125	68.5	70	71.5	148	150	152	58.5	60	61.5	113	118	123	
	126	48.5	50	51.5	98.5	100	101.5	38.5	40	41.5	75	79	83	
Sensitivity per psi	124		23			16.67			6.60			6.50		mV
	125		14			10			4.00			3.93		
	126		10			6.67			2.67			2.63		
Overpressure	All			20			45			60			60	psi
Linearity (Best Fit Straight Line) Greatest pressure at port P2 Greatest pressure at port P1	All		±1.5			±1.0			±0.25			±0.5		%F.S.O.
	All		±0.75			±0.5			±0.15			±0.3		
	All													

120PC ORDER GUIDE GAGE AND DIFFERENTIAL

Type	Pressure Range and Catalog Listings		
	Higher sensitivity		Better Linearity
	0-5 psi	0-15 psi	0-15 psi (L)*
Differential	Basic	124PC05D1	124PC15D1L
	Trimmed	125PC05D1	125PC15D1L
	Temp. Comp.	126PC05D1	126PC15D1L
Gage	Basic	124PC05G1	124PC15G1L
	Trimmed	125PC05G1	125PC15G1L
	Temp. Comp.	126PC05G1	126PC15G1L

\*124PC — basic transducer  
 125PC — laser trimmed resistors provide close tolerances on null and F.S.O.  
 126PC — laser trimmed resistors and a thick film thermistor provide low sensitivity shift with temperature  
 \*\*F.S.O. is the algebraic difference between end points (output at minimum and maximum pressure)

Catalog listings are given with terminal style 1. To order style 2 (or 3), substitute the number 2 (or 3) for the 1 at the end of the listing. Example: 124PC15G1 becomes 124PC15G2 with style 2 terminals.

\*For 30 psi applications, order the listing

120PC SPECIFICATIONS at 10.0 ±0.01 VDC Excitation, 25° C (unless otherwise noted)

ABSOLUTE TYPES

PARAMETER	120PC TYPE*	PRESSURE RANGES										UNITS
		0-15psi			0-15 psi, L type							
		Min.	Typ.	Max.	Used over 0-15 psi			Used over 0-30 psi				
					Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.		
F.S.O.(Full Scale Output)**	124	-175	-250	-325	-58	-98	-140	-110	-195	-280	mV	
	125	-147	-150	-153	-57.5	-60	-62.5	-112	-118	-124		
	126	-97.5	-100	-102.5	-37.5	-40	-42.5	-74	-79	-84		
Sensitivity per psi	124		-16.67			-6.60			-6.50		mV	
	125		-10.0			-4.00			-3.93			
	126		-6.67			-2.67			-2.63			
Overpressure	All			45			60			60	psi	
Linearity (Best Fit Straight Line)	All		±1.0			±0.25			±0.5		%F.S.O.	

120PC ORDER GUIDE, ABSOLUTE TYPES

Type	Pressure Range & Catalog Listings	
	Higher Sensitivity	Better Linearity
	0-15 psi	0-15 psi (L)*
Absolute	Basic	124PC15A1
	Trimmed	125PC15A1
	Temp. Comp.	126PC15A1

\*124PC — basic transducer  
 125PC — laser trimmed resistors provide close tolerances on null and F.S.O.  
 126PC — laser trimmed resistors and a thick film thermistor provide low sensitivity shift with temperature  
 \*\*F.S.O. is the algebraic difference between end points (output at minimum and maximum pressure)

Catalog listings are given with terminal style 1. To order style 2 (or 3), substitute the number 2 (or 3) for the 1 at the end of the listing. Example: 124PC15A1 becomes 124PC15A2 with style 2 terminals.

## APENDICE B

En el amplificador inversor que se muestra en la Figura A1, el punto de suma se mantiene a una tierra virtual. Como no pasa corriente a la terminal de entrada inversora del amplificador, la corriente de entrada,  $i = \frac{e_1}{R}$ , es obligada a entrar al capacitor de retroalimentación C, logrando con ello que aparezca un voltaje de carga en este elemento. Debido a que un extremo del capacitor está unido al punto virtual de tierra, el voltaje de salida del amplificador es igual al voltaje de carga del capacitor.

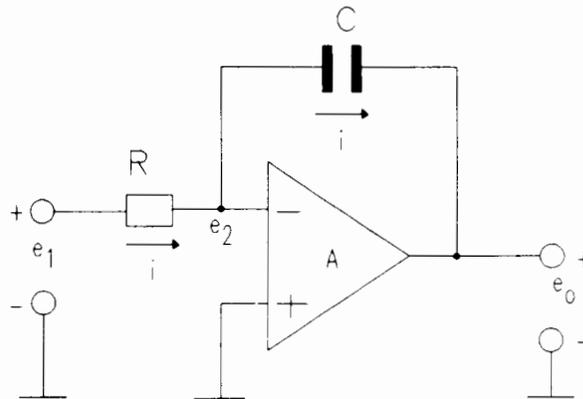


FIGURA A1

Las siguientes ecuaciones muestran en que forma el voltaje de salida es función del voltaje de entrada en el amplificador.

Se tiene que:

$$e_0 = A ( V_p - V_n ).$$

donde

$V_p =$  Voltaje en la entrada no inversora

$V_n =$  Voltaje en la entrada inversora

además

$$V_p = 0$$

$$V_n = e_2$$

por lo que

$$e_0 = A ( 0 - e_2 )$$

$$e_0 = -A e_2$$

o bien

$$e_2 = -\frac{e_0}{A} \quad (1)$$

se tiene también que

$$i = \frac{e_2 - e_0}{Xc}$$

$$i = \frac{e_2 - e_0}{\frac{1}{SC}}$$

$$i = SC (e_2 - e_0)$$

despejando y pasando al dominio del tiempo

$$e_2 - e_0 = \frac{1}{C} \int i dt \quad (2)$$

de la Figura se puede ver que la corriente también puede ser representada por

$$i = \frac{e_1 - e_2}{R}$$

sustituyendo en la ecuación (2)

$$e_2 - e_0 = \frac{1}{RC} \int (e_1 - e_2) dt$$

de la ecuación (1)

$$\text{si } A \rightarrow \infty \text{ entonces } e_2 \rightarrow 0$$

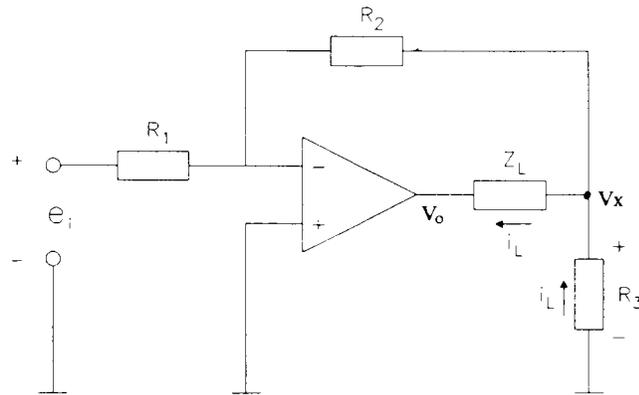
y por lo tanto

$$e_0 = -\frac{1}{RC} \int e_1 dt$$

## APENDICE C

### CONVERTIDORES DE VOLTAJE A CORRIENTE

#### CONVERTIDOR / AMPLIFICADOR DE CORRIENTE



Se definen las corrientes principales

$$I_1 = \frac{e_1}{R_1}$$

$$I_2 = \frac{V_x}{R_2}$$

$$I_L = \frac{V_x - V_o}{Z_L}$$

Aplicando LCK en la entrada negativa del amplificador

$$\sum I = 0$$

$$I_1 + I_2 = 0$$

$$\frac{e_1}{R_1} + \frac{V_x}{R_2} = 0$$

Despejando  $V_x$

$$V_x = -\frac{R_2}{R_1} e_1$$

Aplicando LCK en el nodo  $V_x$

$$I_{L1} = I_L + I_2$$

$$-\frac{V_x}{R_3} = I_L + \frac{V_x}{R_2}$$

o bien,

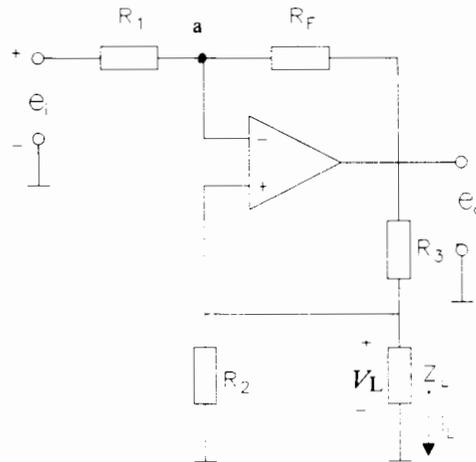
$$I_L = -\left(\frac{R_2 + R_3}{R_2 R_3}\right) V_x$$

Sustituyendo el valor de  $V_x$

$$I_L = \left(\frac{R_2 + R_3}{R_3}\right) \frac{e_1}{R_1}$$

$$I_L = \frac{e_1}{R_1} \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right)$$

### CONVERTIDOR V/I CON CARGA CONECTADA A TIERRA



Definiendo las corrientes principales y considerando que

$$V_L^- = V_L^+ = V_L$$

$$I_F = \frac{e_o - V_L}{R_F}$$

$$I_L = \frac{V_L}{Z_L}$$

$$I_1 = \frac{e_i - V_L}{R_1}$$

$$I_2 = \frac{V_L}{R_2}$$

$$I_3 = \frac{e_o - V_L}{R_3}$$

Aplicando LCK en el nodo  $a$

$$\sum I_a = 0$$

$$I_F + I_1 = 0$$

$$\frac{e_0 - V_L}{R_F} + \frac{e_1 - V_L}{R_1} = 0$$

Reacomodando términos y despejando  $e_0$

$$e_0 = -\frac{R_F}{R_1}(e_1 - V_L) + V_L$$

Aplicando LCK en el nodo  $b$

$$\sum I_b = 0$$

$$I_3 = I_2 + I_L$$

$$\frac{e_0 - V_L}{R_3} = \frac{V_L}{R_2} + I_L$$

Reacomodando términos y despejando  $e_0$

$$e_0 = \frac{R_3}{R_2} V_L + R_3 I_L + V_L$$

$$e_0 = \left( \frac{R_3}{R_2} + 1 \right) V_L + R_3 I_L$$

Sustituyendo la expresión de  $e_0$ :

$$-\frac{R_F}{R_1}(e_1 - V_L) + V_L = \left( \frac{R_3}{R_2} + 1 \right) V_L + R_3 I_L$$

$$-\frac{R_F}{R_1} e_1 = -\frac{R_F}{R_1} V_L - V_L + \left( \frac{R_3}{R_2} + 1 \right) V_L + R_3 I_L$$

$$R_3 I_L + V_L \left( \frac{R_3}{R_2} - \frac{R_F}{R_1} \right) = -\frac{R_F}{R_1} e_1$$

Reacomodando términos y tomando en cuenta que  $V_L = Z_L I_L$ , se despeja  $i_L$

$$I_L \left( R_3 + Z_L \left[ \frac{R_3}{R_2} - \frac{R_F}{R_1} \right] \right) = -\frac{R_F}{R_1} e_1$$

$$I_L = \frac{-\frac{R_F}{R_1} e_1}{R_3 + Z_L \left( \frac{R_3}{R_2} - \frac{R_F}{R_1} \right)}$$

Si se cumple la igualdad:

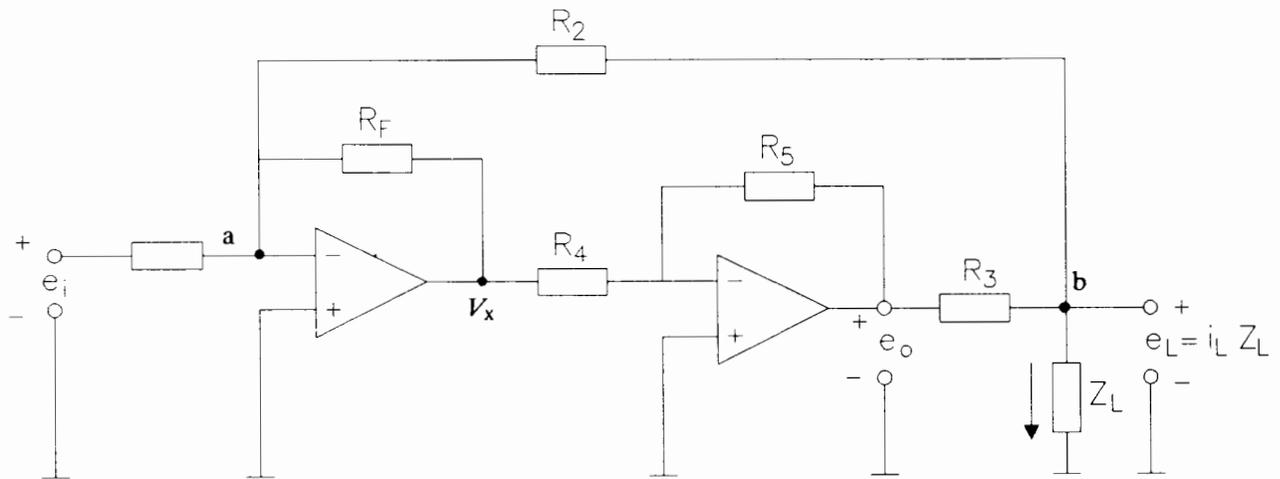
$$\frac{R_3}{R_2} = \frac{R_F}{R_1}$$

$$I_L = \frac{-\frac{R_3}{R_2} e_1}{R_3}$$

o bien

$$I_L = -\frac{e_1}{R_2} = -\frac{e_1}{Z_L}$$

**CONVERTIDOR V/I DE DOS AMPLIFICADORES CON CARGA CONECTADA A TIERRA**



Se definen las corrientes principales:

$$I_1 = \frac{e_1}{R_1}$$

$$I_2 = \frac{e_L}{R_2}$$

$$I_F = \frac{V_x}{R_F}$$

$$I_3 = \frac{(e_o - e_L)}{R_3}$$

Aplicando LCK en el nodo *a*

$$\sum I_a = 0$$

$$I_1 + I_F + I_2 = 0$$

$$\frac{e_1}{R_1} + \frac{V_x}{R_F} + \frac{e_L}{R_2} = 0$$

$$V_x = -\frac{R_F}{R_1} e_1 - \frac{R_F}{R_2} e_L$$

Por otro lado,

$$e_o = -\frac{R_5}{R_4} V_x$$

$$e_o = -\frac{R_5}{R_4} \left( -\frac{R_F}{R_1} e_1 - \frac{R_F}{R_2} e_L \right)$$

Aplicando LCK en el nodo  $b$

$$\sum I_b = 0$$

$$I_3 = I_L + I_2$$

$$\frac{e_o - e_L}{R_3} = I_L + \frac{e_L}{R_2}$$

Sustituyendo el valor de  $e_o$

$$\frac{\frac{R_5 R_F}{R_4 R_1} e_1 + \frac{R_F R_5}{R_4 R_2} e_L - e_L}{R_3} = I_L + \frac{e_L}{R_2}$$

Reacomodando términos y considerando que

$$e_L = Z_L I_L$$

$$\frac{R_5 R_F}{R_1 R_3 R_4} e_1 = I_L + \left[ \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{R_F R_5}{R_2 R_3 R_4} \right] I_L Z_L$$

Despejando  $I_L$

$$I_L \left[ 1 + Z_L \left( \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{R_F R_5}{R_2 R_3 R_4} \right) \right] = \frac{R_5 R_F}{R_1 R_3 R_4} e_1$$

$$I_L = \frac{e_1 \frac{R_5 R_F}{R_1 R_3 R_4}}{R_3 + Z_L \left[ \frac{R_3}{R_2} + 1 - \frac{R_F R_5}{R_2 R_4} \right]}$$

Haciendo:

$$1 + \frac{R_3}{R_2} = \frac{R_5 R_F}{R_2 R_4}$$

$$I_L = e_1 \frac{R_5 R_F}{R_1 R_4}$$

o bien

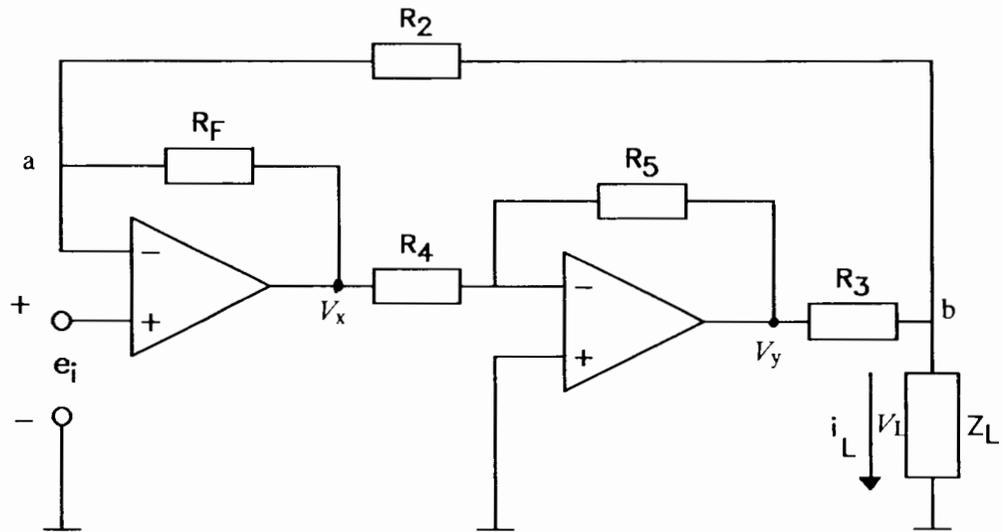
$$I_L = e_1 \left( \frac{R_5 R_F}{R_1 R_3 R_4} \right)$$

Finalmente, haciendo iguales los valores de resistencias

$$R_1 = R_4 = R_5 = R_F$$

$$I_L = \frac{e_1}{R_3}$$

## CONVERTIDOR V/I CON ENTRADA NO INVERSORA



Se definen las corrientes principales:

$$I_2 = \frac{V_L - e_1}{R_2}$$

$$I_3 = \frac{V_y - V_L}{R_3}$$

$$I_F = \frac{V_x - e_1}{R_F}$$

$$I_L = \frac{V_L}{R_L}$$

Aplicando LCK en el nodo  $a$

$$\sum I_a = 0$$

$$I_F + I_2 + = 0$$

$$\frac{V_x - e_1}{R_F} + \frac{V_L - e_1}{R_2} = 0$$

Reacomodando términos y despejando  $V_x$

$$\frac{V_x}{R_F} = \frac{e_1}{R_F} + \frac{e_1}{R_2} - \frac{V_L}{R_2}$$

$$V_x = \left(1 + \frac{R_F}{R_2}\right) e_1 - \frac{R_F}{R_2} V_L$$

Por otro lado,

$$V_y = -\frac{R_5}{R_4} V_x$$

Sustituyendo el valor de  $V_x$

$$V_y = -\frac{R_5}{R_4} \left[ \left(1 + \frac{R_F}{R_2}\right) e_1 - \frac{R_F}{R_2} V_L \right]$$

Aplicando LCK al nodo  $b$

$$\sum I_b = 0$$

$$I_3 = I_L + I_2$$

$$\frac{V_y - V_L}{R_3} = I_L + \frac{V_L - e_1}{R_2}$$

Sustituyendo el valor de  $V_y$

$$\frac{-\frac{R_5}{R_4} \left[ \left(1 + \frac{R_F}{R_2}\right) e_1 - \frac{R_F}{R_2} V_L \right] - V_L}{R_3} = I_L + \frac{V_L - e_1}{R_2}$$

Reacomodando términos en  $V_L$  y  $e_1$

$$I_L + V_L \left[ \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} - \frac{R_5 R_F}{R_4 R_2} \right] = \left[ \frac{-\frac{R_5}{R_4} \left(1 + \frac{R_F}{R_2}\right)}{R_3} + \frac{1}{R_2} \right] e_1$$

Tomando en cuenta que  $V_L = Z_L I_L$

$$I_L \left[ 1 + \frac{Z_L}{R_2} + \frac{Z_L}{R_3} - \frac{R_L R_5 R_F}{R_4 R_2} \right] = \left[ \frac{-\frac{R_5}{R_4} \left(1 + \frac{R_F}{R_2}\right)}{R_3} + \frac{1}{R_2} \right] e_1$$

Despejando  $I_L$

$$I_L = \frac{\left[ \frac{-R_5}{R_4} \left( 1 + \frac{R_F}{R_2} \right) + \frac{1}{R_2} \right] e_1}{1 + Z_L \left[ \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} - \frac{R_4 R_2}{R_3} \right]}$$

Multiplicando por  $R_3$  :

$$I_L = \frac{\left[ -\frac{R_5}{R_4} \left( 1 + \frac{R_F}{R_2} \right) + \frac{R_3}{R_2} \right] e_1}{R_3 + Z_L \left[ 1 + \frac{R_3}{R_2} - \frac{R_5 R_F}{R_4 R_2} \right]}$$

o bien

$$I_L = \frac{-e_1 \left[ \frac{R_5}{R_4} \left( 1 + \frac{R_F}{R_2} \right) - \frac{R_3}{R_2} \right]}{R_3 + Z_L \left[ 1 + \frac{R_3}{R_2} - \frac{R_5 R_F}{R_4 R_2} \right]}$$

Iguando los valores del término del denominador:

$$1 + \frac{R_3}{R_2} = \frac{R_5 R_F}{R_4 R_2}$$

Haciendo las siguientes asignaciones

$$R_F = R_4 = R_5$$

y

$$R_2 = R_F - R_3$$

Entonces

$$I_L = -2 \frac{e_1}{R_3}$$

APUNTE 220 FACULTAD DE INGENIERIA UNAM.



600836

G.- 600836

Esta obra se terminó de imprimir  
en mayo de 1994  
Departamento de Publicaciones  
de la Facultad de Ingeniería,  
Ciudad Universitaria, México, D.F.,  
C.P. 04510

**Secretaría de Servicios Académicos**

El tiraje consta de 1,000 ejemplares  
más sobrantes de reposición