

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**  
**FACULTAD DE QUIMICA**

159

**PROYECTO DE UNA ESPECIALIZACION PARA LA  
CARRERA DE INGENIERIA QUIMICA "CONTROL  
ELECTRONICO DE PROCESOS"**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE**

**INGENIERO QUIMICO**

**P R E S E N T A**

**ALEJANDRO CASTAÑEDA MARES**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

FECHA 5/25/73  
PAGINA 60



QUIMICA

JURADO ASIGNADO :

PRESIDENTE : ING. VICTOR PEREZ AMADOR.

VOGAL : ING. TOMAS FARGAS IGLESIAS.

SECRETARIO : ING. ERIK NAISKER SEIDEL.

1er. SUPLENTE : ING. JORGE MARTINEZ MONTES.

2o. SUPLENTE : ING. ARTURO MORALES COLLANTES.

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA :

BIBLIOTECA DE LA FACULTAD DE QUIMICA U.N.A.M.

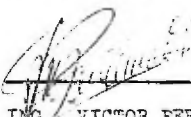
BIBLIOTECA DE LA FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.

BIBLIOTECA DE ESTUDIOS SUPERIORES DE LA FACULTAD

DE INGENIERIA U.N.A.M.

RESPONSABLE : ALEJANDRO CASTAÑEDA MARES.

ASESOR DEL TEMA :

  
\_\_\_\_\_  
ING. VICTOR PEREZ AMADOR.

A mis padres

Sr. Emigdio Castañeda Flores

Sra. Isabel Mares de Castañeda

A mis hermanos y familiares,  
en particular a la Dra.  
Zenoveva Castañeda.

Al Sr. Ing. Victor Pérez Amador  
agradezco sinceramente toda la  
ayuda, orientación y cortesía  
mostrada en la elaboración de éste  
trabajo escrito.

A mis amigos y compañeros  
de la Facultad de Química.

## INDICE

	Pág.	
I	INTRODUCCION	1
II	CARACTERISTICAS GENERALES	4
III	ELECTRONICA BASICA	18
	A Generalidades	18
	B Nociones básicas generales de válvulas electrónicas	22
	C Transistor y circuitos de transistores	28
	D Componentes y circuitos de control	47
IV	TEORIA GENERAL DEL CONTROL AUTOMATICO	80
	A Forma de dos posiciones	80
	B Flotante de una y varias posiciones	87
	C Flotante de velocidad proporcional	89
	D Proporcional	93
	E Operación del reajuste	101
	F Operación derivativa	109
	CONTROLADORES ELECTRONICOS	117
	A Operados por si mismo	117
	B Operados por relevo	118
V	INSTRUMENTACION INDUSTRIAL	164
	A Medidores de temperatura	164
	B Medidores de presión y de vacío parcial	185
	C Medidores de nivel de líquidos	195
	D Medidores de flujo de gases, de vapores y líquidos	207
	E Medidores de calor	227
VI	DISEÑO DE TABLEROS	233
VII	CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES PERSONALES	239
VIII	BIBLIOGRAFIA	241

## INTRODUCCION

El empleo del control automático electrónico en algunas ramas de la química de proceso, se presenta actualmente por necesidad y deberá de tomar una mayor proporción en los años venideros, diversificandose de acuerdo a las necesidades de consumo interno y de la disponibilidad del productor.

Existen en nuestro país grandes barreras que en la actualidad están frenando la inversión en nuevas industrias, siendo una de ellas la rentabilidad obtenida (en forma global de un 15%), que aunada a la escasez de la materia prima y el aumento en el costo de la vida, hacen necesaria una reestructuración industrial para aumentar la cantidad de producto elaborado.

Una vez planteado el problema, se tiene como objetivo principal en el presente trabajo en preparar adecuadamente a un especialista en ésta actividad, ya que ésta actividad involucra necesariamente mejoras en la calidad y en la cantidad, al mismo tiempo que se efectúa una reducción en el costo de fabricación beneficiando a todos los sectores sociales de nuestro país.

Es importante hacer notar que la instalación de éste sistema de control influye directamente en un aumento bastante considerable en el costo inicial de una planta, que se justifica cuando la cantidad del producto a elaborar es suficientemente grande, ó bien, cuando se desea aumentar la capacidad manteniendo por razones de seguridad la misma calidad del producto, de tal manera que su aplicación sea necesariamente útil.

El uso de éste sistema de control proporciona una serie de ventajas inherentes comparadas con otros sistemas de control, entre los que se encuentran los siguientes :



- a) Efectúa una corrección instantánea de las variables de proceso.
- b) Por ser sus componentes más pequeños y confiables, pueden ser más precisas.
- c) El conocimiento de éste sistema controlante proporciona una mayor versatilidad.

Desde el punto de vista eléctrico, el control automático electrónico emplea una menor cantidad de corriente y de voltaje comparada a la que se maneja en un sistema eléctrico, con lo cual se tiene una mayor seguridad en la industria y se protege al ser humano.

El tema relacionado a la electrónica básica trata de una verdadera introducción al estudio de la válvula termoiónica y al transistor de unión, así como de las partes principales de los componentes de un circuito de control.

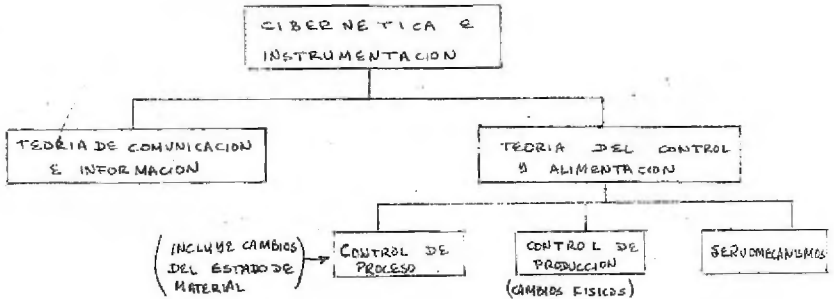
Conviene aclarar que se hace un análisis general del control automático, e igualmente de las particularidades de cada tipo de control electrónico dedicados a los parámetros que se involucran en los procesos.

Por lo que respecta al tema de la instrumentación industrial cuya importancia es innegable, se da una información completa entre los que se incluyen aparatos eléctricos recientemente utilizados en países altamente industrializados.

En el diseño de tableros se hace notar que no es un estudio minucioso, pero que sin embargo se deben de reunir ciertas características para su instalación y manipulación de los mismos, dependiendo ellos del grado de complejidad.

Es conveniente ahora dar a conocer las ciencias que complementan ó que están en estrecha relación con el control automático, teniendo siempre en mente

que debe de tenerse un conocimiento real del proceso y despues aplicar el sistema y tipo de control más adecuado. A continuación se muestra mediante un diagrama de bloques la relación de la teoría de control con otras de importancia.



Aunque la teoría del control se divide en tres grupos, todos ellos están en estrecha relación pero son mutuamente exclusivos y se encuentran con frecuencia en la industria.

La teoría de la comunicación e información se basan en el concepto de que todas las ideas puedan expresarse en mensajes traducidos a un lenguaje común. esa cantidad de información puede definirse y por lo tanto medir, dando a su vez como consecuencia que las leyes que gobiernan a la transmisión puedan ser puestas en disposición de la tecnología de medición, T.V. , telemetría, números del sistema y computación, así como de datos de proceso y de manejo.

### CARACTERISTICAS GENERALES

Se hace mención en el presente tema de aquellos conceptos e ideas que sirvan de base para una mejor comprensión cuando se hable de los diferentes tipos de control automáticos.

Debe de tenerse en mente que el proceso a manejar está por encima de todo, para que posteriormente el Ingeniero Químico emplee sus conocimientos de control automático, electrónica básica e instrumentación para el mejor aprovechamiento de la planta a nivel global.

Como es sabido, ningún proceso opera en condiciones de equilibrio, esto es en condiciones ideales, ya que continuamente son alteradas y se procede a su manipulación para corregir tales efectos, pudiendo ser éstos externos ó internos y presentandose ciclicamente ambos. Un ejemplo sencillo e ilustrativo es la necesidad de tensionar una banda de un agitador en algún reactor supuesto cada 3 ó 5 días provocandole una mejoría en el mezclado. Cuando no se presentan ciclicamente éstos efectos, existen modelos capaces de predecir la corrección en una forma estadística (probabilidad).

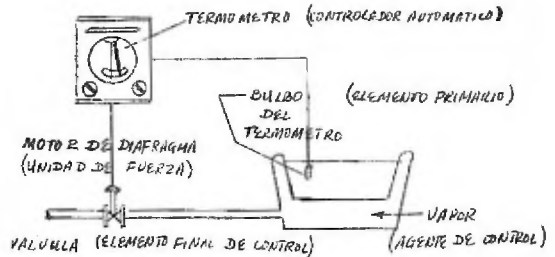
Los principales puntos ventajosos para el empleo del control automático, son los siguientes :

- a) Aumento en la cantidad del número de productos.
- b) Mejora en la calidad del producto.
- c) Mejora en la uniformidad del producto.
- d) Ahorros en el material de proceso.
- e) Ahorros en energía ó potencia necesaria.
- f) Ahorros en el equipo de la planta.
- g) Disminución en el trabajo humano y aprovechamiento de otros competentes en otras actividades.

Se entiende por control automático al dispositivo que mide el valor instantáneo de un parámetro de un proceso con referencia a un valor previamente establecido ó seleccionado y efectuar los cambios necesarios para mantenerlo dentro de un valor deseado ya sea corrigiendolo ó limitando éste parámetro medido.

A manera de ejemplo, la fig. 1.1 muestra el empleo de un termómetro controlador y registrador de la temperatura en un recipiente con camisa de vapor en el que se desea calentar agua manteniendola a una temperatura elegida. La temperatura es la variable controlada, en tanto que el agua se denomina el medio controlado ; el vapor mediante el cual se calienta el agua, se denomina agente de control.

Fig. 1.1 Diagrama sencillo mostrando los elementos de un controlador automático.



El termómetro es el controlador automático, siendo el elemento controlante la válvula de control en la línea de vapor con un motor de diafragma que manipula a la válvula. El bulbo, denominado elemento primario ó sensor, es parte de los medios de medición, de los cuales el tubo capilar y la espiral de presión son sus componentes.

Suponiendo que, por ejemplo el termómetro de la fig. anterior tiene un rango de 0 a 150°C y la temperatura debe de mantenerse en 90°C, entonces para ajustar el control, se fijará por medio de una válvula que cierre ó abra.

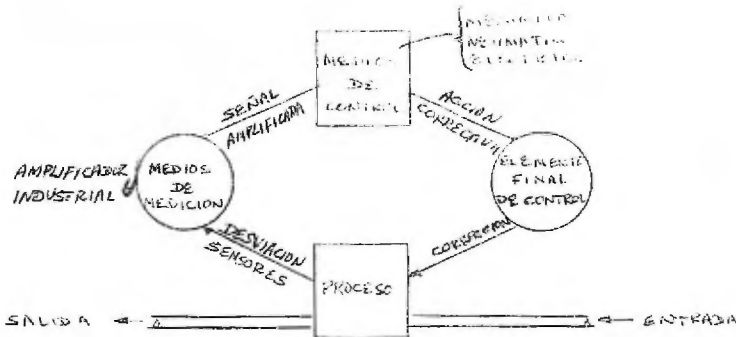
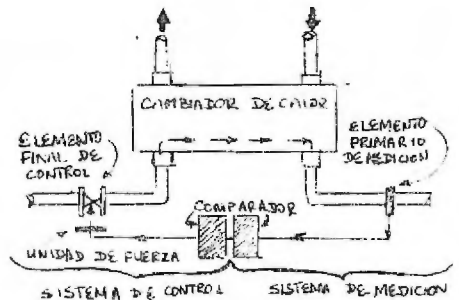


Fig. 1.2 Elementos de un controlador automático con retroalimentación aplicados a un proceso.

Todos los sistemas de control automático se basan en la idea fundamental de "retroalimentación", tal como se aprecia en la fig. 1.2. En la primera parte muestra el empleo de sensores en un proceso, que dan una respuesta ampliada al momento de arriar al medio de control y éste le transmite la acción correctiva al elemento final de control para que lo mantenga a la salida del proceso manejado.

Consideremos ahora un cambiador de calor, como parte de un proceso en el cual se van a analizar los elementos formativos del control automático, y a su vez explicar las características fundamentales de un proceso con la ayuda de la siguiente figura.

Fig. 1.3 Elementos de un controlador automático aplicados a un cambiador de calor.



## ELEMENTOS DE UN CONTROLADOR AUTOMATICO

a) El "sistema de medición" que consiste de aquellos elementos, los cuales se comunican con el "sistema de control", ya sea por el valor de la variable controlada, el error ó la desviación. En el caso del ejemplo anterior, consiste de un pirómetro que mide la temperatura del "medio controlado" ó sea, uno de los fluidos que sale del cambiador, éste aparato lo denominamos "elemento primario".

b) El "sistema de control" consiste de aquellos elementos del controlador automático, los cuales tienen por objeto producir un orden en la acción correctiva en la variable controlada; aquí emplearemos uno eléctrico de dos posiciones ( tipo conectado-desconectado ).

c) La "unidad de potencia" es la parte del sistema de control que proporciona una potencia al elemento final de control y que es la que ejecuta la acción correctiva. En el ejemplo anterior, un motor abrirá ó cerrará la válvula.

d) El "elemento final de control" es la parte que manipula directamente a la variable del proceso. En la ilustración anterior, la válvula representa la parte controlante para una mayor ó menor cantidad de flujo.

## CARACTERISTICAS FUNDAMENTALES DE UN PROCESO

Es importante hacer ahora una serie de definiciones que nos permita un mayor entendimiento cuando se hable de control automático, éstas son dadas a continuación :

Capacidad. Es la medida de la cantidad máxima de energía ó material que puede ser almacenada por el proceso.

Capacitancia. Es el cambio en cantidad contenida por unidad de cambio en una variable de referencia. Se mide en unidades de cantidad divididas por la

-variable de referencia. Este termino es función de la capacidad y el tipo de variable de referencia; varios tipos de capacidades y capacitancias pueden existir en el mismo proceso. En la fig. I.4 se muestra gráficamente la comparación entre estos dos conceptos, de un líquido almacenado en dos recipientes que tienen el mismo volumen.

Vemos que, aunque las capacidades son iguales, las capacitancias son distintas, y respecto a una altura del líquido, es el cambio de volumen del líquido por unidad de cambio en la altura del líquido.

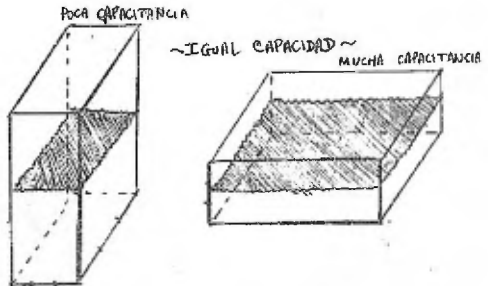


Fig. I.4 Capacidad y capacitancia.

Resistencia. Es la oposición al flujo de energía, medida en unidades de cambio de potencial necesarias para producir un cambio unitario de flujo. Combinaciones de resistencia y capacitancia se encuentran en casi todos los procesos industriales y las siguientes figuras muestran esta analogía en diferentes procesos.

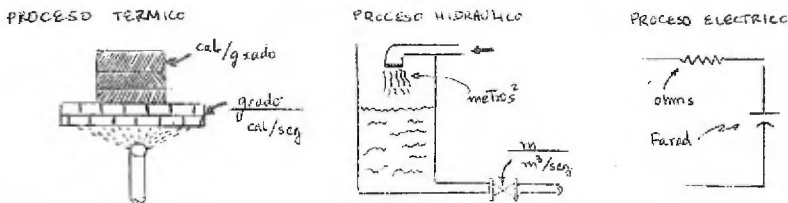
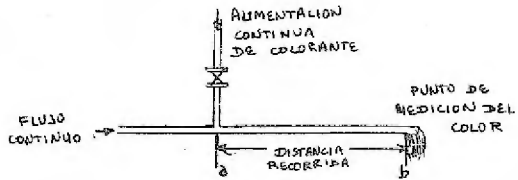


Fig. I.5 Algunas ilustraciones de procesos.

Tiempo muerto. Es cualquier retardo entre los acciones relacionadas, se mide en unidades de tiempo. Considerando a una mezcla que fluye a través de una longitud de tubo, en la parte se alimenta un colorante en forma continua

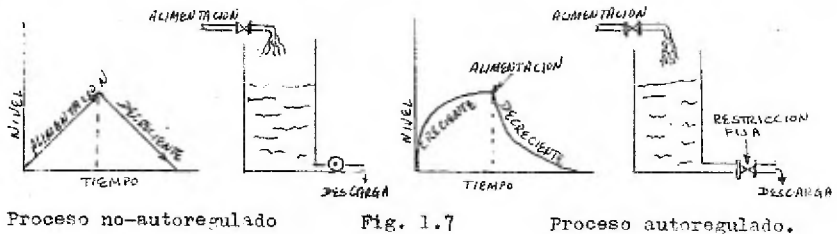
$$\text{RETRASO} = \frac{\text{DIST. RECORRIDA}}{\text{VEL. DEL FLUIDO}}$$

Fig. 1.6 Ilustración del tiempo muerto.



que es medida en b. El tiempo muerto es el necesitado por la mezcla para que pase de a hacia b, y es igual a la longitud del tubo dividido por la velocidad de la mezcla.

**Autoregulación.** Es una reacción constante y propia del proceso, que ayuda ó se opone al establecimiento del equilibrio. En la fig. 1.7 se muestra claramente las diferencias existentes de la autoregulación con otro que es no-autoregulado en un proceso hidráulico continuo, en el que la altura del líquido es la variable controlada debido al cambio de la alimentación.



Proceso no-autoregulado

Fig. 1.7

Proceso autoregulado.

En el proceso no-autoregulado la descarga se mantiene constante. Por medio de una bomba, al aumentar la alimentación (variable independiente), subirá el nivel a velocidad constante; si se reduce en una cantidad fija el nivel bajará a velocidad constante. Cuando se tiene autoregulación, en éste caso mediante la restricción, el nivel del líquido subirá a una velocidad decreciente, debido a que la descarga aumenta con el nivel; por el contrario, si la alimentación se reduce (gasto), el nivel bajará a velocidad decreciente debido a que la descarga disminuye al bajar el nivel.



Las unidades dimensionales de las características básicas para varios procesos, se resumen en la tabla I.I.

Características	Capacidad	Potencial
Térmico	cal.	$^{\circ}\text{C}$
Presión	m	$\text{Kg/cm}$
Nivel	m	m
Eléctrico	coulomb	volt
	Capacitancia	Resistencia
Térmico	$\text{cal}/^{\circ}\text{C}$	$\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{cal}/\text{seg.}}$
Presión	$\frac{\text{m}}{\text{Kg/cm}}$	$\frac{\text{Kg/cm}}{\text{m}/\text{seg}}$
Nivel	m / m	$\frac{\text{m}}{\text{m}/\text{seg.}}$
Eléctrico	$\frac{\text{coulomb}}{\text{volt}} = \text{farad}$	$\frac{\text{volt}}{\text{coul}/\text{seg.}} = \text{ohm}$

En dicha tabla la capacidad representa una cantidad estática y la capacitancia una cantidad dinámica. El potencial representa una condición en un punto del proceso que determina la energía en ese punto, siendo por lo tanto la variable controlada en un proceso.

#### TIPOS DE ALTERACION EN PROCESOS.

Analizando un proceso desde el punto de vista de control automático es bueno dar una consideración particular de dos de los muchos tipos de alteración de proceso que pueden aparecer:

I. Alteración de Reserva: Es un cambio en la energía (o materiales) de entrada al proceso. En el intercambiador de calor, el cambio en la cantidad del vapor, presión de vapor; abrir la válvula de vapor son altera-

-ciones de reserva.

II. Alteración de Demanda; Es el cambio de energía (o material) a la salida del proceso. En el caso del ejemplo anterior, el cambio en la temperatura del agua fría y la velocidad del flujo de agua son alteraciones de demanda. Hay diferencias importantes en la reacción de un proceso para esos dos tipos de cambio en la carga.

#### CURVAS DEL PROCESO DE REACCION.

El efecto de cambios repentinos en el punto de carga en los tipos de reserva y de demanda, son aquí mostrados para varias combinaciones de resistencia, de capacidad y de tiempo muerto.

Proceso de Capacidad Simple. Emplearemos una vez más el cambiador de calor, ayudados de un diagrama de bloque que contiene las características del proceso.

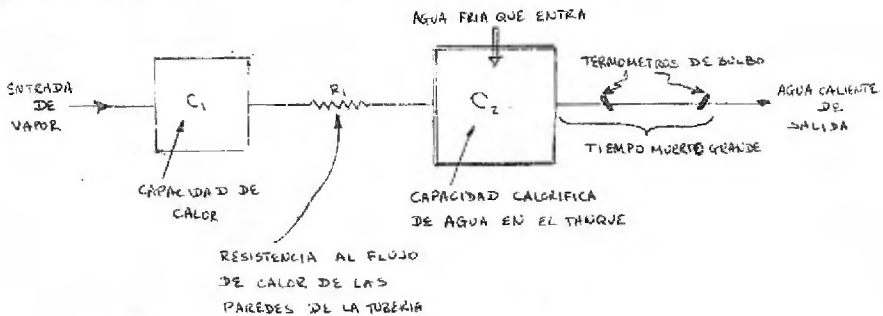


Fig. Diagrama de bloques para agua caliente del cambiador de calor.

La capacidad calorífica  $C_1$  del pliegue de vapor, de las paredes del tanque y el termómetro de bulbo son asumidos como insignificantes, comparados con la capacidad calorífica  $C_2$  del agua del tanque; así, el par -

-resistencia-capacidad son tan grandes, que dominan a los demás y es considerado que existe un buen mezclado.

Efecto de cambio subitico en la carga de reserva. Cuando se presenta éste efecto, que es originado por el aumento de abertura en la válvula de vapor al tiempo cero. La curva indicada en la fig. I.9 muestra como la temperatura empieza a aumentar inmediatamente conforme la carga es cambiada -la temperatura aumenta a partir de una velocidad muy baja hasta alcanzar el valor establecido. Digno es de notar, como la temperatura es retrasada con el tiempo, esto es, como la abundancia de capacidad calorífica del proceso es aumentada y un tiempo mayor es necesitado para que la temperatura alcance su valor final, debido también a la resistencia al flujo de calor.

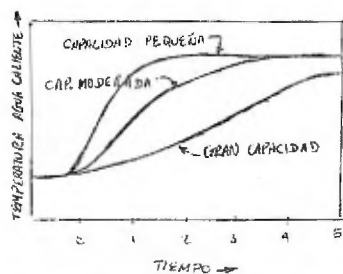


Fig. I.9 Efecto de la carga con el tiempo y la temperatura.

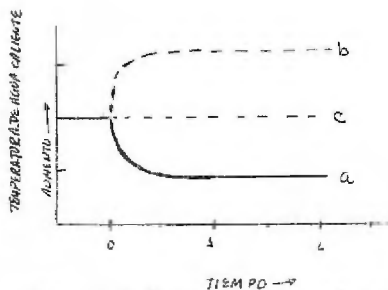


Fig. I.10 Curvas de reacción de un proceso a capacidad simple.

Efecto de ambos cambios "Reserva y Demanda". Las curvas características de un proceso a simple capacidad están representadas en la fig. I.10 por medio de tres literales que representan:

a) Esta curva muestra el efecto de un cambio súbito de carga de demanda al tiempo cero y a su vez indica un aumento en la abertura de la válvula de agua caliente cuando sucedió ésta alteración.

b) Representa el aumento de carga de reserva repentino al tiempo cero, aquí el vapor de reserva va a corregir la alteración de demanda.

c) Es la aplicación simultanea de la corrección exacta de los cambios reserva-demanda, de las curvas b y a cuando las constantes de tiempo son iguales.

Aunque éstas curvas de reacción son típicas de procesos a simple capacidad, en la realidad son imposibles de producir, dandose solo como ilustración.

Proceso a doble capacidad. Se asume que los pliegues de vapor calentado de la fig.I.3 son lo suficientemente grandes para tener una capacidad de calor  $C_1$ , el cual es completamente significativo cuando es comparado con la capacidad del agua en el tanque  $C_2$ , el proceso se considera a dos capacidades. Entonces, la resistencia  $A$ , entre las dos capacidades  $C_1$  y  $C_2$  es la transferencia de calor dadas por las paredes de los pliegues de vapor y la película aislante de agua en la superficie interna y externa.

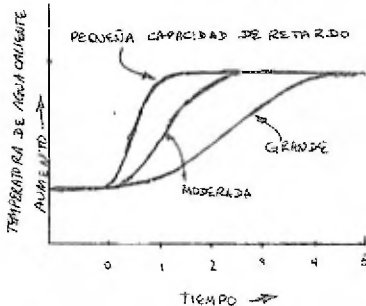


Fig. I.11 Curvas de reacción para un proceso a dos capacidades, con tres diferentes capacidades de retardo para aumentar la carga de reserva al tiempo cero.

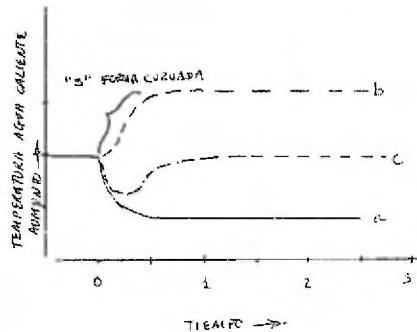


Fig. I.12 Curvas de reacción incontrolada para un proceso a 2 capacidades, seguido de un cambio repentino de reserva-demanda a causa del aumento de abertura de la válvula de vapor al tiempo cero.

Comparando las figs. I.9 y I.II notamos una diferencia significativa, la temperatura en vez de cambiar inmediatamente como sucede en la fig. I.9, se eleva lentamente, despues rápido y luego lentamente hasta llegar al valor fijo señalado. La curva de reacción "s" de la fig. I.I2 muestra los efectos "carga de reserva" para dos capacidades o más, relativamente iguales de pares capacidad-resistencia. La resistencia R, de la fig. I.3 de transferencia de energía entre la capacidad de calor del pliegue de vapor  $C_1$  y la capacidad de calor del agua  $C_2$  causa éste retardo en la capacidad de atraso en la temperatura.

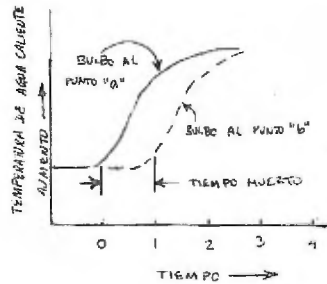
La fig. I.II muestra que a mayor capacidad del proceso, mayor tiempo es necesitado para que alcance un valor fijo de temperatura. La curva de la fig. I.I2a señala una alteración de demanda para dos capacidades; la curva b es el efecto de corrección de reserva exacta por la válvula de vapor al tiempo cero. Hay que notar la forma característica del cambio de la carga de reserva para procesos a multicapacidad. Nuevamente la curva c muestra el resultado de aplicar simultaneamente el cambio de la carga de demanda de la curva a y de la corrección exacta de la curva b de reserva. Aún a travez de una corrección exacta inmediatamente aplicada, la temperatura en un proceso a dos capacidades cambia ampliamente y no regresa a su valor inicial por algún tiempo.

Procesos de Multicapacidad. Aunque la mayoría de procesos tienen más de dos pares de resistencia-capacidad de medida igualmente relativa, la conducta de esos procesos de multicapacidad es semejante y aplicables a todo proceso que no tengan ese tiempo muerto.

Cuando se presenta éste tiempo muerto es procesos a multicapacidad, como el representado en la fig I.8 representando el punto b el tiempo muer-

to largo en lugar del corto a, necesitará de mayor tiempo para cambiar de temperatura. Este cambio de tiempo es señalado en la fig. I.13 para los puntos a y b.

Fig. I.13 Efecto del tiempo muerto en la curva de reacción de un proceso a dos capacidades con aumento en la carga de reserva al tiempo cero.



#### CARACTERISTICAS DEL CONTROL AUTOMATICO

a) Oscilación. Es el cambio periódico de la variable controlada, aumentando o disminuyendo en valor alternadamente (con referencia a un valor dado); amplitud es la máxima desviación o elongación de la variable; frecuencia es el número de oscilaciones por unidad de tiempo; período es el tiempo necesario para efectuar una oscilación completa.

Para ilustrar mejor éstos conceptos, en la fig. I.14 se señalan tres tipos de oscilación de la variable a controlar; una oscilación en la cual la amplitud gradualmente disminuye se tiene en un control flotante de velocidad proporcional; una oscilación con amplitud constante se puede tener con un control de dos posiciones. En el control automático no tiene uso una oscilación con amplitud creciente.

b) Punto de control. Es el valor de la variable controlada mantenido por el controlador.

c) Desviación. Es la diferencia entre el valor instantáneo de la va-

riable controlada y el valor de la variable correspondiente al punto de ajuste.

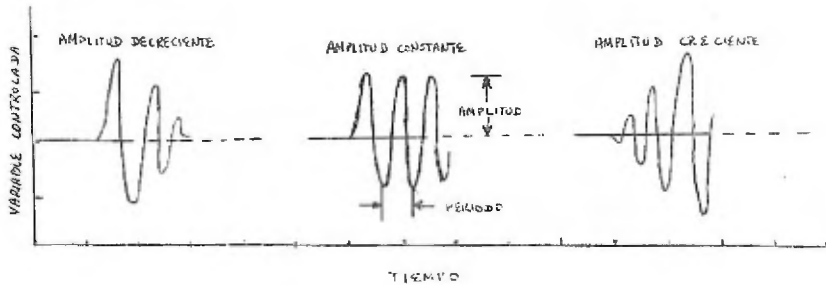


Fig. I.14 Tipos de oscilación.

d) Punto de ajuste (set point). Posición a la cual se sujeta el mecanismo que mueve el índice de control. Para algunos tipos de control, por ejemplo el de dos posiciones con zona diferencial ó flotante con zona neutra, el punto de control puede estar dentro de una gran zona de valores de la variable controlada y el punto de ajuste se escoje por lo general como el punto medio de áquellos valores.

La fig. I.15a señala la condición para la cual el punto de ajuste y el de control coinciden. Este tipo de registro puede obtenerse con un con-

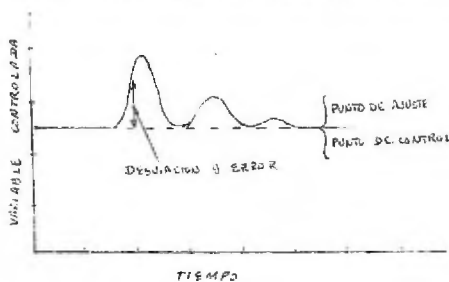


Fig. I.15a Características de un control.

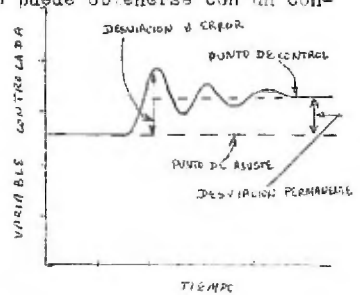


Fig. I.15b

rol que tenga acción proporcional y reajuste despues de haberse efectuado

un cambio de carga en el proceso. Los puntos de ajuste y de control coinciden a causa de la acción de reajuste usada.

En la fig. 1.15b se muestra la condición en la que difiere el punto de control ó del ajuste en una cantidad constante. Para ésta clase de registro se emplea un controlador de acción proporcional después de un cambio de carga en el proceso.

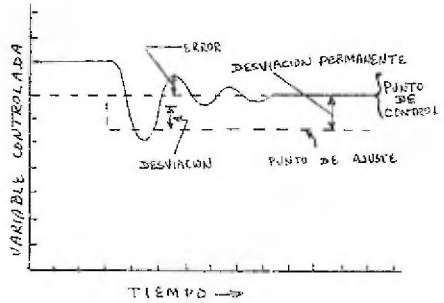


Fig. 1.15c Características de un control.

La fig. 1.15c ilustra la condición en la cual el punto de control de la figura 1.15b se hace coincidir con el valor deseado ajustando el punto de ajuste del control proporcional.



## ELECTRONICA BASICA

Se ha desarrollado el sig. tema con el fin de que el Ingeniero Químico tenga una vista panorámica de la teoría y aplicaciones de la electrónica en la industria manejada con el control eléctrico automático.

La explicación detallada de una gran cantidad de conceptos, se ha omitido deliberadamente en ésta sección, pero sin embargo, están incluidos aquellos puntos de interés que se han visto en las diferentes materias que comprenden al plan de estudios correspondientes al Ingeniero Químico.

No se intenta presentar un estudio cuantitativo de conceptos nuevos como lo es el diseño de circuitos, ya que tales cálculos necesitan horas de estudio básicos en electrónica, pero sí en cambio tener una buena preparación en la teoría de semiconductores que tienen una gran aplicación en el transistor de unión, diversos tipos de rectificadores de una gran capacidad, amplificadores y algunos dispositivos semiconductores fotoeléctricos que han sustituido a la válvula de alto vacío y a la de gas rápidamente.

Los conceptos desarrollados y las materias antecedentes a las cuales corresponden, son dadas a continuación y que se encuentran actualmente vigentes en el plan de estudios de la Facultad de Química, y son los siguientes :

### Física III

Teoría del electrón.

Clasificación de la electricidad .

a) corriente continua  
b) corriente alterna.

Conductores y aisladores.

Ley de Ohm.

Ley de electricidad estática.

Potencia, potenciómetros, puente de Wheatstone.

Circuitos (serie, paralelo serie - paralelo).

#### Física IV

##### Campo Magnético

- a) Movimiento de carga en un campo.
- b) Fuerza magnética sobre una carga en movimiento.
- c) Ley de Lorentz.

##### Naturaleza del campo magnético.

- a) Ley de Biot-Savart (campo creado por una corriente en un conductor recto).
- b) Ley de Ampere

##### Introducción electromagnética.

- a) Ley de Faraday, ley de Lenz y conservación de la energía.
- b) Inducción electromagnética .

##### Propiedades magnéticas de la materia.

- a) Diamagnetismo, paramagnetismo, ferromagnetismo
- b) Curva de histéresis, saturación magnética.

#### Ingeniería Eléctrica I

##### Corriente alterna

- a) Vectores y fasores
- b) Circuitos : Inductivos, capacitivos, resistivos, (R L C) serie, paralelo, serie-paralelo.
- c) Valor medio y eficaz de una corriente senoidal.
- d) Sistema trifásico : circuito delta y circuito estrella
- e) Potencia monofásica, potencia trifásica.

## Ingeniería Eléctrica II

### Conversión de energía.

#### Transformador.

#### Máquinas rotatorias.

- a) Corriente continua - Generador, motor (serie, derivado, combinado)
- b) Corriente alterna - Alternador, motor (síncrono, inducción, reducción serie)

#### Instrumentos de medición

- a) Corriente continua - amperímetro, ohmetro, voltímetro, potenciómetro, puente de Wheastone.
- b) Corriente alterna - Voltímetro, multimetro, freno de Prony, electrodinamómetro.

Además de los conceptos señalados anteriormente, se deben de dar por conocidos los conceptos que sirven de introducción al estudio de los semiconductores y que fueron desarrollados en la física química I, ellos son :

- Revisión de la teoría atómica
- Fuerzas electrostáticas
- Enlaces químicos
- Enlaces de paraje de electrones
- Estructuras cristalinas
- Niveles de energía
- Banda de conducción
- Portadores de corriente
- Impurezas
- Características de los semiconductores.

Una vez que se han establecido los conceptos y las materias a las que corresponden, los puntos principales para desarrollar la física básica son los siguientes :

Teoría e introducción en estado sólido

Nociones básicas generales de válvula electrónicas

Transistor y circuitos de transistores

Componentes y circuitos de control que incluye :

- a) Amplificadores
- b) Osciladores
- c) Rectificadores
- d) Contactores
- e) Componentes de voltaje
- f) Circuitos desfasadores
- g) Dispositivos de sincronismo
- h) Transformador de impedancia en serie
- i) Transformador sobre excitado
- j) Dispositivos no lineales
- k) Sensores
- l) Transductores

### Nociones Básicas Generales de Válvulas Electrónicas.

Emisión electrónica y diodos. Entre las partes esenciales de las válvulas de vacío figuran dos elementos o electrodos, entre los cuales pasa la corriente; estos elementos van cerrados en una válvula de vidrio o metal, en la que se ha hecho un vacío, dando origen al nombre de válvula de vacío.

Uno de estos electrodos, el cátodo actúa como fuente de electrones (electrodo negativo), mientras el otro, la placa o ánodo no lo es. El flujo de electrones, en el interior de una válvula va normalmente del cátodo a la placa y nunca, en número apreciable en sentido inverso. El sentido convencional de la corriente (opuesto al flujo electrónico) es de placa a cátodo en el interior de la válvula y de cátodo a placa por el circuito exterior.

El estudio del diodo de alto vacío implica el de emisión electrónica y su comportamiento en el vacío así como los efectos del elemento conectado a un circuito exterior, el hecho de que el diodo se considere como un conmutador que permite el paso de la corriente en un sentido y le impide el inverso, le da el nombre de válvula.

Diodos. Los tubos termiónicos pueden clasificarse como diodos, triodos, etc. según contengan dos, tres o más electrodos respectivamente. El diodo es la forma más sencilla conteniendo un cátodo y un ánodo; un circuito sencillo es el señalado en la fig. 21 en la que se emplea esta válvula mostrando una fuerza electromotriz y quedando colocada de tal forma que la placa tenga un potencial positivo con relación al cátodo y así de ésta manera se efectúa una corriente termiónica de electrones emitidos por el cátodo.

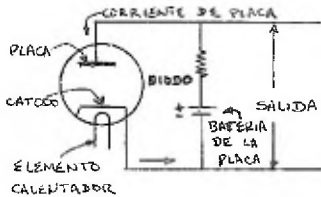


Fig. 2.1 Circuito sencillo mostrado para un diodo.

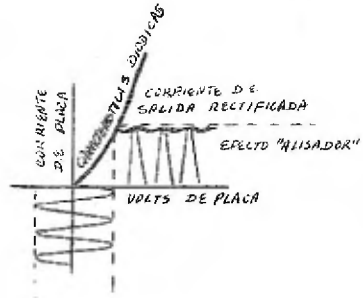


Fig. 2.2 Corriente de salida rectificadora producida por una c.a. de entrada en un diodo .

Si se aplica un potencial negativo a la placa, los electrones libres en el espacio que circunda al cátodo serán repelidos hacia éste, no produciéndose circulación de corriente de placa. Si aplicamos una tensión alterna en la placa, será alternativamente positiva y negativa, pero como la corriente anódica circula solamente durante el tiempo en que la misma es positiva, la corriente circula en un solo sentido y se dice que es rectificadora, la fig. 2.2 muestra tal acción.

Los rectificadores diodo se utilizan en recepción para convertir la tensión de la fuente de c.a. en c.c. para la alimentación de los electrolos de otras válvulas del receptor. Estas válvulas que tienen una placa y un cátodo se denominan rectificadoras de media onda.

En forma general, la salida del rectificador es alimentada a algún tipo de circuito - filtro para reducir las variaciones en la corriente. Estos circuitos se componen de condensadores e impedancias; un solo condensador se carga (através de la salida) cuando la corriente fluye a través del diodo, y se descarga cuando no fluye corriente en el circuito del tubo, o cuando el voltaje de salida cae por debajo del voltaje del condensador y muestra entonces un efecto

galizador".

Los diodos como rectificadores son útiles en sistemas electrónicos para ob tener un voltaje de c.c. cuando los sistemas operan desde una línea de suministro de c.a. tal aplicación es útil en el potenciómetro de balance continuo.

Cuando se hace uso de placas y uno ó más cátodos, puede obtenerse corriente en ambas mitades del ciclo de c.a. y reciben el nombre de rectificadores de onda completa. No todos los electrones llegan a la placa, algunos retornan al cátodo emisor y otros se mantienen por breve tiempo en el espacio entre cátodo y placa el efecto conocido como carga de espacio.

Esta carga ofrece una acción de rechazo sobre los otros electrones que aban donan la superficie del cátodo impidiendo en parte hacia la placa. La magnitud de esta acción y de la carga de espacio propiamente dicha, dependen de la tempe ratura del cátodo la distancia entre cátodo y placa, y el potencial de la placa.

No obstante, existe una cierta tensión de placa que al sobrepasar tendrá mu y poca influencia en el aumento de la corriente de placa, ya que ha llegado al valor máximo o corriente de saturación indicada por la fig. 2.3 y es conoci da también como corriente de emisión.

Si no existiera la carga de espacio que o riginaria el rechazo de electrones provenientes del cátodo, la misma corriente de placa alcan zarce con una tensión anódica más reducida. Un medio para reducir este efecto de carga en el espacio, es reducir la distancia entre placa y cátodo; un segundo sería el utilizado por los -

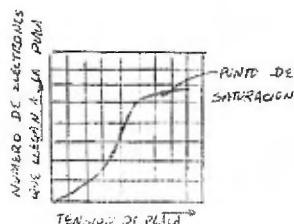


Fig. 2.3 Corriente de electrones que llegan a la placa mostrando el punto de saturación.

tipos rectificadores a vapor de mercurio (al cual se evapora parcialmente cuando la válvula se encuentra en plenas funciones llenando el espacio interno de la válvula con átomos de mercurio). Cuando los electrones viajan a suficiente velocidad, tal que originan un desprendimiento de electrones de los átomos de mercurio en su trayecto al cátodo, se dice entonces que el átomo de mercurio se ha "ionizado". La válvula rectificadora de cátodo calentado por ionización, basa su funcionamiento en el principio descrito con anterioridad.

**Triodos.** Cuando se dispone de un tercer electrodo, denominado rejá, entre el cátodo y la placa, la válvula recibe el nombre de triodo. La rejá está constituida por alambre relativamente fino, en rollado sobre dos varillas de soporte que se extiende a lo largo del cátodo; los espacios entre vueltas son relativamente grandes, de modo que el pasaje de electrones de cátodo a placa no queda obstruido prácticamente por los alambres de la rejá; el objeto de la rejá es el de controlar la corriente de placa de modo que, cuando la válvula se utiliza como amplificadora, la rejá usualmente trabaja con una tensión negativa, tendiendo a repeler los electrones y, en consecuencia, no toma una corriente apreciable.

El número de electrones atraído por la placa depende del efecto combinado de las polaridades de rejá y placa, como se ilustra en la fig. 2.4. Cuando esta última es positiva (como sucede en condiciones normales) y la tensión de rejá se hace sucesivamente, cada vez más negativa, la placa puede atraer un menor número de electrones y en consecuencia, se produce una corriente anódica.

Por lo tanto, cuando se varía la tensión de rejá de acuerdo con una señal, la corriente de placa varía con ella; como una pequeña tensión aplicada a la rejá puede controlar una corriente de placa considerablemente grande, la

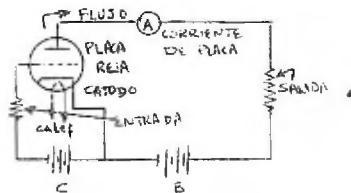


Fig. 2.4 Esquema de conexión para los electrodos de un triodo.



señal resulta amplificada por la válvula.

Existen capacidades electrostáticas entre rejilla, placa y cátodo, y rejilla con cátodo; éstas capacidades se denominan inter-electrónicas ya que actúan como placas de un pequeño capacitor. Generalmente la capacidad entre rejilla y placa es la más importante, porque aplicado a sistemas de amplificación un acoplamiento de tal naturaleza resulta indeseable, ya que le provoca inestabilidad y un comportamiento poco satisfactorio entre el circuito de entrada (circuito rejilla - y cátodo), y el circuito de salida (que comprende placa y cátodo).

Puesto que la rejilla está mucho más cerca del cátodo que de la placa, las variaciones en el voltaje de rejilla son más efectivos que el voltaje de la placa, para cambiar la corriente de placa. La relación de éstos efectos se les conoce como el factor de amplificación del bulbo; así por ejemplo, si un cambio del voltaje de placa es de 100 volts, producirá el mismo cambio en la corriente de placa al que produce el cambio de solo 5 volts en la rejilla, así el factor de amplificación es de  $100/5$ , ó sea de 20.

**Triodos Amplificadores.** Uno de los usos principales de los triodos, es el empleado como componente de amplificadores en una infinidad de circuitos, en los cuales se aplica un voltaje a la rejilla del bulbo para controlar su voltaje, ó bien a una salida de fuerza relativamente grande en el circuito del bulbo.

Los amplificadores se clasifican en dos tipos, de acuerdo a su aplicación en amplificadores de fuerza y amplificadores de voltaje. Los amplificadores de fuerza están diseñados para desarrollar una señal de salida bastante apreciable en una entrada de poca ó ninguna energía a la rejilla, mientras que los ampli-

ficadores de voltaje están diseñados para desarrollar un voltaje de salida mayor que el aplicado a la rejilla.

**Amplificación de pasos múltiples.** Para la amplificación de voltaje, se debe proveerse de un medio adecuado para utilizar la salida de voltaje de una etapa, para su introducción a la sig., sin entorpecer la distribución correcta de potenciales en los varios electrodos de los bulbos.

En la fig. 2.5 la salida de voltaje de la primera etapa se muestra aplicada a la rejilla del segundo bulbo a través de un condensador C. La componente de potencial constante producido por la batería del circuito de placa de la primera etapa, no se aplica a la rejilla del segundo bulbo, porque el condensador solo deja pasar C.A.

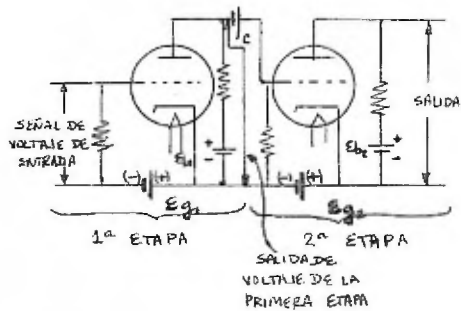


Fig. 2.5 Amplificación de pasos múltiples.

El condensador, sin embargo, si pasa el potencial fluctuante de salida, el cual entonces se aplica a la rejilla del segundo bulbo, y es posteriormente amplificado. Con la componente de c.c. bloqueada por el condensador, este potencial puede considerarse como un simple voltaje alterno. El voltaje de bias del segundo bulbo es entonces debilmente ajustada mediante una batería u otro medio para dar un voltaje resultante correcto a la rejilla (generalmente negativo).

Los tubos termiónicos que contienen los juegos de triodos son fabricados.

y pueden ser conectados para dar amplificación en dos etapas; semejantes bulbos se conectan como duo-tríodos ó tríodos gemelos y por consiguiente se recomiendan en donde se desea tener un sistema pequeño y compacto.

En la amplificación de fuerza, dos tríodos pueden conectarse en paralelo para proveer doble emisión de fuerza comparativa a la de un bulbo, para el mismo valor de voltaje de la señal de rejilla. Haciendo las debidas conexiones, tal sistema tambien puede incorporarse a un solo bulbo duo-tríodo.

### Transistores.

Introducción. El transistor es un dispositivo de tres elementos, que presenta muchas características de amplificación comunes a los tubos termoiónicos ( el tríodo amplifica tensiones, mientras que el transistor amplifica corrientes, que se traducen en ganancias de potencia de señal ).

El transistor amplificador proporciona gran número de ventajas, entre las que se tienen: a) Un costo más bajo, y en algunos casos, b) Un mejor rendimiento. Sin embargo, no hay que suponer que los transistores pueden reemplazar a los tubos termoiónicos tan fácilmente entre las que figuran la pérdida de precisión en un amplio margen de temperatura, elevado factor de ruidos, falta de seguridad en el funcionamiento (excepto en tipos costosos) y su sensibilidad a la radiación nuclear limitando su aplicación en circuitos esenciales y balísticos.

Representación física y esquemática. El transistor de unión se considera como la unión de dos díodos que se reparten un material común de impureza. La -  
fig. (a) dada a continuación representa la construcción física de un transistor de unión PNP con los elementos denominados emisor, base y colector.

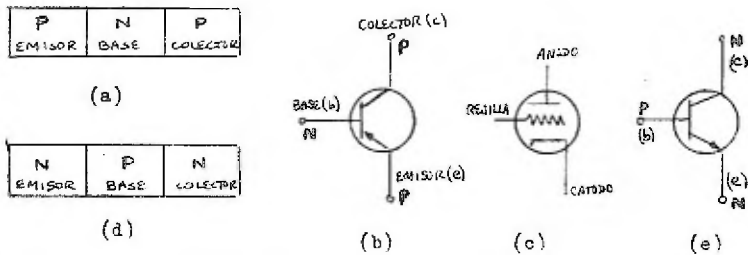


Fig. 2.6 Representación como dispositivo físico y esquemático del transistor de unión. (a) Unión P N P ; (b) Símbolo esquemático del transistor de unión - PNP; (c) Válvula triodo; (d) Representación física de la unión N P N ; (e) - Representación esquemática del transistor N P N .

La fig. (c) muestra el símbolo esquemático para el tubo termoiónico triodo; el emisor puede compararse con el cátodo, ya que es la fuente de portadores, la base efectúa en el transistor una función análoga a la de la rejilla en el tubo termoiónico; la rejilla controla la corriente de espacio, mientras que la base controla el flujo de portadores y superiores y suponerse que la placa de un tubo termoiónico " recoge " electrones.

La fig. 2.6 (d) representa al transistor N P N como dispositivo físico y la fig. (e) como esquemático. El funcionamiento de los tipos de transistor N P N y P N P , es el mismo. Son necesarios símbolos esquemáticos diferentes ya que los procedimientos para la polarización no son iguales para ambos tipos.

#### Polarización de Transistores .

Uno de los factores más importantes para la comprensión del funcionamiento de un transistor, es el conocimiento adecuado de la polarización y del flujo de corriente. Es por ello necesario conservar en la memoria 4 conceptos fundamentales aplicados a todos los circuitos de transistores, independientemente de su conexión en los circuitos.

- 1.- Los electrones siempre fluyen en contra de la flecha.
- 2.- La combinación base - emisor debe tener siempre polarización directa.
- 3.- La combinación base - colector debe tener polarización inversa.
- 4.- La corriente de la base y del colector es siempre igual a la corriente del emisor.

Si aplicamos el circuito de la fig. 2.7 el punto número 4, en la forma de ecuación daría :  $i_e = i_c + i_b$

Esta gráfica es representativa de los cuatro puntos anteriormente señalados para el funcionamiento de los circuitos de transistores así que la corriente de entrada aparece como circuito base - emisor con los trazos de la línea grandes, para la corriente restante  $i_e$  (de salida) del circuito emisor - colector muestra el camino de la corriente en forma punteada. Ambas corrientes fluyen por el borne del emisor y los electrones fluyen contra el sentido de la flecha y la combinación base - emisor tiene polarización directa.

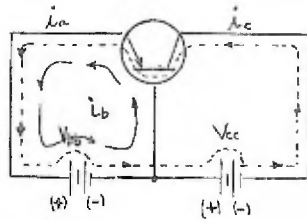


Fig. 2.7 Polarización de un transistor.

#### Funcionamiento ( N P N ) del circuito físico.

**Acción del Transistor.** El análisis del funcionamiento de los transistores se lleva a efecto mediante líneas electrostáticas son impulsadas en el sentido del campo electrostático, refiriéndonos a la fig. 2.8 . La batería  $V_{bb}$  actúa como la polarización directa en el circuito - emisor. El circuito conduce, ya que los electrones del material N son impulsados hacia la unión. Los portadores en

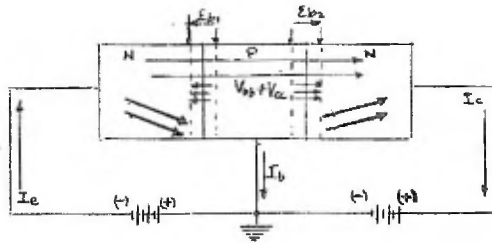


Fig. 2.8 Campos del Transistor - N P N .

mayoría del material de la base (huecos) son también impelidos hacia la unión y se produce la recombinación con el resultado de un flujo de corriente que pasa la unión. Los electrones que abandonan el material de la base, generan huecos que, a su vez se dirigen hacia la unión para recombinación con los electrones. El emisor dispone de una fuente de electrones en el borne negativo de la batería, la corriente  $i_e$  fluye en el circuito exterior .

Cuando se intercala la batería  $V$  como polarización inversa entre la base y el colector, se crea un campo electrostático en el sentido en que se indica en la fig. 2.8. Aquí los portadores en mayoría del material N en el colector son los electrones, los cuales se alejan de la combinación base - colector. Los portadores en mayoría de la base, los huecos se alejan también de la unión, por lo que no se produce recombinación. Existe un tercer campo  $V_{bb} + V_{cc}$  sobre toda la estructura.

Las tensiones de barrera entre las uniones se indican por  $E_{bc}$  y  $E_{be}$ . Los dos campos  $V_{bb}$  y  $(V_{bb} + V_{cc})$  se oponen a la  $E_{bc}$  de barrera, lo que produce la emisión de cargas negativas en la región de la base. Los  $V_{cc}$  y  $V_{bb} + V_{cc}$

tienen el mismo sentido que  $E_{b2}$ , por lo que cualquier hueco en la base se aleja de la  $E_{b1}$  de barrera.

Si volvemos a examinar la combinación emisor - base de polarización directa, vemos que los electrones pasan del emisor a la región de la base, donde tiene lugar la recombinación (cada electrón se combina con un hueco, lo que elimina a los dos portadores). Ahora bien, el número de huecos existente en la región de la base es inferior al número de electrones pasando por la unión. Esta condición se obtiene haciendo a la base físicamente menor, ó controlando el número de átomos de impureza en el cristal durante la fabricación. Entonces el resultado es un gran número de electrones en la base que no pueden recombinarse con los huecos. Es preciso tener en cuenta, asimismo que los electrones en el material P son los portadores en minoría que emigran hacia la unión en condiciones de polarización inversa. Por lo tanto, estos electrones son impelidos por los campos de  $V_{cc}$  y  $(V_{bb} + V_{cc})$  através del colector y su circuito asociado.

La relación del número de electrones que se recombinan y fluyen en el circuito de la base, a los electrones que no se recombinan y fluyen en el circuito del colector, queda predefinida en la fabricación del transistor (esto es, la anchura de la región de la base), siendo dicha relación la que determina la capacidad de amplificación del transistor.

#### Ganancia de Corriente.

Si se altera el valor de  $V_{bb}$  en la fig. 2.3 el resultado es una corriente variable en el circuito del emisor. Supongamos que tal emisor tiene una variación identificada como  $i_e$ . Como los diversos valores de  $V_{bb}$  producen cantidades diferentes de portadores, que vierten en la región de la base, se deduce

que también variará la corriente del colector identificada como  $\Delta i_c$ .

La relación de la variación de  $i_c$  con respecto a la variación de  $i_e$ , recibe el nombre de parámetro alfa ( $\alpha$ ) ó de ganancia de corriente para el transistor.

$$\alpha = \frac{\Delta i_c}{\Delta i_e}$$

donde  $i_c$  = Variación en la corriente del colector.  
 $i_e$  = Variación en la corriente del emisor  
 $V_c$  = Tensión constante en el colector

Recordando que una de las premisas fundamentales en el funcionamiento del transistor establece que la corriente del emisor es siempre igual a la suma de la corriente de la base y del colector, por lo tanto el denominador de la ecuación anterior será siempre mayor que el numerador y el valor de  $\alpha$  nunca mayor de uno.

#### Ganancia de Potencia.

Podría suponerse que un transistor con una ganancia inferior a 1, no es en realidad un dispositivo amplificador. Si bien no se produce una ganancia real de corriente por esta configuración del circuito de transistor, se considera como amplificador, porque tiene lugar una ganancia de potencia.

#### Parámetro h

La mayoría de fabricantes emplean el término parámetro h como palabra híbrida. El circuito que se muestra en la fig. 2.4 tiene la base puesta a tierra. Es importante tener en cuenta que la relación de traspaso de la corriente directa, conocida como  $h_{fe}$ , es válida solo para circuitos en los que la base tra



baja con tensión puesta a masa. Alfa puede indicarse como un parámetro  $h_{fb}$ , donde  $f$  significa relación de traspaso de la corriente directa; al subíndice  $b$  significa que el circuito tiene la base puesta a masa.

El símbolo adicional,  $h_{21}$ , se utiliza para indicar las condiciones de base puesta a masa para la ganancia de corriente, y entonces los sig. términos son equivalentes  $\alpha = h_{21} = h_{fb}$  = relación de traspaso de la corriente directa.

### Funcionamiento (P N P) del Circuito Físico.

La acción de los transistores P N P es igual a la de los transistores N P N. Los sentidos de las corrientes en el circuito exterior son diferentes y los portadores de corriente son los huecos en lugar de los electrones. Los parámetros del circuito resultante son también iguales. Examinando el circuito de la fig. 2.9 se observa que la polarización sobre el emisor base  $V_{bb}$  tiene sentido directo.  $V_{cc}$  polariza la combinación colector - base en sentido inverso. Las tensiones combinadas de  $V_{bb}$  y  $V_{cc}$  producen un campo electrostático sobre el conjunto emisor - colector.

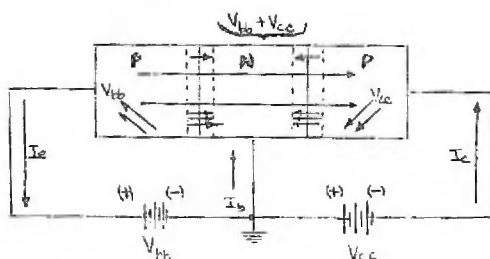


Fig. 2. 9 Campos de Polarización del transistor P N P .

Los huecos en el material P del emisor son los portadores mayoría y fluyen hacia la unión en sentido opuesto al campo electrostático de  $V_{bb}$ . Los electrones en la base son los portadores en mayoría y fluyen hacia la unión en el sentido del campo electrostático. Se produce la recombinación y fluye una corriente resultante en el circuito base - emisor.

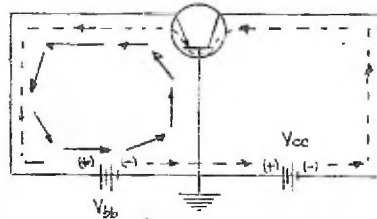


Fig. 2. 10 Flujo de corriente en el circuito exterior colector - emisor.

la combinación colector - base tiene polarización inversa, en la región de la base se encuentran presentes gran número de huecos ya que solo tiene lugar un número limitado de recombinaciones. Estos portadores se reúnen como resultado del campo electrostático producido por  $V_{cc}$  y  $(V_{bb} + V_{cc})$ . El resultado es un flujo de corriente en el circuito exterior colector - emisor. La fig. anterior es la representación esquemática equivalente. La corriente base - emisor se muestra por líneas de trazos y la corriente colector - emisor por una línea de puntos. El valor  $(\beta)$  guarda la misma relación de corrientes para P N P así como para N P N.

#### Relación de Traspaso de la Corriente Directa

En el circuito con base a masa de la fig. 2. 11 el parámetro de la ganancia de corriente se identificó como la relación de la variación en la corriente del colector a la variación en la corriente del emisor. La base tiene tensión sujeta a tierra.

Ahora en la presente fig. con el emisor puesto a tierra, se va a identificar un parámetro diferente para la ganancia de corriente .

La corriente emisor - base se muestra como una línea de trazos y el camino de la corriente colector - emisor es una línea de puntos. Cuando se varía la tensión  $V_{bb}$  del circuito con emisor a masa, variará la corriente en los circuitos de la base y del colector.

La relación de la variación en la corriente del colector a la variación en la corriente de la base recibe el nombre de relación de traspaso de la corriente directa, indicada como  $h_{fe}$  pero se puede encontrar también como beta ( $\beta$ ) .

$$\beta = h_{fe} = \frac{\Delta i_c}{\Delta i_b} \quad ] \quad V_c = k$$

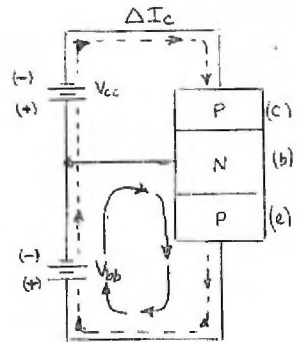


Fig. 2.11 Circuito con emisor a masa.

Si se compara el parámetro  $h_{fe}$  con el  $h_{fb}$  , resulta evidente que la ganancia de corriente es mayor de uno para el caso del emisor a tierra.

Las características estáticas de los transistores, así como el de tubos termiónicos se utilizan para predecir las condiciones de reposo en los circuitos, así como las condiciones de funcionamiento en la fig. 2. si los valores de  $V_{bb}$  y  $V_{cc}$  se ajustan para una tensión determinada de trabajo, fluirá una corriente continua en el circuito del colector, así como en el circuito de la base. La relación de la c.c. del colector, a la c.c. de la base , se identifica como la relación de traspaso de c.c. cuyo símbolo es  $h_{FB}$  . Para el parámetro corriente

continua, las subíndicadas son letras mayúsculas.  $h_{FE} = I_c / I_b$

Suponiendo que una corriente con inua de  $50 \mu a.$  fluye en la base y de  $18 ma.$  en el colector, refiriendonos al circuito con emisor a masa y sustituyendo los valores en la ecuación anterior tendremos ;  $h_{FE} = \frac{(18) (10^{-3})}{(50 \times 10^{-6})} = 360$

Así hemos demostrado que un transistor presenta una de dos relaciones de  $\alpha$  traspaso de c.c. a c.a., lo que depende de la forma en que está conectado al circuito. Si es con base a masa,  $\alpha$  ó  $h_{fb}$  ; si es con emisor a masa  ~~$\beta$~~  ó  $h_{fe}$  ; como se trata del mismo transistor conectado a un circuito en diferente forma, las dos relaciones no son completamente indiferentes una de otra.

#### Características de Salida.

Los circuitos de transistores se dividen en dos grupos : a) amplificadores de pequeña señal y b) amplificadores de potencia. Los parámetros tales como  $h_{fe}$  y  $h_{fb}$  proporcionan constantes exactas del transistor para predecir el funcionamiento del circuito del amplificador de pequeña señal ; sin embargo los problemas de circuitos de amplificadores de potencia deben resolverse utilizando representaciones gráficas de los parámetros. Todos los circuitos de pequeña señal de amplificadores de potencia y de conmutación, puede analizarse empleando las curvas características.

Emisor Común . Identificando el emisor a masa como emisor común y suponemos que se ajuste la tensión  $V_{bb}$  para proporcionar una corriente de polarización de  $20 \mu a.$ , variando la tensión  $V_{cc}$  de 0 a 10 voltios, el incremento resultante en la corriente del colector es el indicado por la fig. 2.12

Si se aumenta el valor de  $V_{bb}$ , de forma que se produzcan aumentos de 20 a. en la polarización, resultará una familia de curvas representativas de las características de salida del transistor 2N207.

Se puede observar de esta gráfica, que las curvas son análogas al pentodo donde la corriente de salida se eleva rápidamente hasta un "codo", donde continúa ascendiendo pero con mucho menor rapidez a medida que aumenta la tensión del colector.

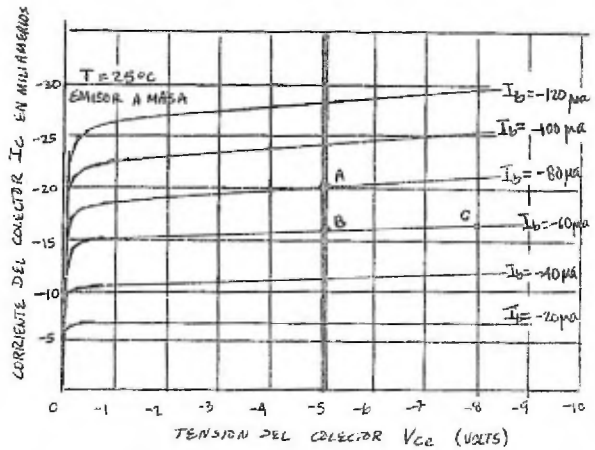


Fig. 2. 12 Característica de salida del emisor común: 2N207 .

Observemos también que la alimentación  $V_{cc}$  del colector debe tener su borne negativo conectada al colector y además ser representativa del tipo P N P . Es frecuente analizar un circuito con tensiones del colector muy bajas, para ello se debe de interpolar los valores bajos de polarización y de tensión para obtener valores de corriente en el colector .

Relación de traspaso de c.c.

La solución gráfica viene dada en la fig. 2.12 en las condiciones de salida para encontrar  $h_{fe}$  . En forma numérica la solución se da por la sig. relación

$$\text{algebraica : } \beta_{fe} = h_{fe} = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b} \quad \left. \vphantom{\frac{\Delta I_c}{\Delta I_b}} \right|_{V_{ce} = k}$$

Tomemos un ejemplo para ilustrar mejor y supongamos 5 voltios de tensión constante en el colector, la perpendicular que corte a todas las curvas de polarización de la base, seleccionando 2 de éstas curvas con los puntos A y B con el aumento de corriente en la base. El punto A representará una polarización de 80  $\mu$ a., - con una corriente del colector de 19.6 ma.; el punto B representa una polarización de base de 60  $\mu$ a. y una corriente en el colector de 15,5 ma., así sustituyendo tendremos:

$$h_{fe} = \frac{\Delta i_c}{\Delta i_b} \left. \vphantom{\frac{\Delta i_c}{\Delta i_b}} \right]_{i_{ce} = k} = \frac{(4 \times 10^{-3})}{(20 \times 10^{-6})} = 200$$

Para resolver gráficamente el valor de  $h_{fb}$  del transistor 2N207, el parámetro de la ganancia de corriente para la configuración a base común, resulta difícil a causa de los errores inherentes a las medidas gráficas pequeñas, así pues empleando la ecuación obtenemos la solución:

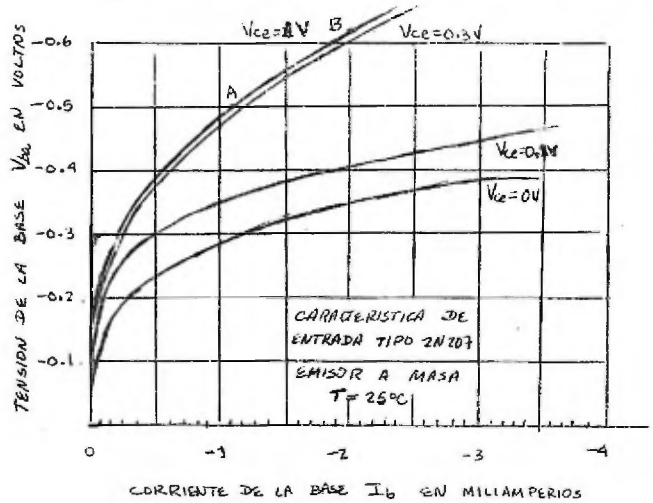
$$h_{fb} = \frac{h_{fe}}{(1 + h_{fe})} = \frac{200}{(1 + 200)} = 0.995$$

Conductores de salida. La familia de curvas de placa en un termiónico - proporciona dos de los tres parámetros fundamentales de la válvula: el factor  $\mu$  de amplificación y el de resistencia de placa  $r_p$ . Estas características de - salida en el transistor proporcionan asimismo, dos parámetros necesarios al transistor, la relación de traspaso  $h_{fe}$  de c.c. y la conductancia de salida -  $h_{oe}$  por la expresión:

$$h_{oe} = \frac{\Delta i_{ce}}{\Delta e_{ce}} \left. \vphantom{\frac{\Delta i_{ce}}{\Delta e_{ce}}} \right]_{i_{be} = k}$$

Donde:  $\Delta i_{ce}$  = Variación en la corriente del colector.

Fig. 2.13 Características de entrada de emisor común: 2N207.



#### Características de Entrada.

Esta segunda serie de curvas características del transistor, está limitada a pocas aplicaciones, no obstante ayudan al desarrollo y comprensión de los circuitos.

Tomemos nuevamente un ejemplo, tomando como base la fig. 2.13, cuando la corriente en la base es de -0.5 ma., la tensión en la base es -0.24 volt, en la hipótesis de una tensión constante en el colector de cero voltios, si se varía la tensión en el colector a 0.1 voltio y se efectúa una variación en la corriente u tensión a base, se obtiene una segunda característica de la potencia de entrada.

Observando que las curvas para  $V_{ce} = -0.3$  y  $V_{ce} = -1$  volt. se encuentran bastante proximos y si deseamos construir otras de  $V_{ce} = -2, -3, -5$ , etc. estarían bastante juntas y la razón es que la tensión base - emisor es virtualmente independiente de los aumentos en la tensión del colector y el emisor que exceden a 1 volt aproximadamente.

Impedancia de Entrada. - La resistencia de entrada de un tubo termiónico tendría una impedancia infinita, debido a que la rejilla se suele mantener a una tensión negativa y no se da como parámetro; pero en el transistor, la realimentación entre los circuitos de entrada y salida es inherente a la estructura física del dispositivo. Cualquier variación en el circuito de salida se traduce en variaciones a la entrada.

La ecuación para el parámetro de la impedancia de entrada presume una polarización constante en el colector y viene dada por :

$$h_{ie} = \left. \frac{\Delta e_{be}}{\Delta i_{be}} \right]_{V_{ce} = k} = \frac{0.12}{(0.0)(10^{-3})} = 132 \text{ ohms}$$

Determinando gráficamente el parámetro  $h_{ie}$ , eligiendo una polarización constante en el colector de un voltio, en el cual el punto B de la fig. representa una tensión en la base de 0.62 volt y una corriente de 2 ma. y el A una tensión de base de 0.5 volt con una corriente de 1.1 ma. en la base.

Tiene importancia el hecho de que la resistencia de entrada de un dispositivo transistor sea 132 ohmios solamente, si se compara con la resistencia infinita de entrada del tubo termiónico a bajas frecuencias. Ahora resulta evidente porque la válvula termiónica debe activarse mediante una corriente variable.

Relación de traspaso de tensión inversa. Este parámetro identifica la característica de tensión de un transistor y es análogo al parámetro de tensión de una válvula termiónica, que mide la relación de las variaciones en la tensión de salida a las variaciones de tensión a la entrada dado por:



$$h_{re} = \frac{\Delta V_{ce}}{\Delta V_{be}} \quad \left. \vphantom{\frac{\Delta V_{ce}}{\Delta V_{be}}} \right] i_{be} = k$$

Puede calcularse gráficamente con las características de entrada, pero a causa de pequeños aumentos las soluciones gráficas no resultan totalmente dignas de confianza. Este parámetro, así como el de la impedancia de entrada, suelen ser proporcionadas por los fabricantes de transistores en los manuales que publican y deben utilizarse con preferencia a las representaciones gráficas.

#### Características de Base a Masa.

En ocasiones, los fabricantes proporcionan dos series de características de salida para un transistor dado, una para la conexión de emisor y la otra conexión de base común, como se aprecia en la fig. 2.14 y 2.15 para un 2N34.

Cuando este parámetro se deduce de las características, existe una considerable falta de exactitud. Por ejemplo:  $\alpha = h_{fb} = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b}$ , y los puntos A y B de la fig. anterior se eligen como aumentos, representarán  $\Delta I_c = 5,8 \text{ ma} - 3,9 \text{ ma} = 1,9 \times 10^{-3}$  y  $\Delta I_b = 6 - 4 = 2 \text{ ma}$ .  $\alpha = \frac{(1,9 \times 10^{-3})}{(2) (10^{-3})} = 0,95$

Este error es lo suficientemente considerable para que los cálculos del circuito resulten incorrectos, razón por la cual la mayoría de los fabricantes facilitan  $\alpha$  en los manuales de especificaciones. Comparando las figs. 2.14 y 2.15, puede apreciarse la diferencia entre las curvas del emisor común y de la base común representativas del 2N34; en ésta última, se nota una separación no uniforme, y la pendiente variable de las características del emisor, se nota una mayor



Fig. 2.14 Características de salida de base a masa : 2N34.

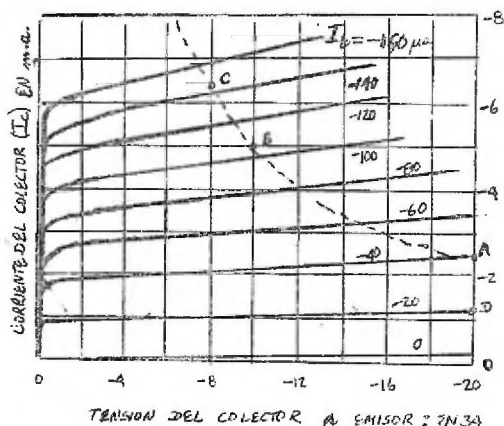


Fig. 2.15 Características de salida del emisor común : 2N34.

distorsión que la de base a masa.

#### Características Nominales Máximas.

La característica de didipación máxima de potencia para un transistor, de fino la cantidad máxima de ener-ía que puede didinarse en un colector en forma de calor, así que al proyectarse un circuito, es necesario que sus componentes tengan un valor que no exceda al de didipación. La selección de polarizaciones de trabajo y de resistencia de carga, deben efectuarse debajo del área de curva de didipación máxima e indicada en la fig. 2. 15 para diferentes puntos .

Así mismo en los manuales se da el valor de corriente continua máxima en el colector para cada transistor, y en las de tensión se dividen en colector a emisor y colector a base. en el caso de que solo se de una característica, se sé bre entiende que es la tensión máxima directa entre colector y emisor.

Corriente de Fuga. Observando en la fig. 2.15 en el colector, aunque está

polarizada a 0 ma. El punto D indica que en 20 voltios entre colector y emisor, existe una corriente de fuga de 0.02 ma. aprox..

Cuando la unión colector - base tiene polarización inversa y deja abierta la conexión del emisor, fluye una corriente pequeña a causa de los portadores en minoría que a temperatura ambiente suelen ser de pocos microamperes., pero q aumenta rápidamente con la temperatura, duplicándose por cada 10 C para el germanio y por cada 10 C se triplica su valor para el silicio, haciéndose estos valores importantes.

**Configuración del Circuito.** Los circuitos de transistores se dividen en tres configuraciones fundamentales; los elementos conectados a la señal tierra (o masa) establecen el punto de referencia y son :

- 1) Emisor común.
- 2) Base común.
- 3) Colector común.

Esta sección se hace con el fin de investigar la analogía entre las configuraciones de los transistores y la correspondencia de las válvulas termoiónicas, así como las ventajas y desventajas de dichos arreglos.

1) **Emisor Común.** En la teoría de circuitos de transistores, es lo más popular y se caracteriza por :

- A Elevada ganancia de corriente
- B Elevada ganancia de Tensión
- C Elevada ganancia de Potencia

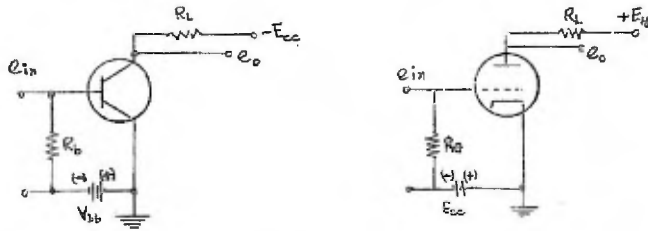


Fig. 2.16 Amplificación de emisión común y de cátodo común .

Además de los puntos señalados, el circuito resulta muy adaptable para el acoplamiento mutuo de amplificadores en cascada. Las impedancias de entrada y salida del dispositivo son tales, que permiten una razonable transferencia de energía solo con pérdidas moderadas en las redes de acoplamiento. La analogía de disposición de circuitos entre el amplificador de emisor común y el amplificador de cátodo masa en las válvulas termoiónicas se presentan en la fig. 2.16.

2) Base Común . En el circuito de transistores, el circuito de base a masa proporciona mejor fidelidad que un amplificador de emisor a masa, sus características son :

- A Baja ganancia de corriente (inferior a 1)
- B Elevada ganancia de tensión.
- C Moderada ganancia de potencia.

Además, la baja impedancia de entrada y elevada impedancia de salida del dispositivo, impiden que el amplificador de base común se conecten en cascada. La adaptación de las impedancias de tan amplia diferencia exigen grandes pérdidas de energía en la red de acoplamiento . En la fig. 2.17 se muestra la analogía del amplificador a base común y el amplificador de rejilla a masa ( proporciona ganancia de tensión con bajo factor de ruido).

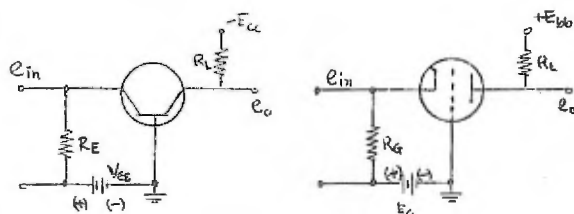


Fig. 2.17 Amplificadores de base común y de rejilla común.

3) Colector Común. El circuito cátodo - masa se usaba antiguamente como un dispositivo de adaptación en los circuitos de válvulas, es especialmente útil para adaptar una impedancia elevada a otra baja; la función de este circuito, - llamado también seguidor de emisor es la misma en el circuito de transistores, por ejemplo, adaptación de impedancias. Este circuito se caracteriza por :

- A) Elevada ganancia de corriente.
- B) Baja ganancia de tensión (inferior a 1)
- C) Moderada ganancia de potencia
- D) Elevada impedancia de entrada.
- E) Baja impedancia de salida.

El colector común se ilustra en la fig. 2.18 y puede compararse con el amplificador de placa a masa (seguidor cátodo), además la ganancia de corriente - suele ser análoga a la del emisor común.

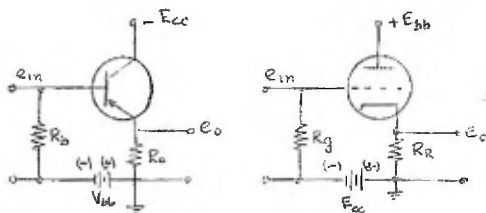


Fig. 2.18 Amplificadores de colector común y de placa común.

### Componentes y Circuitos de Control.

**Amplificadores.** La función de un amplificador es de hacer de mayor amplitud una señal muy débil hasta que sea de capaz de controlar una potencia eléctrica suficiente para producir luz, sonido o trabajo mecánico, mediante el control de la fuente de energía. El amplificador puede diseñarse para amplificar voltaje o amplificar potencia; ambas unidades de amplificación completas constan de más pasos amplificadores de voltaje seguidos por un paso amplificador de potencia, la ganancia global puede ser muy grande, teniendo al infinito, porque la entrada al primer amplificador de voltaje puede ser casi cero, mientras que la energía de paso final puede ser muy grande .

Se puede clasificar los amplificadores en función de (1) margen de frecuencia de trabajo; (2) dispositivos empleados, o (3) circuito empleado. No existe ninguna clasificación normalizada de los amplificadores; según su frecuencia, - se elabora la sig. tabla. (2.1)

Tipo de Amplificador	Frecuencia
De acoplamiento directo	0 megaciclos
De audio frecuencia	20 - 20,000 ciclos
De radiofrecuencia	Frecuencia por encima del margen del audio, cada amplif. cubre una banda estrecha.
De videofrecuencia	0 - 5,000 000 ciclos

Tabla 2.1 Clasificación de los amplificadores de acuerdo a la frecuencia - empleada.

Los dispositivos usados para conseguir amplificación, son (1) válvulas de vacío con rejillas de control; (2) transistores; (3) amplificadores magnéticos; y (4) amplificadores rotativos.

La razón por la cual no se da una introducción al estudio de los amplificadores rotativos, es que éstos aparatos amplifican la potencia de motores, y no son aplicables a circuitos de control en una forma directa como sucede con los amplificadores magnéticos.

Por lo que se refiere al estudio de la amplificación en válvulas y transistores, se ha cubierto ya de una forma elemental con anterioridad.

**Amplificadores Magnéticos.** Es un dispositivo de inductancia variable que amplifica y controla la potencia suministrada a una carga; difiere de los amplificadores de válvula y transistor (que emplean una resistencia variable), en que su funcionamiento depende de la imantación no-lineal de los materiales ferromagnéticos. Los tres elementos básicos del amplificador magnético son: un circuito magnético cerrado; un circuito de salida ó de carga; y un circuito de carga ó señal como se indica en la fig. 2.19 (a). La potencia aplicada al circuito de carga es siempre c.a., y la energía aplicada al circuito de entrada ó de señal, es usualmente una c.c. variable. Existen dos clases generales de amplificadores magnéticos, ellos son: (a) amplificador de reactancia saturable; (b) amplificador magnético autoexcitado.

a) **Amplificador de Reactancia Saturable.** El circuito y la forma de onda se presentan en la fig. 2.19 (a) y (b). Al aplicar una tensión de c.a. al circuito de carga, y una c.c. a la entrada de valor cero, el núcleo magnético funciona a lo largo de la línea a'a; en éste régimen de variación de flujo, la inductancia de la bobina se eleva y solo una pequeña corriente (de excitación) fluye por el circuito de carga, esta corriente es alterna e indicada por la fig. 2.19b como  $i_e$ . Ahora bien, si se cierra el circuito de entrada de c.c. y se ajusta para que la corriente tenga el valor representado por  $x$  en la fig. 2.20, el núcleo magnético

co se satura, la inductancia de la bobina es casi cero y la corriente de la carga está solo limitado por la resistencia de carga y la resistencia de la bobina. Así de ésta manera, fluirá por la carga una onda completa de c.a. ; ajustes adicionales de entrada de c.c. entre  $\underline{a}$  y  $\underline{x}$  producirán variaciones en el período de los semiciclos, durante los cuales hay saturación con las variaciones correspondientes en el valor de  $\underline{L}$  y en las ondas de corriente  $i_0$ ,  $i_1$ ,  $i_2$  de la fig. 2.19b. Evidentemente, si se funciona en la región entre a y b, de la fig. 2.20 las ondas de la corriente positivas y negativas, no son simétricas y se introducen armónicos en el circuito de carga.

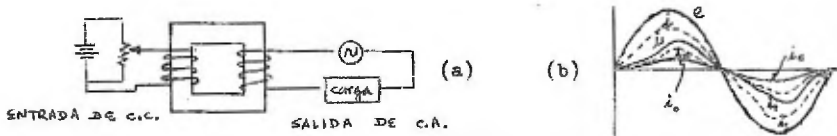


Fig 2.19 Amplificador de reactancia saturable elemental y formas de onda resultantes.

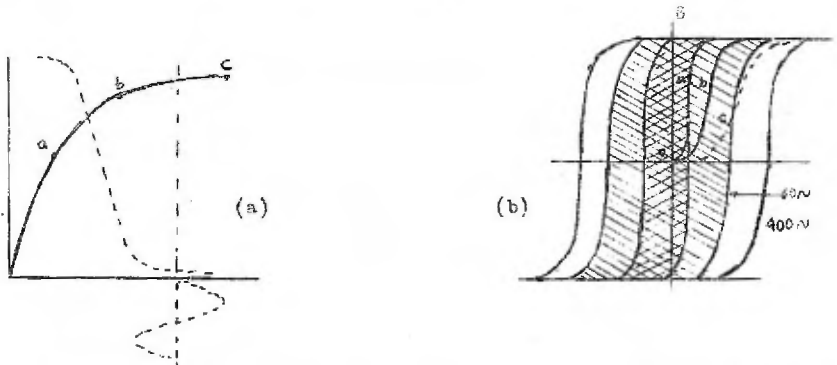


Fig. 2.20 Curvas de imantación y ciclos de histéresis de materiales magnéticos

El amplificador de reactancia saturable elemental tiene el inconveniente de que las variaciones de corriente en el circuito de carga inducen tensiones elevadas en el circuito de entrada de c.c. y que pueden ocasionar la ruptura del



aislamiento, así como interferir en la señal de control. Se vence este inconveniente usando un núcleo de 3 ramas con un devanado equilibrado magnéticamente - como se muestra en la fig. 2.21 (amplificador de Reactancia saturable con bobinas de carga en serie).

En este caso, los devanados de la carga se colocan en las ramas exteriores y el devanado de la señal en la rama central. Se conectan las bobinas de carga de modo que sus fuerzas magnetomotrices estén en serie (en fase) en el circuito magnético que comprende las ramas exteriores, pero en fase opuesta en la rama central (salvo en el caso de posibles desequilibrios) de reactancia en el circuito magnético.

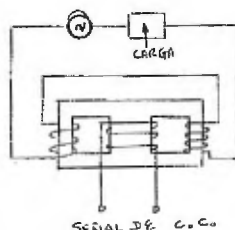


Fig. 2.21 Amplificador de reactancia saturable con bobinas de carga en serie.

El tiempo mínimo de respuesta de estos amplificadores (medido en ciclos de la corriente aplicada para alcanzar una fracción sustancial usual del 63 %) es de 1 a 3 ciclos; cuando el tiempo es crítico, se puede reducir usando frecuencias más elevadas, tales como 400 o superiores a está; otra forma de reducirla, es mediante el control de la inductancia de los devanados, el flujo de dispersión, etc. pero este estado crítico no se presenta normalmente.

Los devanados de la carga del amplificador pueden conectarse en serie o en paralelo; la conexión en serie proporciona un tiempo de respuesta más corto y una mayor caída de tensión interna, su uso es apropiado para controlar cargas de pequeña magnitud; la conexión en paralelo proporciona tiempos de respuesta mayores y se usan para controlar magnitudes grandes. La potencia de c.c. de control varía desde unos cuantos microwatts hasta 50 watts.

Se usan reactancias saturables para controlar dispositivos de calefacción eléctrica tales como hornos industriales, supercalentadores, pasteurizadores de leche calentadores de agua, etc. en unión de dispositivos de control de temperatura. Estos amplificadores proporcionan un poder de control o de "aceleración" proporcional que es capaz de mantener la temperatura dentro de límites muy estrechos, además se usan para reducir el voltaje de arranque de motores de c.a. de gran capacidad, se pueden usar para la regulación de voltaje.

b) Amplificadores Magnéticos Autoexcitados. Se conocen con los nombres de amplístat y magamp, estas unidades difieren del amplificador de reactancia saturable en varios aspectos. En primer lugar el circuito de carga contiene un rectificador de bloqueo generalmente de selenio, o es un diodo de silicio, con lo cual la corriente de carga debe ser unidireccional, por lo que tiende a saturar el núcleo de hierro dándole ahí su nombre. En otro sentido puede considerarse como realimentación positiva ya que puede arreglar unos cuantos amper-vuelta a la señal de entrada de c.c.

En segundo lugar el núcleo de hierro de la fig. 2.22 difiere usualmente en dos aspectos (de la fig. 2.19). El material magnético es usualmente de un tipo especial (como el de la fig. 2.20) con una curva de imantación muy empinada de esta manera solo se necesitan pequeñas variaciones de fuerza magnetizante para obtener grandes variaciones de flujo, además la sección transversal del núcleo magnético se reduce de modo que la saturación tenga lugar a menores valores de ampere-vuelta. En tercer lugar puede invertirse la señal de entrada c.c.

El funcionamiento de este amplificador magnético autoexcitado está indicado por la curva característica de la fig. 2.23 y las formas de onda de la fig. 2.22 b

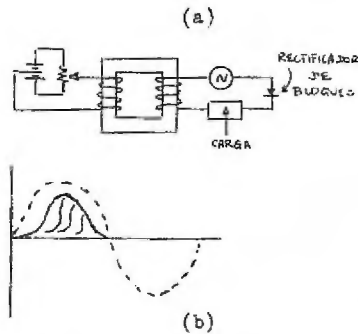


Fig. 2.22 Amplificador magnético autoexcitado normal.

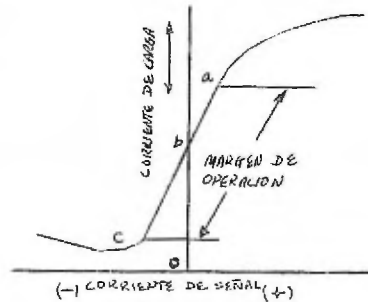


Fig. 2.23 Características de operación de un amplificador magnético autoexcitado.

Primero, el rectificador de bloqueo hace que la corriente de la carga sea la que corresponde a una rectificación de media onda. Si la señal de c.c. es positiva y hace que el flujo se eleve, hasta cerca del punto de saturación a el voltaje aplicado e producirá una corriente autoexcitada en la carga i que llevará el flujo a la saturación obteniéndose un semiciclo de corriente rectificadas casi completa. Si la corriente de señal es cero, la corriente autoexcitada de carga producirá la saturación en algún punto hacia la mitad del semiciclo, con lo que el impulso de corriente rectificadas será menor. Nuevamente si la c.c. de señal es negativa, puede polarizar al flujo normal hasta un valor tal como el punto c en el cual la corriente rectificadas de la carga es incapaz de producir la saturación del núcleo. Así, se regula la señal de c.c. o polarización en el margen de funcionamiento entre a y c, los impulsos de corriente rectificadas tendrán una amplia variación de amplitud.

El amplificador descrito no es deseable para aplicaciones comerciales, por que la corriente de carga induce voltajes en el circuitos de control y el uso de una corriente rectificada de media onda tiene poco rendimiento.

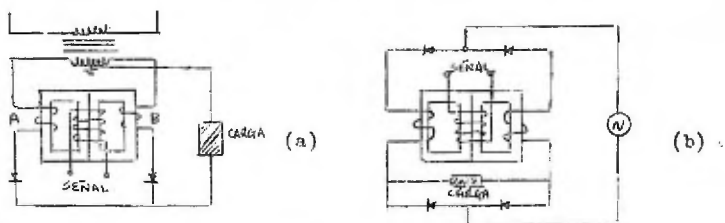


Fig.2.24 Circuitos Amplificadores magnéticos básicos de doble onda con salida de c.c.

Los circuitos amplificadores magnéticos autoexcitados de doble onda están representados en la fig. 2.24 ambos circuitos proporcionan una corriente unidireccional o c.c. a la carga, emplean un nucleo magnético para cada devanado de carga con el devanado de señal abarcando ambos nucleos; para obtener un efecto magnético equilibrado. Cada bobina de carga con su rectificador de bloqueo funciona como el circuito elemental descrito previamente. La fig. 2. 24 a representa un transformador de toma media en el secundario con un punto a tierra para la carga en caso de que sea deseable ; la fig. 2.24 b representa el circuito puente que funciona mejor con cargas inductivas por tener dos rectificadores conectados através de la carga, con lo cual tienden a reprimir cualquier impulso de voltaje que se produzca en la carga.

Los amplificadores magnéticos pueden ser tratados como amplificadores de válvulas en muchos aspectos. Pueden conectarse en cascada para dar una amplificación global mayor. El efecto de autosaturación puede considerarse como una realimentación intrínseca o interna; la realimentación externa debe realizarse llevando la corriente de carga por un devanado adicional que vaya paralelamente al devanado de entrada de c.c., esta realimentación puede ser positiva (ayudando) o negativa, como en el caso de los amplificadores de válvula.

La señal variable de entrada de un amplificador magnético puede insertarse en serie con un devanado de polarización de c.c., como en el circuito de rejilla de las válvulas electrónicas; aún más el amplificador magnético puede tener uno ó más devanados de entrada paralelamente al devanado de polarización de c.c. con lo cual se pueden aplicar señales independientes al amplificador magnético para obtener una salida que sea resultado de la composición de diversas variables.

El amplificador magnético tiene multitud de aplicaciones en el campo de control. Puede ser una unidad vital para un regulador de voltaje, o para un regulador de velocidad. Puede controlar el funcionamiento de relevadores campos e inducidos de motores pequeños y elementos de calefacción; ha sustituido a la válvula electrónica en muchas aplicaciones militares, tales como control del fuego de la artillería, guía de cohetes, etc.

Las ventajas de los amplificadores magnéticos en relación con los de válvula son:

- 1.- Robustez y capacidad de resistir fuertes choques y vibraciones, así como otras condiciones adversas del medio.
- 2.- No requieren tiempo de calentamiento previo.
- 3.- Funcionan con bajo costo, necesitan un mínimo de mantenimiento y tienen una larga duración.
- 4.- Tienen un rendimiento global elevado (mayor de 50 % y puede ser mucho más elevado con tamaños grandes).

El principal inconveniente es que es relativamente lento en actuar. (Pueden emplearse frecuencias hasta de 2.000 c.p.s. para reducir el tiempo de respuesta en ciertas aplicaciones críticas).

Osciladores. Las oscilaciones se pueden producir electrónicamente en cual

quier circuito amplificador si la entrada del amplificador se excita de una manera adecuada. Se puede clasificar los osciladores electrónicos atendiendo a : (1) forma de onda producida ó (2) principio usado en la excitación. Así la onda de salida puede ser senoidal o no senoidal y la excitación puede ser autoproducida o externa. Los cuatro métodos comunes de excitación o control que constituyen la base para clasificar los osciladores son : (1) realimentación externa; - (2) resistencia negativa; (3) vibración mecánica (cristal), y (4) relajación.

Osciladores de válvula y transistor. Los amplificadores se diseñan usualmente para reproducir y amplificar el voltaje de la señal aplicada a la entrada. Si parte del voltaje de salida se realimenta en fase adecuada, el amplificador quedará autoexcitado y en condiciones adecuadas oscilará. La fig. 2.25 muestra circuitos simples para obtener este resultado; en este circuito, la bobina  $L_p$  del circuito de placa está acoplada a la bobina  $L$  del circuito sintonizado LC, el cual a su vez determina el voltaje de señal aplicada a la rejilla. Cuando se cierra el interruptor del circuito de placa, la corriente pasa por el circuito de placa a través de la bobina  $L_p$ ; esta corriente, en forma creciente forma un flujo creciente que corta a la bobina  $L$  induciéndose un voltaje que carga el condensador  $C$ . Cuando la corriente de placa alcanza su valor nominal, la energía del campo magnético  $L$  hace que  $C$  se cargue con un valor más alto, para que posteriormente  $C$  se descargue en  $L$  y el circuito sintonizado LC oscile a la frecuencia propia de resonancia. La tensión oscilante de la rejilla hace que la corriente de placa sea también oscilante, con la cual, se vuelve a inducir en el circuito de rejilla una energía suficiente para compensar las pérdidas del circuito LC. De esta manera, el circuito de la fig. 2.25 a se convierte en un amplificador autoexcitado. Para el circuito del transistor de la fig. 2.25 b funciona de una manera similar.

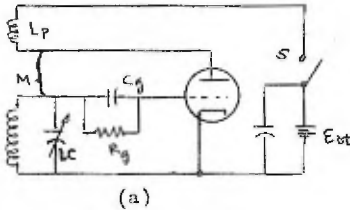


Fig. 2.25 (a) Oscilador con sintonía en rejilla.

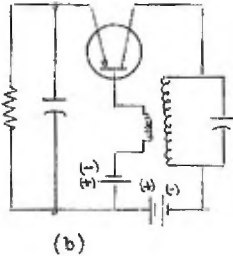


Fig. 2.25 (b) Oscilador con sintonía en el colector.

Las condiciones necesarias para que las oscilaciones se mantengan en un os cilador de válvula autoexcitada son :

- 1.- La realimentación de energía de la placa de rejilla debe hacerse con un cambio de fase (de 180°).
- 2.- La energía realimentada debe ser suficiente para compensar las pérdidas del circuito de entrada.
- 3.- Se usa generalmente un circuito sintonizado LC bien a la entrada o en la salida, o en ambos lados para determinar la frecuencia de resonancia.
- 4.- Los osciladores que trabajan en clase C (para altas frecuencias) deben tener toda o parte de su polarización negativa de rejilla procedente de una resistencia de escape. Si se usa polarización fija, no habrá corrien te inicial y no pueden empezar las oscilaciones.

Se pueden diseñar evidentemente muchos circuitos osciladores, a continuación se dan 4 de los más importantes.

Oscilador Hartley. En el está combinado el acoplamiento de la carga a la entrada con la bobina del circuito sintonizado LC, de modo que la componente de c.a. de la placa pasa por  $L_p$  al cátodo, se evita que la radiofrecuencia vaya a la fuente por medio del choque  $R_{fc}$ .

La frecuencia de oscilación está controlada por el condensador variable  $C$ , en tanto que el voltaje de excitación a la rejilla lo está por la parte de bobina comprendida entre  $L$  y  $L_p$ . El condensador  $C_p$  impide que haya un corto circuito entre la fuente y el negativo a través de la bobina.

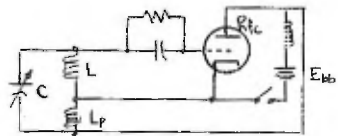


Fig. 2.26 Circuito oscilador - Hartley.

Los osciladores Colpitts de la fig. 2.27 son similares al Hartley, ya que dos condensadores  $C_1$  y  $C_2$  substituyen a las inductancias  $L$  y  $L_p$  produciendo una realimentación capacitiva. Se realiza la sintonía variando la inductancia  $L$ , aunque es posible usar una  $L$  fija y variar  $C_1$  y  $C_2$  por medio de un condensador variable de dos secciones. En la fig. 2.27 a se debe conectar la resistencia de polarización de rejilla directamente al cátodo para proporcionar la polarización adecuada.

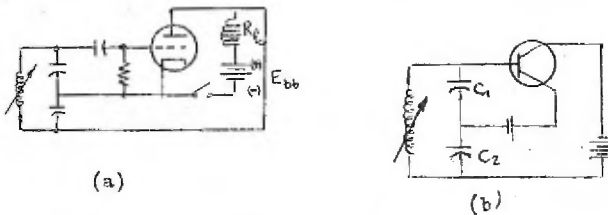


Fig. 2.27 Circuito oscilador Colpitts.

En la fig. 2.28 está ilustrado un oscilador con acoplamiento electrónico. Este circuito utiliza un retrodo conectado de manera que el cátodo, la rejilla de control y la rejilla pantalla actúan como un oscilador similar al circuito - Hartley de la fig. 2.26 y el circuito de la placa del retrodo actúa como un amplificador, obteniendo así una potencia de salida mayor. El acoplamiento entre los dos funciones. es debido al haz de electrones dentro de la válvula, de ahí el nombre de acoplamiento electrónico.



En este oscilador se usa un circuito sintonizado a la entrada y a la salida; como la rejilla pantalla se mantiene a un potencial cero de radio frecuencia y sirve también como blindaje entre los dos circuitos. Este oscilador es muy estable y las variaciones de la carga tienen muy poco efecto en las variaciones de frecuencia.

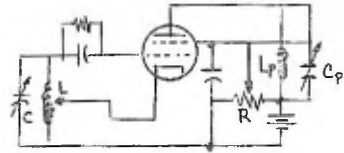


Fig. 2.28 Circuito oscilador con acoplamiento electrónico.

Otro factor que ayuda a la estabilidad del oscilador de acoplamiento electrónico, es que un aumento de la tensión de la rejilla pantalla hará disminuir la frecuencia mientras que un aumento de la tensión de la placa hará aumentar la frecuencia; de esta manera, mediante el ajuste adecuado de la toma del potenciómetro  $\mu$  la frecuencia se hará independiente de las variaciones de tensión de la fuente.

La frecuencia de las oscilaciones generadas en los circuitos osciladores regenerativos, Hartley y Colpitts está afectada considerablemente por las variaciones de la carga, tensiones de alimentación y temperatura. Aunque la variación de frecuencia es pequeña en los osciladores de acoplamiento electrónico es suficiente para que sea objetable en los transmisores de radiodifusión, sistemas telefónicos de onda portadora y aplicaciones similares.

Los circuitos osciladores con control de cristal de cuarzo son aplicables para controlar frecuencias precisas, debido a su propiedad piezoeléctrica, que consiste en cambiar su forma física, va que si se le aplica una fuerza mecánica se desarrolla una diferencia de potencial, recíprocamente si una lámina delgada de dicho material se conecta a una fuente de c.a., producirá vibraciones mecáni-

cas. Cuando uno de dichos cristales comienza a vibrar a su frecuencia de resonancia, solo se necesita una pequeña f.e.m. de la misma frecuencia para que las vibraciones sean de gran amplitud; la frecuencia de resonancia mecánica de un cristal depende principalmente de su espesor.

En la fig. 2. 29 b se muestra un oscilador controlado por cristal de cuarzo con una válvula terodo, debe observarse que este circuito es similar al de acoplamiento electrónico salvo que el cristal y la resistencia escape han reemplazado al circuito sintonizado de entrada la realimentación tiene lugar a través de la capacidad rejilla - placa del interior de la válvula . Un circuito -

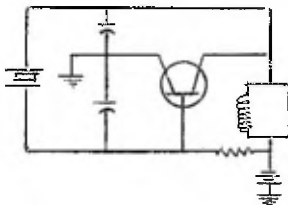


Fig. 2.29a Circuito oscilador de transistor controlado a cristal.

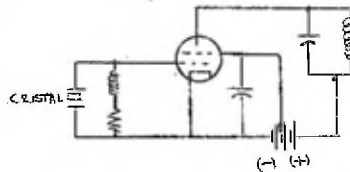


Fig. 2.29b Circuito oscilador de válvula controlado a cristal.

oscilador de cristal de cuarzo con un transistor como amplificador esta representado en la fig. 2. 29 a la potencia de salida que se exige de los osciladores de válvula electrónica depende del uso que se destina; en la mayoría de las aplicaciones, el oscilador se usa meramente como puente de una señal de radiofrecuencia que se aplica a la entrada de un amplificador para conseguir la potencia necesaria, para dicho uso, la potencia de salida de 1 a 5 watts es suficiente. Es deseable de salida, porque una carga demasiado grande tiende a afectar la estabilidad de la frecuencia de los osciladores Hartley y Colpitts y otros, no así el de acoplamiento electrónico que sí proporciona potencia moderada con buena estabilidad.

**Rectificadores.** Es importante el empleo de este componente de control - por dos razones, en primera es más sencillo y económico generar y distribuir - la energía eléctrica en forma de corriente alterna y en segunda, su aplicación en la transmisión y comunicaciones requieren del uso de c.c.

La rectificación se puede hacer por medios electrónicos y de conmutación . La inversión, proceso de convertir una c.c. en c.a. puede hacerse de una manera similar, tanto por medios electrónicos como de conmutación .

**Rectificadores de Conmutación .** Estos rectificadores pueden ser del tipo de vibrador, de contacto movido por un motor o del tipo rotativo. Un rectifica dor de vibrador consiste de un electroimán que hace vibrar una lámina que lleva unos contactos móviles. El período de vibración está controlado o sintonizado por los impulsos o alternancias de la corriente, de tal manera que los contactos móviles sirven para invertir el sentido de la misma de modo que la corriente de salida sea unidireccional. Años atrás fue empleado este principio en aparatos para cargar baterías y para la rectificación de corrientes en dispositivos de - llamada telefónica, ahora, en la actualidad el vibrador se usa ampliamente como inversor en aparatos de radio portátiles y algunos equipos realiza la doble misión de inversión seguida de rectificación.

El rectificador mecánico o convertir de contacto puede rectificar corrientes hasta 10,000 amperes a 400 volts con rendimientos del orden de 97 % . El princi pio de la rectificación de la c.a. es muy antiguo, teóricamente es necesario in vertir solamente cuando la tensión y la corriente pasan por cero en el ciclo de c.a. Realizar esto es difícil debido al breve tiempo disponible para mover - los contactos mecánicamente cuando la variación de corriente es máxima; cualquier diferencia de fase que pueda existir complica el problema de la conmutación. Si

se pudiera modificar la forma de onda del circuito para mantener la tensión en un valor casi cero durante un breve tiempo en los puntos en que la tensión y la corriente se invierten, es evidente que el problema mecánico de la inversión quedaría simplificado. Esta importante ventaja se tiene en el nuevo rectificador de contacto insertado reactancias saturables en los conductores de c.a. Estas reactancias se saturan a valores relativamente bajos de corriente y de flujo, de manera que presentan una alta impedancia a las variaciones de corriente de bajo valor (cuando la corriente pasa por cero) la aplicación de la reactancia saturable produce el necesario retardo en la variación de tensión y de corriente y permite la inversión mecánica de los contactos operados por medio de un pequeño motor síncrono. Se necesitan de muchos refinamientos mecánicos y eléctricos para que este rectificador de contacto sea un éxito.

Los rectificadores rotativos existen en tres tipos: conmutadores simples, grupos motor - generador y convertidores rotativos.

Los conmutadores simples consisten de un motor síncrono que mueve a un conmutador a una velocidad tal que se invierte la polaridad al ritmo adecuado para que la salida sea unidireccional. Este dispositivo se ha usado ampliamente en los primitivos transmisores de radio y equipos de rayos X y en la actualidad tienen aplicación para la rectificación de altas tensiones para uso en los procesos de precipitación para eliminar el humo, el polvo y ciertos productos químicos secundarios.

El rectificador del tipo motor - generador consiste de un motor de c.a. al cual mueve a un generador de c.c. Es un proceso de conversión eléctrico - mecánico seguido de otro mecánico - eléctrico. Tiene la ventaja de poderse regular muy bien la tensión continua de salida y los inconvenientes de alto costo inicial, bajo rendimiento y todas las complicaciones de las máquinas rotativas.

Este sistema se esta sustituyendo por los métodos electrónicos de conversión. - El convertidor rotativo consiste en una sola unidad rotativa que consume c.a. - como motor y produce c.c. de salida. que es en parte el resultado de una rectifi cación pura y en parte un proceso de conversión. Esta máquina tiene un costo - menor y un rendimiento mayor que el grupo motor - generador, pero su inconvenien te está en la falta de flexibilidad para regular la tensión continua de salida , se ha empleado mucho en los ferrocarriles eléctricos, pero se está sustituyendo por rectificadores eléctricos.

Todos estos dispositivos de mutación usados para la conversión de c.a. en c.c. pueden ser empleados igualmente por medio de proceso recíproco para producir la inversión .

Rectificadores Electrolíticos. Consisten de dos electrodos diferentes colo cados en un electrolito; un cierto rectificador usa como electrodos una placa de aluminio y una de plomo y como electrolito una disolución de fosfato amónico. En éste elemento, los electrones pasan fácilmente del electrodo de aluminio al elec trodo de plomo, pero no al revéz y de esta manera, se puede emplear como un rec tificador de media onda.

Rectificadores Electrónicos. las principales características de estos - rectificadores. se dan en la tabla 2.2 de ellos. (los diodos de cristal, los - diodos de vacío, los rectificadores metálicos, los rectificadores de unión de - germanio y los rectificadores de unión de silicio) pueden usarse en un circuito como el de la fig. 2.30 (a) para obtener una rectificación de media onda. Se - ha demostrado que estos cinco rectificadores tienen una característica de conduc ción en sentido directo del tipo indicado por la línea de la fig. 2.30 (b) . La tangente en un punto cualquiera de esta curva representa la resistencia interna en c.a. para dicho punto de trabajo. en un circuito rectificador, el interés -

reside principalmente en la corriente que resulta del voltaje aplicado, por consiguiente se debe agregar una caída de tensión  $i_p R_L$  a través de la carga a la caída de tensión a través del rectificador y mostrado gráficamente en la fig. 2.30 (b) dando como resultado la característica dinámica de trazos referida a la tensión aplicada  $e$ . (que es aprox. recta). Por lo tanto para efectuar el análisis en una forma ideal, se puede usar una recta como se indica en la fig. 2.30. Esto implica una suposición de que tanto el dispositivo como la carga son lineales.

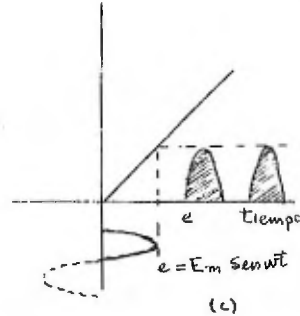
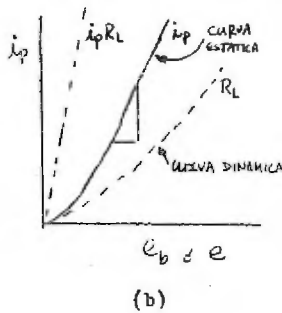
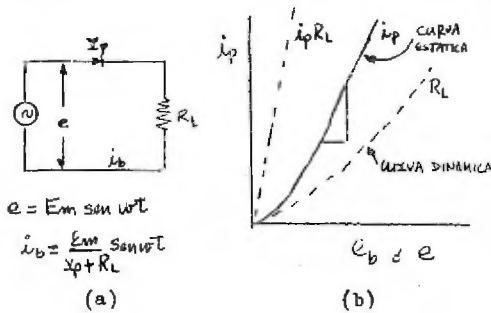


Fig. 2.30 Curvas de carga básicas de un rectificador de válvula de vacío y de semiconductor.

Fig. 2.30c Rectificación de media onda con diodo de vacío.

Si se aplica a éste conjunto una onda senoidal de tensión, se obtendrán impulsos senoidales de corriente como se muestra en la fig. 2.30c.

Los tres sig. rectificadores (Diodo de gas y de vapor, rectificadores de arco de mercurio, y los triodos de gas vapor), tienen una caída de tensión interna casi constante cuando están trabajando, por consiguiente su característica de funcionamiento típica será una recta vertical como se ve en la línea truesa de la fig. 2.31 (a). Si como antes, deseamos la característica con respecto a la tensión aplicada, se sumará gráficamente la caída en la carga  $i_p R_L$  obteniendo se la característica dinámica representada por una línea de trazos de la fig. 2.31a

RECTIFICADOR	DESCRIPCIÓN	MARGEN DE TENSION DE CARGA	MARGEN DE CORRIENTE DE LA CARGA AMPERES	TENSION INVERSA DE PICO	APLICACIONES
Diodos de Cristal	Semiconductores	40-250	0-0.5	50-1000	Detección, Rectificación de pequeñas corrientes
Oxido de Cobre	Metálico	3-12 por elemento	46.5 mA/cm <sup>2</sup>	3-30	Bajas Tensiones - relevadores; Galvanoplastia
Selenio	Metálico	18-26-33 por elemento	46.5 mA/cm <sup>2</sup>	18-45 por elemento	Fuentes de alimentación, radio, T. V. - Aplicaciones diversas de baja Tension
Magnesio - Sulfuro de Cobre	Metálico	5 por elemento	3.88-7.36 A/cm <sup>2</sup>	15-125 por elemento	Baja Tension, Rectificación de corrientes elevadas
Germanio de potencia	Unión p-n	65-125	93 A/cm <sup>2</sup>	5 por elemento	65-250 Volt corrientes elevadas de la ind. química
Silicio de potencia	Unión p-n	50-400	35-150 por elemento	400 por elemento	50-400 volt corriente moderada, Temperatura hasta de 190°C
Kenotron	Diodo alto vacío	0-150 Kv	0-1 Usualmente	150 Kv	Alimentación de Tubos de rayos X, de válvulas de radiofusoras, etc
Gasoso	Diodo termiónico de gas	0-220	0-15	300	Fuentes de alimentación
Fanotron	Diodo de vapor cátodo termiónico	0-2200	0-30	5000	Fuentes de alimentación de voltaje moderado
Tiratron	Cátodo termiónico, gas o vapor	1-10 Kv	0-18	25 Kv	Funciones de control - soldadura de resistencia - rectificación controlada
Ignitron	Arco de Mercurio	250-20,000	30-1000 por válvula	1-20 Kv	Rectificación de potencia - conmutación electrónica de potencia - inversión
Excitron	Arco de Mercurio	0-3000	750 por válvula	3000	Rectificación de potencia

TABLA 2.2 RECTIFICADORES ELECTRONICOS Y SUS PRINCIPALES CARACTERISTICAS DE FUNCIONAMIENTO

Esta característica dinámica está representada en trazo grueso; en ella se aplica como antes una tensión senoidal y se obtienen impulsos de corriente de magnitud reducida. La reducción de corriente que se produce debido a la caída interna de tensión esta indicada gráficamente por líneas de trazos en donde la característica dinámica ha sido trasladada hasta el origen.

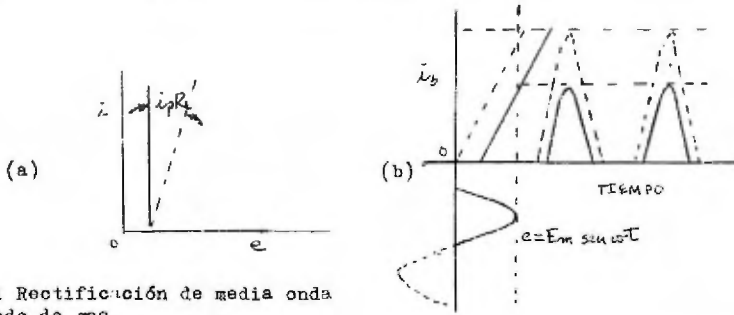


Fig. 2.31 Rectificación de media onda en un diodo de gas.

Los rectificadores de arco de mercurio y los trodos de gas pueden tener una mayor reducción en el área de los impulsos de corriente resultantes si se ejerce un control de rejilla para retrasar al instante del disparo.

Contadores . Una de las funciones básicas en el funcionamiento de un control eléctrico, es el cierre de un circuito efectuado por los contactores. El control manual se efectúa por medio de un simple interruptor que puede ser del tipo pulsador, de palanca y el de sobrecarga térmica; en éste último se tiene incorporado un interruptor automático que se abre cuando la corriente de carga es superior a la de trabajo normal. A continuación se da una breve descripción de los principales contactos empleados en la industria .

El interruptor de mercurio se usa en el control de posición y consiste de una pequeña cantidad de mercurio sellada dentro de un tubo de vidrio con dos -



contactos ; según la inclinación del tubo de mercurio, cierra ó abre el circuito entre los dos contactos, para lo que basta una pequeña variación en la inclinación . Estos dispositivos se fabrican para voltajes hasta de 250 volts y de corriente hasta 45 amperes como máximo; sus aplicaciones son tan numerosas, que aquí no serán mencionadas.

El microinterruptor es igualmente usado en el control de posición de acción rápida que se hace actuar con un recorrido de 1.59 mm ó menos. Como interruptor de posición límite se usa para desconectar energía que mueve a un mecanismo que recorre cierta distancia o correrá y se alcanza al punto predeterminado. . - En las aplicaciones de control, éste interruptor actúa manual ó mecánicamente - como parte de un ciclo del equipo automático ; en el funcionamiento de muchas - máquinas - herramientas es usado como interruptor de seguridad para la protección de los operarios, el equipo y el material contra lesiones o bien pérdidas.

Los relevadores magnéticos son quizá los dispositivos contactores más antiguos en la tecnología eléctrica. Los sistemas de conmutación telefónica han sido construidos a base de relevadores magnéticos durante tres cuartos de siglo. Los relevadores funcionan mediante potencias de excitación pequeñas, pero pueden controlar potencias elevadas cuando actúan como contactores de línea de transmisión, naturalmente éstos dispositivos juegan un papel vital en todo sistema de control.

Las válvulas electrónicas son usadas con frecuencia como contactores eléctricos . Cualquiera de las válvulas de vacío con rejilla de control (triodo, tetrodo, pentodo) pueden bloquear el paso de la corriente por un circuito de placa cuando la rejilla está polarizada al corte. Un aumento de tensión en la rejilla hará que pase corriente, en tanto que una disminución de la tensión de rejilla

controlar el paso de la corriente. De una forma similar, las válvulas de gas, tales como el tiratrón, el ignitrón y el triodo de cátodo frío pueden usarse como interruptores electrónicos por medio de una rejilla de control.

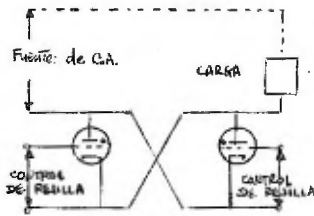


Fig. 2.32 Circuito contactor con tiratrones .

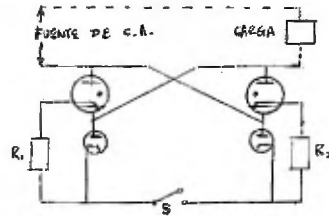


Fig. 2.33 Contactor con diodos de gas para el disparo.

El tiratrón resulta adaptado para controlar potencias moderadas, conectando y desconectando. Cuando se desea dejar pasar dos semiciclos de corriente, se pueden usar dos tiratrones conectados como se muestra en la fig. 2.33; cada tiratrón deja pasar un semiciclo según la rejilla de control respectiva.

El ignitrón se usa en el control de potencias elevadas con corrientes de varios cientos de amperes. En la fig. 2.34 se presenta un circuito de control para una carga de c.a. elevada, empleando dos ignitrones, de modo que hay disponible uno u otro para conducir en cada sentido. Los ignitrones se dispararán por medio de diodos de gas independientes (a, b), siendo el interruptor s el que controla la conexión y desconexión.

#### Componentes o fuentes de voltaje.

La fuente de voltaje para la mayoría de los equipos fijos es la alimentación de c.a.; para grupos móviles suele ser un generador de c.c. o bien una batería de acumuladores; para equipos portátiles ligeros la fuente puede ser una batería

de pilas secas ó de mercurio.

La pila de mercurio tiene una f.e.m. de 1.345 volts, puede almacenarse durante mucho tiempo y tiene una relación elevada de energía a peso y volumen, con lo cual resulta particularmente apta para equipos de transistores que requieren una corriente constante, de un valor reducido y servicio prolongado.

Un divisor de tensión es un dispositivo empleado en la distribución de la tensión en dos ó más partes, que se efectúa aplicando una diferencia de potencial dada através de un cierto número de resistencias en serie, como es mostrado en la fig. 2.34 parte superior.

Como la misma corriente debe pasar por el grupo en serie, la caída de tensión através de cada resistencia  $IR$  es proporcional a la resistencia en ohms; si en la fig. 2.34 (a),  $E$  es 100 volts,  $R_1$  de 4 ohms,  $R_2$  de 6 ohms y  $R_3$  de 10 ohms, las tensiones respectivas que aparecen através de las resistencias, son : 20, 30 y 50 volts.

Las tensiones respectivas que aparecen através de las resistencias son: 20, 30 y 50 volts. Se puede obtener una margen de voltaje muy amplio usando un contacto móvil (b) a lo largo de una resistencia bobinada, como es apreciada en la fig. 2.34 (b); se puede fabricar la resistencia lineal en forma circular (fig.

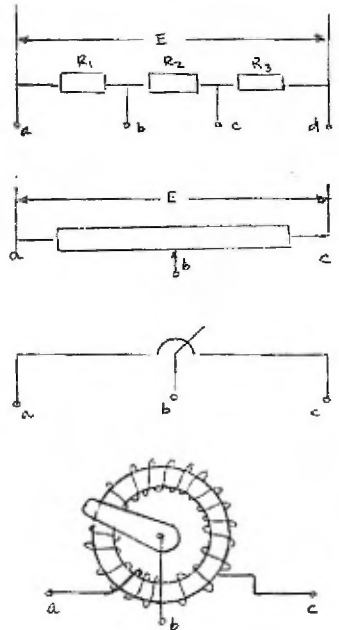


Fig. 2.34 Circuitos divisores de tensión.

2.34 c) para permitir que el contacto móvil (b) tenga un recorrido circular. Esta última forma de divisor de tensión se denomina potenciómetro; debe observarse que las relaciones entre las tensiones de los dispositivos anteriores sólo son exactas si son obtenidas las corrientes de las tomas.

Una fuente de tensión alterna variable es llamada variac y consiste de un autotransformador variable compuesto por una bobina de una sola capa, enavada sobre un núcleo toroidal (fig. 5 d), el voltaje de la línea, como es de 115 volts, se aplica entre los puntos a y c. El contacto (b) se desliza sobre una parte del bobinado que no está aislado; la tensión variable entre los puntos a y b es proporcional a las vueltas entre éstos dos puntos.

Frecuentemente los circuitos de control requieren una tensión continua constante que sea independiente de la tensión de la línea; estos circuitos de potencial constante suministran un potencial de referencia conectando una válvula reguladora o tubo de descarga en serie con una resistencia como se observa, se puede emplear un diodo Zener (semiconductor de Silicio). En lugar de una válvula reguladora de gas. Si se desea conseguir dos ó más potenciales conectando en serie dos ó más válvulas ó diodos.

**Circuitos desfasadores.** El desfasaje de voltajes en circuitos monofásicos se consigue fácilmente mediante un puente de corriente alterna.



Fig. 110 Puentes de c.a. para producir desfasajes.

Un circuito tal (fig. 2.36) emplea un transformador con una toma media en el secundario para formar dos ramas del puente AO y OB con tensiones inducidas iguales. Los otros dos brazos están formados por una inductancia y una resistencia como en (a) ó un condensador y una resistencia, como en (b). Existe un desfase a través de los puntos del puente O y G, con respecto al voltaje que existe entre A y B.

La variación de desfase se produce por una variación de R, L ó G. La explicación de éste desfase se muestra en los diagramas vectoriales de la fig. 2.36. La caída de tensión a través de los brazos L y R (ó R y C) en serie. En cada caso, la caída IR y la IX estarán en ángulo recto entre sí; una reducción en la resistencia R reducirá la caída IR y mediante cierto aumento de corriente aumentará IX.

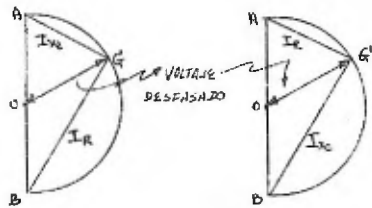


Fig. 2.36 Diagramas vectoriales para la ilustración del desfase.

El desfase de un puente de C.A. puede controlarse automáticamente mediante el control eléctrico al variarse la inductancia generalmente sustituyendo L con una reactancia saturable de la fig. También se

puede conseguir este desfase variable modificando la capacidad C, aunque éste método tiene poco uso práctico. Por el control manual el desfase del puente de C.A. por medio de una resistencia variable R ó una inductancia variable (variómetro).

El desfase de voltaje en los circuitos trifásicos y polifásicos puede conseguirse mediante el mismo principio de los monofásicos, aunque existen otros - que debido a su facilidad y sencillez son preferidos, uno de ellos, es colocar

do un potenciómetro entre dos fases de un circuito, e ilustrado por la fig. 2.37 donde la tensión entre C. y X. puede ser variada en un margen de 60 grados moviendo el punto X a lo largo de la resistencia R. puede conseguirse éste desfaseaje mediante un control manual de un transmisor Selsyn y que está constituido de un estator de motor de C. A. con devanados trifásicos y un rotor con un devanado trifásico similar. La fase del voltaje inducido en el rotor con relación al estator está determinada por la posición del rotor.

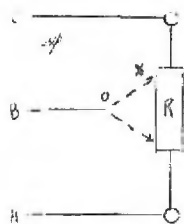


Fig. 2. 37 Desfaseaje por medio de un circuito trifásico.

**Dispositivos de Control de Tiempo.** El sincronismo de las operaciones de control industrial puede realizarse por medio de circuitos eléctricos, de dispositivos magnéticos y de mecánicos. El tiempo necesario para que la corriente y el voltaje experimenten ciertos cambios en inductancias y capacidades resulta muy útil para sincronizar las operaciones y son mostrados en la fig. 2.38 cuatro combinaciones de corriente de RC y de RL, así como las ec. representativas del circuito, siendo las más importantes e útiles las combinaciones de R y C.

A manera de ilustración usemos una fuente de c.c. para cargar un condensador en paralelo con una resistencia de la fig. en el que se abre el interruptor y el condensador se descargará a una velocidad definida; la velocidad de descarga está determinada por la constante de tiempo RC. Una vez transcurrido un tiempo igual a la constante del tiempo, la tensión caerá a un valor igual al 37 % del inicial, de manera similar, la tensión volverá a tener el 37 % del

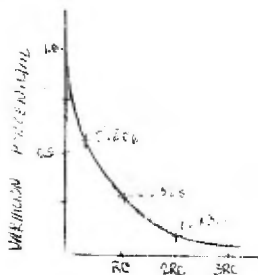


Fig. 2.38 Curva de retardo RC.



primer período cuando se efectúa el segundo, así como ésta velocidad de descenso es constante y segura, resulta muy útil en el circuito de sincronismo.

El empleo de relevadores de acción retardada empleando circuitos RL, se muestran en la fig. 2.39a; consiste de una bobina de c.c. y un anillo grueso de cobre colocado sobre un núcleo de hierro, así que, cuando se excita la bobina de c.c., el núcleo queda imantado atrallando la armadura y cerrándose el circuito; en el momento de abrirse el circuito de c.c. el flujo de la bobina empieza a disminuir, y esta variación dentro del anillo de cobre provoca un desajuste y se efectúa una variación en el número de líneas de flujo induciéndose una f.e.m. y hace pasar una corriente de oposición al original.

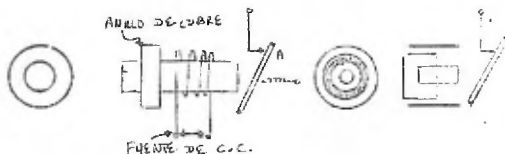
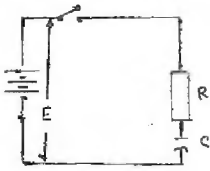


Fig. 2.39 Tipos de relevadores de retardo.

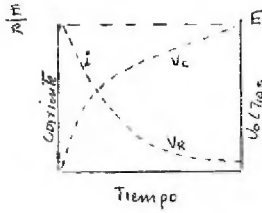
La constante de tiempo ( $L/R$ ), del anillo de cobre determina la velocidad de disminución del flujo. En vista de que se necesita una pequeña cantidad de flujo para mantener la armadura en contacto con el núcleo de hierro, habrá un cierto retardo antes de que se separe la armadura; la duración del retardo puede controlarse en un diseño fijo mediante la longitud axial y la posición del anillo de cobre. Puede hacerse variable el tiempo de retardo por medio de un manguito de cobre móvil colocado entre el núcleo de hierro y la bobina, como se nota en la fig. 2.39b.

Transformador de Impedancia en Serie.

Circuito



Gráfica



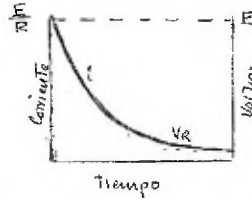
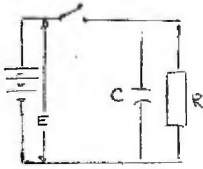
ecuación

tensión Continua aplicada bruscamente

$$i = \frac{E}{R} e^{-t/RC}$$

constante de Tiempo = RC

tensión a través de R  $\{ V_R = E e^{-t/RC}$   
 tensión a través de C  $\{ V_C = E(1 - e^{-t/RC})$

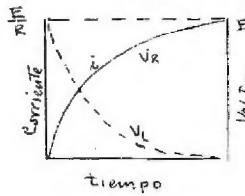
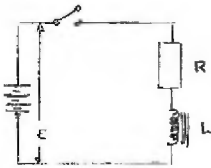


C cargando a una tensión E  
 descargando bruscamente a través de R

$$i = \frac{E}{R} e^{-t/RC}$$

constante de Tiempo = RC

tensión a través de R  $\{ V_R = E e^{-t/RC}$



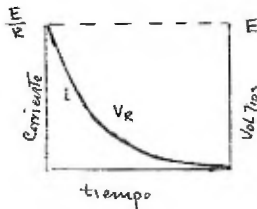
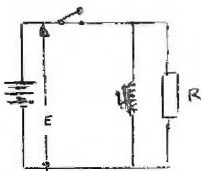
tensión continua aplicada bruscamente

$$i = \frac{E}{R} (1 - e^{-tR/L})$$

constante de Tiempo  $(\frac{L}{R})$

tensión a través de R  $\{ V_R = E(1 - e^{-tR/L})$

tensión a través de L  $\{ V_L = E e^{-tR/L}$



Corriente de L continua interrumpida  
 bruscamente  $i = \frac{E}{R} e^{-tR/L}$

constante de Tiempo  $\frac{L}{R}$

tensión a través de R  $\{ V_R = E e^{-tR/L}$

Fig 2.40 Circuitos de Simetrismo



Este transformador varía la reactancia de un circuito serie, como la reactancia de núcleo saturable, pero esta basado en el principio de reducir el flujo de un núcleo de hierro en lugar de forzarlo a la saturación; en un transformador típico en circuito abierto, la reactancia del primario es muy elevada. Si se cortocircuita el secundario, la corriente resultante produce una fuerza magnetomotriz que se opone al flujo del núcleo y reduce la reactancia del primario casi a cero. Para cargas y corrientes del secundario intermedias, la reactancia del primario variará entre los valores máximos y mínimos.

La fig 2.41 muestra el circuito eléctrico del transformador de impedancia en serie, en la cual una corriente del secundario con c.a. está regulada por un rectificador de doble onda con triodos de gas ó de vacío, en la cual existe una tensión adecuada de la rejilla aplicada en triodos manuales ó automáticos que hará variar la impedancia dentro del margen deseado.

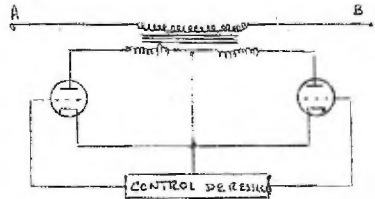


Fig. 2.41 Control de transformador en serie.

#### Transformador Sobreexcitado.

Es un transformador de baja capacidad que trabaja con un núcleo sobresaturado a fin de producir picos de voltaje en el secundario; el primario de este transformador está conectado en serie con una resistencia ( ó inductancia ) a una línea de c.a. indicada en la fig. 2.42.

Las ondas resultantes de voltaje, de corriente y de flujo, se representan en la fig. 2.42, siendo la cantidad de hierro del transformador limitada, la

saturación sobreviene al principio de la onda de corrientes, produciendo una onda de flujo de forma recortada y plana.

Las variaciones de flujo del núcleo del hierro tiene lugar en un intervalo de tiempo muy breve en la zona de inversión del flujo, produciendo así unos picos de voltaje  $e_s$ . Los transformadores sobrecitados se usan para disparar ciertas válvulas, tales como los tiratrones e ignitrones.

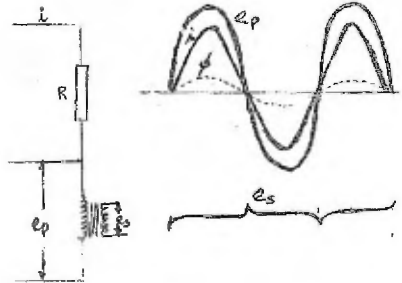


Fig. 2.42 Ondas de tensión y de flujo en un transformador sobresaturado.

#### Dispositivos no Lineales.

Muchas substancias tienen una resistencia no lineal al ser sometidos a variaciones de temperatura, de corriente y de voltaje; algunas de ellas son empleadas en dispositivos para la protección de equipo electrónico, así por ejemplo tenemos una lámpara reguladora de corriente que tiene un alambre helicoidal cuyo coeficiente de resistencia con la temperatura es positivo y muy elevado para mantener la corriente con un valor casi constante en un margen de voltaje aplicado bastante grande como se aprecia en la fig. 2.43.

Las lámparas reguladoras de corriente pueden usarse para proteger los filamentos de las válvulas y otros elementos de circuito contra corrientes excesivas derivadas de variaciones en la tensión de la línea.

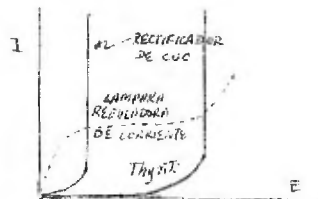


Fig. 2.43 Características de resistencias no-lineales.

El carburo de silicio (Thyrite) ofrece una resistencia muy elevada, cuando la tensión aplicada es baja, pero su resistencia disminuye cuando la tensión aumenta. Se usa mucho para la protección de válvulas y componentes de circuitos, para evitar la ruptura del aislamiento originada por transistores de voltaje inductivos. Los diodos de semiconductor tienen una resistencia baja en el sentido directo, pero una resistencia elevada en sentido inverso; además de usarse como rectificadores, se emplean para bloquear el paso de corriente en ciertos circuitos, ó bien en conexiones con circuitos de alarma para indicar una inversión de polaridad accidental en un circuito de c.c. .

**Sensores.** Es un dispositivo empleado para medir la magnitud de cierta cantidad variable, tal como la temperatura, la velocidad, el voltaje, etc. ; el sensor constituye un eslabón importante en la cadena de control, así pues, se ha elaborado la siguiente tabla que nos muestra la cantidad medida y los sensores indicados.

CANTIDAD	SENSOR
Voltaje	Voltmetro
Velocidad	Tacómetro de generador
Luz	Fotocelula; pila fotoeléctrica; célula fotoconductora ( selenio-Scd-SPb )
Temperatura	Termopar; bimetálico; termistor; termómetro de resistencia.
Presión	Cápsula aneróide.
Tensión	Tensiómetro
Humedad	Cabello humano y otros.
Posición	Potenciómetro; sist. Welsyn; microinterruptor e interruptor de mercurio; diferencial mecánico.

Tabla 2.3 Sensores.

Algunos de los dispositivos se han visto ya anteriormente, así pues aquí se dará una breve descripción de aquellos que merecen importancia.

Generador de tacómetro. Es un pequeño generador de c.c. que tiene un campo magnético permanente, como su flujo inductor es constante, su f.e.m. generada es directamente proporcional a la velocidad.

Termopar. Es una unión de cobre-constantan que da una variación de f.e.m. con la temperatura de acuerdo con el efecto Seebeck. La unión y los cables de salida van dentro de un tubo sellado.

Bimetal. Consiste de tiras de latón y de acero invar soldadas; la diferencia en dilatación de ambos metales, hace que el bimetal se curvee con los cambios de temperatura.

Termómetro de Resistencia. Puede consistir de dos bobinas de resistencia - ( una de níquel y otra de magnanina ) aislados y sellados dentro de un tubo metálico. El níquel tiene coeficiente de resistencia con la temperatura positiva, mientras la magnanina es cero. Los extremos de las bobinas, conectadas en serie y la unión de las dos son llevadas a un puente de Wheastone. para determinar los cambios de resistencia en el níquel.

Tensiometro. Consiste de un trozo de alambre fino de aleación de cobre-níquel ( de 0.0254mm. de diametro, y de 25 a 150mm. de longitud ) enrollado y pegado firmemente a un papel ó trozo de plástico no mayor a un sello de correos; ésta unidad se cementa al espécimen cuya tensión mecánica desea probarse. La tensión sobre ésta unidad de prueba puede aumentar la longitud del alambre y disminuir su sección, lo que aumenta su resistencia y permite hacer medidas adecuadas por la caída de tensión IR.

**Sistema Selsyn.** Es una combinación de unidades rotativas destinadas a interconectar eléctricamente dos puntos alejados, de modo que se controle una de la otra, ó bien una de ellas indique la posición de la otra; una de las unidades actúa como transmisor y la otra como receptor; éste sistema puede funcionar a base de c.c. ó bien de c.a.

El sistema selsyn de c.c. es usado ampliamente en aviación y algunos barcos. Para c.a. (autosíncrono) que transmite el movimiento eléctricamente, consta de dos motores autosíncronos conectados entre sí por medio de 3 conductores, e indicados por la fig. 2.44a. En la fig. 2.44b se aprecian a los motores con un estator trifásico conectado en estrella, pero el rotor es bipolar con una bobina conectada por medio de anillos colectores y escobillas a una fuente de c.a. monofásica.

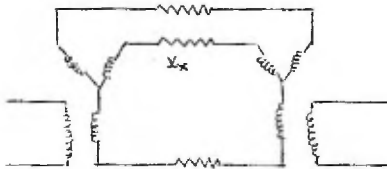


Fig. 2.44a Circuito de un sistema selsyn de c.c.

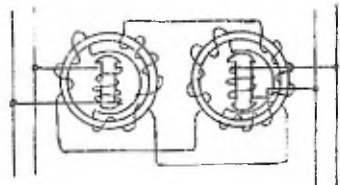


Fig. 2.44b Circuito de un sistema selsyn de c.a.

En éste sistema, una de las máquinas funciona como generador ó transmisor, y la otra como motor ó receptor. Cuando el circuito de excitación del rotor está conectado, el campo de c.a. de cada rotor induce voltajes en el devanado trifásico del estator que lo rodea. Los tres voltajes inducidos en estas fases son de magnitud desigual y están determinados por la posición del campo del rotor. Cuando los dos rotors están en posición tal que se correspondan exactamente, los

voltajes que se inducen en el estator del transmisor son iguales y opuestos a los inducidos en el estator del receptor; esto es, están equilibrados de modo que no circula corriente por ninguno de los devanados de ambos estatores; sin embargo si se mueve el rotor del transmisor a partir de su posición anterior, los voltajes quedan desequilibrados, pasa corriente en los devanados del inducido y se crea un par de giro de ambos rotores. Como el rotor del transmisor se mantiene en su posición, el rotor del receptor se mueve sometido al par de giro creado hasta que ocupa una posición correspondiente a la nueva posición del transmisor.

**Transductores.** Es un dispositivo que transforma la señal corregida por el sensor en otra forma adaptada al sistema del control que se va a usar; por ejemplo la mayoría de los sistemas automáticos de control eléctrico necesitan una tensión de señal para llenar su cometido de control. Ahora bien, si un sensor determinado produce una corriente de señal, se puede hacer pasar ésta corriente por una resistencia fija, como se muestra en la fig. 2.45a, para proporcionar la tensión variable deseada  $e_1$ .

Una vez más, un termómetro de resistencia (níquel-manganina), puede ser conectado a un puente de Wheatstone como en la fig. 2.45b. La variación de temperatura apreciada, hará variar la resistencia de la bobina de níquel X, y el

desequilibrio resultante del puente desarrollará un voltaje  $e_2$ . Un sensor que mide desplazamiento mecánico puede actuar un contacto móvil P a lo largo de un potenciómetro CD y producir una tensión de salida variable  $e_3$  (fig. c), por estos u otros medios, el transductor convierte varias señales en una forma usual, además transforma la salida del amplificador para corregir errores.

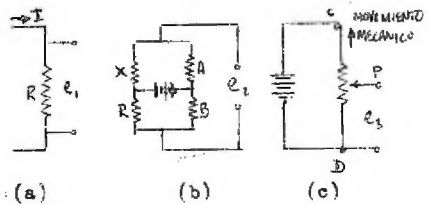


Fig. 2.45 Circuitos simples de transductores.

## TEORIA GENERAL DEL CONTROL AUTOMATICO.

Se ha cubierto en capítulos anteriores, una introducción previa de los conceptos más importantes para una mejor comprensión del control automático, de tal forma que el presente capítulo tiene como finalidad el desarrollo de la teoría en forma general, seguido de su manipulación en forma eléctrica.

**Formas de Control Automático.** Si el controlador interpreta los cambios de la variable y produce una acción correctiva para mantener el valor deseado en el proceso, a esa forma de control mediante la acción correctiva se le llama forma de control y son principalmente:

Des posiciones.

Flotante de una sola velocidad.

Flotante de velocidad proporcional.

Proporcional.

Proporcional con reajuste (reset).

Proporcional con reajuste y con acción derivativa (rate action).

todos éstos tipos de control pueden operar hidráulica ó mecánicamente, neumática y eléctricamente.

**Formas de Dos Posiciones.** Debido a su simplicidad, éste tipo de control es bastante popular, su acción es esencialmente cíclica aunque en condiciones casi ideales, la magnitud de la variación de la variable controlada, puede ser extremadamente pequeña. Se puede considerar que siempre hay una diferencial en éste tipo de control.

Una acción de dos posiciones es aquella en la cual el elemento final de control se mueve de una de las dos posiciones fijas a la otra, para el mismo

valor de la variable controlada. En la fig. 3.1 se ilustra claramente este tipo de control cuando se emplea una válvula para controlar el valor de temperatura ya sea abriendo o cerrandola instantáneamente, donde no hay retrasos en el proceso y teóricamente son condiciones ideales porque las oscilaciones tienden a disminuir en amplitud y a aumentar en frecuencia hasta llegar a cero amplitud y frecuencia infinita.

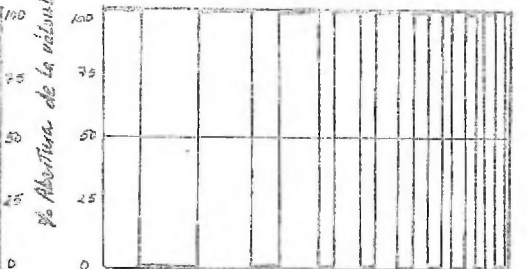
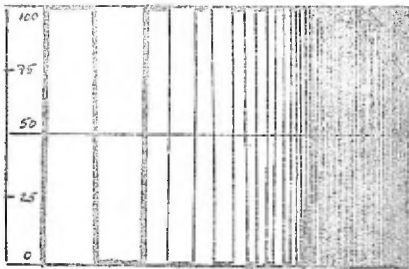
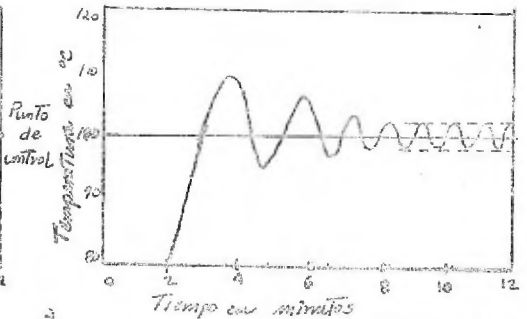
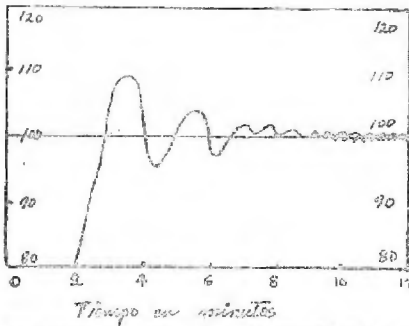


Fig 3.1 Control ideal de dos posiciones.

Fig. 3.2 Control real de dos posiciones.

En la práctica no se puede tener un controlador en esas condiciones condiciones ideales. Las fricciones, los retardos en la medición y la transmisión de la señal, hacen imposible que un control perfecto se construya, por lo tanto, el comportamiento más eficiente de un controlador automático de dos posiciones, es el señalado en la fig.3.2, observando una zona muerta en la cual se



opera el controlador. Para que la válvula cierre ó abra, la variable debe cruzar por encima ó por debajo de la zona muerta.

Es de uso común el empleo de controladores de dos posiciones con zona diferencial, en donde la variable debe pasar a través de ésta zona antes de que ocurra un cambio de posición del elemento final de control. Esta zona puede tener un valor fijo para cualquier posición en la escala ó bien, puede variarse dentro de ciertos límites determinados por el punto de ajuste (fig. 3.4).

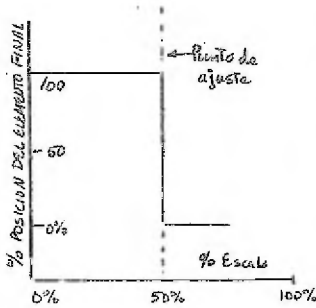


Fig. 3.3 Acción de -  
dos posiciones.

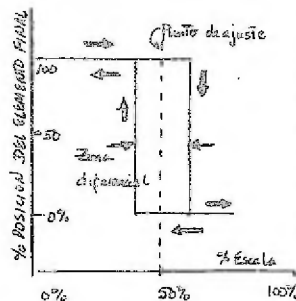


Fig. 3.4 Acción de dos  
posiciones con zona -  
diferencial.

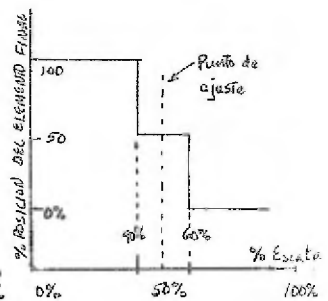


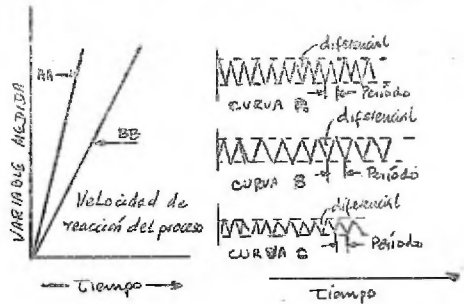
Fig. 3.5 Acción de tres  
posiciones.

Un control múltiple de tres posiciones es mostrado en la fig. 3.5 para el elemento final de control, que bien pudiera ser una válvula en la que a valores de 0 a 40% de la escala estuviera 100% abierta; para valores entre 40 y 60% de la escala, el elemento final está colocado al 50%, y entre 60 y 100% de la escala está totalmente cerrada la válvula ó elemento final de control.

Considerando un caso ideal aplicado a un proceso sin autoregulación, en el que el controlador no tiene atrasos, y suponamos que se controla el nivel de un líquido en un tanque abierto que recibe agua por su parte superior, hasta

alcanzar el límite superior de una diferencial, para que, en éste instante la válvula que admite agua se cierre. El nivel empieza a bajar a velocidad constante hasta llegar al límite inferior de la diferencial mostrada en la fig.3.6 y empezando nuevamente el ciclo para la curva A entre los límites de la diferencial mostrada en la curva AA, el periodo de ciclo es comparativamente pequeño. Si la capacidad aumenta al doble de tal manera que la velocidad de cambio del nivel sea la mitad de su valor inicial, como se ve en la curva BB; el periodo del ciclo es doblado como se aprecia en la curva B. La amplitud de ciclo permanece constante puesto que es numéricamente igual a la anchura de la diferencial; al reducir la diferencial a la mitad, el periodo y la amplitud del ciclo son también reducidos a la mitad como se aprecia en la fig.3.6 curva C.

Fig 3.6 Efecto de la velocidad de reacción del proceso en el control de dos posiciones.

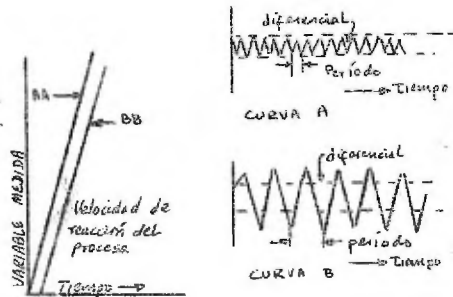


Se supone que la velocidad de reacción del proceso es la misma cuando aumenta ó disminuye la variable controlada. En muchos procesos ésta velocidad varía y el ciclo se vuelve desigual; esto no altera la acción de la diferencial, afecta solo al ciclo de la variable controlada, entonces idealmente la amplitud doble del ciclo es igual a la anchura de la diferencial, y el periodo es inversamente proporcional a la velocidad de reacción.

Supongamos ahora que el proceso ó el sistema de control tiene un tiempo muerto como el mostrado en la fig.3.7 de la curva BB de velocidad de reacción del proceso comparándola con la curva AA. Con un control de dos posiciones, el

el ciclo de la variable controlada es más ancho que la diferencial, como se ve en la curva B, puesto que existe tiempo muerto, la variable controlada continúa cambiando hasta que el período de tiempo muerto ha terminado y la acción correctiva se vuelve efectiva. Si el sistema tiene un tiempo muerto apreciable, la amplitud del ciclo es proporcional a la velocidad de reacción del proceso, puesto que mayor sea la velocidad de reacción, habrá una mayor desviación antes de que la variable controlada pueda volver al punto de control.

Fig. 3.7 Efecto del tiempo muerto en el control de dos posiciones.

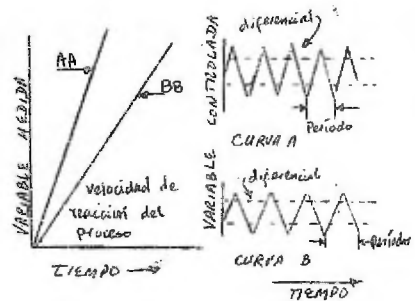


La amplitud del ciclo es también directamente proporcional a la duración del tiempo muerto y a la amplitud de la diferencial del controlador. El período de ciclo cuando hay tiempo muerto, es inversamente proporcional a la velocidad de reacción del proceso, directamente proporcional a la amplitud de la diferencial y a la duración del tiempo muerto.

Cuando hay tiempo muerto, la capacidad del proceso y la velocidad de reacción del mismo, tiene gran influencia en la amplitud del ciclo. En la fig. 3.8 se ilustran dos sistemas controlados teniendo el mismo tiempo muerto pero diferentes velocidades de reacción. Si empleamos un control de dos posiciones con diferencial en el proceso que tiene una mayor velocidad de reacción (curva AA), la amplitud doble del ciclo es de 1.7 unidades; si reducimos la velocidad de reacción a la mitad (curva BB) la amplitud doble del ciclo es reducida a una unidad.

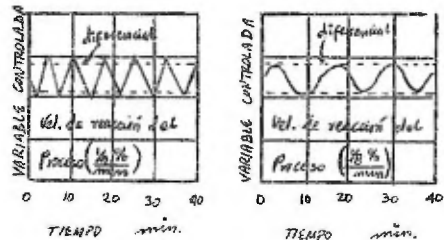
La velocidad de reacción del proceso depende no solo de la velocidad del proceso, sino también de la cantidad de energía proporcionada por el elemento final de control. Por ejemplo el flujo de un combustible proporcionado por una válvula de control se reduce ajustando los límites de apertura alto y bajo, la velocidad de reacción es también reducida al igual que la amplitud del ciclo.

Fig. 3.8 Efecto de la velocidad de reacción del proceso en el control de dos posiciones cuando hay tiempo muerto.



Heblamos anteriormente que en la práctica existen atrasos en la transmisión introducido por atrasos del medidor y controlador para la forma de dos posiciones, máxime que se usa mucho en procesos térmicos, en tales circunstancias

Fig. 3.9 Efecto de la velocidad de reacción del proceso para 1/4 y un 1/3 % por minuto, en el control de dos posiciones con atraso en la transmisión.



que tiene una gran influencia en la amplitud y período de ciclo ilustrada en la Fig. 3.9 .

Nótese que el proceso con velocidad más lenta, la variable se mantiene más cerca a la diferencial, y el período aumenta, además estos atrasos redondean

los picos de la onda variable controlada pudiendo aparecer como onda senoidal.

Variando las condiciones de carga del proceso, el ciclo adquiere una apariencia asimétrica cuando se aplica un control de dos posiciones a un sistema que tiene atrasos en la transmisión. En la fig. 3.10 se ve que la magnitud promedio de la variable controlada debe ser menor cuando la demanda es alta; la variable se separa mucho de la diferencial cuando hay un cambio de carga debido que se necesita una cantidad para el cambio de la demanda. A menudo un proceso tiene más de una capacidad, que unidas al atraso de medición y control, provocan tal atraso que la acción del control se vuelve inestable, causando una mayor amplitud del ciclo.

Las conclusiones que se deducen del período del ciclo.

- 1.- Aumenta con una velocidad de reacción menor.
- 2.- Aumenta con los atrasos en la transmisión.
- 3.- Aumenta con el tiempo muerto.
- 4.- Aumenta con la diferencial del controlador .

De la amplitud del ciclo:

- 1.- Aumenta con una velocidad de reacción mayor.
- 2.- Aumenta con atrasos en la transmisión .
- 3.- Aumenta con el tiempo muerto.
- 4.- Aumenta con la diferencial del controlador.

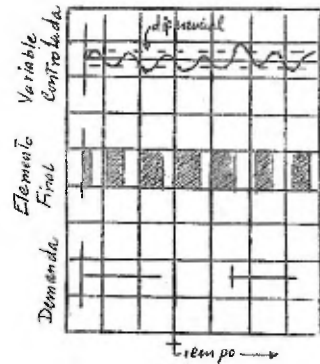


Fig. 3.10 Efecto del cambio de carga en el control de dos posiciones.

Es obvio que existen limitaciones en la aplicación del control de dos po

siones. Asumiendo que hay atrasos de transmisión y controlador no siendo despreciables, como raras veces sucede en el control de temperatura, el proceso debe poseer ciertas características especiales, siendo la más importante el tener el ciclo con amplitud pequeña al igual que el tiempo muerto ( un proceso con alta velocidad de reacción, tiene un tiempo muerto casi cero ).

En resumen, el control de dos posiciones es satisfactorio cuando:

- 1.- Los atrasos de transmisión y tiempo muerto son despreciables.
- 2.- La velocidad de reacción del proceso es lenta.
- 3.- Los atrasos de medición y control son pequeños.
- 4.- Los cambios de carga no son grandes o frecuentes.

Los más importantes para un control de dos posiciones es la reacción inmediata del proceso y del control.

**Control Flotante de una y varias velocidades.** Para esta forma de control el elemento final se mueve gradualmente abriendo o cerrando, flotando en una posición parcialmente abierta, aunque dependerá de que si la variable a controlar está arriba o abajo del punto de control. Tres tipos principales de control existen: Flotante de una velocidad; Flotante de una velocidad con zona neutral; Flotante con varias velocidades.

El control flotante de una velocidad, no reconoce la velocidad o magnitud de la desviación y reacciona solamente en el tiempo de la desviación, su velocidad es constante y el equipo empleado puede ser el mismo al de las posiciones.

El control flotante de una velocidad con zona neutra opera de igual for-

ma, con excepción de que la zona neutra evita la ida y vuelta con demasiada frecuencia del motor. Una de las aplicaciones es el de regular la corriente eléctrica para controlar un horno calentado eléctricamente.

El control flotante de varias velocidades es empleado en el elemento final de control para ajustar al punto deseado con valores diferentes de velocidad, si ésta variable esta cerca o lejos al punto de control. Este tipo reconoce tiempo y magnitud de la desviación, es generalmente eléctrico moviendo a válvulas motorizadas reversibles. La alta velocidad es la máxima del motor y para bajas velocidades se efectúan por medio de interruptores eléctricos que dan impulsos al motor en fracciones de ciclo fijo, quedando desconectados cuando se emplean para altas velocidades.

La autoregulación es aplicable en forma general para todo tipo de control flotante para estabilizar la variable en una zona muerta y evitar la frecuencia. La velocidad de reacción del proceso debe ser tan grande como sea posible, lograndose bien en pequeñas capacidades, donde los cambios graduales

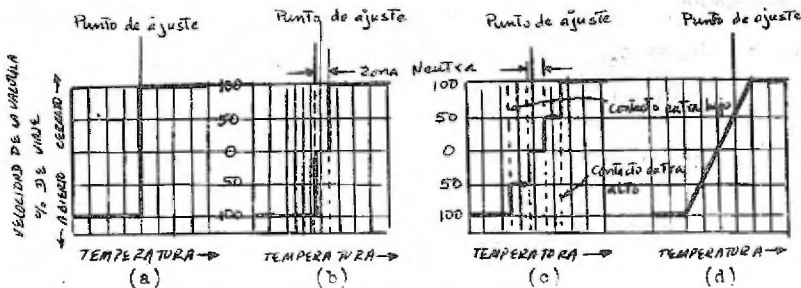


Fig. 3.11 Relación entre el % de abertura de una válvula y variable controlada en distintas formas de control flotante; (a) Una sola velocidad; (b) Una sola velocidad con zona muerta; (c) Multivelocidad; (d) Velocidad proporcional.

de carga son contrarrestadas gradualmente por pequeños movimientos de la válvulas .

No es aconsejado utilizar la zona neutra cuando existen atrasos de transmisión y tiempo muerto, ya que provocan una desviación excesiva con gran amplitud de ciclo. Para pequeñas velocidades de reacción del proceso el período de ciclo es demasiado grande.

El control flotante de una velocidad se aplica cuando:

- 1.- Los atrasos de transmisión y tiempo muerto son pequeños.
- 2.- La velocidad de reacción del proceso es grande.
- 3.- La autoregulación de proceso es grande.
- 4.- El atraso de medición es pequeña.
- 5.- Los cambios de carga son lentos.

Cuando la carga sufre cambios rápidamente, el control flotante de velocidad múltiple se emplea para limitar la desviación corrigiéndola más rápida y tendiendo a reducir la frecuencia.

Control Flotante de Velocidad Proporcional. Para este control, el elemento final tal como una válvula, se mueve a una velocidad que depende de la magnitud de la desviación, así por ejemplo se la variable aumenta en cierta cantidad sobre el punto de control, esta válvula empieza a cerrarse a velocidad constante; si la velocidad se dobla, la válvula se mueve al doble de velocidad original.

Aunque éste tipo de control puede operar sola, muy a menudo se combina con el control proporcional y se conoce entonces como reajuste. El control flotante de velocidad proporcional se obtiene en forma general por medio hidráulico, tipo pistón, para el cual la alimentación de aceite al cilindro se



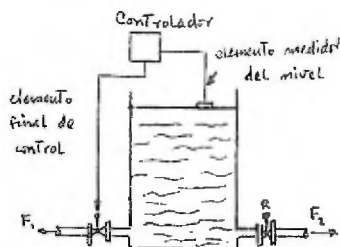
ajusta en proporción a la magnitud de la variable medida, aunque algunas veces un motor eléctrico operado por medio de un interruptor para que la potencia se proporcione en fracciones de un ciclo. Tambien el empleo del control neumático es usado en este tipo de control.

Considerese el caso ideal del control flotante de velocidad proporcional aplicado a un proceso de una sola capacidad operado hidráulicamente como se muestra en la fig. 3.12 . Asumimos una acción lineal en el proceso y para la válvula sin atraso alguno, la ecuación del proceso es :

$$C \frac{d\theta}{dt} = (F_1 - F_2) \quad \dots \text{ ( ec. 3.1 )}$$

- Donde :
- C - Es la capacidad de proceso
  - $\theta$  - Es el nivel en el tanque
  - F - Es el flujo de entrada
  - F - Es el flujo de salida
  - t - Es el tiempo.

Fig. 3.12 Proceso de una capacidad con control automático.



Con autorrealización en el proceso, el flujo de salida depende del nivel

$$F_2 = \frac{\theta}{R} \quad \text{sustituyendolo la última relación en (3.1) :}$$

$$C \frac{d\theta}{dt} + \frac{1}{R} \theta = F_1 \quad \dots \text{ (3.2) en donde R es la resistencia de la válvula de salida.}$$

La relación para el control flotante de velocidad proporcional es:

$$- \frac{dF_2}{dt} = f (\theta - C_p) \quad \text{donde f es la velocidad flotante del controlador}$$

$C_p$  es el punto de control

Diferenciando la ecuación (3.2) tenemos:

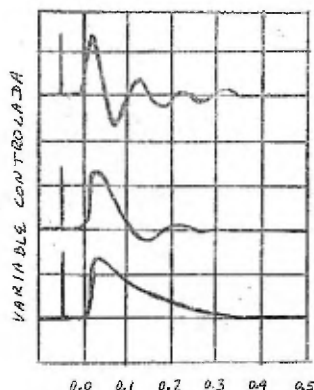
$$C \frac{d^2 \theta}{dt^2} + \frac{1}{R} \frac{d\theta}{dt} = \frac{dF_2}{dt} \quad \dots \quad (\text{ec. 3.4})$$

Sustituyendo (3) en (4) :

$$(\theta - \theta_0)'' + \frac{1}{RC} (\theta - \theta_0)' + \frac{f}{C} (\theta - \theta_0) = 0 \quad \dots \quad (\text{ec. 3.5})$$

La ecuación anterior (3.5) representa la acción de un proceso a una sola capacidad con un control flotante de velocidad proporcional en un cambio de carga. ( flujo de salida en éste ejemplo ).

Fig. 3.13 Ajustes de velocidad flotante para el control flotante de velocidad proporcional con un cambio de carga.



Se puede investigar la naturaleza de ésta acción sin resolver la ecuación directamente. La magnitud de los coeficientes de la ec. determinan cuando la dinámica es oscilatoria o estable. Las raíces imaginarias se determinan de :  $b^2 - 4ac = 0$  donde a, b, y c son los coeficientes de cada término en la ecuación anterior.

La estabilidad del sistema controlado es excesiva cuando  $f < 1/4RC$  si la velocidad flotante es menor que las constantes del proceso, la acción

del proceso es muy lenta, como se aprecia en al fig. 3.13.

La acción es críticamente amortiguada cuando :

$$f = \frac{1}{4 R C}$$

La variable entonces se aproxima a un nuevo balance sin salirse demasiado y sin una estabilidad excesiva.

La acción es oscilatoria pero amortiguada cuando :

$$f > \frac{1}{4 R C}$$

Entonces la variable sobre pasa un poco y oscila ligeramente antes de alcanzar el balance mostrado en la fig. 3.13 .

La acción del control se estabiliza seleccionando la debida velocidad flotante , demasiada velocidad produce un ciclaje excesivo antes de estabilizarse. Una baja velocidad hace sobre pasar a la variable o produce una acción del control lenta.

Notese que el control flotante de velocidad proporcional no necesita zona neutra para mantener una acción estable, debiendose a que la velocidad de operación de la válvula depende de la desviación de la variable. Otra característica importante es que la variable vuelve al punto de control para cargas diferentes.

Si el proceso no tiene autorregulación, la salida de flujo es constante y la ec. queda :

$$(e - c)'' + \frac{f}{C} (e - c) = 0 \dots\dots (ec. 3.6)$$

Esta última ec. tiene movimiento armónico simple, con amplitud constante de la variable, por lo que se necesita autorregulación para mantener la acción estable.

A medida que la velocidad de reacción del proceso se vuelve mayor, el control flotante de velocidad proporcional es más efectiva e indicada por la ec. críticamente amortiguada, donde la velocidad flotante aumenta cuando la capacidad del proceso disminuye y la velocidad de reacción ( $1/C$ ) aumenta.

El atraso o un tiempo muerto apreciable produce un aumento del período y una disminución de la velocidad flotante, y solo una velocidad de reacción grande o instantánea tenderá a vencer esas dificultades, haciendo notar que el control flotante de velocidad proporcional no corrige inmediatamente los cambios repentinos de carga aunque los controlen posteriormente.

Este tipo de control dará buen resultado cuando :

- 1.- Los atrasos en la transmisión y tiempo muerto son pequeños.
- 2.- La velocidad de reacción es grande.
- 3.- El proceso tenga autorregulación.
- 4.- Los atrasos en la medición sean pequeños.
- 5.- El atraso del controlador sea pequeño.

Este modo de control puede contrarrestar los cambios de carga; cuando la desviación de la variable es grande, la acción correctiva es grande, por consiguiente en este tipo de control se mantiene una desviación más pequeña en los cambios de carga que el flotante de una sola velocidad.

**Control Proporcional.** Definiremos al control proporcional o modulante cuando a cada valor de la variable controlada, dentro de una zona llamada banda proporcional corresponde una posición proporcional del elemento final de control.

Banda proporcional es un rango de valores expresada en porcentaje de la es

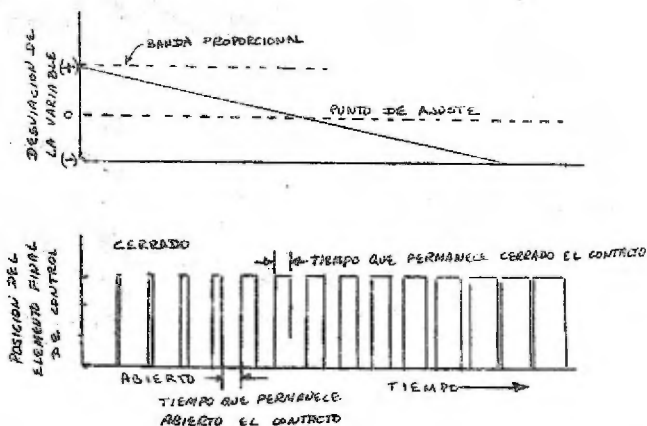
cula , a través de la cual se debe mover la variable controlada para que el elemento final de control pase de una posición totalmente abierta a otra totalmente cerrada, o viceversa. La selección de la banda proporcional depende del tipo de proceso que se tenga y de la calidad del control que se necesite .

Cuando los cambios de carga son frecuentes, se debe usar una banda proporcional ancha, donde tenemos mucha desviación pero pocas oscilaciones; de manera similar para pocos cambios de carga se admite tener desviaciones pequeñas con muchas oscilaciones. En la mayoría de los controles automáticos la banda proporcional se ajusta precisamente al valor más adecuado de un proceso en particular y es como sigue: Ocasionalmente un cambio de carga en el proceso y notamos la oscilación y la desviación, el cambio de carga lo podemos efectuar artificialmente moviendo un poco el índice de control a uno y otro lado, empezamos después con una banda proporcional ancha, que va disminuyendo en incrementos notándose el tipo de control obtenido. Generalmente es reducida la banda proporcional hasta obtener oscilaciones de la misma amplitud y frecuencia (banda proporcional crítica), aumentándose entonces un poco más la banda proporcional.

Se debe tener una desviación que corregir mediante el control automático de acción proporcional, pero sin tratar de llegar al punto original de ajuste ya que si se llega a éste punto, la corrección desaparecería teniendo el mismo valor de la variable controlada. Existe un caso en que teniendo control proporcional no hay desviación de la variable, siendo ése el que se llega después de varios cambios de carga a las condiciones iniciales en que se encontraba el proceso, es decir, las desviaciones fuerón iguales en magnitud pero opuestas.

El control proporcional de tiempo es aquel en la cual hay una relación lineal entre la posición de la variable dentro de la banda proporcional y el tiempo en que el elemento final de control está totalmente abierto (o cerrado). Esta relación lineal se guarda únicamente dentro de la banda proporcional. Para esta forma de control, es una equivalencia de una combinación de una acción proporcional con una de dos posiciones operando en una forma periódica.

Fig. 3.14 Control de tiempo proporcional.



El ciclo o sea la suma del tiempo en que el control permanece totalmente cerrado, es predeterminado y fijo (aunque puede ajustarse para diferentes valores). El cambio de la posición abierta a la cerrada se supone instantáneo. Este tipo de acción es mostrada en la fig. 3.14.

Volviendo nuevamente a un control proporcional, el rango a través del cual se puede operar el elemento final de control puede ser menor de 100% de su movimiento total. Esto depende de los valores de la banda proporcional y de la posición de la banda en la escala. Cuando el valor de la banda se aumenta a más de 100%, el desplazamiento que puede sufrir el elemento final de control es menor que el de 100% del desplazamiento total para cualquier posición del punto de ajuste.

Notese en la fig. 3.16 la relación entre variable controlada y posición de la válvula para diferentes bandas proporcionales. Así cuando su valor es mayor del 100 % es imposible cerrar o abrir la válvula completamente, aún cuando la variable controlada se sitúe en cero o en un 100 % de la escala del controlador.

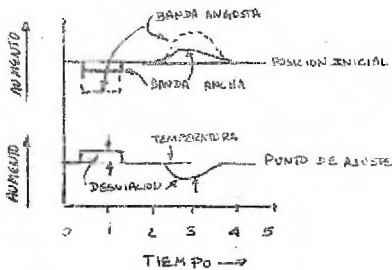


Fig. 3.15 Relación entre posición de la válvula y variable controlada bajo el modo de posición proporcional a cambios repentinos y estables.

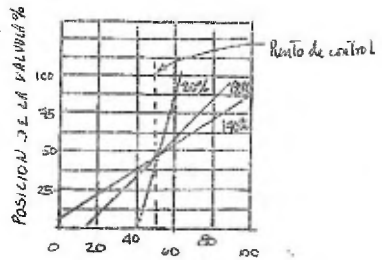


Fig. 3.16 Posición de la pluma en la escala % - efecto de la banda proporcional.

Notese en la fig. 3.16 la relación entre variable controlada y posición de la válvula para diferentes bandas proporcionales, así cuando su valor es mayor del 100 % es imposible cerrar o abrir la válvula completamente, aún cuando la variable controlada se sitúe en cero o en un 100 % de la escala del controlador.

El reajuste (reset) manual se usa para variar la abertura de la válvula cuando la variable controlada está en el punto de control. Para la fig. 3.16, la válvula está en un 50 % abierta cuando la variable está en el punto de control. Esto puede variar y puede ser necesario mantener cualquier abertura en la válvula para un valor particular del punto de control.

En la fig. 3.17 es mostrado como, ajustando el reset manual, se corre la banda proporcional a través de la escala del controlador para obtener 0.38 y 73 % de abertura de la válvula cuando la pluma está en el punto de control.

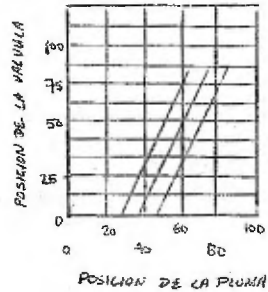


Fig. 3.17 Efecto del reajuste manual.

La ec. del control proporcional puede ser desarrollada a partir de las figuras 3.15 y 3.17 expresada en dos formas : Una que relacione la posición de la válvula y la variable controlada y la otra que relacione la velocidad de movimiento de la válvula con la velocidad de cambio de la variable controlada. Consideremos el primer caso, en el que la posición de la válvula está dada y se supone que tenemos un controlador de escala lineal por :

$$P = \frac{1}{s} (\theta - C) + M \quad \dots \quad (\text{ec. 3.7})$$

En donde:

- P = Posición de la válvula en % dividido por 100
- s = Banda proporcional en % dividido por 100
- M = Constante o valor de reajuste manual (reset).
- θ = Desviación de la variable en por ciento dividido por 100
- C = Punto de control en % dividido por 100

Para el caso de escalas no lineales, como lo son los termómetros actuados por vapor, pirómetros de radiación y medidores de flujo de presión diferencial la ec. anterior se debe corregir. Considerando que la pluma está en el punto de control, entonces  $(\theta - C) = 0$ ; pero si la válvula está en el 50 % de su carrera, M es igual a 0.5 para el reajuste manual y se tiene que la posición de la válvula será :

$$P = 1/2 (\theta - C) + 0.5$$



Ahora supongamos un valor de 0.20 de banda proporcional  $s$ , teniendo la pluma una desviación del 7% del punto de control, sustituyendo tenemos :

$$- P = \frac{1}{0.20} \times 0.07 = 0.35$$

$$- P = 0.85$$

Para esas condiciones la válvula se movería de 50 a 85 %.

La segunda ec. de control proporcional, que relacione la velocidad de movimiento de la válvula respecto a la velocidad de cambio de la temperatura como variable controlada, es diferenciando la ecuación anteriormente expuesta, así pues nos dará :

$$- \frac{dP}{dt} = \frac{1}{s} \frac{d\theta}{dt} \dots\dots(\text{ec. 3.8})$$

Resolviendo el ejemplo hecho con anterioridad, para una banda de 20% con una velocidad de cambio en la temperatura de 7% por minuto, obtendremos:

$$- \frac{dP}{dt} = \frac{1}{0.20} \times 0.07 = 0.35$$

Entonces 35% por minuto es la velocidad del movimiento, y el tiempo total a lo largo de la escala sería de 0.26 minutos.

Aplicando la ec. de un proceso a una sola capacidad :

$$C \frac{d\theta}{dt} + \frac{1}{s} \theta = F_i \dots\dots (\text{ec. 3.2})$$

Combinando la ec. del proceso con la del controlador, cuando la posición de la válvula está en relación directa con el flujo de entrada y reorganizando:

$$(O - C)' + \left( \frac{1}{s C} + \frac{1}{R C} \right) (O - C) = - \frac{C + R M}{R C} \dots (ec. 3.9)$$

Esta ec. (3.9) describe la acción del sistema controlado, y sin resolverlo directamente se pueden determinar algunas características del control proporcional. Cuando la variable se estabiliza, la velocidad de cambio es cero y :

$$(O - C) = - \frac{C + R M}{R C} \dots (ec. 3.10)$$

El valor físcal del elemento final de control depende no solo de la carga (proporcional a R), sino también del valor de la banda proporcional. Cuando hay un cambio de carga, la variable se desvía permanentemente del punto de control y a mayor banda proporcional, hay mayor desviación que se puede corregir variando el valor de ajuste manual (reset), puesto que de acuerdo a la última ec. cuando  $(O - C) = 0$ , M debe ser igual a  $\frac{C}{R}$ .

El término  $\frac{1}{R C}$  representa autorregulación; el término  $\frac{1}{s C}$  la acción del control proporcional; si la capacidad grande y apropiada para esta forma de control debiéndose hacerse pequeña la banda proporcional si se mantiene el mismo valor absoluto de  $s C$ , u la acción correctiva es rápida con límites de control estrictos.

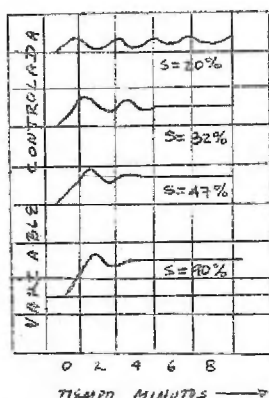


Fig. 3.18 Ajustes de la banda proporcional para el control proporcional con un cambio de carga.

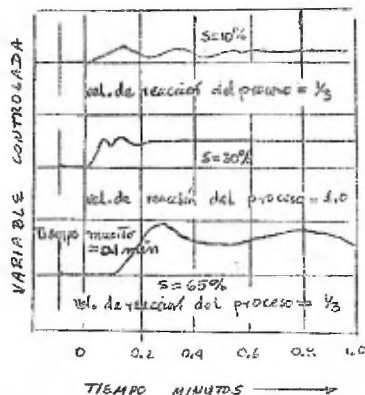


Fig. 3.19 Efecto de la velocidad de reacción del proceso y del tiempo muerto en el control proporcional.

La velocidad de reacción del proceso, junto con los atrasos de transmisión y tiempo muerto, determinan el valor de la banda proporcional que se muestra en la fig. 3.19, donde se puede tener la menor banda proporcional con velocidad de reacción lenta y pequeños atrasos en transmisión y tiempo muerto, así, la desviación sostenida causada por el cambio de carga es pequeña.

Las características del control proporcional son :

- 1.- Una velocidad de reacción lenta permite una banda proporcional ancha.
- 2.- Los atrasos de transmisión y tiempo muerto necesitan banda proporcional ancha.
- 3.- Un cambio de carga grande causa una desviación sostenida de la variable.

Si el proceso tiene gran capacidad, con atrasos de transmisión y tiempo

muerto pequeños, la banda proporcional apropiada será pequeña, 10% ó menor -  
disminuyendo la importancia del cambio de carga.

El control proporcional es aplicable cuando:

- 1.- No hay cambios de carga rápidos ni grandes ( moderados ).
- 2.- No hay grandes atrasos de transmisión y tiempo muerto.
- 3.- La velocidad de reacción del proceso es lenta.

Operación del Reajuste ( Reset ). Esta forma de operación es combinada ap  
pleando al control proporcional para ajustar la banda proporcional y al control  
flotante de velocidad proporcional, para ajustar la velocidad del reset y vol-  
viendo la variable al punto de control usado; ésta operación la podemos ver en  
en la fig. 3.20, así como en la fig. 3.21 y 3.22.

La velocidad del reajuste se hace comparando las veces que en una unidad  
de tiempo ( estimada con anterioridad, por ejem. min. ); la acción debida al re-  
ajuste, iguala la acción debida al control proporcional, dandose a éste valor -  
repeticiones por minuto. Supongase que a una desviación dada, una válvula se -  
movió 2 cms. en un minuto, entonces la velocidad de reajuste es de 15 veces por  
minuto. Para determinar el número de repeticiones por minuto que deba usarse en  
un proceso, se siguen los siguientes pasos:

1.- Con cero repeticiones por minuto se determina la banda proporcional con  
la cual se obtiene un tiempo de estabilización bastante corto.

2.- Se empieza a añadir reajuste en aumentos, empezando con pocas repeticio-  
nes por minuto. Entre cada aumento debe crearse un cambio de carga, moviendo el  
punto de ajuste.

3.- Cuando se note que empieza a crearse una inestabilidad en el proceso, -  
pongase el número de repeticiones por minuto a un valor un poco más bajo.

Es preferible tener una velocidad de reajuste lenta, a tener una velocidad demasiado rápida, ya que éste último puede alterar seriamente la estabilidad del proceso. Desgraciadamente a menudo se interpreta una inestabilidad en el proceso como causada por una banda proporcional demasiado angosta y se procede

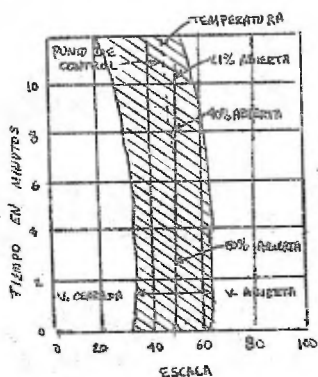


Fig. 3.20 Respuesta del - reajuste cuando varía la banda proporcional.

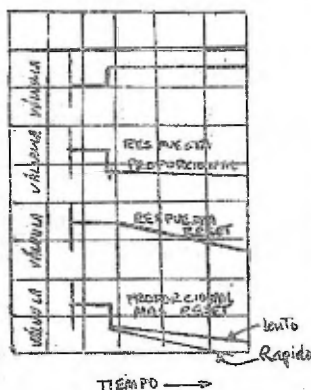


Fig. 3.21 Respuesta del - controlador proporcional con reajuste a cambio repentino.

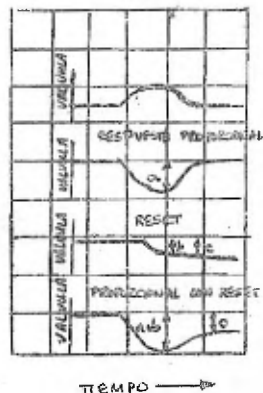
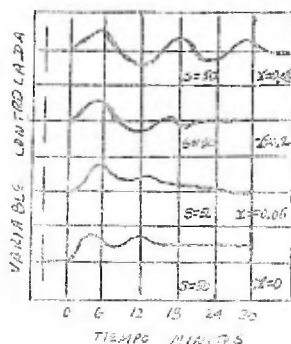


Fig. 3.22 Respuesta del controlador proporcional con reajuste a cambio de carga.

a ensanchar la banda. En forma general cuando se ha logrado esto, junto a la velocidad de reajuste para un proceso, no es necesario hacer un nuevo ajuste de valores, a menos que las características del proceso cambien considerablemente. Sin embargo si es necesario hacerlo, debe ajustarse tanto la banda proporcional así como la velocidad de reajuste.

Supongamos el uso del control proporcional con reset en un proceso con una velocidad de reacción y tiempo de transmisión moderados con tiempo muerto muy pequeño y existe un cambio de carga, como se ve en la fig. 3.23.

Fig. 3.03 Ajustes de la velocidad del reset para control proporcional con reset con un cambio de carga.

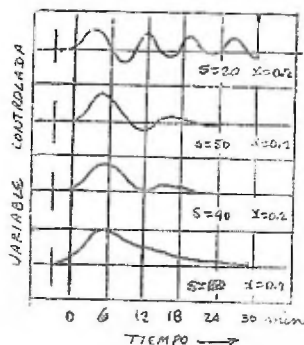


La banda proporcional tiene un valor constante para todas las curvas, así que, cuando la velocidad de reajuste  $r$  es cero, el control se lleva a cabo únicamente por la forma proporcional y la gráfica producida es típica de ésta forma de control.

Si la velocidad del reset tiene un valor pequeño ( $r = 0.06$ ), la vuelta de la variable al punto de control es lenta, pero después la oscilación sostenida se elimina, aunque la gráfica indica que debe hacerse más rápida. Para un valor de reset = 0.020 la corrección es rápida sin tener ciclojaje excesivo y el valor es el óptimo. Cuando la velocidad de reset = 0.60 se produce un ciclojaje excesivo antes de alcanzar un valor estable; en ocasiones cuando este valor sobrepasa el límite la variable oscila aumentando en amplitud y así continúa de forma indefinida. Notamos aquí que para período de oscilación grande es causado por alta velocidad del reset.

La banda proporcional tiene poca importancia en este tipo de control, ya que un cambio en la banda afecta proporcionalmente la velocidad de reset, si la banda se reduce a la mitad, la velocidad del reset aumenta al doble.

Fig. 3.24 Ajustes de la banda proporcional para control proporcional con reset con un cambio de carga.



Una banda amplia trae consigo un retorno gradual y lento de la variable al punto de control, aunque el valor de reset permanezca constante, como se aprecia en la fig. 3.24 .

Disminuyendo la banda proporcional, se consigue un retorno más rápido de la variable al punto de control. En éste ejemplo el valor óptimo es de 50 %. Para una banda pequeña existe un cicloaje, de tal manera que lleve mucho tiempo estabilizár la variable .

Una capacidad de proceso pequeña permite una mayor velocidad de reset cuando hay atrasos en la transmisión o tiempo muerto, ésto corresponde a una mayor velocidad flotante de velocidad proporcional, sin embargo, los atrasos en la transmisión necesitan una reducción de velocidad del reset para evitar cicloaje excesivo.

En la tabla siguiente veremos la influencia de las características del sistema controlado en el ajuste relativo a cada respuesta en un controlador proporcional con reset.

Características del proceso	s Banda proporcional	r velocidad de reajuste
N Pequeña D Grande	Moderada	Lenta
N Pequeña D Pequeña	Amplia	Rápida
N Grande D Grande	Ancha	Lenta
N Grande D Pequeña	Moderada	Rápida

N = Velocidad de reacción del proceso.

D = Atraso en la transmisión o tiempo muerto.

Tabla 3.1 características del proceso operadas bajo la acción del reajuste.

Concluyendo de lo anteriormente señalado tenemos que :

En control de procesos con pequeña capacidad sin atrasos la parte principal la efectúa el reset, aunque también es aplicable en procesos con atrasos pequeños de cualquier clase. En grandes capacidades un retrasos moderados se emplea el control proporcional, como se recuerda con anterioridad señalada.

La acción del reajuste automático presenta un serio inconveniente cuando se desea controlar automáticamente un proceso desde su principio, ya que puede causar grandes inestabilidades con oscilaciones prolongadas que, generalmente, no son aceptadas en procesos.

Supongamos un proceso que se inicie y la variable se encuentra lejos del punto de control una válvula se abre a cierta velocidad dada por los ajustes iniciales, con el fin de eliminar la desviación de la variable. Normalmente, al tiempo que tarda la válvula en moverse totalmente hacia la acción del reajuste automático, es menor que el tiempo que emplea la variable en llegar



al punto de ajuste, así que cuando dicha variable llega a éste punto, la válvula se encuentra totalmente cerrada (o abierta), empezando a moverse en dirección opuesta cuando la variable entra a la zona de la banda proporcional, entonces, la válvula empieza a abrir (o cerrar según el caso), pero debido a la capacidad del sistema y retraso en la medición, la variable continua desviándose del punto de ajuste hasta cambiar de sentido sobre pasando el punto de ajuste repitiéndose esta situación de oscilaciones prolongadas que provocan un control defectuoso.

Por este motivo, se recomienda que al empezar a controlar un proceso se haga sin la acción del reajuste automático, a no ser que se tenga una completa identificación del proceso a controlar, así las ventajas son la sig.

- a).- La acción proporcional estabilizará la variable cerca del punto del control sin oscilación.
- b).- La variable se estabilizan rápidamente, posiblemente en menos tiempo que el necesario en el control manual, ya que el controlador no comete errores ni pierde tiempo.
- c).- El operador evita seguir el registro de la variable dedicándose a otras labores. El operador únicamente tendrá que aplicar el reajuste automático de acuerdo a su experiencia mostrada como adecuada, cuando la variable se establece.

Cuando se supone que es la primera vez que se inicia el proceso, entonces se recomienda emplear un controlador manual, para que, posteriormente se determinen los ajustes de banda proporcional y reajuste automático. La fig. - 3.25 ilustra esta forma de control.

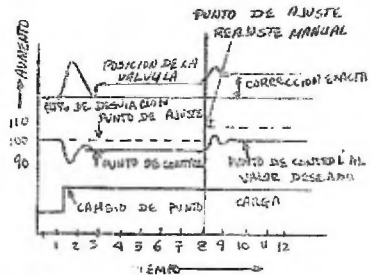
Los siguientes puntos se recomiendan al parar un proceso :

- 1) Muévase el punto de ajuste a una posición extrema que cierre la válvula

la de control.

- 2) Si la válvula es del tipo normalmente abierto, (aire para cerrar) es conveniente cerrar la válvula manual en la línea del agente de control para evitar que haya flujo de agente de control en caso de fallar el aire.

Fig. 3.25 Empleo del reajuste manual para corregir desviación de una variable provocada por un cambio de carga en una posición proporcional.



Al empezar nuevamente el proceso, se debe tener presente :

- 1).- Si el tiempo de paro ha sido corto con velocidad de reajuste lenta, ábrase el reajuste a su máxima velocidad con el fin de que la válvula se mueva en la dirección debida en poco tiempo, esperando unos minutos para que ésto suceda.
- 2).- Cerrar el reajuste hasta tener cero reajuste automático.
- 3).- Abrir la válvula de mano del agente de control.
- 4).- Ajustar el índice de control a su valor deseado.
- 5).- Después de que la variable se ha estabilizado, abrir el reajuste a su posición previamente establecida, para obtener buen control en condiciones de operación normales.

La ec. del controlador proporcional con reset es la suma de los dos respuetas individuales, como se notó en la Fig. 3.21. Asumiendo una ecuación lineal :

$$- P = \frac{I}{s} \int_0^t (\theta - C) dt + \frac{1}{s} (\theta - C) + K \dots \dots \text{(ec. 3.11)}$$

Donde :

P = Posición de la válvula en % dividido por 100 .

r = Velocidad de reajuste en número de veces por minuto.

s = Banda proporcional en % dividido por 100.

$\phi$  = Variable en % dividido por 100.

C = Punto de control en % dividido por 100 .

t = Tiempo en minutos .

K = Constante de integración, posición inicial de la válvula.

Suponiendo una desviación de la variable con valor constante e igual a 0.03, la ec. (3.11) queda : 
$$- P = \frac{0.03 r}{s} \int_0^t dt + \frac{0.03}{s} + K$$

Si la velocidad de reajuste es de 0.05 por minuto y la banda proporcional de 0.2, sustituyendo éstos valores tenemos la posición de la válvula en cualquier tiempo t. :

$$- P = \frac{0.03 \times 0.05}{0.20} t + \frac{0.03}{0.20} + K$$

$$- P = 0.0075 t + 0.15 + K$$

Al cabo de un minuto la posición de la válvula sería :  $- P = 0.1575$  ó sea 15.75% abierta, suponiendo que originalmente estaba cerrada completamente, de tal manera que  $K = 0$  .

Si deseamos expresar la ec. básica en forma de velocidad de movimiento de la válvula en lugar de la posición, la relación que se obtiene es por diferenciación :

$$-\frac{dP}{dt} = \frac{P}{s} (\phi - c) + \frac{1}{s} \frac{d\phi}{dt} \dots \text{(eq. 3.12)}$$

Sustituyendo los mismos valores del ejemplo anterior :

$$\frac{dP}{dt} = \frac{0.05}{0.20} \times 0.03 + 0 = 0.0075$$

Esto muestra que la válvula se movería por la sola acción del reset junto al de la banda proporcional. Así en el ejemplo, con una banda proporcional de 20 %, el movimiento de la válvula sería de 0.75 % de la carrera de la válvula por minuto.

Con una banda de 10 %, la velocidad del movimiento sería :

$$-\frac{dP}{dt} = \frac{0.05}{0.10} \times 0.03 = 0.015 \text{ ó } 1.5 \% \text{ por minuto.}$$

Entonces, si la banda proporcional es reducida a la mitad, la velocidad del reset se dobla, aunque el ajuste del reset no se cambia.

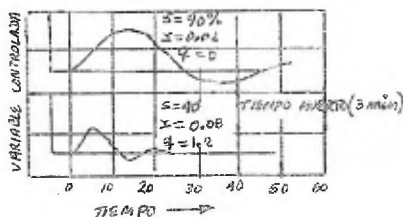
**Operación de la Acción Derivativa (Rate).** Esta forma de control, al igual que el proporcional con reajuste, son los únicos medios mediante los cuales se pueden controlar procesos con gran tiempo muerto o atrasos en la transmisión. Es recomendable emplear una banda proporcional que debe ser excepcionalmente ancha con reajuste lento para evitar un ciclo continuo. Cuando hay cambios de carga hay una desviación excesiva y se necesita mucho tiempo para volver al punto de control.

La fig. 3.24 muestra la aplicación del rate para contrarrestar el efecto

del tiempo que se aplica el control proporcional cuando se un reajuste y reducir una desviación máxima.

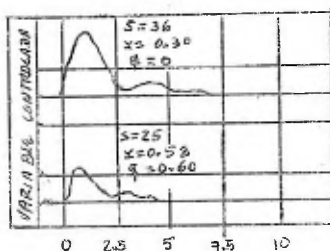
La mayor ventaja se obtiene al reducir la mitad, más o menos, el período de ciclo. La variable controlada vuelve al punto de control en la cuarta parte del tiempo requerido sin el rate, cuando la velocidad del reajuste se cuadruplica.

Fig. 3.26 Control proporcional con reset y control proporcional con rate cuando existen atrasos en la transmisión y tiempo muerto.



El más serio problema en los atrasos de transmisión es que la primera indicación de cambio en el proceso es pequeña en magnitud y se lleva a cabo a una velocidad lenta. Si el medio medidor tiene una zona muerta, se produce un tiempo muerto que es eliminado en el rate.

Fig. 3.27 Control proporcional con reajuste y control proporcional con rate cuando hay atraso en la transmisión sin tiempo muerto.



La fig. 3.27 muestra la acción del control proporcional con reajuste y con rate cuando hay atraso en la transmisión sin tiempo muerto. En él notamos que el período de ciclo se reduce a la cuarta parte y se estabiliza la variable más rápidamente. El rate es efectivo cuando hay atrasos, pero es más aplicable para combatir el tiempo muerto ya que es el único modo de hacerlo.

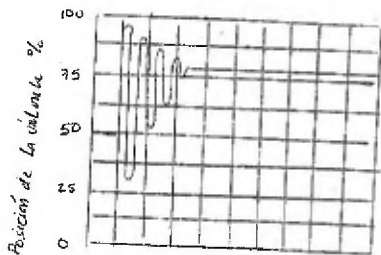
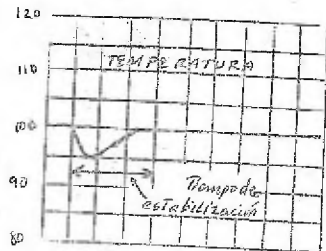
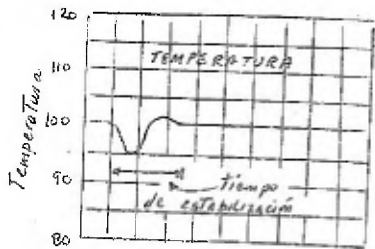


Fig 3.28 a.- Poca sobrecorrección



Fig 3.28 b.- Moderada sobrecorrección

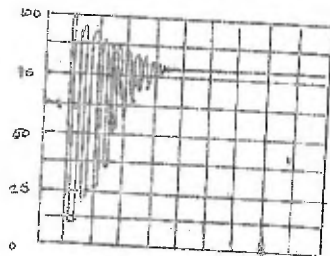


Fig 3.28 c.- Demasiada sobrecorrección.

Fig 3.28 Temperatura y posición de la válvula en un proceso con acción proporcional, ajuste automático y sobre corrección

Los ajustes del rate deben ser muy cuidadosos, ya que para un valor log  $\mu$  pueden ocasionar oscilaciones o poniéndose a un cambio rápido en la variable, ya sea que se acerque o aleje del punto de control. Cuando el tiempo de ajuste  $\mu$  es corto, se produce un ciclo largo provocado por una banda proporcional angosta y a un reajuste grande previamente satisfactorio con un rate determinado. Así tenemos una forma de identificar la causa de ciclo excesivo, el ciclo causado por el reajuste es largo con banda corta y para el rate aún más corta.

Es de interés notar que la forma rate tiene un gran efecto estabilizante en el control, pero no elimina las desviaciones indeseables características de la posición proporcional permitiendo usar una banda proporcional más angosta, lo cual de una forma indirecta reduce la desviación permanente.

Las unidades en que se mide la sobre-corrección son unidades de tiempo, ya que su función es de reducir el tiempo de estabilización de la variable. Para evitar las oscilaciones e inestabilidad hay que ajustar adecuadamente la banda proporcional y el reajuste automático en la forma anteriormente descrita para después aplicar correctamente la sobre corrección.

La fig. 3.28 muestra típicamente la acción proporcional, reajuste automático y sobre corrección momentánea empleando una banda proporcional y un reajuste moderado con lo cual el tiempo de estabilización se reduce sin que se produzcan oscilaciones.

El tiempo de sobre corrección es ilustrado en la fig. 3.29 para una variable que va aumentando a velocidad constante (pendiente constante), por lo cual se le cambia del punto de ajuste y se aplica una acción proporcional

mostrada en la fig. 3.29 b. para corregirlo se emplea un elemento final de control que se mueve a una velocidad constante.

Una acción combinada de la acción proporcional, más sobrecorrección se muestra en la línea 2 de la fig. 3.29 b en la cual el elemento final de control llega a cualquier posición, "M" minutos antes comparada con la acción proporcional en ese mismo punto.

En la fig. 3.30 se muestra la respuesta de un controlador con las últimas 3 acciones estudiadas mediante las curvas (b), (c) y (d), que son componentes de la curva (a) mostrando la posición del elemento final de control cuando ha sufrido un cambio de carga constante.

Es de notar que la variable vuelve al punto de ajuste debido a la acción del reajuste automático y que el elemento final de control tiene una posición diferente a la inicial y ésta es propo-

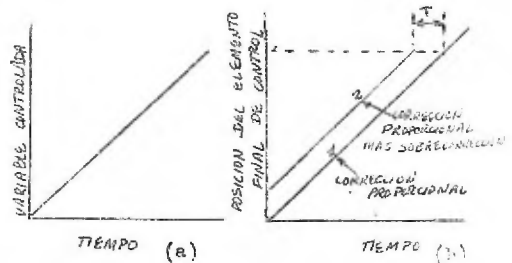


Fig. 3.29 - a      Fig. 3.29 - b  
Fig. 3.29 Tiempo de sobre corrección.

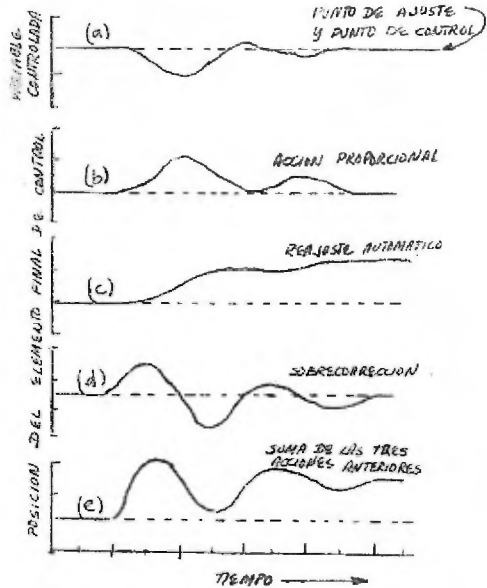


Fig. 3.30 Relación entre la variable controlada y el elemento final de control para cada una de las tres acciones.



cisamente lo que hace la variable, vuelva al punto de ajuste.

Como el rate es la respuesta del control con la cual la posición de la válvula puede ser proporcional a la velocidad de cambio de la desviación, entonces solo se necesita un término más en la ec. 3.11 para tener la relación del control proporcional con reset y es:

$$-P = \frac{r}{s} (O - C) + \frac{1}{s} (O - C) + \frac{q}{s} \frac{d}{dt} + 'K \dots (ec. 3.13)$$

Esta última relación (ec. 3.13) muestra el efecto de la velocidad de cambio de la variable sobre la posición de la válvula.

Al diferenciar la ec. anterior (3.13) obtenemos la velocidad de movimiento de la válvula que responde en parte a la segunda derivada, o sea la velocidad de la velocidadde cambio de la variable .

$$- \frac{dP}{dt} = \frac{r}{s} (O - C) + \frac{1}{s} \frac{dO}{dt} + \frac{q}{s} \frac{dO}{dt} \dots (ec. 3.14)$$

- En donde:
- $r$  = reset ajustable en unidades por minuto
  - $q$  = minutos (Acción derivativa)
  - $s$  = Banda proporcional ajustable, afectando a todos los términos, en % dividido por 100

La interpretación física de "q" puede darse cuando "r" vale cero, de tal manera que no hay respuesta del reajuste y ajustando la variable para que once el punto de control. Así a una velocidad de 1" por minuto y una banda proporcional de 20 %, entonces al sustituir:

$$(\phi - 0) = 0 ; \quad \frac{d\phi}{dt} = 0.06 ; \quad s = 0.20 ; \quad c = 0$$

$$- P = \frac{1}{0.20} \times 0 + \frac{q}{0.20} \times 0.06 + K$$

$$- P = 0.30 q + K$$

La respuesta proporcional duplicaría esta acción, en cambio, para el rate causa un aumento constante en el movimiento de la válvula porque la velocidad de cambio de la variable es constante. Al sumar las dos respuestas algebraicamente, la respuesta del control proporcional con rate adelanta la posición de la válvula con respecto al tiempo, si el valor del rate es 0.25 min. significa que se adelanta la acción de la válvula 0.25 min.

La magnitud de la respuesta del rate también depende del ajuste de la banda proporcional, así en el ejemplo anterior para un rate de 0.25 el aumento adicional de la posición de la válvula será :  $- P = 0.30 \times 0.25 = 0.075$  ó 7.5 % de la carrera de la válvula.

Ahora bien, si la banda proporcional se fija a la mitad del valor anterior, el valor de la acción derivativa produce un movimiento adicional de :

$$- P = \frac{q}{0.10} \times 0.06 = 0.60 \times 0.25 = 0.15 \text{ ó } 15 \%$$

Así pues, queda demostrada como la velocidad de respuesta del rate bajo los ajustes de tiempo de rate y banda proporcional es más sencilla de ajustar.

El tiempo de la acción derivativa (rate) q, que puede ser fijo o variable

Depende del arreglo del mecanismo de control. Si el ajuste es fijo, un ajuste del control proporcional automáticamente varía la magnitud de la acción derivativa, ya que  $q$  y  $s$  están incluidos en el término del rate. Por otro lado, un ajuste del tiempo  $q$ , fija la relación entre las respuestas del control proporcional y del rate.

El mecanismo controlador debe tener una velocidad de movimiento casi doble al que se usa cuando el control proporcional solo y el reajuste, ya que el rate, se emplea para proveer un movimiento grande y repentino de la válvula y un atraso muy grande del control haría imposible las respuestas a los cambios rápidos de la variable.

## CONTROLADORES ELECTRICOS

En éste subtema se hace una descripción de los controladores que usan fuerza eléctrica para actualizar la desviación de la variable en un proceso mediante el elemento final de control.

Estos controladores pueden ser simples o bien llegar a sistemas complejos, que de acuerdo al proceso y a la amplia selección del equipo, sean verdaderamente útiles y aprovechables para su uso.

### Clasificación de Controladores.

Pueden ser clasificadas en dos formas principales y en ésta forma serán descritos :

1.- Por el tipo de señal recibida del elemento primario en :

- a) Operadas por si mismas.
- b) Operadas por relevo.

2.- Por el modo de control :

- a) Dos posiciones.
- b) Flotante.
- c) Proporcional.
- d) Proporcional - reajuste.
- e) Proporcional - reajuste - rate.

### Controladores Operados por si mismo.

En los instrumentos operados por si mismos, la energía de salida (generalmente mecánica o hidráulica) del elemento primario directamente actúa en elemento medidor. La operación del elemento final de control es provista de energía eléctrica. Tales instrumentos son del tipo biestático o bulbo de expansión para medidores de temperatura; de tubo Bourdon, de diafragma, de fuelle, o de tipo flotante para mediciones de presión, de nivel y de flujo.

En tales instrumentos, la variable medida puede o no ser indicada, o bien grabada. Los medios controlantes pueden actuar directamente del elemento primario, como en un termostato típico de una habitación, sin indicación de la variable medida. En un instrumento indicador o grabador, el elemento controlante (elemento final) será actuado sobre el movimiento del sistema medido, el cual generalmente incluye el punto indicador ó pluma registradora.

Para éstos controladores, las características básicas son su simplicidad y no ser muy costosos. En el uso de instrumentos que actúan por sí mismo para control eléctrico, dos consideraciones son de importancia: (1) La sensibilidad del elemento medidor. Por ejemplo el arrastre friccional acompañado de histéresis de los elementos de control. (2) Una histéresis adicional introducida por los mismos elementos de control. Estas dos consideraciones limitan su aplicación por no ser muy precisos, aunque emplean poca cantidad de energía eléctrica.

#### Controladores Operados por Relevé.

Debido a su versatilidad y sensibilidad son ampliamente usados. En éstos instrumentos, que reciben una señal eléctrica del elemento primario con una posición o indicación del movimiento tanto como la del medio controlante allí mismo, para que, con posterioridad otros instrumentos reciban ésta señal amplificándola para hacerla útil en el control ó en la medición empleando un galvanómetro y un amplificador mecánico, o más comúnmente a través de un amplificador electrónico y un motor conductor.

En éstos instrumentos, uno de los factores más importantes es la sensibilidad, capaz de responder a pequeñas variaciones en la variable medida y medir

ficiar éstos cambios del controlador a la salida. Un segundo factor, el punto de permanencia para la velocidad de respuesta del instrumento, que es de importancia vital en el control de procesos que padece en variaciones rápidas de carga .

### Controladores Eléctricos de Dos Posiciones.

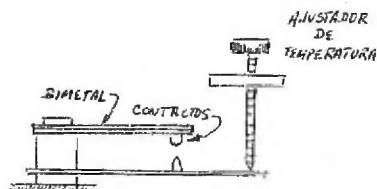
Este tipo de control es la más sencilla e útil, como se sabe cuando tiene un nivel superior, entonces pasa a un mínimo. Es usado satisfactoriamente si :

- 1) Alguna fluctuación ciclica de la variable controlada es permitida (pequeña si las características del proceso son favorables y la sensibilidad del controlador es alta).
- 2) Las fluctuaciones de la variable manipulada puede ser tolerada .

Controladores de dos posiciones operados por sí mismos. Un aparato típico es un termostato usado en el control de la temperatura. Tales aparatos no son indicadores y su uso es comercial e industrial para el control de temperatura y refrigeración.

Controladores de dos posiciones operados por relevo.- Estos controladores tienen amplificadores que los permite una mayor precisión comparados a los operados por sí mismo, además, permiten una localización de punto del controlador sin mantener grandes corrientes de calibración.

Fig. 3.31 Diagrama muy simplificado de un termostato eléctrico.



Controladores tipo puente. Este forma de control es mostrada en la fig. 3.33; un circuito puente conteniendo en un brazo un resistor sensitivo de temperatura se suple con el voltaje que cruza los puntos de potencia  $P_1$  y  $P_2$ . El puente desbalanceado se detecta en los puntos  $P_3$ ,  $P_4$ . Al conjunto de puntos se determina por el ajuste de la posición de los contactos de los alambres deslizantes  $S_1$ ,  $S_2$  típicamente una resistencia de bulbo de tres conductores se usa para compensar la resistencia conductora, con la resistencia del conductor A siendo balanceada por una resistencia igual del conductor B en el brazo opuesto. El alambre conductor deslizante sirve para mantener la

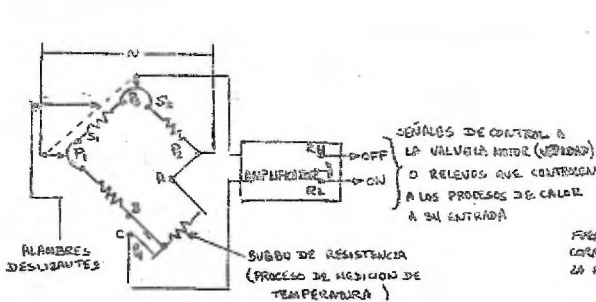


Fig. 3.33 Controlador de dos posiciones eléctrico operado con relevo tipo puente.

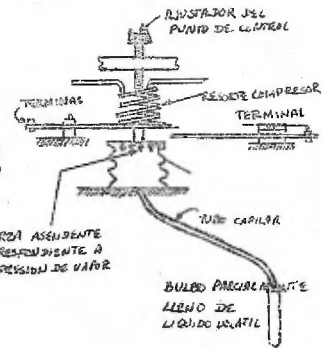


Fig. 3.32 Control de dos posiciones eléctrico empleando un bulbo de expansión como elemento primario.

relación 1 a 1 en el brazo superior del puente para varios conjuntos de puntos para proporcionar la razón 1 a 1 en los brazos más bajos del puente y así mantener exacta el bulbo resistor conductor de una compensación a través del rango del conjunto de puntos.

El amplificador de c. a. de fase sensitivo cierra el contacto del rele-

vador RH cuando la temperatura esta debajo del punto de control. Para el punto de control, el puente es balanceado y la señal de entrada del amplificador es cero. En este punto, el relevador se balancea con todos contactos abiertos.

En la fig. 3.34 se muestra un amplificador de c.a. en la cuál la salida de la medición del puente es conectada a un transformador la entrada y después es aplicado a la rejilla del tubo de vacío V-1 ; después de la primera amplificación de voltaje, la señal es aplicada a las rejillas de la

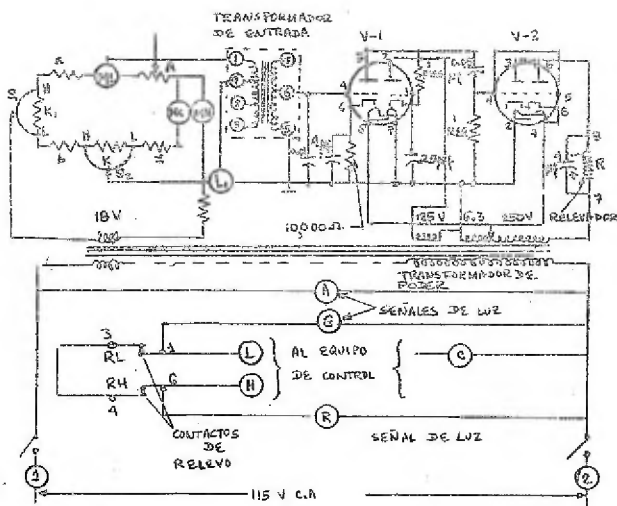


Fig. 3.34 Diagrama de un amplificador usado en la operación del control de dos posiciones operado bajo el tipo puente de relevo.

válvula V-2, la placa de esta válvula se conecta al relevador R, en vista de que el voltaje de esta válvula V-2 es de c.a., el amplificador está en fase sensitiva con la corriente del relevador, aumentando en una fase de entrada del puente desbalanceado y disminuyendo en la fase de salida del mismo puente. Para probar una operación de falla la seguridad en el amplificador cuando hay error, la rejilla del cátodo de la válvula se conecta a un voltaje de



c.a. la 0.3 volta, el cual sirve para desenergizar al relevador, cerrar el contacto RI y posteriormente desconectar la energía al proceso y encender la señal de luz roja. Las señales de luz roja y gris conectadas a los contactos del relevador indican al operador el tipo de temperatura baja o alta al punto de control.

Controladores similares son útiles en la medición de otras variables: además de la temperatura, tales como la conductividad eléctrica de un líquido. Tiene un solda conductora localizada en un brazo del puente de Wheatstone. Estos aparatos permiten una calibración estable con el tiempo y bajo todas las condiciones normales de ambiente; las mediciones precisas de este tipo de equipo, independientemente del elemento primario, es de 0.3 % de la escala y la sensibilidad del control tiene una fracción de la F.

#### Controladores de Dos Posiciones Operados con Relayo del Tipo Milivoltmetro

Al igual que el controlador del tipo puente, es ampliamente empleado en termopares o en pirómetros de radiación para medir o controlar temperaturas. Como podemos apreciar en la fig. 3.34, este instrumento es del tipo deflexivo, generalmente con un puntero indicador y escala con un error adecuado del detector, que cruza ajustablemente la escala. Por medio de un tubo oscilador de vacío, amplificador y relevador asociado, este instrumento controla el proceso a su entrada para mantener la temperatura en el punto de control. Algunos diseños recientes

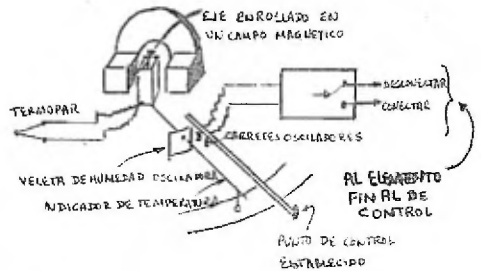


Fig. 3.35 Controlador de dos posiciones eléctrico operado con relayo del tipo milivoltmetro.

tes de dicho controladores son del tipo de unidad tapón. Por ejemplo el galvanómetro y detector de error son construidos como unidad de ensamblaje en la púa caso también amplificadores de control. Tales diseños reducen el servicio extra y disminuyen el tiempo bajo del evento del componente de trabajo.

La precisión de este tipo controlador, es algo afectada por la longitud de extensión del alambre usado y atendiendo a variaciones de resistencia. Otros aparatos usan alta resistencia en la medición de movimiento, sin embargo tienen a minimizar tales efectos. La precisión en la calibración en éste tipo de equipo, fuera del elemento primario, normalmente correría del orden del 1% de todos los valores de la escala. La sensibilidad del control es buena y generalmente sería la una pequeña fracción del 1% de la gama de la escala. En algunos modelos la gama puede ser ajustada y puede ampliarse de 1 a 5% de la original.

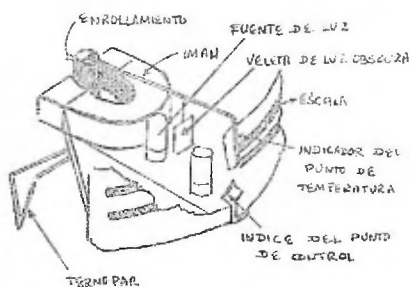


Fig. 3.36 Controlador eléctrico tipo relevador milivoltmetro el cual usa fotocelda.

**Tipo de Fotocelda-** Es similar al anterior, en donde la veleta de humedad oscilante y los enrollamientos osciladores son reemplazadas con una fuente de luz, fotocelda y veleta de luz oscura. El amplificador que va asociado a este tipo de control, es electrónico en lugar del tubo de vacío y se muestran en las figs. 3.35 y 3.36. La protección de freno del termopar, es por medio de c.c. que normalmente es apuntada al pedal del medidor por la baja resistencia del termopar para sobre la cual el interruptor del circuito del termopar externo incluye alambres de extensión que así fácilmente pueden salir a través

del medidor de movimiento defectivo hacia una final alta en la escala.

Estos controladores usan un amplificador electrónico al sentido de movimiento del medidor e iniciar la acción controlante desde allí. Otra forma de amplificador, que sustituye al electrónico, es el mecánico, el cual consiste de un control indicado por mercurio montado en un toldo de una plataforma, - que está continuamente recorriendo una distancia cada 15 segundos por medio de un motor.

Este aparato tiene una marca alta y otra baja para controlar mejor el proceso, además se sostiene en varios ámbulos que dependen de la relación entre el punto establecido y la posición de movimiento del milivoltmetro. Su uso es frecuente en la protección al monitor en sobre calentamientos y otros equipos de control. Cuando se van a efectuar poros, es recomendable separar los contactos, así que para la reiniciación del proceso deberá empezarse con un reajuste manual y posteriormente pasar al control eléctrico.

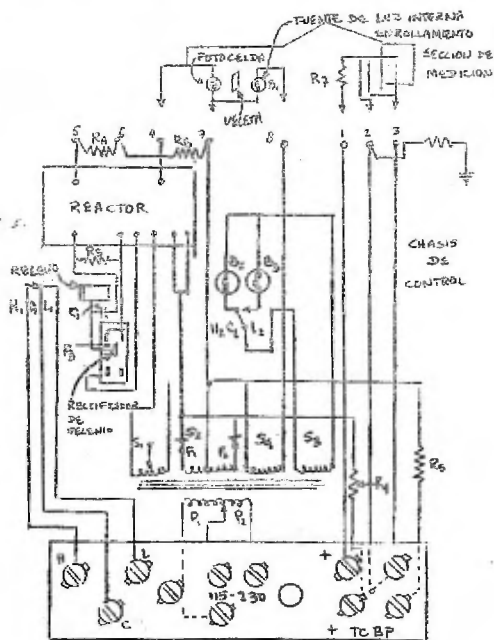


Fig. 3.37 Diagrama de circuito usado en el controlador del tipo milivoltmetro.

**Tipos Grabadores.** En el control de dos posiciones, es frecuente

provisto adicionar contactos simples o bien (de alto y bajo) de dos posiciones a un potenciómetro modelo grabado del tipo balanceado electrónico o mecánicamente como se aprecia en la fig. 3.38 .

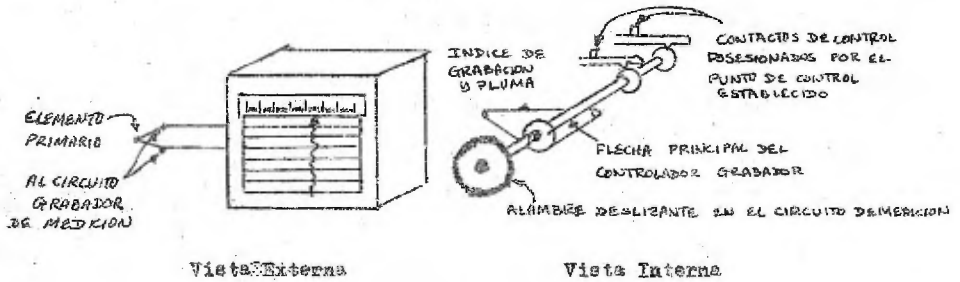


Fig. 3.38 Controlador Eléctrico Tipo Grabador

Estos instrumentos están provistos con circuitos de medición que permiten usar elementos primarios por ejemplo : Termopares, célula de conductividad, y electrodos de pH. En respuesta a esta forma de señales del elemento primario, la flecha principal del grabador será manejada por un amplificador y una unidad de potencia hasta que los alambres deslizando de medición son llevados a una posición que balancee la señal de entrada. Conforme la flecha grabada gira en respuesta a esta señal de entrada un contacto se cierra cuando la temperatura está arriba del punto de control y cierra el otro contacto cuando la temperatura esta debajo del punto de control.

Los contactos mostrados en ésta última figura pueden tener zona neutra - ajustable, en otros diseños los contactos pueden ser ó bien de doble rotura - con zona neutra ajustable, o de una acción con una rotura y un polo con un contacto doble arrojado sin zona neutra ajustable.

Arreglo de los contactos de control. En algunas ocasiones un ran paso diferencial es preferido para evitar la operación excesiva de la válvula

o fuerza de contacto. En otras aplicaciones, es el uso de un mínimo de paso diferencial, que emplea un contacto de control simple de calura, que son diseñados para romper una operación equivocada del elemento de control y hacerla positiva. Tal arreglo, es mostrado en la fig. 3.39.

En la fig. 3.38 se tiene una operación positiva asegurada a un controlador de dos contactos, los cuales no están en acción de ruptura y permiten una operación segura debida a su acción dual aumentando la capacidad de corriente interrumpida.

Aquí el contacto R-1 provisto eléctricamente se sostiene conectado al relevo hasta que el contacto alto se cierra para separar el enrollamiento del alto se cierra para separar el enrollamiento del relevo.

En la fig. 3.40 se tiene un arreglo de un control con dos contactos operados por una unidad de manejo de dos posiciones, que ajustan un paso diferencial o bien pueden ser por acción de ruptura de un polo y doble hilo que producen un paso diferencial mínimo.

Existe una forma modificada en el control de dos posiciones para la dirección del

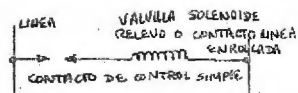


Fig. 3.38 Circuito de control de relevo operado por un controlador de dos posiciones empleando un contacto de control simple.

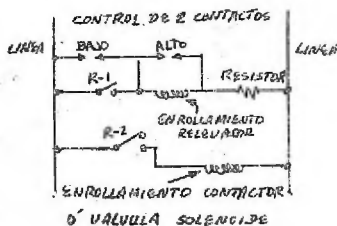


Fig. 3.40 Arreglo típico donde la operación positiva es seguida en unión de dos contactos controladores.

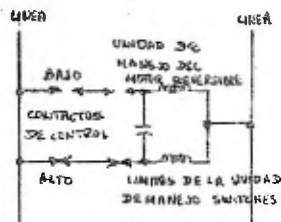


Fig. 3.41 Circuito de las posiciones en el control de la operación de una unidad manejada eléctricamente.

Sin reconocimiento de la magnitud o velocidad de la variable controlada que conduce a una disminución de la banda de control a la mitad de su amplitud original, siendo más progresiva en donde la detección del retraso del sistema de control es relativamente grande.

### Controladores de Acción Flotante Operados con Relevé.

Es poco usual el empleo de la acción flotante en forma aislada, en cambio con la acción proporcional produce el reajuste que es de más utilidad práctica.

El equipo eléctrico en control flotante puede ser relativamente simple,

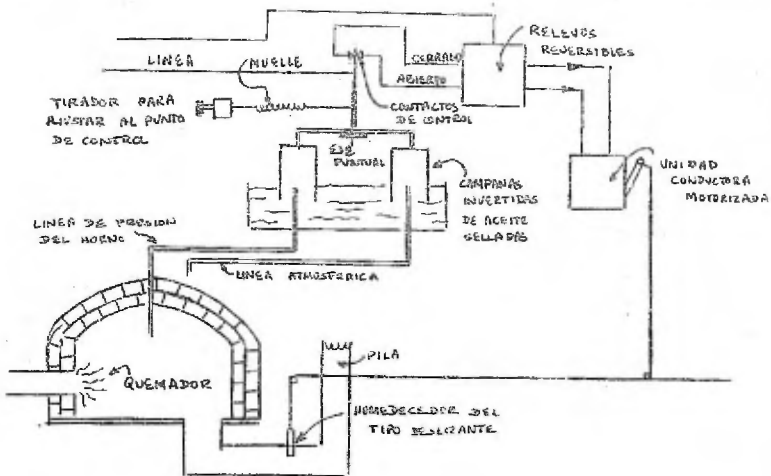


Fig. 3.42 Controlador de simple velocidad de acción flotante en el control de presión de un horno.

siendo este factor muy importante en el uso de procesos de corto tiempo de retraso, en donde cubren en corto tiempo un rango amplio de valores y en condiciones variables producen una gráfica casi lineal con las fluctuaciones de

pequeñas de todas las formas de control. Una aplicación de este tipo de control es mostrado en la fig. 3.42 para controlar la presión de un buque.

Un aumento en la presión de bomo desvía el sistema de eje de presión de campana resultando un contacto del lado derecho, actuando la unidad de ajuste exterior de la humedad para abrir el humidificador de alta velocidad hasta que sea la presión del punto de control, en donde se abre el contacto controlador por iniciado la acción.

Después al disminuir la presión hasta fuera del proceso del punto de ajuste del humidificador, la posición de este es el de flotar en pequeños aumentos entre los dos extremos de respuesta. Pequeños impulsos correctivos de los contactos del controlador.

Los controladoras de las velocidades flotante como el mostrado en la fig. 3.43 son empleadas en pequeñas desviaciones de presión donde los contactos internos del controlador son cerrados a través de un impulsor correctivo como interruptor, moviendo la unidad conductora a una relativa baja velocidad

de operación la cual no sobre corrección en desviaciones pequeñas de presión. Para desviaciones grandes, el contacto de los controladores externos se cierran llevando la acción a un interruptor de impulso grande, que mueve la unidad conductora a una velocidad de medio más rápida así como a correcciones más rápidas en grandes cambios de presión. Esta acción es rápida para líneas

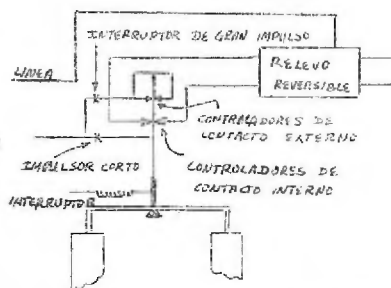


Fig. 3.43 Controlador Eléctrico - de dos velocidades con acción - flotante .

tiempo cuando la presión es llevada a su condición más próxima deseada y así a se evita la subcorrección.

### Controladores de Acción Proporcional Operados con Relevos.

Este tipo es ampliamente usado y su utilidad es grande para una gran variedad de equipos. Su forma más simple es la moduladora y como se sabe, cuando una variable controlada se mueve en forma proporcional, el elemento final de control será proporcionalmente ajustado de un mínimo a un máximo de entrada.

Existen dos categorías en esta forma de control eléctrica: el tipo de posición promedio y el de posición proporcional.

Acción de los controladores de posición promedio. - El ajuste de esta forma de control a la entrada va de un valor mínimo a un máximo por medio de la regulación de la razón del tiempo a la entrada y después de transcurrir este tiempo posterior  $t$ . El uso más frecuente es en el control de procesos de calor, que son adaptados a su operación con relevos y contactos para el encendido y apagado de poder (potencia). También es utilizada en control de procesos, donde la acción de la válvula es abierta y cerrada con frecuencia. Así por ejemplo en procesos de calentamiento, en donde una gran área es calentada. La uniformidad mayor en la distribución de calor es obtenida por la acción de encendido - a parada, que es posible gracias al control del tiempo ajustable, en donde una carga de calor a la entrada, tiende a los límites del calentamiento a la entrada del calentador (quemador), así pues es mejor utilizar una acción - ramificación que conduce a un control de operación promedio.

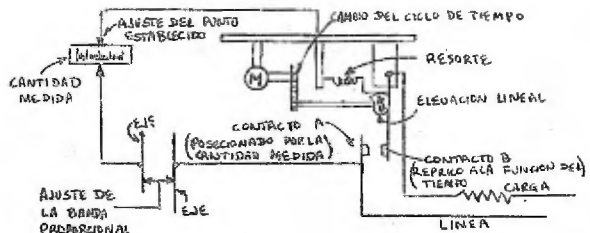
### Controladores de Sistema de Tipo de Tiempo Fijo.



Este grupo provee una acción de posición promedio por un motor conductor giratorio o elemento recíproco que coincide con un segundo elemento con posición de la variable medida, así que se provee un ciclo de encendido-apagado de tiempo fijo, pero con una variación del encendido y el apagado. En la fig. 3.44 es mostrado este tipo de controladores con la acción anteriormente descrita.

A través del instrumento controlante, el contacto A se posiciona en función de la variable medida.

Fig. 3.44 Controlador eléctrico proporcional de acción promedio con un ciclo de tiempo fijo.



El contacto B recíprocamente, en función del tiempo, y del tiempo de cierre del circuito, por lo tanto será función de la relación de la variable medida al punto de ajuste del control. Una banda proporcional ajusta el movimiento del contacto A con respecto a la variable medida y el ciclo de tiempo es también ajustada cubriendo períodos de varios segundos a uno o dos minutos.

**Controladores de Retroalimentación.** Es el segundo grupo de acción promedio que posee una señal adecuada de retroalimentación a la salida. Para el control de temperatura, en donde el elemento primario es un termopar, se emplea un voltaje pequeño de c.d. de retroalimentación para cerrar uno y otro de los contactos de control. Este voltaje se conecta al instrumento medidor en serie con el termopar, este voltaje de realimentación es provisto de un -

generador adecuado puede ser aplanado a través del trabajo neto RC en un tipo de generador o debido a los efectos de inercia térmica en otro tipo. Un circuito de tales características es mostrado en fig. 3.45.

Cuando la energía se aplica en el horno se aumenta la temperatura del termopar, ésta energía es también aplicada a un elemento propio de calentamiento en el circuito de retroalimentación para suplantar la señal del termopar, de aquí que sea apagado mucho más rápido de lo que sería. Cuando así sucede, ésta energía se aplica en sentido opuesto al elemento de control del circuito retroalimentador en donde se genera una señal que sustrae la del termopar, el efecto total es para proveer un control proporcional donde el tiempo promedio del calor es una función de la variable medida.

Este tipo de controlador, es generalmente inexpensivo y al ser limitado en su adaptabilidad al proceso teniendo amplias diferencias en las oscilaciones de control, pero diseñado para adaptar su aplicación práctica. Tiene la desventaja de causar un error en el instrumento medidor, así que la temperatura real se registra solo cuando la señal de retroalimentación es cero y ésta

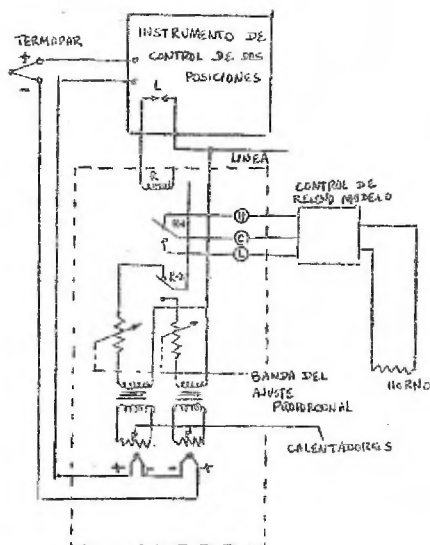


Fig. 3.45 Controlador Simétrico de dos posiciones modificado para obtener la acción de control de posición promedio usando retroalimentación térmica.

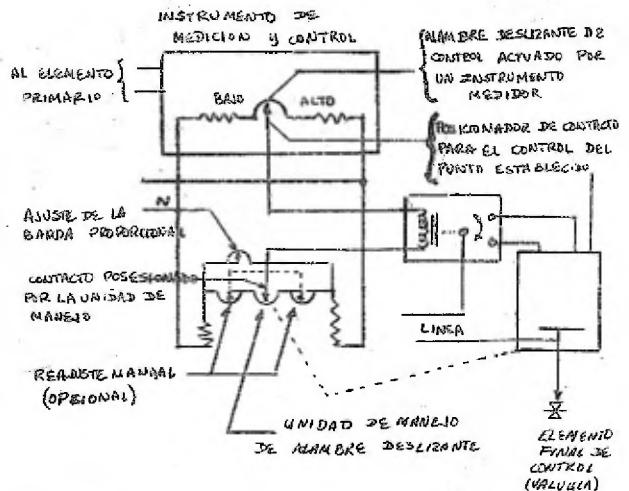
ta solo se alcanza a un valor a la entrada.

Otros tipos más elaborados de controladores de posición promedio teniendo su circuito de retroalimentación en el circuito de control y en lugar de circuito medidor presentan un reajuste automático, recibiendo el nombre de controladores de posición promedio y reajuste.

### Acción de los Controladores de Posición Proporcional.

Se efectúa por medio de la modulación de la posición del elemento final de control como una función lineal del valor de la variable medida. El deseable esta forma de control en procesos de regulación casi alisados, que se autoconducen manteniéndose sin variación, como presión en hornos, temperatura, atmósferas, y otros factores relacionados a la cantidad y el proceso que están siendo regulados.

Fig. 3.46 Controlador eléctrico de posición proporcional.



Un sistema controlador eléctrico de posición proporcional con una unidad de manejo de alambre deslizando movilizadora por una unidad de manejo motorizada se muestra en la fig. 3.46; en la cual se puede asociar un reajuste de alambres deslizantes con resistencias contruyen un control puente que está conectado a una fuente de voltaje.

Con la variable medida en el punto de control, el contacto se localiza al centro de control de los alambres deslizantes. El relevo detector se conecta a los contactos de control y a la unidad conductora de los alambres deslizantes, para que, cuando se efectua un desbalance en estas dos partes del sistema, una señal de error se alimente en el relevo detector y cause a la salida del relevo el cierre de un contacto o de otro para que corra la unidad motorizada en una dirección que resture el puente y lo balancee, a la vez que opera el elemento final de control en la dirección apropiada ajustando correctamente el proceso a su entrada.

Asi pues para cada cambio de la variable medida dentro de la banda proporcional, un cambio correspondiente será producido en la posición de la unidad de manejo.

El ajuste de la banda proporcional esta separada de la unidad conductora de alambres deslizantes es arreglada para que la relación de ajuste este seguida entre el movimiento de control del alambre deslizando y el viaje de la unidad conductora.

Los dos réstatos de reajuste manual, cuando se prenden en una dirección dada, cambian sus resistencias en sentido opuesto al otro de acuerdo al cambio de relación entre el control de alambre deslizando y la unidad conductora de

alambre deslizante con lo que se provee una posición del elemento final de control necesaria para sostener la variable controlada en el punto establecido para las condiciones promedio de carga encontradas.

**Control del Reactor Saturado.** Es una forma de control de posición proporcional que opera una fuerza eléctrica a una carga (generalmente un horno) como lo muestra la fig. 3.47 para una entrada, continua es preferida al de la posición promedio debido a las condiciones de proceso.

Una de ellas es cuando el material calentado está en movimiento, que puede ser una faja continua o de alambre que producirían alternativamente secciones calientes y frías conforme se mueven al paso de los elementos calentadores.

Este sistema de control electrónico se diseña para operar desde un instrumento medidor que por sí mismo se nivela, los cambios de señal del elemento primario, actúan al instrumento, el cual se prende cambiando la relación de control del elemento deslizante y poseicionarlo en el punto de control establecido. El tablero de control convierte la señal desde aquella posición del alambre deslizante, a una potencia de salida de c. d. adecuada para el control del reactor de

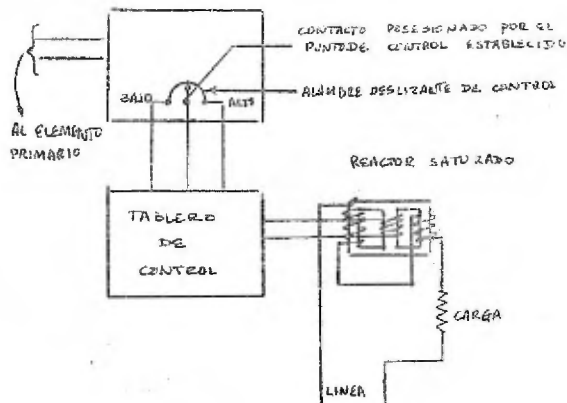


Fig. 3.47 Controlador eléctrico de posición proporcional diseñado para controlar una fuerza eléctrica utilizando un reactor saturado.

c.d. del reactor saturado, que está en serie con la carga y línea, y de allí - por controles de potencia a la entrada hacia la carga que en orden satisfacen el punto de control establecido del instrumento, excepto para condiciones normales lejanas al seleccionado producido por cambios de carga.

Si empleamos un controlador auxiliar colocado entre el generador de la - señal errónea y el tablero de control, éste sería útil sobre todo cuando se - empleara el reajuste.

Control de velocidad del motor. La utilidad del reajuste, se aquí aplicada ya que además de controlar la velocidad, hace un rompimiento dinámico y coloca un límite en la aceleración de corriente para cargas diferentes de un motor. Esta regulación se hace por medio de amplificadores eléctricos, magnéticos o bien rotativos que proporcionan señales provenientes de un generador e indicadas en un tacómetro.

#### Controladores de Acción Proporcional - Reajuste

Si bien ésta acción es la combinación de la proporcional y el de velocidad flotante que la hace más compleja si estuviera únicamente el proporcional, es también aplicable a la posición promedio, y útiles en las siguientes condiciones :

- 1.- Al aplicar la corrección a la desviación por cambio de carga y se emplee el reajuste, ésta será de un costo más grande aunado al de complejidad que pueda ser justificado para su uso.
- 2.- Que las características del proceso sean tales, que una banda proporcional ancha se use para evitar salida del control.
- 3.- Para demandas de proceso sobre amplios límites

Controladores de posición promedio - reajuste. Existen varios tipos, que



Sin embargo, el carrito DF tiene más masa, el cual baja lento a su cambio de temperatura y la forma del carrito DS es un cilindro sólido metálico. el e cual toma gran tiempo para calentar o enfriar. Cuando la corriente pasa através de los rodillos de calentamiento, se asume que el ajustamiento del reajuste esta en el extremo rápido, la resistencia de Nickel PF de éste rodillo aumenta rápidamente hasta que iguala la resistencia del lado de la mano derecha del brazo de control del puente de alambres deslizantes; esto rebalanza al puente y el relevo R cae separándose, abriendo el contacto RL y apagando el calor a al horno y calentar los rodillos. Inmediatamente PF empieza a enfriarse nuevamente, disminuyendo su resistencia hasta que el desbalance es suficiente para que otra vez tire en relevo R. La acción ciclica del control es causada por el enf. y calentamiento alternado del rodillo PF. La velocidad impulsiva o ciclicidad puede ser disminuida por un ajuste que atenue la señal alimentada al amplificador.

Si la temperatura esta lejos abajo del punto de control, la resistencia promedio deberá ser mantenida en PF si es alta, lo cual necesita una temperatura promedio más alta del rodillo (aquí el calor de disipación es más rápida por lo que se necesita mantener un tiempo mayor la corriente y apagado a porcentajes más cortos del tiempo impulsivo). Este efecto proporcional del porcentaje en tiempo cambia la temperatura del proceso.

Con la temperatura del proceso en el punto de control, el promedio PF de la resistencia del carrito de nickel iguala la resistencia del carrito DF. Si la carga en el horno es aumentada, causandole a la temperatura una caída, el aumento en porcentaje del tiempo lentamente aumentaría la temperatura y resistencia de DF, hasta alcanzar el punto de control original. El tiempo más grande en porcentaje es el resultado de la acción del reajuste. la cantidad -



de la cual es proporcional al tiempo integral de la desviación del punto de control. Por el movimiento para ajustar el reajuste hacia el brazo DSPS, la acción del reajuste puede ser hecha más lentamente desde que DS es una masa alta de velocidad lenta de enrollamiento.

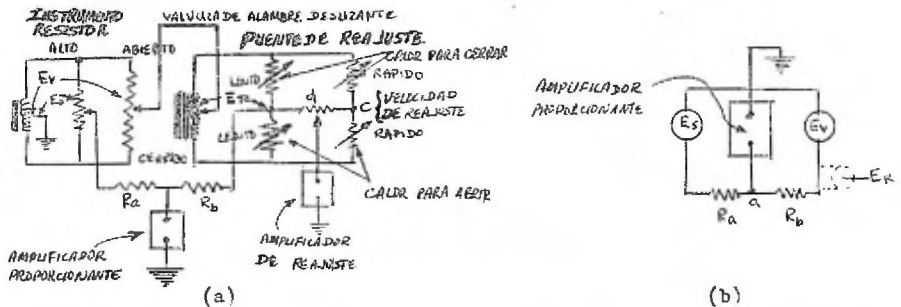
Para prevenir a la temperatura del proceso de excesivas oscilaciones en un principio frío, el controlador puede incluir una velocidad de ajuste de aproximamiento cuando un relevo A es energizado, es normalmente cerrado el contacto A, se abre el circuito corto cruzando la velocidad de aproximación establecida y pone al ajustador en serie con DF y DS (acción de reajuste de los calentadores enrollados), esto reduce el voltaje que cruza DF y DS y mantiene a la resistencia en la cual los rodillos o carretes de Wickes DF y DS pueden alcanzar abajo del valor normal máximo. El relevo A es energizado através del contacto grabador, el cual se coloca para cerrarlo cuando la temperatura está substancialmente debajo del punto de control. El relevo A es encendido a través de A y L, también como através de los contactos R y A. L se abre después de que la temperatura se eleva dentro de una cierta distancia del punto de control.

Sobre una elevación de temperatura superior, el relevo R caerá y desenergiza el relevo A través de la abertura de contacto R; el calor que entra de acuerdo a la caída desde un máximo a un por ciento en relación, determinado por la temperatura reducida a la cual los rodillos han sido precondicionados. De acuerdo a la velocidad de elevación de temperatura del proceso hacia el punto de control es lenta y se evita el sobre ciclaje. La acción de control continúa así posteriormente, y la acción fuera establecido del punto de control se hace por medio del reajuste.

Este controlador está considerado bajo la categoría proporcional con reajuste, aunque con una apreciable cantidad de acción de velocidad que es obtenida virtualmente de la inercia térmica de los rodillos PF y PS. La extensión de esta acción de velocidad se fija por propiedades físicas de esos enrollamientos y es no ajustable.

Controladores de Posición Proporcional - Reajuste.

Varias variedades de esta forma de control son útiles para diferentes fantes. Uno de ellos, (División de Instrumentos Brown, Honeywell Regulao.) hacen uso de transmisiones de error de resistores de alambres deslizantes en un instrumento medidor en una posición hacia arriba de éste alambre sante (resistor) en una válvula motorizada, mostrada en la fig. 3.49.



3.49 Controlador eléctrico proporcional - reset. (a) Uso de un transmisor de error de un resistor de alambres deslizantes en un instrumento medidor en posición hacia arriba sobre una válvula motorizada (el controlador de temperatura opera la válvula de vapor). (b) Diagrama simplificado del circuito proporcional-reset.

Refiriéndonos a este diagrama (fig. 3.49) y asumimos que la temperatura es baja, el instrumento resistor producirá un error de voltaje  $E_s$ , y que su valor es instantáneamente negativo. La acción del reajuste puede desprejarse temporalmente asumiendo que  $E_r$  es cero, así en esas condiciones de balance de

corriente que cruza al amplificador proporcionante con un valor cero, se necesita que  $E_v$  sea instantaneamente positivo y proporcional a  $E_s$  en magnitud. Para alcanzar esta condición de balance, el amplificador proporcional, através de relevos apropiados, causa al motor de la válvula un manejo hacia la posición de abertura; éste movimiento causa un deslizamiento en la válvula de los alambres deslizantes para producir el valor requerido de  $E_v$ , de donde el movimiento de la válvula cesa.

La relación de  $E_s$  a  $E_v$ , o la banda proporcional del sistema de control puede ser ajustado por el cambio de relación de  $R_a$  a  $R_b$ . En orden se provee la acción de reajuste, la posición de la válvula del voltaje de retroalimentación  $E_v$  es modificado por un voltaje  $E_r$  producido en un puente de reajuste, este puente consiste de cuatro coeficiente de temperatura balanceados por resistores negativos. los dos superiores dicen "caliente al cerrar" tienen un calentador el cual es controlado por el amplificador de reajuste y los inferiores señalan "caliente al abrir" tienen un controlador de calor separado por el amplificador de reajuste.

Si los cuatro resistores del puente de reajuste han sido a la misma temperatura,  $E_r$  es cero; si la temperatura controlada cae repentinamente, como discusión de la acción proporcional, la válvula es conducida hacia la posición de abertura, y los puntos b, c, d tienen un voltaje positivo instantaneo igual a  $E_v$ . Esta señal positiva en d es aplicado al amplificador de reajuste y causa al calentador para el par bajo de resistores que sea energizado. La elevación de temperatura resultante en la mitad más baja del puente de reajuste maneja al potencial de los puntos b, c, y d a tierra, causando  $E_r$  tener otro valor a cero. Esta carga en  $E_r$  causará al puente de la fig. 3.13 (b), un rebalaceo con la válvula más lejanamente abierta.

Refiriendonos a la fig. 3.49 a, es aparente que la acción balanceadora del amplificador proporcionante causa a la válvula un movimiento hasta que el potencial del punto lo sigue al voltaje de error  $E_s$ . El equilibrio puede ser alcanzado solamente con el punto b a tierra, Es se reduce a cero. Calentando la mitad del puente de reajuste o el otro continuará hasta que tal condición de error cero es alcanzada si es posible hacerlo dentro del rango de operación de la válvula de control.

Los resistores del puente de reajuste mostrados a la derecha son íntimamente contactos térmicos con los calentadores asociados. La aislación térmica es interpuesta para causar a los resistores de izquierda un cambio lentamente. Estableciendo a la entrada al amplificador de reajuste cerca del punto C necesita poco calor de entrada para volver la señal a cero, consecuentemente, una pequeña señal de reajuste al punto b ; Inversamente, estableciendo a la entrada del amplificador cerca de b causa una señal grande del reajuste ; La posición de d se usa como ajustador de la velocidad del reajuste.

Otro sistema de control (Harold Beck Co ) puede ser empleado para esta operación proporcional - reajuste. En ella se considera al "reajuste" como parte de reposición del elemento final de control que es permanente respecto a la desviación de la variable controlada y vuelve al punto de ajuste. Este sistema se describe dividiendo la posición del elemento final de control en tres respuestas que son :

- 1) Acción de posición proporcional C,
- 2) Posición proporcional - reajuste  $C_2$  (Cambio permanente relacionado a la acción de posición proporcional)

3) Acción proporcional - velocidad flotante  $C_3$  (normalmente definida como reajuste).

Estas acciones se representan en la fig.

3.50 y junto a ellas se encuentra la acción resultante posicionando al elemento final - de control en respuesta a la variable a controlar .

Generalmente éte sistema emplea un control transmisor de error, de alambres en el instrumento medidor en posición hacia arriba sobre un conductor motorizado, el cual está colocado en un circuito puente. Cuando este puente se desbalancea se corrige - por un detector de relevo, que a la salida sirve para actuar la unidad de manejo en la dirección propicia hasta balancear al puente.

La acción de posición proporcional  $C_1$  resulta de la relación lineal de los dos alambres deslizantes el ajuste de la banda proporcional es acompletado variando los voltajes relativos en los dos alambres deslizantes.

La acción  $C_2$  se acompaña de un mecanismo en una unidad de manejo motorizada. Cuando la variable controlada esta en su punto de ajuste, el deslizador se mueve con el elemento final de control, que está siempre en el centro de estos alambres deslizantes; este deslizador es causado para mover en una relación fija a la unidad conductora a la salida de la flecha durante una desviación de la variable a controlar separandose del punto de ajuste y moverse en una relación más rápida durante el regreso hacia el punto de control. Así és

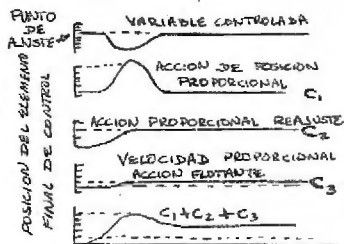


Fig. 3.50 Acciones de Control obtenidos con el mecanismo eléctrico Beck.

ta unidad conductora o la salida de la flecha se mueve más lejos durante el retroceso al punto de control, causando un porcentaje izquierdo positivo de la acción de posición proporcional y sea permanente con respecto a la respuesta de desviación que se iniciara de la variable a controlar.

La acción C se inicia por un tiempo impulsivo que periódicamente reduce el voltaje en alambre deslizante sobre la unidad conductora, causando una acción de posición proporcional - reajuste para repetir por sí mismo en miniatura en cada impulso, así continua hasta el punto de ajuste en el que el combio periódico de voltaje de los alambres deslizantes no tiene efecto por que - el puente esta balanceado. Conforme una desviación se desarrolla, la medida del punto crece, alcanzando su máximo cuando la desviación esta cerca de la - orilla de la banda proporcional ; este máximo se ajusta manualmente girando un potenciómetro en el cuadrante desde cero hasta un valor máximo deseado, la frecuencia y duración de los impulsos son tambien ajustables. La acción C<sub>2</sub> se - realiza como auxiliar de ajuste de la acción C<sub>2</sub> causando a la variable controlada una línea hacia arriba, exactamente en el punto de ajuste y compensa los cambios de carga que no son efectuados por la acción C<sub>2</sub>.

Otro sistema de control (Hays Corp.) provee la misma acción proporcional y reajuste, utilizando una combinación en su forma de operar; mientras el elemento final de control se opera con motor, las funciones de control son provis-tas de elementos neumáticos. Este sistema se muestra en la fig. 3.51, para el control de presión de un horno regulando una válvula de vapor en la línea del tiro inducido en abanico de una turbina.

La operación es como sigue: En condiciones balanceadas de la fig. 3.49 en que se presenta. Pero a cambios en el tiro del horno, mueven al diafragma del elemento medidor del tiro y hace contacto en una de las agujas de mercurio

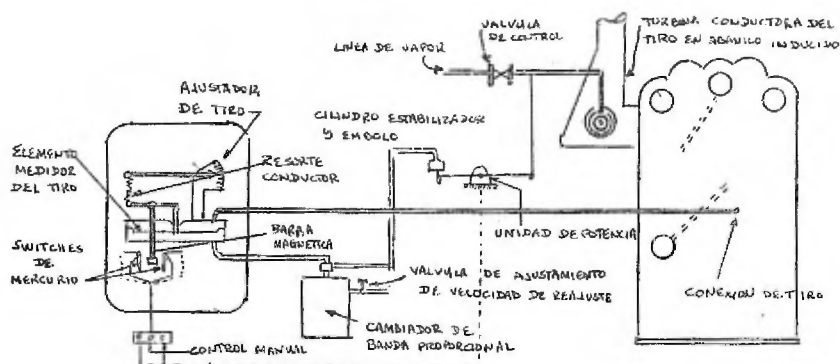


Fig. 3.51 Sistema de control con unidad eléctrica conductora, pero con una función de control generada neumáticamente .

en el piloto; la unidad de potencia mueve la válvula del flujo de vapor de la turbina conductora del tipo, que cambia su velocidad del abanico en la dirección necesaria que restaura el tiro del horno al valor para el cual el controlador es ajustado.

Simultáneamente el émbolo estabilizador se mueve, por la unidad de potencia una cantidad proporcional al movimiento de la válvula ; el émbolo se mueve por cambio de presión del aire bajo el diagrama en una dirección que tiende a restaurar el diagrama a la posición "neutral". Esta acción continua hasta alcanzar esta posición aun através de arriba del tiro y de que el horno no halla vuelto a la posición para la cual el controlador se ajusta. Cuando el diagrama está en "neutro" el contacto en la acuja piloto es rota y la unidad de potencia se para con la válvula de control en una nueva posición.

Desde que la presión atmosférica estabilizante está ó bien arriba o abajo, dependiendo de la dirección del movimiento del émbolo, el aire de escape que entra o sale del sistema através del ajustador de velocidad de reajuste -

de la válvula para restaurar esta presión a la atmosférica; simultáneamente el cambio de abanico cambia la velocidad para restaurar el tiro en el cambiador de combustión al valor apropiado.

#### Controladores de Velocidad Proporcional - Reajuste - Derivativas.

Esta acción de control es aplicada para aquellos procesos que necesitan el control más exacto, los cuales encuentran las condiciones especificadas como son : el tener una respuesta libre de ruido y características de atraso, para que la velocidad de acción se use con ventaja. La mayoría de los procesos están bajo ésta categoría; en algunos ejemplos, donde procesos con cambios repentinos de carga a la entrada no pueden ser toleradas o donde un alto nivel de ruido existen en la medición de la variable controlada, la acción derivativa no puede ser usada.

Sistemas Eléctricos con elementos finales de control actuados Neumáticamente.

Una forma de este tipo de control (Swartwout Co.), el controlador es diseñado para recibir una señal de error directa (a.c) del elemento primario. Se libra a la salida d.c., la magnitud de la cual refleja una combinación de las tres funciones de control; la salida opera a una conversión del aparato, donde la c.a. es cambiada a presión de aire, la cual vuelve a ser usada para operar un elemento final de control del tipo neumático. Este sistema es de alta sensibilidad, porque no hay fricción o movimiento mecánico involucrado entre las señales eléctricas de entrada y salida.



Un diagrama en bloques de dicho controlador se muestra en la fig. 3.52. la señal de 60 c.p.s. de a.c. del elemento primario transmisor varía de 0 a 0.5 volt y se compara con un voltaje de referencia de la unidad del punto de ajuste. El controlador mide y amplifica la diferencia entre estas señales y las producidas a la salida d.c. las cuales varían de 4 a 8 m.a. La corriente de salida se transmiten a la conversión del relevo el cual provee una presión de aire de 3 a 15 psig. , proporcional a la corriente directa, a la posición del operador neumático sobre el elemento final de control. Las tres respuestas características del controlador son obtenidas por medio de circuitos amplificadores de retroalimentación.

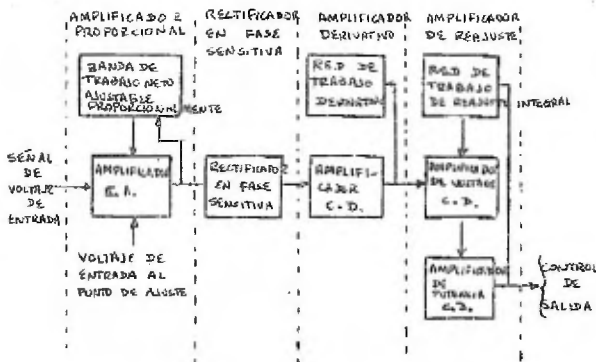


Fig. 3. 52 Diagrama de bloques de un controlador eléctrico provisto de acción proporcional, reajuste y derivación para operar un elemento final de control neumático.

Es en el primer amplificador de c.a. del controlador en el que la ganancia proporcional es obtenida. la sección de salida (1) retroalimentada negativamente a través de la banda proporcional ajustable donde la red de trabajo gobierna la ganancia del primer amplificador .

La señal de salida a.c. de la sección 1. se convierte a un voltaje proporcional d.c. en la sección 2, fase del rectificador sensitivo. Una señal cero a.a. producirá un voltaje cero d.c. ; con un voltaje al punto de ajuste dado, un aumento en la señal de voltaje a la entrada producirá un voltaje c.d. de una polaridad, mientras que una disminución en la señal de voltaje a la entrada - producirá un voltaje d.c. de polaridad opuesta.

Un amplificador de voltaje c.d. con retroalimentación negativa produce una acción derivativa en la sección 3; cuando no hay. ésta retroalimentación actúa simultáneamente con la señal d.c. y mantiene la relación 1 a 1 entre la entrada d-c. Cuando la acción derivativa es usada, una red de trabajo integrada de resistencia - capacitancia se incorpora en la ruta retroalimentadora para aplazarla . Para cambios repentinos de voltaje a la entrada del amplificador d.c. hay una alta amplificación inicial la cual vuelve la relación 1 a 1 durante un tiempo determinado por la acción derivativa de ajuste.

En la sección 4 del amplificador de reajuste, consiste de voltaje d-c y un amplificador de potencia d-c con una sobre ganancia total que cubra de 200 a 1, la red de trabajo derivativa de resistencia - capacitancia es incorporada en el circuito retroalimentador negativo alrededor de ambos amplificadores. Un cambio a la entrada d-c de la sección 4 de cero a algún voltaje será amplificado muy poco debido a su gran retroalimentación. La red de trabajo RC entonces causará a la retroalimentación una disminución lentamente y la salida a la conversión de relevo cambiará a una velocidad gobernada por el ajuste de la constante de tiempo ajustable en la retroalimentación que determinará que la velocidad de reajuste.

Otros controladores similares al anterior, pero operados con una señal d-c

de entrada son diseñados en lugar de una de c.a. , son igualmente útiles. En uno de ellos, el control proporcional es alcanzado por medio de la repetición de una señal recibida desde el medio medidor a través del uso de un repetidor fotosférico, incorporando un aparato diferencial que permite un ajuste de la banda proporcional de 2 a 600%. Las acciones de reajuste y derivativas son suplidas por un tubo cuya corriente de placa es la suma de las dos funciones; la acción del reajuste se provee de un puente fotosférico, el cual carga un capacitor en un circuito reja-resistor-capacitor operado por la corriente en el circuito. El voltaje de salida de éste circuito se agrega al del capacitor de reajuste previamente descrito, en el circuito rejadel tubo; la salida de c.c. del controlador opera un relevo electroneumático atado a un operador de una válvula neumática. Un sistema de palanca operado por la válvula se opone a la retroalimentación mecánica, hacia el lado eléctrico del relevador.

Otro tipo de controlador (Manning, Maxwell & Moore Inc.), emplea un instrumento diseñado para operar desde un transmisor que mide la variable del proceso y produce señales correspondientes de salida del rango de 0.5 a 5.0 ma. de c.c. para manejar al elemento final de control a través de un convertidor electroneumático, ó bien una válvula posicionadora electroneumática.

El registrador ó estación indicadora de control recibe la señal de corriente desde el transmisor de proceso, y lo compara para que, por sí mismo lo evalúe y lo ajuste al valor deseado; las desviaciones producen una señal de voltaje polarizada, la cual está relacionada a la dirección y a la magnitud de la desviación y es alimentada al controlador.

a las terminales 7 y 6.

La amplificación de voltaje y la potencia de salida son provistas en el amplificador de salida, entonces la corriente de salida fluye a través de la válvula posecionadora y el control de la banda proporcional  $P_{21}$  desarrollando un voltaje que cruza posteriormente.

Para analizar la respuesta proporcional, se renueva el resistor  $S_{21}$  del circuito. El capacitor  $C_{21}$  operará al resistor para algún cambio del voltaje que lo cruce, por lo tanto, para un aumento en el voltaje de entrada producirá un aumento de corriente a través del resistor  $P_{21}$  el cual aumentará el voltaje de retroalimentación al amplificador a través del capacitor  $C_{21}$ ; la cantidad de voltaje de retroalimentación será dependiente del ajuste de la banda proporcional, estableciéndose así una ganancia del amplificador de la banda proporcional.

La acción del reajuste resulta cuando el resistor  $S_{21}$  se inserta en el circuito. Conforme el capacitor descarga a través de éste resistor, el voltaje de retroalimentación gradualmente disminuye. Sin embargo, este intento de alejar se aún pequeñamente del voltaje de entrada, el amplificador de alta ganancia aumentará su salida para contraactuar esta partida, con el resultado que la corriente de salida gradualmente aumentará.

Es de notar que cuando el voltaje de entrada es cero, el voltaje de retroalimentación es cero así que no hay corriente que fluya en el resistor  $S_{21}$ , y la corriente de salida permanece estacionaria para algún valor. La velocidad de reajuste se ajusta variando el valor del resistor variable  $S_{21}$ . La operación del cambio de manual a automático, se acompaña de un switch que opera los relevos  $K_1$  y  $K_2$ . Ellos se energizan con la conexión control manual.

Una desviación completa de la escala entre la pluma ó grabador y punto de ajuste, produce una  $\pm 22.5$  volt de señal actuadora; así se constituye una ganancia fija del amplificador del punto de ajuste; la velocidad del amplificador es capaz de manejar señales de entrada de más de  $\pm 50$  volts, así la acción derivativa se opera bajo todas condiciones, indiferente del ajuste del control de la banda proporcional.

Las siguientes referencias del controlador son mejor descritas por el diagrama de bloques de la fig. 3.53 ; los símbolos triangulares se usan para representar la ganancia alta de los amplificadores de tubo de vacío, que tiene dos entradas y una salida. La salida es sensitiva a la diferencia de voltaje de entrada, pero insensitiva relativamente a su nivel común arriba de tierra.

La señal de entrada es conectada a las terminales 6,8 ; la acción derivativa se obtiene por aplazamiento del voltaje de retroalimentación degenera. Para cambios repentinos del voltaje de entrada, hay una gran amplificación. Por que el voltaje retroalimentado se retrasa por la acción del resistor S y el capacitor C. El voltaje retroalimentado es entonces aumentado a una velocidad dependiente del tiempo derivativo de ajuste. hasta que el voltaje de salida se iguala exactamente al de entrada; cuando la acción derivativa no es necesaria. entonces esta unidad puede ser removida y la entrada conectada

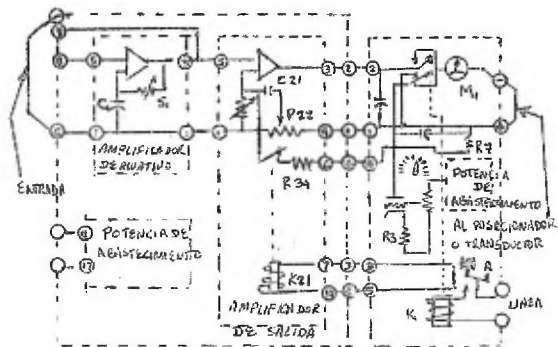


Fig. 3.53 Diagrama ilustrador de un controlador con acción proporcional, reajuste, derivación, la cual provee una corriente de salida a una válvula poseccionadora electro neumática.

Los contactos del relevo se muestran en la posición "automático" del diagrama de bloque de la fig. 3.53.

Para un control manual, el flujo de salida de la potencia de reserva a través del circuito serie, el cual incluye el resistor  $R_7$ , la válvula poseccionadora o el transductor y el tubo de vacío con su cátodo resistor  $R$ ; el controlador de salida fluye a través de las terminales 1 y 2 en el posicionador manual, cuyo circuito se cierra por los contactos del relevo  $K_1$ . Esto es acompañado por medio de una conexión retroalimentadora a través del resistor  $R_{34}$ , el cual causa un voltaje que parece cruzar el resistor  $S_{11}$ , el cual es proporcional a la diferencia entre la corriente del controlador y la corriente del posicionador manual. La ganancia alta del operador controlante mantiene esta relación de diferencia a casi cero.

Así la carga en el capacitor de reajuste  $C$  es ajustado para corresponder al ajuste manual de la válvula, y el switch que puede ser hecho en algún tiempo presionando el botón que cubre al cambio automático. El ajuste de la estrecha banda proporcional no causa una igualación entre el punto de ajuste y la pluma o señalador que lo vuelve crítico.

El cambio de control automático a manual, es completado igualando el señalador ya calibrado del tirador a la válvula poseccionadora como lo indica el millímetro operando el switch en posición manual.

**Relevos Electroneumáticos.** Estos relevos, son aparatos de conversión de cambios de señal eléctricos a una correspondiente presión de aire o válvula de posición operada neumáticamente. Ellas se usan en combinación con un sistema de control eléctrico, donde el controlador superior recibe la señal de error del transmisor liberado en una señal eléctrica de salida, conteniendo las respuestas

de los componentes proporcional, reajuste y derivativa hacia el aparato conversor.

Esos relevos son de dos tipos generales; el primero de ellos se muestra en la fig. 3.54 y consiste de un aparato de balance nulo en la cual una fuerza magnética se opone a la presión de salida del piloto neumático. La sección de aire del relevo de potencia incorpora un booster de relevo de alta capacidad que provee una operación extremadamente rápida de la válvula .

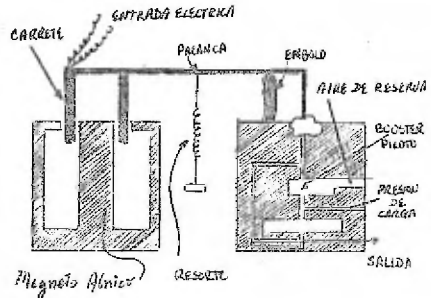


Fig 3.54 Diagrama de un relevador electro-neumático con presión de aire retroalimentado.

La porción eléctrica en el relevo consiste de un carril en movimiento en un campo magnético permanente. En una forma particular, el relevo es así ajustado que la corriente directa de 4 m.a causará 3 psig de aire de salida y una corriente de 8 m.a causará 15 psig de aire que sale. Este rodillo móvil se conecta a una palanca, la cual actúa sobre un diafragma flexible en una porción de aire del relevo. El diafragma flexible ejerce una fuerza proporcional a la presión de salida del piloto pequeño el cual balanceara contra la atracción magnética entre el magneto Anico <sup>®</sup> y el rodillo móvil.

La presión de salida del piloto pequeño no sangrado, se conecta internamente al lado más bajo de un gran diafragma en el relevo booster. Este piloto booster (es considerablemente mayor que el piloto pequeño de arriba de la unidad) se construye arriba de la presión de aire de salida en el lado superior del diafragma hasta igualar exactamente a la presión de carga del aire en el lado más -

bajo ; tiene exactamente la misma presión de salida que el piloto pequeño y -  
consecuentemente la misma relación lineal que se mantiene entre la entrada eléc-  
trica al relevo y la presión final del aire que deja la carga a la válvula de -  
control.

Un segundo tipo de relevo electro neumático se muestra en la fig. 3.55 . su  
operación es similar al que se describió anteriormente, excepto que el apuntador  
son usados como movimiento sensitivos del aparato para producir un cambio en la  
presión de aire al booster neumático.

Un segundo tipo de relevo elec-  
neumático se muestra en la fig. 3.55,  
su operación es similar al que se des-  
cribió anteriormente excepto que el  
orificio y el apuntador son usados -  
como movimientos sensitivos del apa-  
rato para producir un cambio en la -  
presión de aire al booster neumático.  
El booster de salida opera al elemen-  
to final de control, en este caso una  
válvula tróncal; el movimiento es a-  
través de un emparejamiento de resor-  
tes que provee retroalimentación al -  
apuntador y oponerle a la fuerza mag-  
nética generada por la corriente del  
carrete.

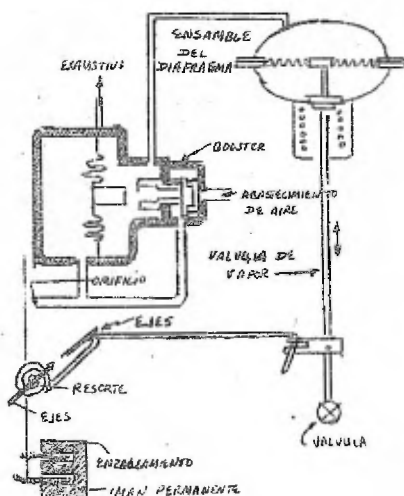


Fig. 3.55 Relevo electro neumático con retroalimentación desde una -  
posición de válvula tróncal.

Debería ser notado, que tiene un hecho deseable que es el tener al elemento  
final de control en el circuito retroalimentador, así actúa conforme a la válvu



bajo ; tiene exactamente la misma presión de salida que el piloto pequeño y consecuentemente la misma relación lineal que se mantiene entre la entrada eléctrica al relevo y la presión final del aire que deja la carga a la válvula de control.

Un segundo tipo de relevo electroneumático se muestra en la fig. 3.55 . su operación es similar al que se describió anteriormente, excepto que el apuntador son usados como movimiento sensitivos del aparato para producir un cambio en la presión de aire al booster neumático.

Un segundo tipo de relevo electroneumático se muestra en la fig. 3.55, su operación es similar al que se describió anteriormente excepto que el orificio y el apuntador son usados como movimientos sensitivos del aparato para producir un cambio en la presión de aire al booster neumático. El booster de salida opera al elemento final de control, en este caso una válvula trócal; el movimiento es a través de un emparejamiento de resortes que provee retroalimentación al apuntador y oponerlo a la fuerza magnética generada por la corriente del carrete.

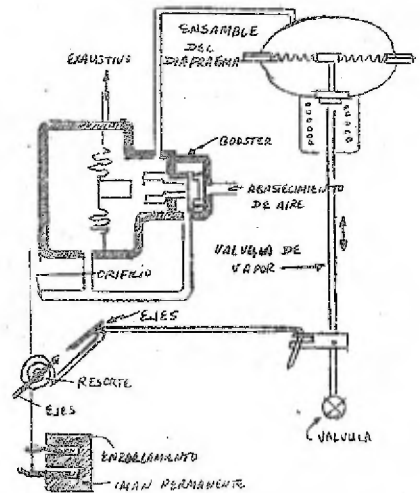


Fig. 3.55 Relevo electroneumático con retroalimentación desde una posición de válvula trócal.

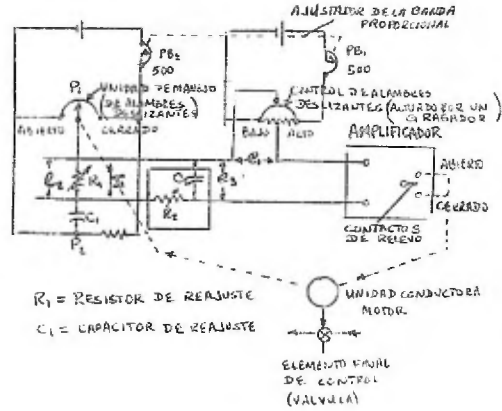
Debería ser notado, que tiene un hecho desahable que es el tener al elemento final de control en el circuito retroalimentador así actúa conforme a la válvula

la posicionadora asegurando un movimiento a la válvula en respuestas a cambios pequeños de la señal de corriente a pesar de la fricción de la válvula.

**Sistemas Eléctricos con Motores Eléctricos actuadores de los elementos finales de control .**

Un sistema más que provee una acción proporcional, reajuste y derivación, es el diseñado para operar un motor eléctrico que maneja las posiciones del elemento final de control. La señal de error c.d. a la entrada es generalmente, pero no necesariamente, obtenida de los alambres deslizantes de control por un tipo de instrumento controlador grabador autobalaceador.

Un diagrama simplificado de este sistema se muestra en la fig. 3.56. Para la acción proporcional, solamente se asume que el capacitor  $C_1$  es cortado. Una partida del contacto de control de alambres deslizantes en el grabador, desde su posición media produce un error de voltaje  $E_1$ , este error se convierte a la corriente alterna amplificada, y a través de un detector opera la unidad de conducción de una dirección a otra.



El movimiento de la unidad de manejo de alambres deslizantes de contacto, produce una diferencia de voltaje entre  $P_1 - P_2$  que cruza al resistor  $R_2$ ; cuando este voltaje de retroalimentación  $E_2$  se iguala y opone a  $E_1$ , la unidad de

Fig. 3.56 Controlador eléctrico con acciones proporcional, reajuste y derivación para operar un motor que maneja a un elemento final de control.

manejo se para.

La banda proporcional puede ajustarse cambiando la relación de voltajes - que cruza al control y la unidad de manejo de los alambres deslizantes en un - rango de 1 a 1.500 por ciento.

Para la acción del reajuste, el capacitor  $C_1$  debe estar en el circuito como se muestra . El voltaje  $E_2$  es la caída de la corriente de carga  $I_c$ , fluyendo através de  $R_1$  ; conforme  $C_1$  es cargado a un potencial  $P_2 - P_1$  , la corriente de carga tiende a disminuir . Tan grande como el grabador esta lejano al punto de control,  $E_1$  no es cero y  $E_2$  debe permanecer igual a  $E_1$  , y la unidad conductora de los alambres deslizantes deben ser lentamente movidos para prevenir un decaimiento en la corriente  $I_c$  de carga ; esto provee una acción de reajuste cuya velocidad es proporcional a la cantidad de partida del punto de control, el cual es lineal através de un rango entero de la acción de la válvula . La acción de reajuste es típicamente ajustable desde 0.02 a 10 repeticiones por minuto variando  $R_1$  , la cual cambia la velocidad de carga de  $C_1$ .

La red de trabajo  $E_2 - R_2$  es agregada a la acción producida por la velocidad por el aplazamiento aparente  $E_2$  en el circuito amplificador  $P_2$  ; solamente  $E_2$  , la carga en  $C_1$  , aparece en el circuito de entrada, mientras el resto de  $E_2$  está en una caída  $IR$  que cruza a  $R_2$  causada por el cargado de corriente para  $E_2$  . Si  $E_2$  es cambiada a velocidad constante, entonces  $E_2$  debe ser mantenido igual a  $E_1$  y el cambio a la misma velocidad, para ello se necesita una corriente de carga constante através de  $R_2$  , y desde que  $E_2 = E_1 - E_4$  , la unidad de manejo de alambres deslizantes debe ser mantenida avanzada fuera de su posición normal proporcional que depende sobre el establecimiento del ajuste del tiempo derivativo. Esta puede ser ajustada de 0 a 5 minutos del tiempo pasado

variando  $R_1$ .

**Características del control eléctrico.**

**Características de transmisión.**

Es probable que la característica más entendida de los sistemas de control eléctrico sea la transmisión; la facilidad y velocidad de transmisión de señales eléctricas tienen un marcado contraste con las señales neumáticas. La siguiente tabla ilustra comparativamente las diferencias entre ellas.

CARACTERÍSTICA	ELECTRICO	NEUMATICO
VELOCIDAD	SUSTANCIALMENTE INMEDIATA	RELATIVAMENTE LENTA
CONDUCTOR	ALAMBRE DE COBRE	ALAMBRE DE COBRE
SENSITIVIDAD A LA TEMPERATURA DE LOS CONDUCTORES	SUSTANCIALMENTE INAFECTABLES POR LA TEMPERATURA	PUEDO CONGELARSE Y TRABARSE A BAJAS TEMPERATURAS SI LA MEZCLA ESTA PRESENTE
CONFIABILIDAD DE LOS CONDUCTORES	LOS ALAMBRES EN EL CONDUCTO ESTAN BIEN PROTEGIDOS DEL DAÑO	EL TUBO DE COBRE ES ALGO MAS VULNERABLE AL DAÑO. LA POSIBILIDAD DE ESCAPE ESTA SIEMPRE PRESENTE
RIESGO DE EXPUSION	RIESGOSA, EXCEPTO POR EL USO DE ACCESORIOS ESPECIALES	NO SON RIESGOSAS

Tabla 3.2 Características del control eléctrico y neumático.

Desde el punto de vista práctico, las características anteriores son importantes; la velocidad de transmisión puede mejorar la calidad del control apreciablemente, teniendo referencia de los sistemas neumáticos que señalan el efecto adverso de la distancia en la controlabilidad debido a retrasos en transmisión, se tiene que en procesos rápidos sus defectos son demasiado pronunciados como sucede en el flujo, pero de poca trascendencia como sucede con la temperatura.

La diferencia en costo entre la corriente de tubería con el generalmente menor costo de los alambres de cobre, que puede ser apreciable en instalaciones grandes; la confiabilidad de la transmisión, eliminación del riesgo de congelamiento y eliminación de aire expansivo de bomba, limpieza y secado del equipo, son todos factores favoritos en el uso de sistemas eléctricos de control.

En donde existen condiciones riesgosas, la necesidad de grandes y expansivos albergues necesarios para pruebas de explosión de equipo electrónico, puede tender a limitar su uso, sin embargo, los salones de control en la mayoría de las nuevas instalaciones son consideradas seguras, y solamente el artículo localizado en el área de la planta necesita de pruebas de explosión para su mayor parte. Los Británicos han desarrollado un código para "seguridad intrínseca" donde no hay pruebas de explosión cuando las corrientes y voltaje son mantenidas debajo de ciertos valores. Tales códigos para los Estados Unidos pueden bien desarrollarse con el aumento aplicativo de instrumentación eléctrica y control en procesos riesgosos.

La mayoría de los pequeños usuarios prefieren sistemas de control eléctrico, ya que la electricidad es normalmente de rápida utilidad, no así en sistemas neumáticos, además la misma fuente de potencia puede emplearse en otras actividades.

Para ciertas aplicaciones en donde las ventajas del control eléctrico es deseable pero donde el elemento final de control se localiza en una atmósfera riesgosa, la mejor respuesta será el sistema de control eléctrico que provee para una operación local del control final neumático por medio de un convertidor eléctrico neumático.

### Operación de Falsa Seguridad.

En faltas de potencia, las unidades eléctricas conductoras son normalmente arrojadas para permanecer en su última posición indefinidamente, ya que ellas son autocerrables por lo general y no están sujetas para ser manejadas al revés por la carga que ellos operarán. Eshecho, es con frecuencia completamente importante, especialmente en ciertos procesos críticos. Diafragmas neumáticos o cilindros de potencia, en el otro (extremo) parte, no son normalmente de auto-cierre; los actuadores tipo diafragma son generalmente arrojados por medio de resortes inclinados para cerrar, o bien abrir en falta de aire como pueda ser deseado.

Los circuitos eléctricos son frecuentemente diseñados para una señal de salida predeterminada, la que resultará de lo más común de las fuentes de abastecimiento.

### Versatilidad .

Pueden combinarse con equipos especiales, donde dos ó más variables pueden ser detectadas y entrar a una acción que cubra el control total. Por ejemplo, el control de temperatura puede ser rápidamente disminuida por una señal de respuesta de velocidad originada desde un tacómetro; en otro ejemplo, el control de temperatura puede combinarse con una señal que represente la velocidad de respuesta del flujo de aire, como es generalmente hecho en el control de temperatura de un hervidor de vapor para proveerle la velocidad de respuesta. La mayoría de las combinaciones con variación son con frecuencia desechables y mezcladas rápidamente con señales eléctricas en proporción deseada que se completa con multi-elementos de control.

Con frecuencia un simple controlador puede operar más de un elemento final de control, y en tales casos, la unidad conductora puede ser rápidamente operada en paralelo o en la secuencia deseada, teniendo cada unidad de manejo un ajustador de banda proporcional por separado que responda a las características adecuadas del elemento final de control en particular que esté operando .

#### Efectos de las Condiciones Ambientales.

Básicamente las condiciones son: temperatura , humedad, voltaje de línea, frecuencia y forma de la onda .

Efectos de la temperatura. La mayoría del equipo de control eléctrico es diseñado para operar en un rango de cero a 140 F. Para bajas temperaturas, - consideraciones especiales pueden ser necesarias para su lubricación de la unidad conductora; para altas temperaturas, ciertos componentes pueden necesitar un tratamiento especial y se obligan a un enfriamiento artificial ; un escudo de radiación provee protección para los cuerpos calientes en el caso de que sean - deseables.

Efectos de la humedad . La mayoría del equipo de control eléctrico es di se ñado para operar bajo condiciones de humedad provocadas por la temperatura del medio ambiente ; para clima tropical o semitropical. Deben tomarse precauciones para cubrir las condiciones excesivas de humedad, particularmente durante el alma ce ñaje de equipo para períodos extensos de tiempo . Cuando se operan, el propio calentamiento de la mayoría del equipo de control tienden a mantenerse secos para que el daño o mal funcionamiento debido a la mezcla no se presente.

Variaciones en la línea de voltaje. Frecuencia y forma de la onda y del en

terrado . La mayoría del equipo de control es diseñado para operar con un voltaje de línea de 115. con una tolerancia de  $\pm 10\%$  ; el voltaje de línea menor del  $10\%$  tienden a efectuar una operación incierta, y en el caso de los amplificadores eléctricos, en forma general tienden a reducir su sensibilidad. Para voltajes de línea superiores, causan un sobre calentamiento y reducen la vida del equipo eléctrico . Un almacenamiento que corra consistentemente en las posiciones alta y baja, pueden corregirse con un transformador de paso ascendente y descendente.

La variación de un amplio almacenaje debería ser corregida instalando una capacidad eléctrica mayor a la normal de carga, que no afecten al voltaje de línea seriamente, o que es con frecuencia preferible corregirlo para el uso de instrumentos y además del regulador de voltaje .

Para la selección del regulador de voltaje, una consideración debe hacerse sobre la forma de la onda, si una considerable distorsión armónica se presenta. por esta razón, la mayoría de instrumentos y amplificadores control necesitan un almacenaje razonablemente bueno de ondas senoidales y que puedan operar equivocadamente o con pobre sensibilidad cuando este presente mucha distorsión en la fuente de almacenamiento de poder .

Es bueno en la práctica y generalmente deseable tener una parte de la línea enterrada, particularmente en equipos de control de abastecimiento que incluya amplificadores electrónicos . En reservas desenterradas, las variaciones rápidas y grandes de voltaje desde la línea a la tierra pueden causar falsas operaciones del equipo de control. Con frecuencia, se desea que una parte de la línea vaya a tierra como lo indica los fabricantes de equipo y control para tener un mejor funcionamiento .



Factores de Instalación. Se recomienda seguir con una cuidadosa atención, para obtener mejores resultados y disminuir la mantención expansiva, los sig. - puntos :

- 1.- El equipo se instale a una altura conveniente, arriba del suelo y permita un amplio espacio, tanto el frente como a l fondo de la instalación, para su observación y mantenimiento.
- 2.- Evitar la temperatura ambiente excesiva.
- 3.- Proteger al equipo del polvo y basura en exceso, humos ( corrosivos, químicos y de mezcla ).
- 4.- Proveer una fuente de poder estable del propio voltaje, frecuencia, forma de onda, apropiadamente enterrados en donde se necesite.

Aplicación. Los sistemas de control eléctrico son ampliamente empleados en una gran variedad industrial, su uso es extenso en la industria del acero, de la cerámica, del papel y de las fuentes de poder eléctricas ; son algo menos extendidas en la industria química y del petróleo debido al riesgo de explosión. En los laboratorios de alcance industrial, emplean éste sistema eléctrico de control en conexión a los procesos que se calientan eléctricamente.

#### Características de la Unidad de Manejo.

a) Velocidad . Es aparente que conforme a la velocidad de la unidad de manejo se aumenta, su posición de estabilidad tendera a volverse menor debido al aumento del momentum; de acuerdo a que su velocidad debe ser seleccionada para una aplicación dada, no mayor a la que se necesite para mantener a la unidad en un punto, con cambios llamados de variación en la variable a controlar.

Existen procesos en los cuales se presentan variaciones pequeñas de la variable a controlar necesitando para corregir esta desviación en intervalos de tiempo cortos. Para otros procesos en cambio, el retraso de tiempo es perjudicial,

como es el caso de un proceso a pequeña capacidad de almacenamiento, en el que los ajustes del control deben efectuarse en 20, 10 segundos, ó en casos no usuales, en tiempos aún más cortos; pero altas velocidades, agravan el problema de la buena retención de sensibilidad en una posición de la unidad de manejo.

b) Momento de Inercia. La mayoría de la energía almacenada en una unidad conductora eléctrica, por lo general está en el rotor del motor conductor (por girar a alta velocidad). Actualmente existen motores de reducciones drásticas del momento de inercia del rotor, así como flecha y demás partes rotativas del motor, para reducir a un mínimo y dar mejores resultados.

c) Frenamientos. Para reducir costos, varios tipos de frenos pueden ser empleados; una fricción aplicada continuamente a la carga reduce la salida de la unidad conductora generando calor y desgaste, aunque es poco deseable, debido a su bajo costo y simplicidad, a sido empleado eficazmente en unidades pequeñas.

El freno magnético es también frecuentemente empleado en motores de c.c. - este freno se desliza por un electromagneto que energiza al motor y un resorte es aplicado para desenergizarlo; este freno es efectivo aunque costoso y generalmente necesita algún mantenimiento cuando se opera con frecuencia.

Un freno dinámico es empleado con frecuencia en motores shunt de corriente alterna; la armadura es cortada por sí misma a través de un resistor adecuado, y el flujo resultante o corriente de armadura reacciona con el campo magnético para producir el freno. No es expansivo y necesita poco mantenimiento, pero su uso es limitado para motores de c.c.

Otra clase de freno, empleada en motores pequeños de inducción (c.c.), es

mediante la aplicación de una rectificación cuando la c.a. es aislada, la acción da como resultado que el rotor frene dinámicamente.

d) Amortiguación. La amortiguación del motor se acompleta frecuentemente - con una señal auxiliar insertada en el conductor amplificador del motor; esta - señal por lo general es una respuesta al cambio o velocidad de la unidad conductora, así el motor se desenergetiza prematuramente, o puede ser momentaneamente energétizada en dirección inversa, conforme se aproxime al punto de balance y - de acuerdo al paro repentino.

Este problema es en forma general más agudo en unidades conductoras grandes en donde la relación de las fuerzas de amortiguación por fricción a la unidad - conductora de inercia es menor que en las unidades pequeñas.

e) Capacidad de Salida. Las unidades de manejo de un modelo patrón, son - útiles para una capacidad de control a la salida que van desde 10 a 10,000 lb-ft.

## INSTRUMENTACION INDUSTRIAL

El uso de la instrumentación, pieza fundamental en la medición y en el control de procesos químicos es desarrollada en el presente toma cubriendo los puntos de mayor importancia, siendo ellos: instrumentos de medición de temperatura, instr. de medición de presión y de vacío, instr. de medición de nivel, instr. de medición de flujo, instr. de medición de calor. todos ellos ampliamente empleados en la industria.

### INSTRUMENTOS DE MEDICION DE TEMPERATURA

Estos instrumentos están basados en la variación de las propiedades físicas de sustancias con la temperatura. En concordancia con el fenómeno físico empleado para la medición de temperatura, los instrumentos existentes pueden dividirse en los siguientes cinco grupos: termómetros de expansión, termómetros manométricos, termómetros de resistencia, pirómetros termoelectrónicos y pirómetros de radiación.

Termómetro Manométrico. Su acción es gobernada por la relación entre la temperatura y la presión de la sustancia trabajada la cual está prevenida de expandirse libremente cuando se calienta. consiste de un contenedor metálico (termobulbo) el cual se coloca en el medio de medición y conectado por un tubo capilar ( con diametro interno de 0.1 - 0.5 mm.) a un elemento sensitivo del aparato, el cual se arregla de una forma similar a un resorte del manómetro (fig. 4.1). Si es conectado a un medio explosivo ó a un aparato bajo una alta presión, un cambio puede envolver el paro del aparato, por lo que se le protege con una envoltura al termobulbo. Contra el daño mecánico el tubo capilar es encerrado en un frenado metálico, así

-el termómetro manométrico constituye un sistema cerrado consistente de un termobulbo, el tubo capilar y el manómetro, todos llenados con la substancia de trabajo, que puede ser un gas, un líquido o un sistema que comprende un líquido con su vapor saturado, correspondiendo a esas tres clases de substancias de trabajo, hay tres tipos de termómetros manométricos -gas, -líquido y vapor-.

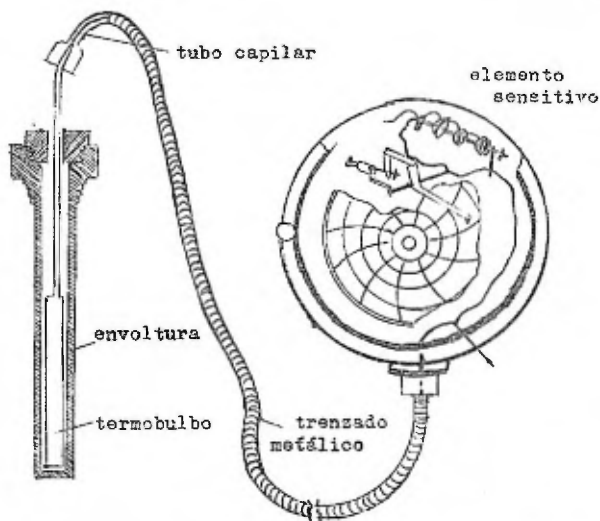


Fig. 4.1 Termómetro manométrico

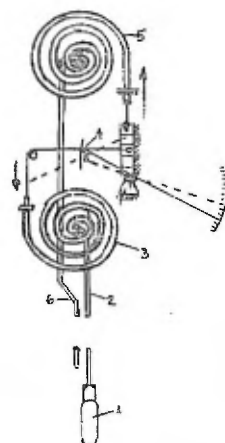


Fig. 4.2 Unidad de compensación especial de un termómetro manométrico.

La sensibilidad de un termómetro manométrico depende sobre el coeficiente de temperatura del volumen de expansión de la substancia de trabajo, el ranco del termómetro depende sobre la temperatura de solidificación y vaporización de la substancia de trabajo.

Los termómetros manométricos de gas son llenados de un gas inerte por ejemplo nitrógeno ó helio. Tales termómetros miden la temperatura en un

-rango de  $-50$  a  $+550^{\circ}\text{C}$ .

Los termómetros manométricos líquidos son más frecuentemente llenados con mercurio, y el límite superior es de  $500^{\circ}\text{C}$ . En manómetros de gas y líquido la sustancia de trabajo está bajo cierta presión inicial (de 10 a  $50\text{ kg/cm}^2$ ) los cuales son capaces de influir en la presión atmosférica para disminuir a un mínimo. Los termómetros manométricos de vapor se llenan con líquido de bajo punto de ebullición (alcohol etílico o éter etílico) y su vapor saturado. La medición límite superior de éstos aparatos es  $200^{\circ}\text{C}$ . Los termómetros de vapor poseen pequeña inercia de temperatura, comparados con los otros manométricos, y en la práctica no se exponen a la influencia de temperatura de los alrededores.

Una de las ventajas de estos termómetros, es el hecho de emplearlos en rangos grandes de medición. La extensión del tubo capilar puede ser de varios cms. a 60 m. dependiendo sobre su posición del instrumento secundario al manómetro. El uso de grandes tubos capilares debería ser evitado si se desea reducir el efecto de la temperatura de los alrededores en la precisión de las lecturas del instrumento; el instrumento secundario puede comprender un manómetro con un resorte tubular (del tipo Bourdon) o con un resorte tubular helicoidal retorcido.

Un aparato de compensación especial se usa para reducir el efecto de la temperatura de los alrededores en la precisión de las lecturas del termómetro manométrico. Este aparato (fig. 4.2) consiste de un tubo capilar compensador(6) de la misma extensión del tubo principal(2), pero sin el termobulbo y un resorte tubular subsidiario(5) con la misma elasticidad y característica del resorte principal del manómetro(3). El resorte subsidiario ejer-

...ce una fuerza en el mecanismo conductor(4), el cual está opuesto al del resorte principal y que le compensa la influencia de los alrededores en las lecturas del instrumento; así el desplazamiento angular del punto del indicador del instrumento cubre la escala que corresponderá a la temperatura del termobulbo exclusivamente.

Los termómetros manométricos tienen muchos méritos, simplicidad constructiva, resistencia a la vibración y baratos, no necesitan ellas de potencia de reserva y son absolutamente seguras. Entre algunos de los defectos se incluyen la necesidad de comparar con frecuencia y revisar, además de la relativa dificultad en la reparación del instrumento cuando el tubo capilar está roto. En termómetros automáticos de cuadrante para grabación con uso de 24 horas, el movimiento del cuadrante es llevado por un mecanismo de reloj o por un motor eléctrico síncrono. La precisión básica de error de los termómetros de gas es  $\pm 1.5\%$  del rango de medición. Los termómetros manométricos para medir la temperatura de un gas pueden ser usados a una presión absoluta arriba de 60 kg/cm<sup>2</sup>.

TERMOPARES. La medición de temperatura se efectúa por medio de termoelementos o conductores metálicos: A, B, C, .....N y las uniones de estos como A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub>, .....A<sub>N</sub>, de una manera similar una fuerza termoeléctromotriz ocurrirá en el circuito; la magnitud de esta fuerza dependerá de la temperatura en los puntos de contacto de los conductores, pero, sin embargo si las uniones tienen la misma temperatura ninguna f.e.m. se producirá en el circuito. La unión en la cual se coloca la temperatura para ser medida se le llama unión trabajo y la segunda unión se llama función libre. Si la temperatura de la unión libre es constante, entonces:  $E_{AB}(t_1, t_2) = f(t_1) - C = f(t_2)$  (4-1)

Para medir una f.e.m. termoeléctrica se debe de introducir al cir-

quito del termopar un instrumento de medición eléctrica ya sea por la separación de la unión libre del termopar (fig. 4.3b), o por conexión del instrumento en uno de los electrodos (fig. 4.3c). En el primer caso hay dos uniones libres 2, y en el segundo hay una unión libre y dos uniones neutras 3 y 4. Los milivoltímetros y potenciómetros automáticos son comúnmente usados en la industria para medir la f.e.m. termoeléctrica.

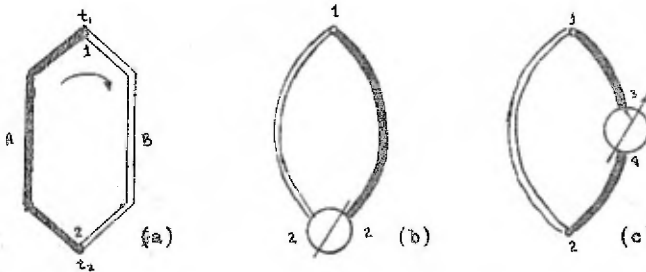


Fig. 4.3 (a) Circuito termopar. (b) Conexión del inst. medidor en el circuito termopar en la unión de los extremos libres. (c) El inst. es conectado a uno de los termoelectrodos.

La corrección efectuada a la fórmula (4-1) será:

$$T_{\text{real}} = t + K(t_1 - t_2) \dots \dots \dots (4-2)$$

donde  $T_{\text{real}}$  es la temp. verdadera  
 $t$  es la temp. leída por el instrumento  
 $t_1$  es la temp. de los extremos libres en la cual la graduación se efectuó  
 $t_2$  es la temp. actual de los extremos libres  
 $K$  coef. que depende del termopar y del intervalo de temp. medido.

En los potenciómetros automáticos usados para medir la f.e.m. termoeléctrica, el efecto de la temperatura de los extremos libres del termopar es compensado automáticamente por la inclusión de una resistencia de nickel o cobre en el circuito medidor del potenciómetro. Los termopares pueden dividirse de acuerdo al material de sus electrodos en dos grupos: los construidos por metales nobles y los construidos por metales no nobles, el



primer grupo incluye el tipo de termopar platino-platinorodio. El segundo grupo incluye el tipo cromo-aluminio TCA, el tipo cromo-kopel TCK y el tipo TWK, que no necesita de correcciones para temperatura de los extremos libres. El termopar platino-platino rodio se usa para medir temperaturas dentro del rango de 1100-1600°C; un electrodo de éste termopar es platino puro y el otro 90% platino y 10% rodio. La f.e.m. producida por este termopar a 1600°C es de 16.76 mV (la temp. de los extremos libres siendo igual a cero). Para medir temperaturas debajo de 1100°C los termopares hechos de metales no nobles son usados, las características básicas de estos termopares se señalan en la tabla 4-I

Nombre del termopar	Termo f.e.m. cuando $t_1=100^\circ\text{C}$ $t_2=0^\circ\text{C}$	El límite superior de la temp. siendo medida	
		Para gran uso	Para poco uso
Cobre-Kopel	4.75	350	500
Fierro-Kopel	5.75	600	800
Cromo-Kopel	6.90	600	800
Cromel-Alumel	4.10	1000	1300

Tabla 4.I Funcionamiento de termopares de metales no-nobles.

El termopar de Cromel-Alumel trabaja bien en un medio oxidante gracias a la producción por calentamiento de una fina capa protectora de óxido que previene la oxidación posterior del metal, pero son menos estables en un medio reductor arriba de una temperatura de 600°C. Los termopares de fierro-kopel y cobre-kopel no han sido ampliamente usados debido a que no poseen las ventajas del termopar de cromel-alumel.

La Construcción de Termopares. Cuando son diseñados los termopares, una considerable atención debe pagarse en la selección del material de la cubierta protectora y aislación. Para cubrir a un termopar, se debe de imper-

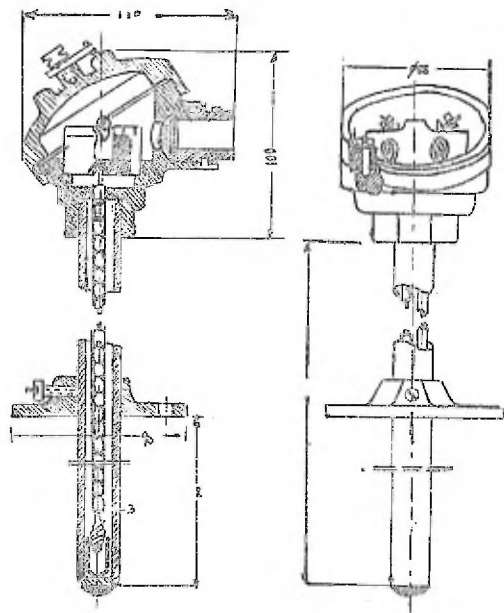


Fig 4.4 Termómetro para Todo propósito industrial con cabeza a prueba de agua

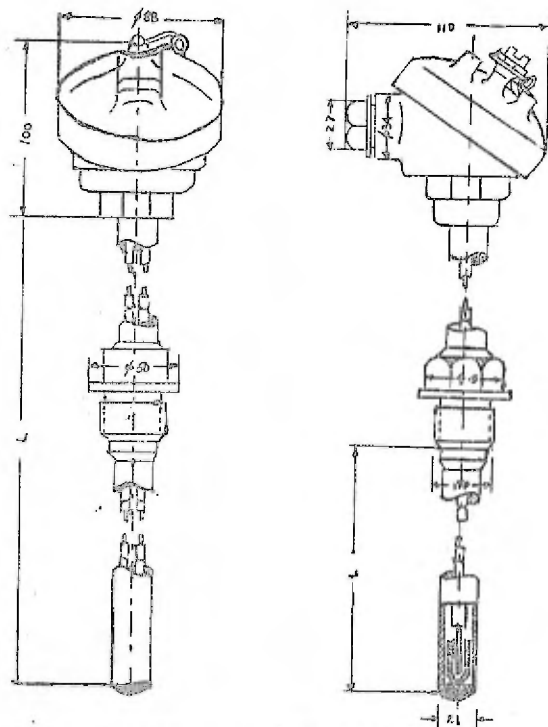


Fig 4.5 Termómetro para Todo propósito industrial con hilado estacionario conectado a un brazo.

deabilizar para gases, de buena conductividad calorífica, robustez mecánica y resistencia al calor. Además, no deben, o siendo calentados, liberar gases o vapores que destruyan al electrodo. Las descosturas de los tubos de acero son usadas para proteger a los termopares hechos de metales no-nobles para mediciones de temperatura arriba de 600°C. El tubo es hecho de acero inox. para medir temperaturas arriba de 1100°C. Los tubos no-metálicos (cuarzo, - porcelana, etc.) son principalmente empleados para protección de termopares hechos de metales nobles. La principal desventaja para un armado no-metálico es su debilidad mecánica y alto costo comparativamente.

Los tubos metálicos enfriados con agua se usan para medir altas - temperaturas en hornos y otros de dichas unidades. Para aislar los termo-electrodos de uno a otro asbesto, se usan arriba de 300°C, los tubos de cuarzo o granos arriba de 1000°C, los tubos de porcelana o granos arriba de 1300° y de 1400°C. Una gran cantidad de atención se tiene en el diseño de termopares para la construcción de la cabeza, la cual es el principal hecho o factor determinante de la realización de calidad del termopar; la fig 4.4 representa a un termopar de cromel-kopel para cualquier propósito industrial con una cabeza protegida de agua. el tubo de protección 3 es hecho de acero 20 o de acero tipo IKH18N9T. El plomo de los conductores de aparamiento son provistos de un metal flexible, las terminales son flotantes por lo cual se pueden dirigir hacia arriba 5 bien hacia abajo.

La fig. 4.5 muestra el diseño de un termopar con un hilado estacionario conectado aun brazo por ejemplo teniendo un definido espesor conductor el cual se determina por el ajuste del borde móvil. La inercia de los termopares descritos de una cantidad de 6 a 8.5 min., necesitan alcanzar dentro de un 5% de la lectura firme, cuando la temperatura brinca de 20 a 100°C.

Para tubos y aparatos de alta presión (arriba de 250 atm.) con baja inercia, se prevé de accesorios protectores hechos en forma de barra de igual resistencia esta aumenta la durabilidad dinámica de la envoltura, la cual se elaboran de acero en varios tipos. De igual forma los termopares de superficie son construídos de acuerdo al trabajo a desempeñar, por ejem. en la medición de temperaturas de las superficies de tubos verticales de los hornos (columnas).

#### TERMOMETROS DE RESISTENCIA.

a) Metálicos. La medición de la temperatura por medio de estos termómetros, se basan en la variación de la resistencia eléctrica de un conductor con variación en temperatura. Si la relación entre la temperatura y la resistencia es conocida, podemos, con la variación de resistencia determinar la temperatura del medio el cual esta siendo controlado. Por medio de los termómetros de resistencia se hacen mediciones de -250 a 1000°C con un alto grado de precisión, pero para temperaturas superiores de 500°C es más práctico usar termopares.

Platino puro y cobre son principalmente usados como material de esta clase de termómetros. El platino debe de satisfacer las condiciones de:

$$\frac{R_{100}}{R_0} = 1.39 \qquad \frac{R_{444.6}}{R_0} = 2.645$$

donde  $R_0$ ,  $R_{100}$ , y  $R_{444.6}$  son las resistencias a las temperaturas de 0, 100, y de 444,6°C respectivamente. Los termómetros de platino industrial son hechos de platino de un diámetro de 0.05 a 0.07 mm. ó de una cinta con sección de cruce de 0.002 a 0.005 mm<sup>2</sup> intentadas para medir temperaturas en el rango de -200 a +500°C

Para el intervalo de temperatura de 0-500°C la variación de la re---

-sistencia del termómetro de platino está sujeto a la ley  $R_t = R_0(I + At + Bt^2)$  (ec. 4.3) donde  $R_0, A$  y  $B$  son constantes que se determinan por la graduación del termómetro en terminos del punto de congelación del hielo y los puntos de ebullición del agua y del azufre. Para el platino puro:

$$A = 3.950 \times 10^{-3} \text{ grad}^{-1}$$
$$B = -5.85 \times 10^{-3} \text{ grad}^{-2}$$

El límite superior para mediciones de temperatura del cobre en los termómetros de resistencia es restringido a 100-150°C, como resultado de la oxidación del cobre para altas temperaturas; la variación de resistencia del cobre de -50 a 150°C puede ser expresado por la ecuación lineal :

$$R_t = R_0 ( 1 + \alpha t ) \quad \text{donde } R_t \text{ es la resistencia a la temp. } t$$
$$\dots\dots(4.4) \quad R_0 \text{ es la resistencia a } 0^\circ\text{C}$$
$$\alpha \text{ es el coef. de resistencia de temp.}$$

Para el alambre de cobre, los termómetros de resistencia de graduación 2 $\alpha$ ,  $\alpha=4.25 \times 10^{-3} \text{ grad}^{-1}$ . Los termómetros industriales tienen una resistencia a 0°C desde 46 a 100  $\Omega$ , los termómetros modelo o patrón tienen una resistencia a 0°C de 10 a 30  $\Omega$ . Los más adecuados materiales para los primarios son de mica, cuarzo y porcelana; los primarios de mica estan fabricados en la forma de un cruce o placa, y están dispuestos de orillas dentadas.

Los termómetros de resistencia de platino están hechos de dos variedades: simple y doble; en el doble dos elementos sensitivos los cuales no están conectados electricamente están montados en un accesorio común. Cada elemento sensitivo tiene su propio par de terminales en la cabeza del termómetro. La fig. 4.6 muestra el elemento sensitivo de una resistencia sencilla. Los puentes de calor son lóbulos hechos de duraluminio en hojas, sea buena garantía de contacto térmico entre la mica en el cual el plano está montado y

la envoltura externa a través del cual el intercambio de calor con el medio alrededor ocurre. Los termómetros de resistencia con lobulos poseen una inercia de dos o tres veces menor que los de viejo diseño con los así llamados de "ramos". Con la ayuda de tales, un diseño de la dificultad de fabricación de un termómetro de resistencia dual teniendo una envoltura común es fácilmente solucionado.

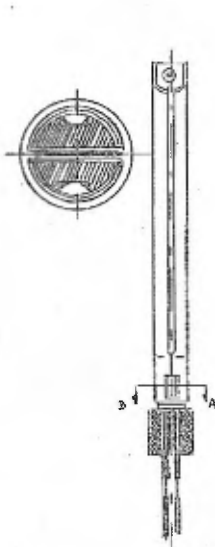


Fig. 4.6 Elemento sensitivo de un termómetro de resistencia con conductores

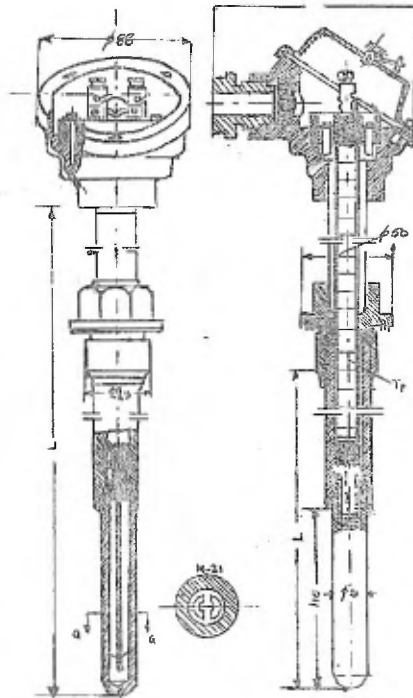


Fig. 4.7 Termómetros de resistencia de platino para todo propósito industrial

El termómetro de platino industrial mostrado en la fig. 4.7 es diseñado medir temperaturas superiores de 500°C y presiones arriba de 100 atm. IX18-N9T o 20x es la forma del acero para el material de envoltura;

la cabeza del termómetro es hecha a prueba de agua o polvo y de ramilla con una chaqueta flexible (tipo ETP-56I).

El termómetro de resistencia de baja inercia se diseña para medir la temperatura del flujo de gas; el enfriamiento del termómetro es cerrado por placas de mica y es colocado en una cobertura metálica, la cabeza es fabricada con una envoltura flexible (tipo ETP-45I).

Para medir temperaturas negativas debajo de  $-200^{\circ}\text{C}$  en la superficie en una tubería o recipiente, se emplean termómetros de resistencia superficiales del tipo ETP-59I; en el fondo de la envoltura de dicho aparato se conecta con la superficie en contacto que está siendo medida, es una espiral extendida de platino de resistencia de  $100\text{-}\Omega$ , el diámetro del alambre de platino es de 0.06 mm. con aislación de esmalte y cubierta de seda.

b) Termómetros de Resistencia Semiconductores. Donde la resistencia de conductores ordinarios aumenta con la temperatura, la resistencia de los semiconductores por otra parte disminuye; la relación entre la temperatura y resistencia de los semiconductores es expresada por la fórmula:

$$R = A \cdot e^{-\frac{b}{T}} \quad \dots\dots (4.5)$$

donde T es la temp. absoluta  
A, B son constantes  
características del semiconductor

$$6 \quad \log R = \log A + \frac{b}{T} \quad \dots\dots\dots (4.6)$$

El coeficiente de temperatura de resistencia a no esta en este caso como una calidad constante pero varía de acuerdo a la expresión siguiente:

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = -\frac{b}{T^2} \quad \dots\dots\dots (4.7)$$

Los oxidos de materiales tales como titanio, magnesio, fierro, manga-

neso, cobalto, nickel, cobre, etc. son usados como materiales para resistencias de los semiconductores (termistores). Los termistores tipo MMT-I, MMT-4, CMT-4 son usados como medidores de temperatura en monitores y en control, los dos últimos son hermeticamente sellados, con el resultado de que puedan ser empleados cuando se trabajan con líquidos. Los parámetros de algunos termistores se señalan en la tabla 4.2.

Los termistores son ampliamente usados en la industria debido a su gran coeficiente de temperatura, tamaño pequeño, baja inercia comparativa y alta estabilidad.

Parametros	tipo de termistor			
	MMT-I	MMT-4	CMT-I	CMT-4
La fuente de disipación que no se hace en la práctica causa el calentamiento inicial del termistor, V	de 0.002 a .005		de 0.002 a 0.005	
La cte. de tiempo en aire, seg.	85	115	85	115
Temperatura de trabajo máxima, °C	120	120	180	120
Rango de resistencias normal, kΩ	de 1 a 200		de 20 a 100	
Coef. de temp. de la resistencia (a 20°C), %	de 2.4 a 3.4		de 4.5 a 6.0	

Tabla 4.2 Parámetros de algunos termistores

#### PIROMETROS DE RADIACION

Pirómetros Ópticos. La temperatura de un cuerpo caliente puede ser determinada por la magnitud de la energía radiante emitida por el cuerpo. En vista de que todos los pirómetros ópticos se gradúan con la radiación total del cuerpo negro, estos no resultan como indicadores reales para otros objetos, por lo que, el valor real se calcula de la expresión:

$$T = \frac{(0.568)(T_b)}{0.568 - \ln \left( \frac{1}{\epsilon} \right) \cdot (T_b)} \dots\dots\dots(4.8)$$

donde T es la temperatura de brillantez del cuerpo (lectura del pirómetro) en °K



- $\frac{I_{\lambda}}{I_{\lambda}^*} = \epsilon_{\lambda}$  — Es el coeficiente de radiación monocromática, menor de 1.  
 $I_{\lambda}$  — Es la intensidad de la radiación monocromática del cuerpo real a la temperatura T.  
 $I_{\lambda}^*$  — Es la intensidad de radiación monocromática del cuerpo negro absoluto a la misma temperatura T.

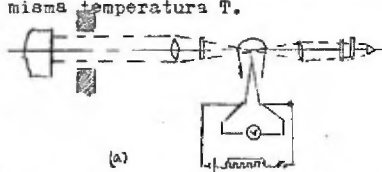
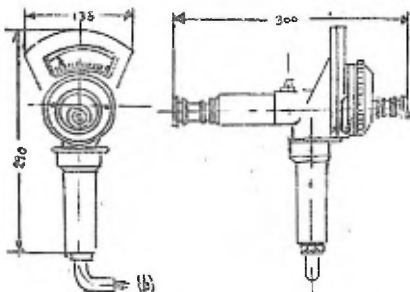


Fig. 4.8 a. Diagrama interno de un pirómetro óptico de filamento separado.

Fig 4.8 b. Apariencia externa del mismo pirómetro (de filamento separado) con escala - directa de temperatura de dos rangos: 800-1400°C y de 1200° a 2000°C



El valor del coeficiente  $\epsilon_{\lambda}$  para los más importantes cuerpos físicos están dados en tablas especiales; se observaría que el valor de  $\epsilon_{\lambda}$  depende de una considerable extensión sobre la condición de superficie del cuerpo.

**Pirómetros de Radiación Total.** La intensidad integral ó total de la radiación de un cuerpo negro absoluto a la temperatura T puede ser calculada de la sig. expresión :  $S_T^* = \int_{\lambda}^{\infty} C_{\lambda} (\frac{C_2}{\lambda T} - 1)^{-1} d\lambda = \sigma T^4$  ....(4.9) en donde  $\sigma = 4.96 \times 10^{-8}$  erg/cm seg grados

Para cuerpos físicos la integral de intensidad de radiación es igual a :  $S_T = \epsilon S_T^*$  donde  $\epsilon$  es el coef. de radiación integral menor de uno. Empleando esta clase de pirómetro, se hace la medición en forma directa, empleando una termobatería como elemento sensitivo; la concentración de los rayos que emergen del cuerpo medido es llevado por medio de un espejo cóncavo o de un lente.

Para medir temperaturas debajo de  $+5^{\circ}\text{C}$  un sistema de espejos es usado o lentes fabricados de fluoruro de litio de cristal KRS-5. Los piró-

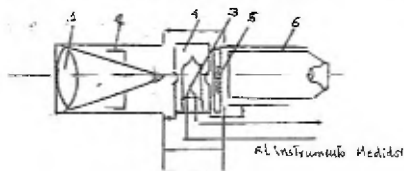


Fig. 4.9 diagrama del pirómetro de radiación tipo RPS.

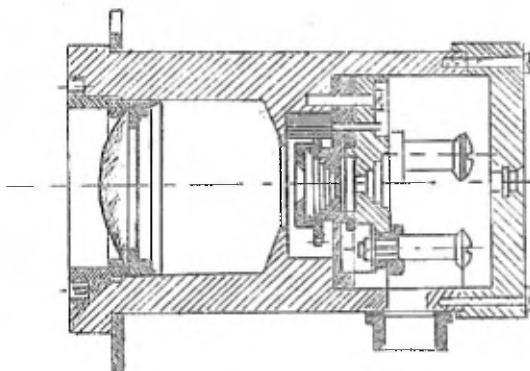


Fig. 4.10 Diseño perfecto de un pirómetro de radiación telescópico.

metros de radiación portátil del tipo RP y los estacionarios del tipo RPS teniendo un rango de  $900$  a  $1800^{\circ}\text{C}$  son industrialmente fabricados. Los pirómetros de radiación del tipo RP y RPS consisten de las siguientes partes:

1. Un sistema de telescopio óptico (refractor) el cual concentra por medio de lentes biconvexas la energía de radiación del cuerpo medido en el intercambiador de calor (elemento sensitivo).
2. Un intercambiador de calor colocado en el telescopio, que consiste de una termobatería hecha de 4 termopares de cromel-kopel unidos en serie, las unióa trabajo las cuales están soldadas a discos de platino enegresidas.
3. Una pieza visual, que sirve para dirigir el telescopio
4. El instrumento secundario.

La representación esquemática de un tipo RPS se da en la fig. 4.9. La radiación del cuerpo habiendo pasado a través del objetivo (1) y el diafragma (2) es concentrado en las uniones trabajo de la termobatería la cual se coloca en un bulbo de vidrio. Para proteger las baterías térmicas de daño mecánico y de la radiación, la mampara (4) es colocada a las paredes del telescopio. El telescopio es dirigido por la pieza visual (6). Para protección de los ojos cuando se hace una mirada en el telescopio sobre el radiador calentado, un filtro de luz roja (5) se coloca enfrente de los ojos. La relación de el diámetro del radiador a la distancia del radiador al telescopio sería aprox. igual a  $1/15$ . Para eliminar el efecto de la variación de temperatura de los extremos libres de la termobatería, un carrete hecho de cobre (o nickel) alambrado se conecta en serie con la termobatería y es colocado para cerrar sus extremos libres.

Un diseño más altamente desarrollado para un pirómetro de radiación telescópico producido recientemente se muestra en la fig. 4.10. La radiación del cuerpo que está siendo medido, habiendo pasado al objetivo (3) y al diafragma (2) es enfocado en la termobatería (4) la cual se coloca en un cono angulado como cámara (3). Un carrete de compensación es hecho de nickel y conectado en paralelo a la entrada de la termobatería fijada en esta cámara. La termobatería no tiene bulbo de vidrio que absorva una parte considerable de la energía radiante. La posición angulada estrellada de los termoperes permiten el enfocamiento del telescopio para que se improvise. Los extremos de la termobatería se extienden a las terminales (7) para los cuales el instrumento secundario se conecta a través de un cable de unión que pasa al brazo conectado. El telescopio es colocado a través del hollo de observación (9) y la pieza visual (10).

La sensibilidad del instrumento es controlada por el movimiento del diafragma por medio del tubo I2. El pirómetro de radiación telescópico puede operar:

- (a) con uno o dos pirómetros milivoltímetros.
- (b) con un potenciómetro automático y con un milivoltmetro
- (c) con un potenciómetro automático.

Para no ir más allá de los límites estipulados de estimación, las siguientes condiciones deben de observarse:

1. El radiador debe cerrarse para un cuerpo negro absoluto es sus propiedades.
2. El intercambiador de calor debe ser cubierto por la imagen del radiador, el diametro del cual no debe ser menor de 1/15 de la distancia del emisor al telescopio;
3. El lóbulo del intercambiador de calor cuando se coloca por la pieza visual debe estar en el centro de la imagen del radiador.
4. El medio a travez del cual la radiación pasa , debe ser suficientemente transparente.

Pirómetros de Luz. La expresión para determinar la extensión de onda que corresponda a la radiación máxima a una temperatura dada es:

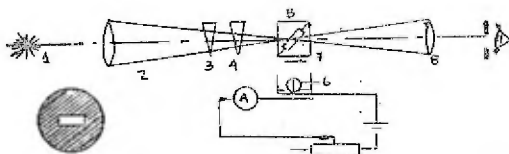
$$\lambda_{max} = \frac{2894}{T} \mu \dots\dots(4.10)$$

Esta relación (4.10) es llamada ley de desplazamiento y conduce a la base de medición de temperatura, usada principalmente en astrofísica, por la determinación del máximo de radiación en el espectro de la energía de radiación. Los instrumentos que emplean este principio se les llaman pirómetros de luz.

Los pirómetros de luz empleados en la industria usan una relación de

-intensidad a radiación de 2 extensiones de onda previamente escogidas, en la radiación del cuerpo a determinar. Esta relación será diferente para cada temperatura pero será completamente única, y como resultado puede servir como criterio para la temperatura absoluta de un cuerpo. Para cuerpos físicos, los cuales, en la mayoría de los casos, de radiadores grises en los cuales el valor de  $\epsilon$  para toda la extensión de onda es la misma y las curvas de  $L_\lambda = \epsilon f(\lambda)$  para diferentes valores de T son absolutamente similares a las curvas para un cuerpo negro absoluto, no es necesario introducir una corrección para desacompletar la radiación, lo que es una verdadera ventaja de este pirómetro en comparación a los estudiados previamente.

Fig. 4.II Esquema de un pirómetro de luz.



El principio de operación de un potenciómetro de luz se ilustra en la fig. 4.II y es como sigue: los rayos del cuerpo medido (1) son enfocados por el objetivo (2) en el plano diagonal del cubo fotométrico (5) teniendo primero que todo transverso la cuña bicromática (3) y la cuña central (4).

La cuña (3) permite solamente rayos rojos y grises (o azules) que pasen y se sumen a la extensión del paso de los rayos variables rojos y grises en el evento de la cuña que se está girando. En virtud de que la parte media del plano diagonal del cubo está plateada, solamente aquellos rayos lanzados transversalmente al observador de los extremos del plano diagonal del cubo serán los que pasen (area sombreada de la fig. 4.I). Además los rayos de la lámpara fotométrica (6) los cuales están en forma transverse al

filtro bicromático (7) y han sido reflejadas desde la parte del espejo de la superficie diagonal del cubo óptico y arrojadas al ojo del observador. Así, éste ve dos campos: el campo del cuerpo radiante (arillo exterior) y el campo de la lámpara fotométrica (rectángulo interior). Girando el cubo bicromático (3) se altera la correlación entre los rayos grises y rojos transversos a la cuña dando sensación de una luz blanca al ojo humano.

El filtro bicromático (7) para tubos de corriente fotométricos específicos pasa rayos rojos y grises los que parecen al observador como luz blanca. La cuña neutra (4) se emplea para nivelar los campos blancos vistos por el ojo observador, de esta forma los procesos de medición reducen el control secuencial hasta obtener la luz blanca, y entonces de la cuña neutra hasta la brillantez del objeto de medición y la lámpara fotométrica se hacen idénticas. La cuña bicromática tiene una temperatura de luz escalar, y la cuña neutra una escala de brillantez de temperatura. Si el instrumento es graduado en términos de la radiación absoluta del cuerpo negro, entonces cuando medimos la temperatura del radiador gris en la lectura de la escala de la cuña neutra, será algo menor que la lectura de la escala de la cuña bicromática.

Pirómetros Foto-eléctricos. La operación de éstos aparatos están basados en la relación entre la corriente del elemento foto-eléctrico y la temperatura de radiación de la fuente, la cual ilumina al fotoelemento.

$I = \alpha T^n$  donde  $I$  es la corriente del fotoelemento

.....(4.II)  $\alpha$  es la cte. del fotoelemento, la cual es función de su sensibilidad.

$T$  es la temperatura de la fuente de radiación.

$\alpha$  es una cte. que depende de las características espectrales del fotoelemento.

Los fotoelementos de selenio (tipo tubo) y los fotoelementos con efecto externo son normalmente usados en los pirómetros fotoeléctricos tal como se muestra en la fig. 4.12. La radiación del del radiador (1) es enfocado por medio del objetivo a través del diafragma(2) y del filtro de luz roja(7) a un fotoelemento de antimonio- F . La radiación del tubo incandescente (3) arroja al fotoelemento al otro lado. Los flujos de luz O y O los cuales lanzan al fotoelemento son modulados por medio de un modulator electro-magnético con un tubo(4), haciendo que las fases de los flujos se desplacen 180° Bajo la acción de esos flujos de luz, un componente variable de la fotocorriente se eleva en el circuito del fotoelemento, y la amplitud de ésta fotocorriente es determinada por la diferencia de los flujos de luz de ambas fuentes de radiación.

La componente alterna 50 c/s de la fotocorriente es amplificada por un amplificador de voltaje de tres etapas (las válvulas T<sub>1</sub> y T<sub>2</sub>) a la salida de la cual se conecta a una etapa en fase sensitiva reunida en la válvula T<sub>3</sub>.

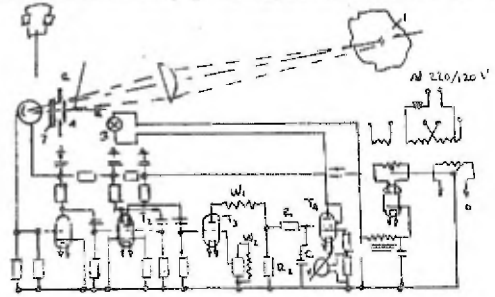


Fig. 4.12 Esquema de un pirómetro fotoeléctrico del tipo PEP-3

El voltaje de la etapa en fase sensitiva es alimentada a través del filtro de rectificación RC<sub>1</sub> a la rejilla del amplificador de potencia de c.c. con salida al instrumento medidor G y a la lámpara(3). En virtud de la retroalimentación negativa con respecto al flujo de luz, las lecturas del instrumento no la hacen en la práctica depender de la variación del tiempo de las características del fotoelemento, sino de la medición de los parámetros de

los componentes del circuito y de las válvulas de vacío o de las fluctuaciones de la potencia de voltaje de reserva. Las características espectrales del fotoelemento de antimonio-cesio es cerrar la sensibilidad espectral del ojo humano, por lo tanto, en el pirómetro foto-eléctrico tratado, el fotoelemento en unión con el filtro de luz roja separa la misma banda estrecha de radiación como lo fue separada en el pirómetro óptico, esto hace posible el poder graduar el pirómetro foto-eléctrico en términos del pirómetro óptico - standard.

El pirómetro tiene un rango que se extiende de 900-1300°C y de 1200 a 1700°C. El rango puede cambiarse reemplazando el diafragma en el objetivo. Para las mediciones de la temperatura en el primer rango, el error más grande que se tendría sería de  $\pm 13^{\circ}\text{C}$ . Las mediciones que se hacen para al menos una distancia entre el cuerpo calentado y el objetivo de cabeza visual igual a un metro para un cuerpo de diametro superficial de 2.5cm. . Para distancias grandes, la relación del diametro a la fuente de radiación debe ser igual a 1/40. El pirómetro esta graduado en términos de una temperatura modelo del tubo de descarga(2), o en términos de radiación por medio de un pirómetro óptico principal.



## INSTRUMENTOS PARA LA MEDICION DE PRESION Y DE VACIO PARCIAL.

Conceptos Básicos y clasificación. Con la posible excepción de la temperatura, la presión es probablemente la variable más importante -en los procesos- que debe ser medida y controlada. La importancia que tiene la medición de la presión se comprende fácilmente, haciendo notar que en algunos procesos, un cambio de temperatura de medio grado centigrado, puede resultar en un cambio de presión de 65 a 90 cms. de agua. En estos casos, por supuesto el control del proceso por medio de la presión, resulta mucho más exacto.

La mayor parte de los instrumentos utilizados para medir la presión, indican la diferencia entre la presión de un líquido encerrado y la de la atmósfera. Si la presión medida es mayor que la atmosférica, se le llama presión manométrica; si a ésta lectura le adicionamos el valor de presión atmosférica, el resultado indicará una presión absoluta. el nombre de vacío se le aplica a la presión menor a la atmosférica, llamandosele también como presión absoluta o residual.

Los instrumentos para la medición de la presión pueden clasificarse de acuerdo a la naturaleza de la cantidad a medir, de acuerdo a su principio operativo y de acuerdo a su precisión. La industria usa una gran variedad de elementos para medir presión, y la elección se efectúa de acuerdo al rango en el cual se va a emplear. La fig. 4. muestra una distribución de los medidores de presión y de vacío. Aquí se dará una breve descripción de algunos de ellos.

Manómetros de Resistencia. Son aparatos ordinariamente usados para medir altas y muy elevadas presiones; el principio de operación de estos manómetros es basado en la variación de la resistencia eléctrica de conductores -

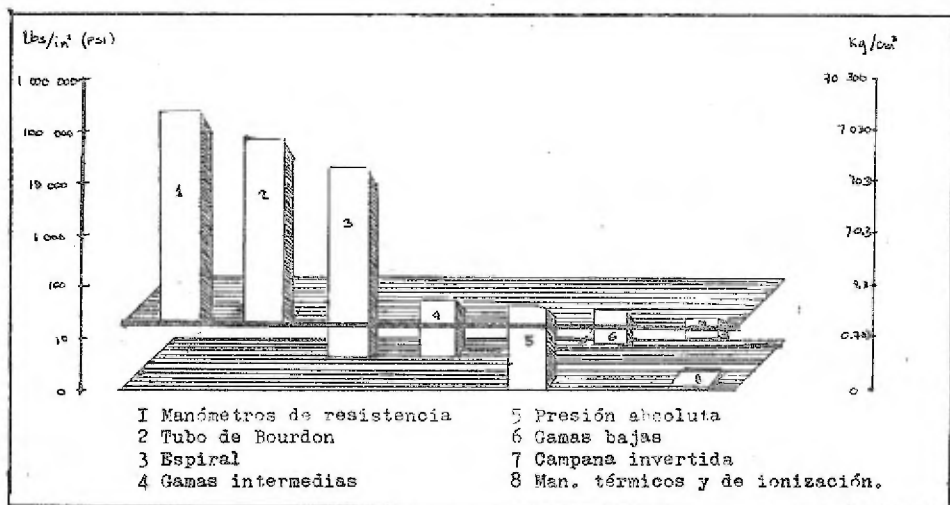


Fig. 4.13 Elementos de medición para todos los rangos de presión y de vacío.

los cuales son sujetos a una presión externa aplicada. El manganeso es normalmente usado como conductor, debido a su bajo coeficiente de resistencia eléctrica de temperatura; la variación de la resistencia de un conductor como función de una presión aplicada  $P$  puede ser escrita en forma de ecuación como: "

$$\Delta R = K R P \dots \quad \text{donde} \quad K \text{ es una cte. que caracteriza las propiedades del material del conductor.}$$

.....(4.12)

$R$  es la resistencia del material conductor

Los valores del coeficiente  $K$  (coef. de presión) para el manganeso conducen a un rango de  $2 \times 10^{-6}$  a  $2.3 \times 10^{-6}$   $\text{cm}^2/\text{kg}$ . El diseño de un manómetro propuesto por N.K. Zhokhovskii es mostrado en la fig. 4.14. la envoltura del instrumento(I) está ligado a un pedazo(2), el cual se une por un canal a una cavidad cilíndrica interior. Una nuez(3) lleva una resistencia doblada(4) y otras partes están atornilladas a la parte superior del manómetro resguardadas. Para asegurar un sellado hermetico, entre el resguardo y la nuez, dos lavadores metálicos(5) con una capa de hule entre ellos son usados. El doblado(4) está fijo a

en la parte superior de la nuez (1) por la varilla (9) y los pernos (7). Las varillas sirven al mismo tiempo para unir las terminales del conductor la cual está adherida sobre el cuerpo del doblado. Para aislar las varillas de las paredes de la nuez, se usan enramadas de ébano (8) y (9), y también capas de ébano y de hule (10) y (11) las cuales están apretadas por medio de el ramal (12) y el ajuste de la nuez (13). Las terminales (14) se conectan al elemento secundario.

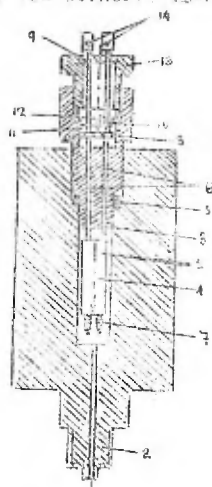


Fig. 4.14 Manómetro de resistencia.

Los manómetros de resistencia permiten mediciones para ser transportadas arriba de una presión de 30,000 kg/cm<sup>2</sup>. Puentes de medición y el uso de potenciómetros son normalmente usados para la medición de la resistencia del manganeso. El error de éstos manómetros de resistencia no excede + 1% del límite superior de medición.

Tubo de Bourdon. Es probablemente el elemento más antiguo y el más ampliamente usado por la industria para medir la presión. La fig. 4.15 muestra este aparato, consistiendo de un tubo de pared delgada, que ha sido aplastado en dos lados diametralmente opuestos, de modo que un corte transversal del mismo, tiene una forma aproximadamente elíptica u oval. Una vez hecho esto se dobla de modo que forme un arco, para que, cuando se aplique una presión a la terminal abierta del tubo, éste tienda a restablecer su forma circular original, haciendo que el tubo trate de enderezarse y, al hacerlo así, su extremo libre se mueve lo suficiente para actuar un sector y un piñón dentado, los cuales tienen como objeto amplificar el movimiento del tubo. Al piñón dentado va montado un puntero, de modo que cualquier movimiento del tubo produce un desplazamiento correspondiente del puntero.

Los metales que se usan para los tubos de Bourdon son muy variados dependiendo del servicio para el cual han sido construidos. Los más comúnmente empleados son: bronce fosforado, cobre aleado con berilio, acero, acero inoxidable, y acero de aleación; el metal más ampliamente usado para presiones bajas, es el bronce fosforado, mientras que para presiones hasta de  $700 \text{ kg/cm}^2$ , se usa acero de aleación. Después de que el tubo de Bourdon es doblado para formar un arco, recibe un tratamiento térmico cuidadoso para "envejecer" el metal y prevenir una deformación permanente cuando es sometido a un esfuerzo prolongado. Los extremos de los tubos de Bourdon hechos de bronce, puede ser soldados ya sea con soldadura de baja temperatura ó con soldadura de plata, mientras que los tubos de acero usados para presiones arriba de  $7 \text{ kg/cm}^2$ , tienen la pared lo suficientemente gruesa, que permite hacerle rosca a los extremos.

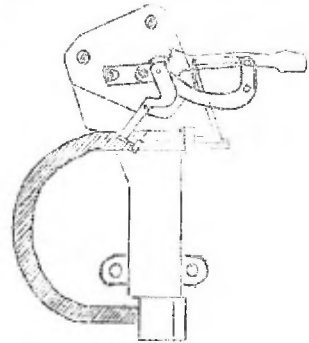


Fig. 4.15 Tubo de Bourdon

Para medir presión de fluidos corrosivos, los tubos de Bourdon de acero inoxidable son recomendados. Esto implica un pequeño sacrificio en la precisión, ya que sus propiedades elásticas no son tan buenas como las del acero tratado térmicamente.

Manómetros Piezo-eléctricos. El principio de operación de éstos instrumentos, es el empleo del efecto piezo-eléctrico, por ejem. la aparición de cargas eléctricas en la superficie de algunos materiales cuando están sujetos a una compresión en una dirección específica. El material más frecuentemente usado es el cuarzo, por motivo de sus altas propiedades mecánicas y de su estabilidad como constante piezo-eléctrica sobre un amplio rango de temperatura

-que se extiende de 0 a 500°C.

La magnitud de la carga eléctrica, la cual se forma en la superficie de la placa de cuarzo, puede determinarse de la relación:  $q = kF$

de donde:  $q$  es la carga eléctrica.

$F$  es la fuerza aplicada a la placa

$k$  es la cte. piezo-eléctrica, la -  
cual se toma como  $1,1 \times 10^{-9}$  cm/kg

El titanio de bario, ha venido recientemente a emplearse como cte. piezo-eléctrica e igual a  $1,2 \times 10^{-9}$  cm/kg. Siguiendo de la relación (4.12) podemos apreciar que la magnitud de la presión aplicada puede ser determinada del tamaño de la carga eléctrica la cual se eleva con la compresión de la placa de cuarzo.

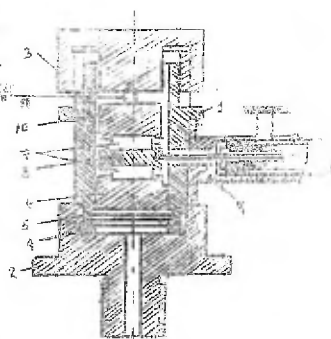


Fig. 4.16 Manómetro piezo-eléctrico.

El manómetro piezo-eléctrico (fig. 4.16) consiste de una emboltura (1) atornillada a la tuerca (2) y (3). El manómetro es unido al objeto por un pedruzco con un canal en la tuerca (2). El anillo lavador (4) hermeticamente sellado con la conexión. La presión que se va a medir actúa en la membrana (5) que se levanta y está hermeticamente conectada a la emboltura. Un lavador (6) que tiene una ranura cilíndrica para la placa de cuarzo (7) que se acomoda en la superficie interna de la membrana. Un lavador (8), sobre la ranura superior, en la que se coloca una segunda placa de cuarzo (7'), es situada en la placa de cuarzo (7) en la ranura inferior. Las placas así arregladas para que las cargas positivas sean aplicadas a los limpiadores (6) y (10) y las negativas al lavador (8). La carga de éste lavador es llevada a través del electrodo para seguir a través del aislante en la ranura 9.

Amplificadores electrónicos en unión con instrumentos ó vibradores magneto-eléctricos se usados casi exclusivamente para la medición de cargas piezo-eléctricas. Esta clase de medidores permiten presiones de más de 1000 kg/cm<sup>2</sup>, y de todavía superiores, sobre todo cuando se emplean para medir cambios rápidos de presión.

Vacuómetros Radiactivos. Se basan en la dependencia de la corriente, la cual fluye a través de un cambiador de ionización, sobre la presión ó más precisamente sobre la densidad del gas en el cambiador. El cambiador de ionización(1) se coloca dentro de la envoltura aeroapretada, la que está en comunicación con una cavidad evacuada en la cual la presión está siendo medida. El gas es irradiado de partículas alfa de la fuente radiactiva (4), que se coloca en el fondo del cambiador. Un colector(5) que consiste de pequeñas alambres finos, se colocan en el cambiador, el cual es alimentado de una fuente de c.c. a través de aisladores de partición(3); el colector tiene un potencial relativo negativo a las paredes del colector, tal como se muestra en la fig. 4.17.

La corriente del ión es amplificada por el amplificador(6) medida en(7). El vacuómetro con levantado radiactivo permite mediciones y grabaciones de presión absoluta desde  $10 \times 10^{-6}$  a 10 mm de mercurio. El orden en el que la relación entre la corriente iónica y la presión, sería lineal con la densidad del gas. Esto se hace seleccionando las dimensiones del cambiador de ionización, para que la distancia de las partículas de nivel alfa vienen a través del gas a una presión máxima que está siendo medida. La condición que se debe de sostener sigue la siguiente relación:

$$L = \frac{760}{P_m} = 0.015d \quad \text{donde: } L \text{ es la dimensión lineal promedio del cambiador.}$$

.....(4.17)       $d$  es la distancia del paso libre de una partícula  $\alpha$  en el gas bajo a presión normal.

P es la presión máxima medible

La distancia de paso libre de una partícula alfa en la substancia es expresada por la ecuación aproximada:  $\lambda = 3.2 \times 10^4 \frac{R\sqrt{A}}{\rho}$  .....(4.15)

donde R es el rango en aire bajo condiciones normales  
A es el peso atómico promedio de la substancia  
 $\rho$  es la densidad de la substancia.

Los amplificadores de c.c. con el 100% de retroalimentación negativa, son frecuentemente empleadas para los vacuómetros de laboratorio del tipo indicador. Por el uso de dichos amplificadores, una relación lineal entre las corrientes de entrada y de salida puede asegurarse, y el efecto de la inestabilidad de la potencia de reserva puede reducirse. El inconveniente del amplificador de c.c. es la tendencia a cero.

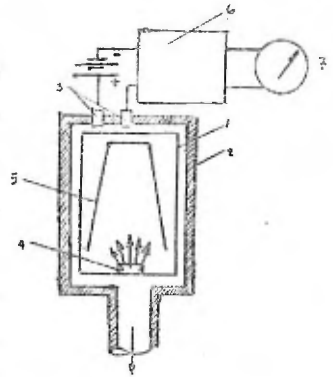


Fig. 4.17 Diagrama de un vacuómetro con levantamiento radioactivo.

Los vacuómetros industriales emplean un amplificador de c.a. con estabilización a cero, capaces de grabar las lecturas que se toman. El diagrama del circuito de un vacuómetro radioactivo automático es dado en la fig. 4.18. La corriente colectada por el cambiador de ionización es alimentada a la resistencia  $R_1$ , la caída de voltaje de la cual es tomada por la rejilla de la válvula de entrada  $V_1$  (6Zh1Zh). La válvula de entrada trabaja como una válvula medidora de electrones. Una corriente de la unidad de compensación es alimentada a la resistencia  $R_2$  a la resistencia  $R_3$ . La rejilla de entrada es periódicamente conectada a tierra con un vibrotransformador a 50 cps. El voltaje de c.a. es posteriormente amplificado por las válvulas  $V_2$  (6B5) y  $V_3$

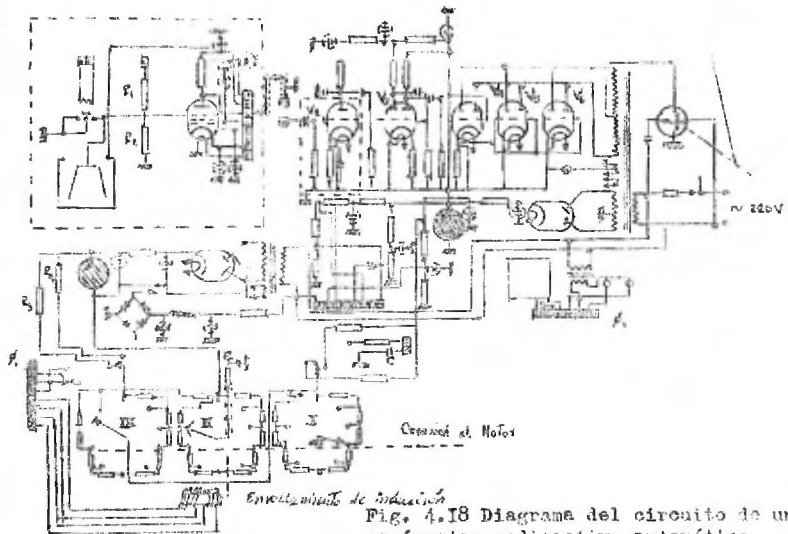


Fig. 4.18 Diagrama del circuito de un vacímetro radioactivo automático.

- (6N9S). El voltaje amplificado es alimentado a la entrada de las mitades de la válvula  $V_4$  ( del tipo doble triodo 6N7S), el cual opera a un cátodo seguidor. El voltaje de éste cátodo seguidor pasa a la entrada de un amplificador de poder, que comprende las válvulas  $V_5$  y  $V_6$  (tipo 6N7S). El control de las vueltas de un motor reversible es conectado a la salida del amplificador de poder.

El motor en giro lleva la acción a una unidad de compensación de caída y a un carrete de inductancia, la cual es el desprendimiento para el elemento secundario. La unidad de compensación I, II, III, es lisa y altera en amplios límites la corriente de compensación, la cual es alimentada a través de la resistencia  $R_1$  a la entrada del amplificador para compensar la corriente en el cambiador de ionización.

El error del instrumento no excede el 2.5%. El instrumento trabaja en



-el rango de  $10 \times 10^{-6}$  a  $10^0$  mm. de mercurio, tiene una escala lineal y permite el control automático de la presión del gas.

Vacómetros de Ionización. Estos aparatos trabajan por medio de la emisión termo-eléctrica. El diagrama de un circuito correspondiente a un vacómetro de ionización es mostrado en la Fig. 4.10, diseñado para la medición de vacío en un rango de  $10^{-3}$  a  $10^{-6}$  mm de mercurio. El elemento sensitivo de este aparato es una válvula de tres electrodos tipo LM-2, y conectada a un espacio evacuado; el gas en la válvula es ionizado por electrones agitados desde un cátodo incandescente.

Si el voltaje en la reja (ánodo), y la corriente  $i^-$  para la emisión de los electrones se mantiene constante, el ión corriente  $I^+$  servirá como un medidor del vacío en el tubo y por lo tanto en el espacio que está siendo monitorado. El ión corriente es amplificado por el amplificador de c.c. que consiste del tipo 6K7S doble triodo con cuatro límites para el control del factor de amplificación de corriente ( $F_1$ ) y con una salida consistente de un microohmetro M-24. El instrumento es alimentado desde una fuente de c.a. con un voltaje de 220 V.a 50 c.p.s. a través de un estabilizador ferro-resonante ( $C_1$  y  $Tr_1$ ) y un rectificador (que comprende una válvula 6Ts5S).

El filamento de ionización de aforo es alimentada directamente desde la fuente a una resistencia variable  $R_2$  y al transformador  $Tr_2$ . En condiciones normales un voltaje de +200 volt es alimentado a la reja de la válvula LM-2 y de -25 volt al ánodo colector. La corriente de emisión del aforo de ionización (5mA) es mantenida constante por medio de un regulador que comprende a la válvula 6P3. La resistencia cátodo-ánodo de esta válvula se conecta cruzando el transformador  $Tr_3$  en serie con el filamento de la válvula LM-2. La resistencia de la válvula 6P3 se regula por la reserva a su reja, una parte de

la caída de voltaje en la resistencia  $R_6$  de la corriente de emisión de aforo, la cual fluye a través de él. La medida de la corriente de emisión es controlada por medio de un interruptor al instrumento de salida por medio de  $S_1$  para apartarlo y colocarlo en el cátodo de trabajo neto del aforo. Variando el potencial del cátodo de la válvula 6F3 por una resistencia variable  $R_3$ , la corriente de emisión puede ser controlada.

La operación del instrumento se efectúa después de establecer la corriente de emisión dando la posición del interruptor, de los límites  $P_2$  en la posición K (calibración)

En este caso, una caída de

voltaje definido se alimenta a la entrada del amplificador con el valor de la corriente de emisión previamente establecida a la resistencia  $R_6$ . En esas condiciones, el instrumento de medición se ajusta con la ayuda de la resistencia  $R_1$  al final de la escala, antes que nada el instrumento es graduado en términos de aire seco; si es usado el aparato para medir otros gases ó mezclas, el aforo debe ser graduado. La constante de la corriente del ánodo es de 1 por  $10^5$  mA/mm de mercurio. Estos aparatos están hechos de dos tipos: el VI-3 de unidad portátil, y del tipo VI-3P para tablero ó bien en aparatos especiales.

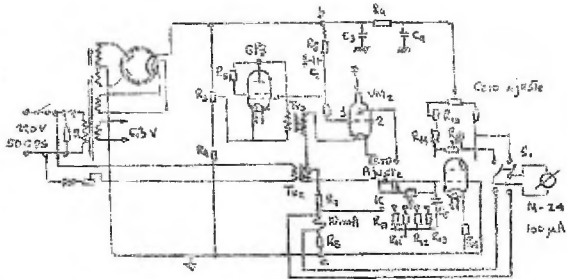


Fig 4.19 Circuito de un aforo de ionización VI-3

## INSTRUMENTOS PARA LA MEDICION DEL NIVEL DE LIQUIDOS

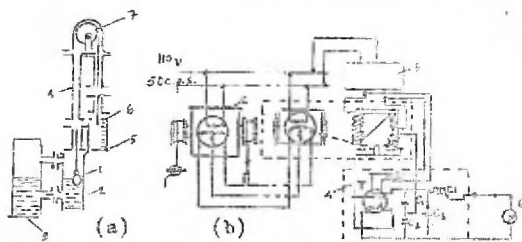
Clasificación. Dependiendo del método de medición empleado, los medidores de nivel pueden dividirse en: (1) visuales; (2) flotantes; (3) piezométricos; (4) de capacidad; (5) radioactivos y (6) ultrasónicos. Los métodos de medición visual incluyen el uso de aforadores de agua colocados en tanques de reserva, hervidores de vapor y uniones. La extensión máxima de estos aparatos es de 1500 mm. Para el propósito de medir productos de aceite, los aforadores tienen una aplicación muy restringida debido a la explosión y al peligro del fuego, baja durabilidad mecánica y facilidades inadecuadas para la lectura cuando líquidos oscuros son usados.

El método de medición del nivel por flotadores, se basa en el empleo de un flotador sobre la superficie del líquido. El método de medición de nivel piezométrico, se basa en la medición de la altura de la columna de un líquido en términos de la presión producida por ésta columna; un manómetro diferencial es usado como instrumento de medición. Los medidores de nivel líquido de capacidad, se basan en el cambio de la capacidad de un condensador cuando se sumerge en el líquido, el nivel del cual está siendo medido.

En el método radioactivo, para la medición del nivel se usa la absorción de la radiación radioactiva en la altura del nivel del líquido empleado; los isótopos radioactivos se usan como fuente de emisión. El método de medición ultrasónico se basa en el uso de la ley de reflexión de oscilaciones ultrasónicas desde un límite aire-líquido ó desde el límite de dos líquidos inmiscuibles.

Medidores de Nivel con El Flotador. Estos aparatos han sido ampliamente usados para medir el nivel de los líquidos, y emplean como elemento sensitivo a un flotador de menor peso que el mismo volumen que se está midiendo, dando como resultado de que descansa en la superficie del líquido moviéndose en una dirección vertical conforme al cambio del nivel. El movimiento del flotador es transmitido por medio de una polea y cable ó palanca al instrumento secundario, el cual mide, graba y en algunos casos transmite las lecturas del nivel a cierta distancia.

Fig. 4.20 Diagrama esquemático de un medidor de nivel flotante para líquidos a presión que incorporan un instrumento de medición remoto.



En terminos de su utilización construccional, una gran diversidad de medidores flotantes existen, un ejemplo de ellos es mostrado en la fig. 4.20. su operación es como sigue: el flotador(1) descansa en la superficie del líquido en un recipiente auxiliar(2), el cual está unido al de reserva(3). El recipiente(2) se conecta por medio de un tubo(4) al recipiente de vidrio(5), en el cual el indicador(6) se mueve por medio de una cuerda enrollada en el rodillo (7). El tubo de vidrio con el indicador es llenado con una substancia gaseosa. El nivel del líquido se determina de la posición del indicador en la escala grabada del tubo de vidrio.

El diagrama esquemático del medidor de nivel flotante incorpora una unidad de medición fabricada por la industria mostrada en la fig. 4.20(b), y el principio de operación es como sigue: el flotador(1) descansa en la superficie y se conecta por un cable a la unidad de medición de tambor del tipo DSU-I (2)

Por medio de éste tambor de carga (selsyn), el movimiento de avance del flotador se transforma en movimiento angular del rotor selsyn; éste rotor se conecta al tambor medidor por medio de un reductor, con una relación de 1:5. Una revolución del tambor corresponde a un cambio de 0.5m. del nivel; una revolución del selsyn corresponde a un movimiento de 10 cm. del flotador. El rotor del selsyn DSU es electricamente conectado al rotor del convertidor selsyn secundario(3), el cual consiste del selsyn y de un transformador de inducción. Los ejes del armazón movable del transformador de inducción se conectan al rotor del selsyn, para que a un movimiento de 90° de revolución del armazón corresponda al cambio máximo del nivel. El transformador de inducción se alimenta desde un estabilizador de voltaje del tipo ferro-resonante(5), que es alimentado desde una red de c.a. con un voltaje de 110 y una frecuencia de 50 c.p.s. . La señal del transformador de inducción, (la cual depende del ángulo formado por el armazón y el rotor selsyn) es rectificadora que actúa en el instrumento de lectura(6), que es en realidad un mili-amperímetro con un rango de medición de 0.5 a 1.0 mA. La resistencia de la línea de conexión de carga y del convertidor selsyn secundario no debe ser mayor que  $30 \Omega$  .

El rango del convertidor selsyn secundario al instrumento indicador es determinada por la máxima resistencia permitible del conductor, que no debe exceder a  $3000 \Omega$  . El error para la medición del nivel desde un instrumento remoto no excede  $\pm 3\%$  . El error adicional que elevaría el resultado de la variación de la resistencia de la línea de conexión de  $\pm 10\%$  no excede  $\pm 0.5\%$  . Basos medidores de nivel, los cuales son diseñados para medir el nivel de recipientes abiertos, se fabrican en un rango superior a 2.5, 5, y 10m.

En algunos casos para llevar el rango de transmisión a uno más grande se utilizan medidores de nivel equipados con reostatos de carga, los cuales

convierten el desplazamiento lineal ó angular del flotador en forma de resistencia eléctrica. Esta es la razón por la cual se debe de proteger al alambre forrandolo con plástico, para que, no de valores equivocados de la resistencia; acero constantan ó manganin son los materiales empleados para éste alambrado. Los contactos deslizantes del resátato de carga es usualmente hecho de 3 a 5 alambres, o en la forma de un resorte plano de uno a tres enrollamientos. Con la excepción de un alambre deslizante de carga, todo el resátato de carga es convertido de una variación lineal a una variación angular de la resistencia. Para un resátato de carga lineal, el error en la función angular se define por la fórmula:  $E\% = 100/n\%$  .....(4.16) en donde n es el número de secciones ó alambrado.

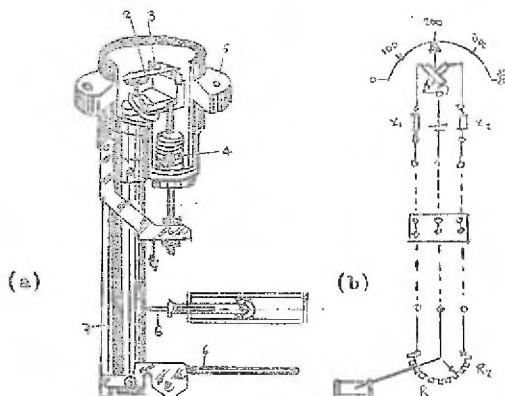
El número de vueltas es normalmente hecho no menor de 200-500. En algunos casos, los resátatos de carga con contacto de mercurio son empleados. Una unidad de medición de benceno se muestra en la fig. 4.2Ia desde el flotador(I), el cual se sumerge en una cisterna con benceno. se extienden las flechas(5)-(7) al deslizador(2) de el resátato(3). Para proteger el resátato de carga del humo del benceno, una palanca transmite el movimiento del flotador al movimiento de la carga que procede a través de un metal corrugado flexible(4). Para fijar éste aparato a la cisterna, se emplea un borde.

La fig. 4.2Ib representa un circuito de medición de benceno, en el un radio magneto-eléctrico en ambos marcos de los cuales están conectados en serie a la resistencia  $R_1$  y  $R_2$  del resátato convertidor, son empleados como el instrumento de medición. Cuando el nivel del líquido en la cisterna cambia la posición del flotador, cambiará la carga deslizante que se le ha conectado, dando como resultado que los corrientes en los marcos y en las lecturas del instrumento estén alteradas. Las resistencias  $r_1$  y  $r_2$  sirven para ajustar el instrumento al nivel de medición deseado. La escala del instru -

mento está graduada en litros.

Si la cisterna tiene un aspecto diferente en terrenos de su altura, el restato de carga debe ser hecho de ese aspecto correspondiente.

Fig. 4.2I Diagrama de la unidad y del circuito de medición del benceno con un restato de carga.

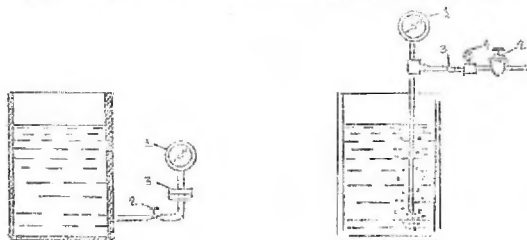


Medidores de Nivel Piezométricos (Manométricos). En estos aparatos, el método de medición utilizado es el tomar la presión producida por una columna de líquido (fig. 4.22a), ó por medio de una corriente continua de aire a través del líquido que está siendo medido (fig 4.22b), en él, un manómetro es utilizado como instrumento medidor. En el primer caso, el manómetro(1) es unido a la parte más baja del tanque ó al tubo de flujo de salida. Entre el manómetro y la válvula(2) hay un diafragma de hule(3). Cuando el manómetro esté en la posición más baja que el tanque, es necesario tomar con precisión la altura de la columna del líquido en el tubo de conexión. En un segundo caso, el aire que sopla a través del tubo sumergido en el recipiente a una cierta extensión relativa a la cual el nivel es medido. Cuando se hace la medición del nivel en tanques calibrados, ó en recipientes, al final del tubo

debe estar aproximadamente a una altura de 75mm. del fondo del tanque ó del recipiente.

Un manómetro que mide la presión del aire en el tubo, y por lo tanto la cabeza estática del líquido, es unida al extremo superior del tubo. Aire comprimido que se alimenta a través del reductor(2) y el diafragma(3) al tubo. El reductor sirve para regular la presión del aire a compresión. Un manómetro se coloca en el siguiente orden(1) para medir la presión del aire; la presión al final del tubo será igual a  $P = H \gamma$ , donde H es la extensión de la parte sumergida del tubo y  $\gamma$  es densidad relativa del líquido. La presión del aire es colocada con la ayuda del reductor, para que con la máxima extensión de sub-

Fig 4.22 Diagrama esquemático del método piezométrico para la medición del nivel de un líquido.



merción del tubo (máxima altura del nivel del líquido) burbujee aire, que emerge del tubo. La magnitud del aire a presión en el tubo es medido con un manómetro(I) graduado en unidades líquidas de nivel. El manómetro puede ser colocado a una distancia de 150mm. del recipiente. Este método con la ayuda de un aire que sopla a compresión, puede ser usado para medir el nivel de cualquier líquido, aún incluyendo los corrosivos, pero la desventaja del método piezométrico, sin embargo, conduce a la dependencia de lecturas del instrumento sobre la densidad relativa del líquido, y por lo tanto sobre la temperatura.

Medidores de Nivel Capacitivos. Consiste de una carga capacitiva y un



instrumento secundario. La carga capacitiva es un tubo (1) en la fig. 4.23, hecha de un dieléctrico, el cual se une al objeto medidor y da como resultado el ajuste del nivel en el tubo, para que corresponda al nivel del líquido que se está midiendo. La envoltura (2) se fija al exterior del tubo; estas envolturas forman al condensador, cuya capacidad varía en función del nivel del líquido.

Algunas veces las cargas capacitivas están hechas en la forma de series de cilindros concéntricos, los cuales forman una batería de condensadores unidos en paralelo. En las mediciones de nivel, tales cargas están sumergidas en un tanque con un líquido no-conductor. Los cilindros son así hechos, para que cuando uno de los cilindros vuelva a ser relativo a los otros, la naturaleza de la dependencia de la capacidad de carga en la cantidad de lí-

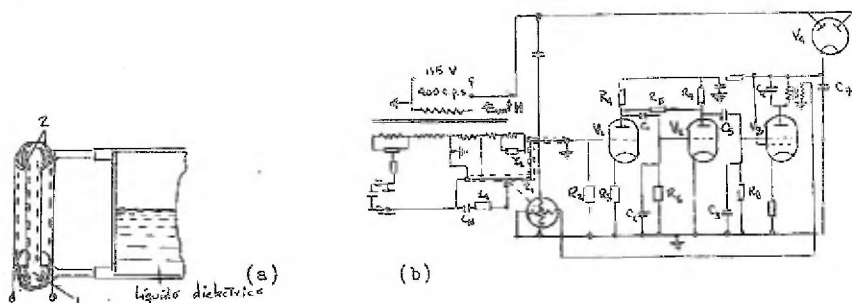


Fig. 4.23 Diagrama de circuito de un medidor de nivel con una carga capacitiva.

quido para ángulos diferentes del tanque puede ser alterada en esta forma.

Los medidores de nivel están generalmente graduados en unidades de peso, volumen, ó de líquido en el tanque. El principio de operación del circuito de medición de nivel mostrado en la fig. 4.23b, es como sigue: la carga capacitiva  $C$  se conecta al circuito diferencial formado por un transformador

Tr, y el condensador  $C_N$ . La diferencia de corrientes que fluyen en el circuito  $C_x$  y  $C_N$  forman la caída de voltaje en la resistencia  $R_1$  que actúa a la entrada del amplificador. El voltaje amplificado causa al motor reversible un movimiento deslizante en  $R_1$ , hasta que la corriente que fluye a través de los condensadores  $C_x$  y  $C_N$  se igualen. El resorte  $r_1$  sirve para fijar en cero al instrumento; si no hay líquido en el tanque, el deslizador  $R_1$  es ajustado en la posición de extrema izquierda. La resistencia  $R_2$  sirve para fijar el deslizador  $R_1$  en la posición de extrema derecha cuando el tanque está completamente lleno.

Medidores de Nivel Radioactivos y Ultrasónicos. El tipo UR-4 radioactivo, permite la medición, el grabado y la regulación del nivel en recipientes cerrados desde un lugar remoto. Nos permite el control en los límites del gas-líquido, líq.-líq., gas-sólido ó material de libre flujo, y también el nivel condicional de ebullición ó líquidos turbulentos.

El diagrama de bloque del medidor de nivel U-4 es dado en la fig. 4.24. La fuente de medición(I) con  $Co^{60}$  y el recipiente(2), que es un contador de halógenos se coloca en un carruaje que se mueve en dirección vertical en las columnas(3) y (4), las que se ajustan de acuerdo al diámetro ó a la cuerda a lo largo de la capacitancia cilíndrica vertical(5). La fuente de radiación puede moverse sincrónicamente en términos de la altura por medio de los selays. Si el centro del contador está en el límite de partición de dos medios, la señal que se obtiene del contador es compensada en unidades electrónicas (6) con un voltaje de referencia, y el sistema está nuevamente en equilibrio. Cuando el nivel del líquido cambia, la absorción de la radiación gana cambiando como resultado que el equilibrio entre la señal y el voltaje de referencia se destruye y una señal de signo apropiado causa a la carga selayn (8)

una revoltura que será alimentada al mecanismo actuador(7). La carga selsyn (8) transmitirá la revolución al receptor selsyn(9) colocado en las columnas,

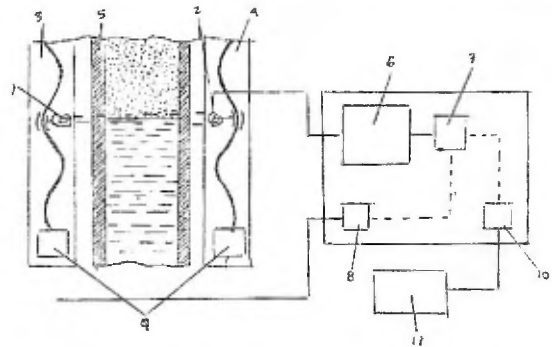


Fig. 4.24 Diagrama de bloque de un medidor de nivel Ultrasónico-4.

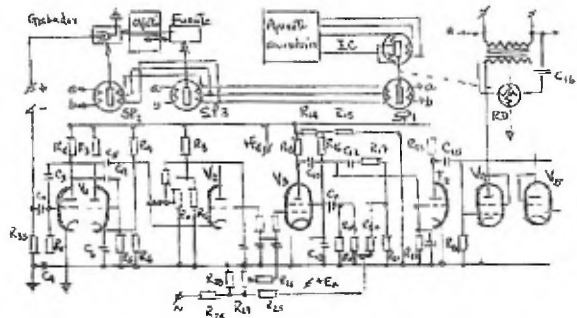


Fig. 4.24b Diagrama del - circuito del medidor de - nivel UR-4.

Los receptores selsyn en revoltura mueven la fuente y al receptor de radiación; cuando la fuente y el receptor de radiación alcanzan un nuevo nivel, el equilibrio se restaura y el movimiento cesa. La revolución del mecanismo actuador se transmite al punto indicador del instrumento de lectura(II) y al buzo del carrete de inducción(10), el cual se conecta al circuito de medición del arabador automático ( ó instrumento de regulación).

El circuito eléctrico del medidor de nivel UR-4 es dado en la fig. 4.24 -b; en esta fig. , una señal del contador en forma de impulsos negativos es -

alimentada a través de la resistencia  $R_{35}$  y el condensador negativo  $C_1$  a la rejilla del lado de la mano izquierda de la válvula  $V_1$  (tipo 6N30), ésta válvula trabaja con una posición estable. Un potencial relativo a la rejilla es alimentada a través del conductor de voltaje  $R_8 - R_6$  al cátodo de la segunda mitad de la válvula  $V_1$ . La señal del contador causa una elevación en el potencial del ánodo de la mitad de la mano izquierda de la válvula  $V_1$ , la cual es alimentada a través del circuito  $C_4 - C_5$  a la rejilla de la mitad de la mano derecha de la válvula; la mitad de ésta válvula es conductora y el potencial de su ánodo es  $\dot{u}$ . Este potencial tiene la forma de un pulso rectangular con una amplitud negativa de 150 V y con duración de  $5 \times 10^{-5}$  seg. .

Los pulsos rectangulares actúan a la entrada de la celda integradora, consistentes de la mitad izquierda de la válvula  $V_2$  (tipo 6N30), de diodos de cristal  $D_1$  y  $D_2$ , de una capacitancia  $C_3$  y  $C_7$ ,  $R_7$  de trabajo neto. El circuito integrador transforma los pulsos negativos rectangulares a un voltaje constante promedio, que se alimenta a través de la resistencia  $R_9$  a la rejilla de la válvula moduladora (tipo 6P3S). El voltaje positivo tomado del divisor  $R_8 - R_{11}$  y  $R_{12}$  compensa parte del voltaje negativa promedio.

Un voltaje alternado es aplicado a la rejilla pantalla de la válvula  $V_3$  (14V) y al ánodo de la válvula  $V_3$  (20V). La diferencia entre el componente alternante de voltaje del ánodo de la válvula  $V_3$  y el voltaje alternante de referencia es alimentado a la rejilla de la mitad derecha de la válvula  $V_2$ . El voltaje amplificado es entonces alimentado a través del circuito  $C_{13} - R_{24}$  a la entrada del amplificador de potencia  $V_4$  y  $V_5$  (tipo 6P3). El control de vuelta del motor reversible es conectado a la salida del amplificador de poder. Los ejes de salida del motor mueven el buzo del enrollamiento de inducción IC y los ejes de la carga selsyn  $SP_1$  mueven al rotor, del cual es repetido por los

receptores  $SP_2$  y  $SP_3$ . El rotor del selsyn  $SP_3$  es conectado a la fuente y el rotor del selsyn  $SP_2$  se conecta al contador de radiación radioactiva.

Los ánodos de trabajo neto de los tubos,  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  y el contador de radiación radioactiva son alimentados por un voltaje estabilizador.

El medidor de nivel es diseñado para medir un nivel de 1-6m para un recipiente del rango de 5-8cm a 5-7m y una pared del recipiente de espesores superiores a 100mm de acero. El error absoluto de medición del nivel es menor que 3mm.

Alguna información reciente ha aparecido relacionada a los medidores de nivel de neutrones. La operación de éstos aparatos es basada en el empleo de la caída lenta de neutrones. El diagrama de circuito del medidor de nivel de neutrones es mostrada en la fig. 4.25. Una fuente de alta velocidad de neutrones(2) es colocada cerca del objeto que está siendo medido(I); un receptor de neutrones(3), es rígidamente conectado a la fuente. Si la fuente y el receptor son movidos verticalmente a lo largo de las paredes del objeto que está siendo medido, la curva que caracteriza la corriente en el trabajo neto del receptor angularmente cambia su gradiente en la región cercana al nivel del líquido. La variación de ésta corriente es fijada por la unidad de medición electrónica apropiada(4). La precisión de la operación del medidor de nivel de ésta clase es estimada de los datos útiles para tener un error de 1mm.

Los medidores de nivel ultrasónicos son instrumentos de promesa considerable; el principio de operación de un medidor de nivel ultrasónico se basa en la aplicación del medio que se desea medir, de impulsos dirigidos angularmente de oscilaciones elásticas a una frecuencia ultrasónica. Esos impulsos son

emitidos por un elemento-piezo, el cual alternadamente cumple las funciones de emisor y receptor de los pulsos. Los elementos-piezo están situados a la salida en la base de un tanque. Las oscilaciones elásticas propagadas en el líquido alcanzan el límite de las dos medias con diferentes impedancias acústicas y son reflejadas. El intervalo de tiempo desde el instante de emisión de un impulso al instante del impulso reflejado es recibida, es el criterio de la altura del límite de las dos medias. Este intervalo de tiempo puede ser medido por un circuito apropiadamente diseñado para la medición de pequeños intervalos de tiempo. La medición de un nivel por el método ultrasónico no necesita penetración alguna dentro del recipiente, y posee una gran precisión y una pequeña inercia.

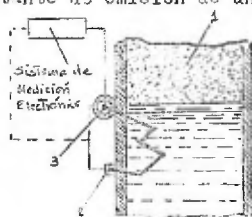


Fig. 4.25 Diagrama de circuito de medición de nivel de un neutrón.

### INSTRUMENTOS PARA LA MEDICION DE FLUJO DE GASES, VAPORES Y LIQUIDOS.

Determinación y clasificación. Los contadores son usados en la determinación de la cantidad de una substancia que ha pasado a través de una tubería en un intervalo de tiempo prescrito (hora, día, mes, etc.) y medidores de flujo son los empleados para la determinación de la cantidad de una substancia que fluye en una tubería ó línea para un instante dado de tiempo, por ejemplo: se emplean en la medición de la velocidad de flujo.

La cantidad de una substancia que ha pasado a través de un contador en un cierto intervalo de tiempo es determinado como la diferencia entre las lecturas de un contador al principio y al final de las mediciones. La cantidad de una substancia puede ser medida en unidades de peso, ó bien en unidades de volumen.

El flujo de una substancia es definida en relación a la cantidad de substancia ( $dG$  ó  $dV$ ) que fluye en el intervalo de tiempo  $d\tau$  al tiempo  $\tau$ , cuando éste tiempo tiende a cero. Consecuentemente, el flujo de volumen será

$$\text{igual a: } Q_V = \frac{dV}{d\tau} \quad \dots\dots(4.17)$$

y el flujo en peso será igual a:

$$Q_g = \frac{dG}{dt} \quad \dots\dots(4.18)$$

Si durante un cierto intervalo de tiempo ( $\tau_2 - \tau_1$ ) el flujo permanece constante, el flujo en volumen y peso puede definirse como:

$$Q_V = \frac{V}{\tau_2 - \tau_1} \quad \text{ó} \quad Q_g = \frac{G}{\tau_2 - \tau_1} \quad \dots\dots(4.19)$$

donde  $V$ ,  $G$  son respectivamente el volumen y el peso de la substancia que ha pasado a través de la tubería en el intervalo de tiempo  $\tau_2 - \tau_1$ . Los medidores

de flujo pueden ser divididos de acuerdo a su principio de operación en: (1) caída variable de presión; (2) caída constante de presión; (3) medidores de velocidad de flujo ó presión-velocidad; (4) medidores de inducción; (5) ultra-sónicos; (6) radioactivos.

Medidores de flujo de caída variable de presión. El principio de operación de éstos instrumentos es basado en la medición de la diferencia de presión antes y después de que un aparato restrictivo es colocado en la líneas de flujo de gas, vapor ó líquido. Diafragmas ó placas de orificio, toberas y tubos Venturi, son los aparatos empleados como restricción. Las principales características de éstos medidores se dan en la tabla 4.3.

Característica	Tubo de Venturi	Tobera de flujo	Placa de orificio
Pérdida de presión permanente	mínima	mediana	máxima
Necesidad de mantenimiento	poca	poca	inspección periódica
Costo	el mayor	intermedio	el más bajo
Instalación	el más difícil de instalar	intermedio	el más sencillo.
Paso del fluido comparado con la placa de orificio bajo las mismas condiciones de operación.	1.6 veces mayor	1.6 veces mayor	

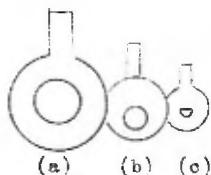
Tabla 4.3 Características principales de los medidores de flujo de caída variable de presión.

La placa de orificio es el más comúnmente usado y consiste de un delgado disco metálico teniendo un agujero concéntrico con una arista cortante y con una parte cilíndrica del lado en donde entra el flujo para obtener los mejores resultados. La placa de orificio debe tener la resistencia necesaria para evitar deformaciones bajo presiones diferenciales ordinarias. El borde



del orificio no debe tener un grueso mayor de 3.175mm (1/8") y para placas de un orificio menor de 12.70mm (1/2), el grueso del borde no debe exceder de 1.588mm. (1/16"). Si para lograr esto es necesario biselar el borde, tendrá que hacerse en el lado de baja presión. Además de la placa de orificio concéntrico, existen otros dos tipos que son: I) el tipo excéntrico, en el cual el orificio está fuera del centro, y II) el tipo segmental mostrada en la fig. 4.26c .

Fig. 4.26 Diferentes placas de orificio:  
a) concéntrica  
b) excéntrica  
c) segmental



Tubo de Venturi. Este elemento primario de medición se instala en la tubería en la misma forma que cualquier otro tubo del tipo común y corriente, pero su sección media tiene un diámetro más pequeño, llamada "garganta". Los diámetros de ambos extremos del tubo de Venturi corresponden al diámetro interno de la tubería a la cual va conectado. El cuerpo cilíndrico del tubo entra en un cono de convergencia angular fija; éste cono entra a la sección media que forma la garganta y que tiene un diámetro más pequeño, que ha sido calculado y torneado con precisión. La garganta está conectada a un cono de salida de divergencia angular fija y cuyo diámetro final corresponde al de la tubería.

El cuerpo cilíndrico del tubo de Venturi está equipado con conexiones piezométricas en un anillo de presión, para promover la presión antes de la garganta; a este anillo se conecta la toma de alta presión del cuerpo medidor. La garganta tiene un diseño similar para efectuar la conexión de baja presión al medidor.

La diferencia de presiones entre el cuerpo cilíndrico y la garganta, produce la diferencial en la cual se basa la medición de flujo. Se puede fabricar el tubo de Venturi y los otros elementos primarios de cualquier material para llenar los requisitos de la aplicación.

El tubo Venturi de inserción es similar al antes descrito pero con ventajas adicionales, tales como poder medir el flujo a una presión extremadamente alta, evitando el costo excesivo del tubo Venturi común. El montaje de este tubo se hace por medio de un dispositivo especial que se fija entre dos bridas a la tubería y que sirve también como conexión de baja presión ya que tiene incorporadas las aberturas piezométricas y el anillo de presión de la garganta. La conexión de alta presión se hace directamente en la tubería, antes de la garganta y a una distancia aproximada de un diámetro de la tubería.

Los méritos del tubo Venturi nos conducen a una pequeña pérdida en la cabeza de presión, alta precisión en la medición, y alta resistencia al uso y escurrimiento. Sus desventajas son: alto costo, tamaño grande y complejidad de instalación. Las ecuaciones que nos permiten conocer el flujo de material con la caída de presión causada por el aparato de restricción tiene la siguiente forma:

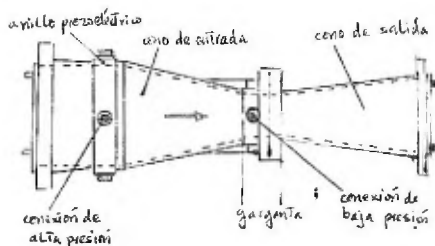


Fig. 4.27 Tubo de Venturi.

$$Q_g = 0.012524 C_d k d^2 \sqrt{h} \quad \text{kg/hr.} \quad \dots\dots (4.20)$$

$$Q_v = 0.012524 C_d k d^2 \sqrt{h/\gamma} \quad \text{m}^3/\text{hr.} \quad \dots\dots (4.21)$$

donde:  $Q_g$  es el flujo de salida en peso en kg/hr.  
 $Q_v$  es el flujo en volumen en m<sup>3</sup>/hr.  
 $C_d$  es el coef. de flujo (experimentalmente determinado).  
 $k$  es el coef. de ensanchamiento que se toma con precisión después del instrumento de restricción (aumento de volumen).

- d es el diám. en la apertura de salida a una temp. de  $+20^{\circ}\text{C}$ , mm.
- k es un coef. que se toma para la expansión térmica a la salida del flujo.
- h es la dif. de presiones ( $P_1 - P_2$ ) en  $\text{kg}/\text{m}^2$
- $\rho$  es la densidad relativa de la sustancia medida antes de que se efectúe la restricción.

Para medir la caída de presión causada por el aparato de restricción, los manómetros diferenciales de varios diseños son usados, su graduación es en unidades de flujo de la sustancia llamados flujómetros.

Los manómetros diferenciales están divididos, dependiendo de su principio de acción en: líquidos(tubería), de membrana, flotantes, de anillo, y de timbre. Dependiendo del tipo de aparato indicador los manómetros diferenciales se dividen en : lectura, auto-registradores y de escala (sensores) con instrumentos secundarios.

Tobera de flujo. Se puede describir éste elemento primario como un tubo de Venturi de inserción, sin cono de salida. La falta de dicho cono aumenta la pérdida de presión permanente. Las características básicas se han señalado con anterioridad para éste aparato, en la tabla 4.3 .

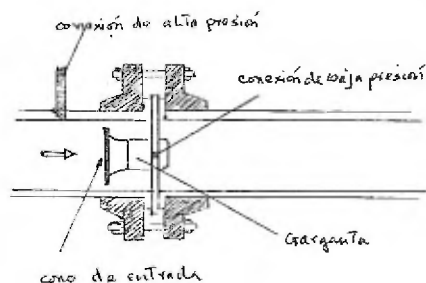


Fig. 4.29 Tobera de flujo mostrando sus partes principales.

Manómetros de Membrana Diferencial DM-6. Estos aparatos con sensor de inducción en un instrumento de escala diseñados para medir el flujo de líquidos, vapores y gases emplean el método de caída variable del voltaje. Además, el manómetro diferencial puede ser usado para medir excesos de presión (cabeza de presión) y el nivel de líquidos.

El elemento sensitivo del instrumento(fig. 4.29) consiste de dos compartimientos de membrana(I) y (2) que están situados en dos cámaras separadas(3) y (4) separados por una partición(5). Los compartimientos están soldados para que sus perfiles coincidan, las membranas están hechas de acero inoxidable ó bronce ( fósforo ó berilio).Las cavidades internas de los compartimientos están llenas de agua destilada e intercomunicadas a través de una abertura en la partición(5).

El buzo(6) del enrollamiento de inducción(7) es fijado al centro de la membrana superior ; el buzo se mueve dentro de un tubo divisor(8) construido de acero no-magnético. La presión que está siendo medida es alimentada a la cámara inferior y la presión inferior a la superior. Bajo la acción de la diferencia de presiones de las cámaras, el líquido de la cavidad de la membrana inferior de la cámara es conducida a la cavidad de la membrana superior de la cámara, donde le causa un desplazamiento de su membrana superior con el buzo. La membrana superior se mueve hasta que las fuerzas producidas por la caída de presión debido a las fuerzas elásticas de las membranas de las cámaras se equilibran. Las presiones se alimentan a las cámaras a través de los tubos(9) y (10) sobre los cuales son fijados dos válvulas de abrir-cerrar(II) , (I) y una válvula de regulación(13).

Un instrumento de inducción electrónico es usado como instrumento secundario

-dario del manómetro diferencial.

Los manómetros diferenciales son fabricados con la siguiente caída de presión en el rango de medición (si la presión es estática arriba de  $160\text{kg/cm}^2$ ) de 90 a 2500mm. de mercurio.

Fig. 4.29 Manómetro de membrana diferencial DM-6

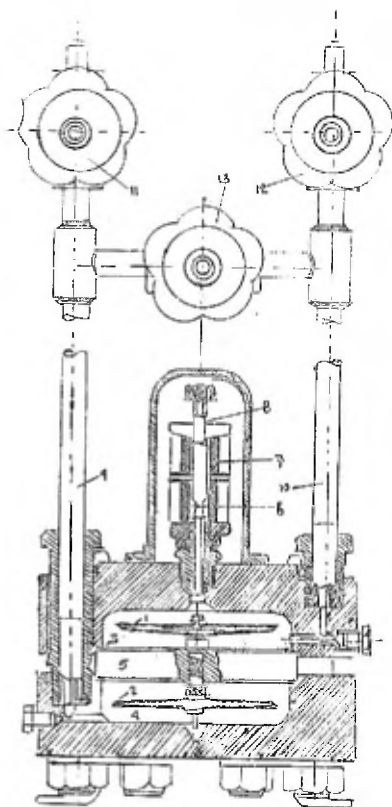
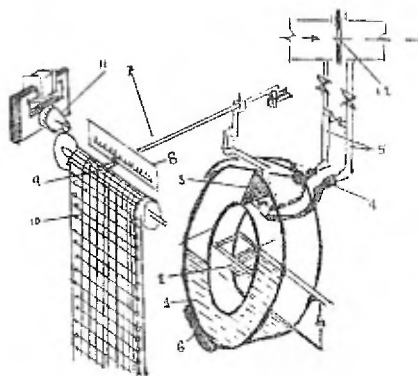


Fig. 4.30 Diagrama del circuito de un manómetro de anillo diferencial.



Manómetros de Anillo Diferencial. Estos manómetros sujetan al líquido que llena al anillo, que puede ser: agua, aceite y mercurio. El principio de operación es como sigue: un anillo hueco(I) en la fig. 4.30 medio lleno de líquido descansa en un soporte(2). El espacio libre del anillo es llenado con líquido dividido en dos partes por medio de un separador(3). Ambas cavidades del anillo están unidas a una tubería antes y después de la garganta - (I2) por medio de tubos flexibles(4) y (5) rígido. Como consecuencia, la diferencia de presión se eleva en la garganta, un movimiento del líquido en el anillo tomará lugar en dirección al de menor presión, hasta que la diferencia de nivel de los líquidos en ambas cavidades balancean la diferencia de presión.

Bajo la acción de las presiones diferentes en la separación, un momento de giro que se eleva causaría al anillo un giro a través de un ángulo tal que, el momento de giro será balanceado por el momento de carga(6) la cual es fijada en la mitad más baja del anillo. La revolución del anillo es transmitida al indicador(7), el cual se mueve a lo largo de la escala(8). El grabador es transportado por una pluma(9) atados al indicador en la cinta(10), la cual está en movimiento desde el motor síncrono(11) ó desde un mecanismo de tiempo.

En manómetros diferenciales diseñados para medir el flujo, la forma del aparato que transmite movimiento desde el anillo al indicador y a la pluma del instrumento es tal que, el instrumento no indique caída de presión directamente, pero la raíz cuadrada de la caída de presión sí es una cantidad directamente proporcional al flujo. Esto hace posible obtener para el flujo una escala que tiene divisiones uniformes. Los manómetros de lectura y la escala diferencial con sistema de inducción eléctrico para transmisiones de -

gran rango de lecturas, están siendo producidos industrialmente.

Medidores de flujo con corrección automática para variaciones en la temperatura y la presión.

El flujo de una substancia (gas, vapor ó líquido) en la línea de tubería está determinado por la caída causada por la garganta de la válvula y la densidad relativa (ec. 4.2I), pero la densidad relativa gira en función de la temperatura, presión y contenido de la mezcla (de gas y de vapor). Los medidores de flujo de caída de presión variable miden el flujo de una substancia tomando la densidad relativa como constante correspondiendo a su temperatura, presión y su contenido de mezcla promedio. De hecho, sin embargo, los factores son variables y consecuentemente la medición de la velocidad de flujo por el instrumento puede diferir grandemente de su valor real, por lo que, se debe de incluir un factor de corrección.

El flujo de una substancia, llevando con precisión su presión y su temperatura puede determinarse de la expresión:  $Q_v = K \frac{P_h}{T}$  .....( 4.22)

- donde: K es un coef. constante.  
h es la caída de presión en la garganta del medidor.  
P es la presión de el medio enfrente del diafragma.  
T es la temperatura absoluta del medio.

Así, el orden en que un medidor de flujo puede llevar con precisión la temperatura y presión, es mediante un puente de balanza y la extracción de la raíz cuadrada es por medio de un resistato funcional. Como ejemplo consideremos el diagrama de un circuito con corrección automática para la variación de temperatura y presión mostrada en la fig. 4.3I. Aquí, la caída de presión en la garganta del instrumento es medido por un manómetro de membrana diferencial  $h$  con un enrollamiento de inducción  $IC_2$ , que está ajustado en el instrumento secundario. El circuito para las conexiones de vuelta del enrollamiento se muestra en la fig. 4.3I.

Con la aparición de la desigualdad en la posición de los brazos de los enrollamientos de inducción  $IC_1$  e  $IC_2$ , una señal desbalanceada es alimentada a la entrada del amplificador  $A_1$ ; después de amplificarla, se alimenta para controlar el giro del motor reversible  $RM_1$ ; con la ayuda de un instrumento que se coloca a la salida de los ejes del motor, mueven al buzo con enrollamiento de inducción  $IC_2$  para ajustar la nueva posición de equilibrio. El deslizador del reóstato sensor  $R_1$ , el cual se conecta a uno de los brazos del puente de cálculo es también fijado a los ejes del motor.

La medición de la presión frente a la garganta es manipulada por el manómetro  $P$  con el enrollamiento de inducción  $IC_3$ , el cual se conecta a un circuito similar para el cual ha sido probado. El deslizador del reóstato sensor  $R_2$ , el cual se conecta al otro brazo del puente a calcular, es fijado a los ejes del motor reversible  $RM_2$  el cual es diseñado para balancear posteriormente el puente.

La medición de la temperatura de una sustancia frente a la garganta es manipulada por un termómetro de resistencia, el cual se conecta al tercer brazo del puente. El reóstato  $R_3$  constituye el cuarto brazo del puente.

Cuando el puente está desbalanceado, como resultado del cambio de flujo de los parámetros de la sustancia ( $P, T$ ) la cual está siendo controlada, una señal aparecerá en la medición diagonal del puente. Esta señal se amplifica en el amplificador  $A_2$  y es alimentada para el control de giro del motor reversible  $RM_3$ ; el motor girará con la ayuda de la leva  $K_3$  que moverá al deslizador del reóstato  $R_4$ , y de allí llevará al puente a una nueva posición de equilibrio. Los brazos del puente a calcular están así seleccionados para que el movimiento del deslizador  $R_4$  sea proporcional a la expresión  $hP/T$ .



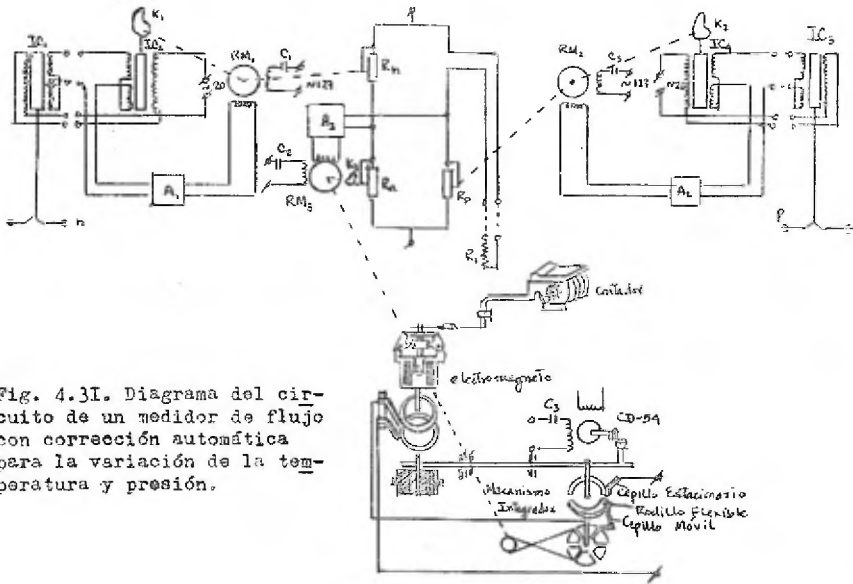


Fig. 4.3I. Diagrama del circuito de un medidor de flujo con corrección automática para la variación de la temperatura y presión.

La extracción de la raíz cuadrada de la expresión anterior es llevada por la leva  $K_3$ , la cual tiene el perfil apropiado. Así, el ángulo de revolución de la leva  $K_3$  está fijo y es proporcional al flujo, tomando con precisión el flujo y la temperatura de la substancia. Para determinar el flujo para un gran intervalo de tiempo, un aparato integrador (mostrado en la parte baja de la fig. 4.3I) es provisto para el instrumento, y consiste de un embrague electromagnético con un sistema de contacto y un calculador. Dos contactos (semi-anillos), con capillos estacionario y móvil son conectados al circuito de embrague que se reserva, al resguardamiento del embrague, junto a los semi-anillos están revueltos a velocidad constante por el motor síncrono SM-54. El capillo móvil se mueve en una forma directamente proporcional al movimiento del instrumento indicador y la suma del ángulo entre los puntos de contacto móvil y estacionario varía de una manera proporcional inversa a la cantidad que está

- siendo medida. Cuando ambos cepillos están en el mismo semi-anillo, los circuitos de embrague de reserva son no-conductores, la armadura del embrague es atraída a la envoltura del embrague y se revuelve con ésta. El contador integrador cuenta el número de revoluciones de la armadura del embrague, el cual en un intervalo de tiempo específico será directamente proporcional al tiempo de conexión del embrague y por lo tanto, inversamente proporcional al ángulo formado entre los cepillos fijo y móvil, y directamente proporcional a la cantidad que se está midiendo.

Medidores de Flujo de Caída de Presión Constante. El flujo de una substancia en la línea de la tubería, es proporcional a la caída de presión del aparato regulador y a su área de abertura ( que permanece constante ). Cuando se hace variar ésta área, se medirá el flujo. Los instrumentos que se rigen bajo éste principio se dividen en: flotantes (rotámetros) y de pistón.

Un tubo de vidrio cónico vertical con un flotador colocado, es usado componente de medición de los medidores de flujo flotantes; la caída de presión para el líquido que fluye a través del tubo cónico es determinado por el peso del flotador. Para un peso constante del flotador (caída de presión) el área de cruce del anillo entre las paredes internas del tubo y el flotador es proporcional a la cantidad de líquido que pasa para un momento dado; una variación en la posición del flotador relativo a la altura del tubo cónico, en la pared en la cual está grabada en escalas de flujo, será proporcional a la variación en la magnitud del flujo de la substancia.

El medidor de flujo de pistón consiste de un cilindro con dos aberturas en su lado superficial y un pistón que pueda moverse libremente en el cilindro bajo la acción de la presión del flujo; el movimiento del émbolo

pistón cierra la abertura, dependiendo si la magnitud de flujo es grande ó pequeña. La magnitud del movimiento vertical del émbolo es una medida del flujo de una substancia. La fig. 4.32 representa el tipo de medidor de flujo de pistón PPS, en la cual está un sensor sin escala, con un enrollamiento de inducción para la transmisión de las lecturas. Dentro del alojamiento de fierro colado(I), se coloca un casquillo con dos aberturas, en la cual, la abertura de entrada(3), es circular; la abertura de salida(4) es rectangular (de dimensiones muy pequeñas). El pistón(5) que mueve dentro del casquillo y cubre la abertura de salida(4). En la parte superior del émbolo se fija una varilla(6) con un centro(7) en el que se encuentra el tubo(8), hecho de material no-magnético sobre el cual está adherida un enrollamiento de inducción (9). Cargas adicionales (10) son encerradas dentro del émbolo; el espacio bajo el émbolo es unido por un canal libre con un espacio de abertura(4). Entre el alojamiento del instrumento y la envoltura del enrollamiento de inducción se ajusta un reborde enfiador(II), que protege al enrollamiento de inducción de sobrecalentamientos cuando se mide el flujo de un líquido a una alta temperatura.

Las siguientes fuerzas actúan sobre el pistón(5): una fuerza directa hacia la cual se iguala el producto de la presión del líquido bajo el pistón y el área del pistón; una fuerza directa hacia abajo, la cual es igual al producto de la presión del líquido arriba del pistón y de su área, y finalmente una fuerza igual al peso del pistón.

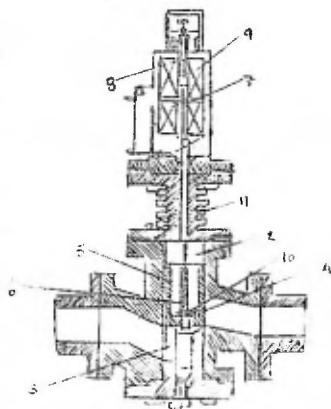


Fig. 4.32 Medidor de flujo de pistón de presión constante tipo PPS.

La diferencia de presión del líquido, arriba y debajo del émbolo es igual a la caída de presión para una fuerza que eleva al émbolo hacia arriba, conformar se eleva el émbolo, la abertura de salida aumentará su presión de caída de presión, y de aquí la elevará al embolo que estará bajando.

Para un flujo estable del líquido, el émbolo se elevará tan lejos - como la magnitud de la fuerza sea igual al peso del pistón; como el peso del pistón es una cantidad constante, la variación del flujo se determinará por el grado de extensión de la abertura. La transmisión de las lecturas de la - altura que se eleva el pistón, es acompañado de un enroblamiento de inducción. Los medidores de flujo PFE están hechos para un rango de medición (calculados con referencia al agua) desde 0-500 a 0-5000 kg/hr. La precisión en la medi - ción de estos medidores es de  $\pm 2.5\%$  del límite superior de medición; ad - más, trabajan en unión de un indicador secundario automático con instrumentos registradores en un integrador.

Medidores de Flujo de Inducción. Los siguientes defectos aplicables en algunas mediciones aparecen en los métodos anteriormente explicados:

- (1) Grandes pérdidas de presión en los aparatos de restricción.
- (2) Altos errores de medición relativa, especialmente para flujos pequeños.
- (3) Una dependencia de resultados en la medición sobre la densidad, viscosidad y temperatura del medio que está siendo medido, y sobre la naturaleza del flujo y otros factores.
- (4) La posibilidad de un bloqueo en la tubería en el punto donde el aparato de restricción es colocado.

Recientemente, los medidores de flujo han sido desarrollados para a - liminar total ó parcialmente los puntos anteriores, éstos aparatos son los de inducción, los ultrasónicos y los radioactivos.

El método de inducción para la medición de flujo puede ser usado únicamente para líquidos de conducción eléctrica. En la práctica, el rango de conductividad es del orden de  $10^5$  a  $10^6 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ . El principio de operación para estos medidores es basado en el hecho de que un medio conductor continuo (el flujo de un líquido) mueve a un campo magnético, que de acuerdo a la ley de inducción electromagnética, una f.e.m. será inducida en el líquido. La diferencia de potencial entre los dos puntos situados simétricamente en el contorno de la sección de cruce transversal del flujo, en un plano perpendicular a las líneas de fuerza del campo magnético pueden ser expresadas por una ecuación análoga a la de un conductor simple:  $E = B\bar{V}d$  ..... ( 4.23 )

- donde: B es la densidad de campo magnético ( ó de inducción )  
 $\bar{V}$  es la velocidad promedio del movimiento del líquido a través de una sección de cruce rectangular del tubo.  
d es el diametro del canal.

El sensor del medidor de flujo de inducción (fig. 4.33), consiste de un tubo(1), sobre el cual fluye el líquido a medir sujeto al campo magnético del magneto(2); el tubo es hecho de material aislante. En unas extremidades diametralmente opuestas de la sección de cruce transversal del tubo, están los electrodos(3). El campo magnético excitante puede ser ó bien constante ó variable; la ventaja de que sea constante el campo, es en ausencia de una fuente de reserva, que eleva la utilidad de la operación del sensor, simplifica la operación y minimiza la interferencia derivada del error del campo magnético variable. El defecto fundamental de un sensor con magneto permanente es el conducir a la polarización de los electrodos del sensor el cual destruye la graduación del instrumento e introduce un error adicional.

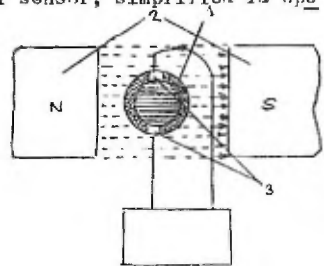


Fig. 4.33 Diagrama del circuito de un medidor de flujo de carga de inducción.

La polarización puede ser reducida por el uso de electrodos de platino, platino, calomel y otros electrodos. El segundo defecto del sensor con magneto permanente, es la dificultad de un voltaje amplificador de c.c.

Las ventajas del empleo de un campo magnético permanente en los medidores de inducción pueden ser sumerizadas como sigue: (1) polarización que no se presenta en los electrodos; (2) el aparato amplificador es generalmente simplificado. La desventaja que se presenta en un sensor de magneto de c.a. es el estar sujeto a la influencia de ruido provocada la alternancia del campo magnético.

**Medidor de Flujo del tipo Ultrasónico UZR.** El principio de operación de éstos medidores se basan en la variación de la fase de una oscilación ultrasónica causada por el movimiento del líquido. La generación y la recepción de las ondas causadas despues de pasar por el medio que se mueve, es acompletado de elementos-piezo colocados en la superficie del tubo, así, cuando éste método de medición es usado, no hay pérdida creciente del líquido cuando se coloca un aparato de restricción.

El diagrama de bloque para este medidor es dado en la fig. 4.34 como puede ser visto, consiste de un sensor(1), un generador de alta frecuencia(2), una válvula de vacío(3), una unidad en fase sensitiva(4), una unidad compensadora para el efecto de la velocidad del sonido(5), un interruptor(6), un instrumento indicador(7), y un instrumento secundario(8). El sensor que está en la sección del tubo metálico engomado, con dos elementos piezo(9) fijados a él adaptados a la tubería con el medio que está en el monitor. los piezo-elementos están hechos de placas de titanio de bario, y sirven para efectuar un medición diferencial del circuito con el fin de aumentar la sensibilidad y la

estabilidad, por medio de una transmisión alternada del sonido primero con el flujo del líquido y después contra él cuando se logra su valor.

La onda enviada a través del medio que se va medir y después de haberse efectuado la medición, están expresados por las fórmulas:

$$e_1 = E_1 \text{ sen } \omega t \quad \dots\dots(4.24)$$

$$e_2 = E_2 \text{ sen } \omega(t - \tau) \quad \dots\dots(4.25)$$

donde:  $e_1$  y  $e_2$  son respectivamente los valores instantáneos de los voltajes aplicados para la emisión y recepción de los elementos-piezo.

$E_1$  y  $E_2$  son los valores de amplitud del voltaje. ( $\omega = 2\pi f$ )

$f$  es la frecuencia de las oscilaciones ultrasónicas

$t$  es el tiempo

$\tau$  es el intervalo de tiempo durante el cual una oscilación atravesará la distancia  $D$  entre los elementos-piezo.

Así la diferencia del ángulo de fase entre las oscilaciones iniciales y receptoras por el elemento-piezo, después de atravesar la distancia  $D$  en acordancia con el flujo será dada por:

$$\Delta \psi_1 = \frac{\omega D}{C + V} \quad \dots\dots(4.26)$$

donde:  $C$  es la velocidad de propagación de las oscilaciones en el líquido.

$V$  es la vel. del flujo del líquido.

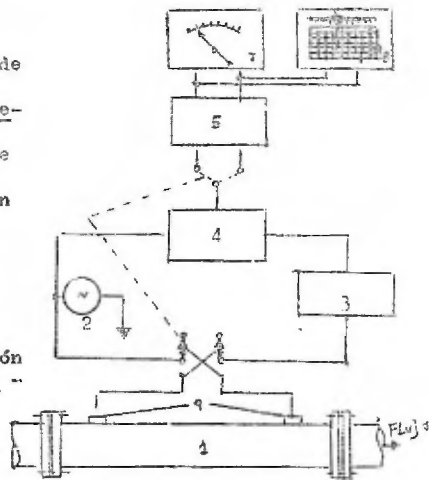


Fig. 4.34 Diagrama de bloque de un medidor de flujo ultrasónico UZR.

La diferencia de los ángulos de fase  $\Delta \psi_2$  para oscilaciones propagadas contra el flujo serán dadas por:

$$\Delta \psi_2 = \frac{D}{C - V} \quad \dots\dots(4.27)$$

Después de atravesar el medio, las oscilaciones son amplificadas y vuelven con una frecuencia de 100 p.p.s. a la entrada de la unidad sensitiva; a la salida de la unidad en fase sensitiva, se obtienen respectivamente los voltajes constantes:  $U = K$  ;  $U = K$  .....(4.23).

Para excluir la influencia de la velocidad del sonido  $C$  en las lecturas del medidor de flujo, una unidad especial de doble canal es provista en la cual los voltajes  $U$  y  $U$  son convertidos a corrientes, las cuales son inversamente proporcionales a esos voltajes. En esta misma unidad, la sustracción de esas corrientes es llevada y sacada por una señal que no depende de la velocidad de sonido  $C$ . De hecho, los valores de las corrientes  $I_1$  y  $I_2$  en ambos conductores de las unidades de compensación pueden ser representadas por:

$$I_1 = \frac{K_1}{U_1} = \frac{E_1(C + V)}{K} ; \quad I_2 = \frac{K_2}{U_2} = \frac{K_2(C - V)}{K} ; \quad \dots\dots(4.29)$$

entonces la diferencia de magnitudes obtenidas será dada por:

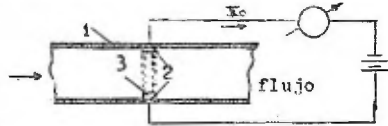
$$I = I_1 - I_2 = \frac{2K}{K} V = K_1 V \quad \dots\dots(4.30)$$

De esta última expresión se ve que la señal de salida de la unidad de compensación es linealmente dependiente de la velocidad del medio y no depende de la velocidad de propagación del sonido en el medio, por ejem. la influencia de los parámetros físicos del medio sobre la lectura del instrumento es excluida. El voltaje de salida es leído y el instrumento secundario lo gradua en unidades de flujo. Los instrumentos de lectura es un tipo M-24 microamperímetro construídos contra golpes ó caídas; un potenciómetro automático es usado como instrumento secundario. Por medio de éstos aparatos, se hacen mediciones desde cero a 7000 hrs. de medición; el error del aparato UZR no excede de  $\pm 2\%$  del valor máximo de flujo.



Medidores de Flujo Radioactivos. Los instrumentos de medición de flujo de gas, los cuales se basan en el empleo de isótopos radioactivos pueden, de acuerdo a su principio de acción, ser divididos en medidores de flujo de amplitud y frecuencia ó tiempo. Aquellos que se basan en el método de amplitud, para la medición de un gas usan dos placas(2), a las cuales un potencial eléctrico es alimentado y que están aisladas del tubo, colocadas en la superficie interna del tubo (fig. 4.35). Sobre una de esas placas, hay una capa de material radioactivo(3), que ioniza el espacio entre las placas. En ausencia de -

Fig. 4.35 Diagrama de flujo de un gas con el circuito de medición basado en la migración de iones debido al flujo del gas.



flujo gaseoso que mueva a los iones, bajo la acción del campo eléctrico, que mueve hacia los electrodos y una corriente( $I_0$ ) que fluye en el circuito. Con la aparición de un flujo gaseoso que mueve algunos iones y se separan del inter-espacio de electrodos, disminuirá la corriente. Con el aumento en la velocidad del flujo gaseoso, el número de electrones que alcanzan a los electrodos disminuye y la corriente de medición disminuye proporcionalmente. Entre los convenientes inherentes de éste método, se debe de incluir el efecto del cambio en la magnitud del voltaje de reserva, el decaimiento de los isótopos radioactivos, el contenido de mezcla y la temperatura del gas, y otros factores que influyen en las lecturas del instrumento. El efecto de tales factores pueden ser disminuidos usando circuitos de medición compensadores.

En los instrumentos que basan su medición bajo el método de frecuencia estan libres de los inconvenientes anteriores, uno de ellos es el el método de "átomos marcados", cuyo circuito ilustrativo se muestra en la fig. 4.36, y su principio de operación es como sigue: para intervalos definidos de tiempo,

la válvula(1) es abierta, y una parte de radiación radioactiva es atrapada por el flujo gaseoso que es lanzado hacia el tubo de la vasija(2). Esta emisión es grabada para un intervalo definido de tiempo por el receptor(3), el cual es colocado en alguna distancia del emisor. Si la distancia entre el emisor y el receptor es conocida, y el tiempo desde el momento de emisión es grabado, la velocidad de flujo y el flujo de gas correspondiente pueden ser determinados.

El método del "átomo marcado" tiene muchos inconvenientes, conectados con el flujo constante del material radioactivo, con la contaminación del medio bajo investigación por adiciones radioactivas, etc.

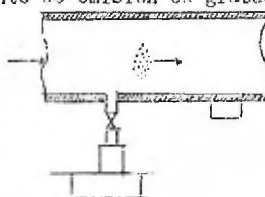


Fig. 4.36 Circuito para la medición de flujo del gas por el método del "átomo marcado"

### INSTRUMENTOS PARA LA MEDICION DE CALOR ( CALORIMETROS ).

Observaciones generales. Los calorímetros sirven para medir la cantidad de calor abastecida al consumidor en el tiempo  $\tau = \tau_2 - \tau_1$ , que puede ser determinada de la fórmula:

$$q = C\gamma \int_{\tau_1}^{\tau_2} Qv(t_1 - t_2) dt = C \int_{\tau_1}^{\tau_2} Q_G(t_1 - t_2) dt \dots\dots\dots(4.3I)$$

- donde  $q$  es la cantidad de calor
- $C$  es la capacidad de calor del transportador de calor
- $\gamma$  es la densidad relativa del transportador de calor
- $t_1$  y  $t_2$  son las temperaturas del transportador en las tuberías que se dirigen hacia adelante y hacia atrás.
- $Q_G$  y  $Q_v$  son la velocidad de flujo del transportador de calor en unidades de peso y volumen respectivamente.

Así, midiendo la cantidad de calor que se reduce para encontrar su valor instantáneo del producto de la velocidad de flujo del transportador de calor y la diferencia entre las temperaturas de la parte delantera y trasera de la tubería, y la integración de esos productos respecto al tiempo. Se ve pues, que ésta última expresión consiste de una unidad que mide el flujo en el transportador, una unidad de medición de la diferencia de temperaturas para dos puntos en una tubería, y finalmente un aparato multiplicador e integrador.

Los medidores de flujo de velocidad y los manómetros diferenciales, son los más frecuentemente usados para medir el flujo de un transportador de calor. Para medir la diferencia de temperatura en las tuberías hacia adelante y hacia atrás, se lleva a cabo con la ayuda de termómetros manométricos, termopares, ó termómetros de resistencia. Ambas unidades eléctricas y mecánicas son usadas como aparatos sumadores y multiplicadores.

En los medidores de calor sin corrección, hay un error posterior debido-

a la variación de la densidad relativa y de la capacidad de calor del transportador con la temperatura, porque cuando se gradúan estos aparatos, se toman éstas propiedades con un valor constante.

**Medidores de Calor Mecánicos.** El diagrama del circuito de éstos aparatos fabricados por la firma Pollux es mostrado en la fig. 4.37. El instrumento consiste de un medidor de flujo de velocidad(I), dos termómetros manométricos (2) y (3), con elementos sensitivos en la forma de resortes helicoidales(4) y (5), y un mecanismo multiplicador e integrador. Los termómetros manométricos son colocados en la parte delantera y trasera de las tuberías para un sistema de circulación de transportación de calor(agua).

El principio de operación del instrumento es como sigue: cuando una diferencia de temperatura entre dos puntos de la tubería provoca un movimiento de la varilla(6), que tomará lugar bajo la acción de los resortes(4) y (5). La varilla se conecta al indicador(7) de temperatura de escala diferencial(8), y un disco móvil(9); un segundo disco(ó leva 10) es rígidamente fijada. La desviación del indicador es proporcional a la diferencia de temperatura. El giro de los ejes(II) causan al engrane(I2) un movimiento y los dientes se unen al eje(II). El engrane(I2) se une al engrane(I4), y de aquí al contador de flujo del agua(I5), el cual está graduado en metros cúbicos.

Si la diferencia de temperatura es igual a cero, los discos(9) y (10) están así dispuestos para que una ranura no se forme entre ellos, y la varilla de la palanca(I6) se desliza sobre los extremos de los discos, y el diente de engrane no se engrane con las ondulaciones de la rueda(I7). La rueda(I7) y el engrane(I9) se colocan libremente sobre el árbol(II). Cuando aparece una diferencia de temperatura, las levas forman una ranura en la cual el girador de la

palanca(16) se recorre girando. En el momento que el rodillo corra por la ranura, el retén(13) entra al diente de la rueda(17) transportandolo con él, hasta que el rodillo emerge de la ranura. Cuando el diente de la rueda(17) y el engrane(18) empieza a girar, el contador(19) es llevado por ésta acción, y la cantidad de calor liberadas son leídas desde éste contador en kilocalorías. La cantidad depende del ángulo de desviación de la varilla, por ejem. la magnitud de la diferencia de temperatura y de la velocidad de giro del medidor de agua, ó de la cantidad de calor del transportador.

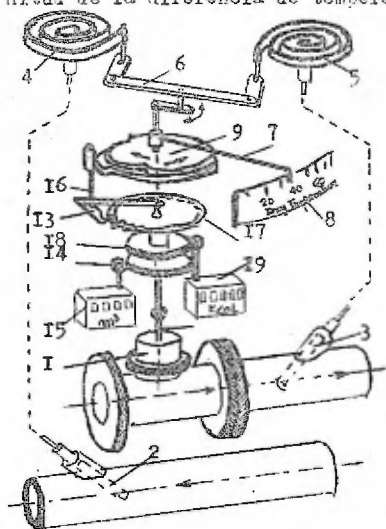


Fig. 4.37 Diagrama del circuito de un medidor de calor mecánico.

Los termómetros manométricos con resortes tienen una característica lineal de seguridad en mediciones idénticas de precisión a través de un rango entero de diferencias de temperaturas.

Medidores de Calor Eléctricos. El diagrama de éste aparato con perfil de caída, se muestra en la fig. 4.38. La cantidad de calor del transportador (agua) es medida en (1) con una veleta atornillada que se conecta en una tubería de sentido contrario al calor; la veleta del medidor de agua causa al eje principal (2) un giro con el eje(3), colocado excéntricamente sobre él.

palanca(I6) se recorre girando. En el momento que el rodillo corre por la ranura, el retén(I3) entra al diente de la rueda(I7) transportándolo con él, hasta que el rodillo emerge de la ranura. Cuando el diente de la rueda(I7) y el engrane(I8) empieza a girar, el contador(I9) es llevado por ésta acción, y la cantidad de calor liberadas son leídas desde éste contador en kilocalorías. La cantidad depende del ángulo de desviación de la varilla, por ejem. la magnitud de la diferencia de temperatura y de la velocidad de giro del medidor de agua, ó de la cantidad de calor del transportador.

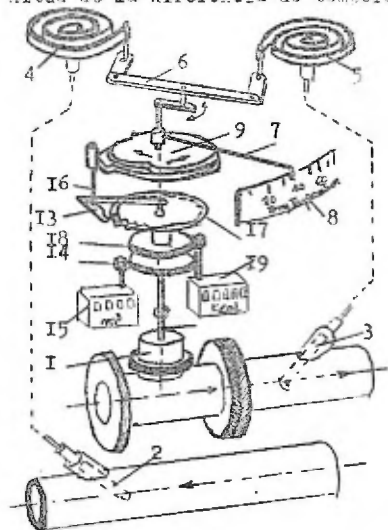


Fig. 4.37 Diagrama del circuito de un medidor de calor mecánico.

Los termómetros manométricos con resortes tienen una característica lineal de seguridad en mediciones idénticas de precisión a través de un rango entero de diferencias de temperaturas.

Medidores de Calor Eléctricos. El diagrama de éste aparato con perfil de caída, se muestra en la fig. 4.38. La cantidad de calor del transportador (agua) es medida en (I) con una veleta atornillada que se conecta en una tubería de sentido contrario al calor; la veleta del medidor de agua causa al eje principal (2) un giro con el eje (3), colocado excéntricamente sobre él.

Cuando el eje principal gira, un movimiento de columpio en el perfil(4) sobre los ejes horizontales(5) es llevado por medio de un engrane y una manivela de clavija; el número de oscilaciones del perfil es igual al número de revoluciones del eje principal, y por lo tanto proporcional a la cantidad de calor del transportador que pasa a través del medidor de agua. La parte frontal del perfil tiene una sección que cae presionando al punto(7) del milivoltmetro, a la escala(6). La magnitud del movimiento del perfil varía, pero sujeta al ángulo de desviación del señalador del milivoltmetro; el ángulo de desviación está determinado por la magnitud de la f.s.m. desarrollada por la batería de calor diferencial(9), la cual mide la diferencia de temperatura del transportador de calor en líneas de tuberías hacia adelante y hacia atrás. Un sector dentado(10) se engrana al diente de la rueda(II), la cual se columpia y transmite su movimiento al retén(12), el cual está fijado al eje principal(5).

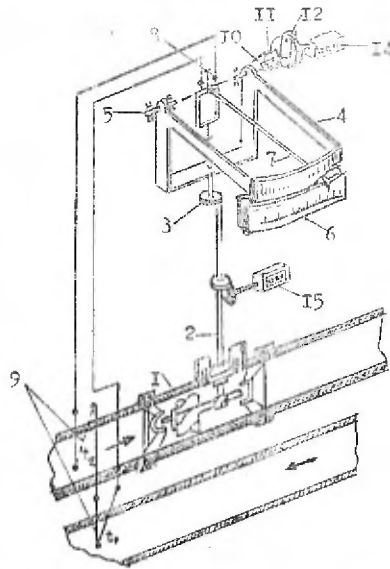


Fig. 4.38 Diagrama del circuito de un medidor de calor eléctrico con un perfil de caída.

Este perfil cuando eleva su perfil, gira al disco retén(13), de acuerdo al indicador de reloj; el disco(13) descansa sobre los ejes del rodillo y mecanismo contador(14) sobre la cual se efectúa la medición del calor. Por medio de un segundo contador(15), el cual es llevado por la acción de giro del eje(2) a través de un par de engranes cónicos, la diferencia de temperatura del transportador de calor para dos flujos es indicado por la flecha del milivoltmetro.

La fig. 4.39 muestra el diagrama del circuito de un medidor de calor eléctrico, en el cual la diferencia de temperatura del transportador de calor en líneas de tuberías hacia el frente y hacia atrás es medida por medio de los termómetros de resistencia  $R_{t_1}$  y  $R_{t_2}$ , que son conectados de acuerdo al circuito diferencial y los enrollumientos  $O_1$  y  $O_2$  del contador de inducción; Las corrientes magnéticas de los enrollumientos  $O_1$  y  $O_2$  son directamente opuestas. La magnitud del flujo resultante  $\Phi_1$  es proporcional a la diferencia de temperaturas  $t_1 - t_2$ ; la magnitud del segundo flujo magnético  $\Phi_2$  está determinado por la corriente que fluye a través del enrollumiento  $O$  del contador de inducción. Para una frecuencia constante del voltaje de abastecimiento, la velocidad de giro  $N$  en el disco  $D$  del contador de inducción, es proporcional a la relación de los flujos magnéticos;

$$N = C \frac{\Phi_1}{\Phi_2} \dots\dots(4.32)$$

Si llevamos con precisión el hecho que:  $\Phi_1 = C_1 (t_1 - t_2)U$  y de que:  $\Phi_2 = C_2 U \dots\dots(4.33)$ , en donde  $U$  es el voltaje del enrollumiento secundario del transformador  $C$ , obtenemos:  $N = C_3 (t_1 - t_2) \dots\dots(4.34)$ .

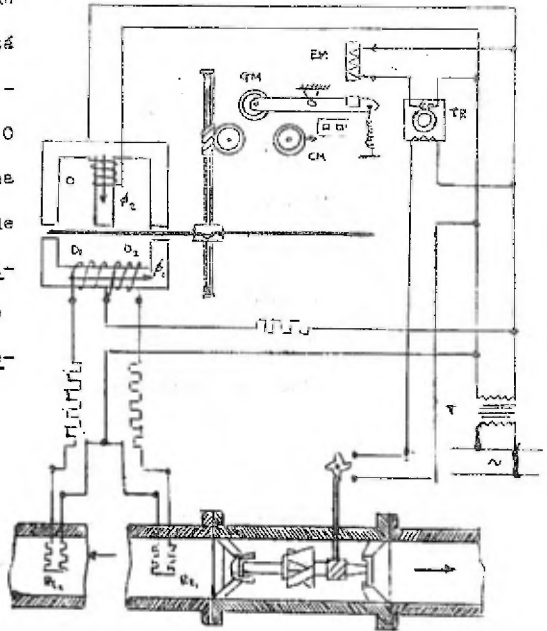


Fig. 4.39 Diagrama del circuito de un medidor de calor eléctrico provisto de un contador de inducción.

Se ve de esta última expresión, que la velocidad de giro del disco de inducción, es proporcional a la diferencia de temperatura y no depende del voltaje.



La cantidad del flujo de agua es medida con un medidor que posee una veleta espiral; tiene además un aparato contactor, por medio del cual el relevador de tiempo TR es llevado a la operación. El relevador cierra al circuito del electromagneto EM, que lleva al apartamiento del disco D cruzando el mecanismo de engrane GM con el mecanismo contador CM.

Consecuentemente, el tiempo total para la conexión del mecanismo calculador es proporcional a la cantidad del flujo de agua. El mecanismo contador indica al producto la diferencia de temperaturas y la cantidad de agua, por ejem. la cantidad de calor liberado al consumidor.

## DISEÑO DE TABLEROS.

Se tratará de dar ahora una información generalizada para el diseño y elaboración de los tableros de control, puesto que un estudio minucioso al respecto nos llevaría más tiempo y trabajo, lo que nos desviaría un poco de nuestro objetivo.

Cada caso representa un problema en particular; no existe un orden ó serie de normas que regulen el procedimiento para efectuar el diseño y elaboración de los tableros de control, no importando si el sistema controlante es neumático ó eléctrico. En base a la experiencia de las compañías constructoras, la "carga" ó cantidad de material manejado es el aspecto más importante para el diseño, y posteriormente viene el proceso en particular. Los tableros son contruidos para mantener un control efectivo en el arranque y paro de los motores que manejan las variables de un proceso, así como toda clase de instrumentos eléctricos e indicadores de control.

Es fácil comprender el porqué se pueden encontrar tableros con unos cuantos instrumentos hasta alcanzar sistemas complejos, dependiendo del grado de automatización que se tenga en un proceso.

Las areas para la instalación de los tableros deberán de reunir las siguientes condiciones :

- a) accesibilidad
- b) visualidad
- c) acceso de conexiones

d) seguridad industrial.

Los tableros pueden clasificarse de diversas maneras dependiendo de :

- a) El tipo de montaje en :
  - sobrepuesto
  - autosoportado
- b) El servicio en :
  - interior
  - exterior
- c) La superficie en :
  - tamaño normal
  - tamaño miniatura.

**Sobrepuesto.** Es aquel en el cual se adaptan todos los aparatos e instrumentos a un tablero empotrado en una pared.

**Autosoportado.** Es aquel tablero que contiene todos los instrumentos colocados en una mesa ó carro transportándose de un lado a otro.

**Interior.** Es el tablero diseñado para operar en lugares cerrados, por ejem. para protegerse de polvo ó peluza que perjudican su funcionamiento.

**Exterior.** Cuando se opera fuera de recintos cerrados.

**Normal.** Es el tablero que contiene aparatos e instrumentos standard.

**Miniatura.** Es el tablero que opera con equipo miniatura.

Por lo que se refiere a los instrumentos electrónicos en miniatura, como son los potenciómetros y los registradores, son particularmente adecuados para llevarlos a estaciones centrales de control, debido a sus bajas necesidades de potencia se emplean con frecuencia en laboratorio así como mediciones en el campo.

El uso de instrumentos de telemetría para el control remoto, permite mediante la técnica de circuitos integrados muy avanzados un máximo de utilidad, de realización y de economía cuando se encuentran ya instalados, pero el costo inicial del equipo sube considerablemente.

La transmisión de señal en los instrumentos en miniatura para la alimentación en dos hilos del receptor que transmite información "analog" del área de proceso al cuarto de control usando una señal de 4 a 20 mA de c.c. , hasta convertir la señal a un voltaje de 1 a 5 volt de c.c. ; éste hilo conectado en paralelo a otros, no provoca disminución en la precisión del sistema debido a su alta impedancia de entrada, adicionalmente no pierde integridad el circuito si se desconectan algunos receptores, sin la necesidad de interruptores.

Todo tipo de instrumento para montar en tableros puede ser colocado en cajas sencillas ó bien, para montajes múltiples. Esta última opción reduce el costo de los instrumentos, de su instalación y del alambrado, así como el ahorro de espacio.

Para proteger a los tableros de fallas eléctricas, éstos son provistos de interruptores magnéticos con disparo automático por sobrecarga y por corto circuito. Para la protección del ser humano, se deben de seguir las siguientes recomendaciones :

- a) No presentar partes vivas accesibles
- b) Tener partes metálicas a tierra.
- c) Recibir el tablero una capa de pintura mínima.

Una hoja típica de especificaciones (se muestra en la pag. 236) para la operación y diseño de un tablero, así como la de su construcción deberá de contener



datos :

a) Una sección que sirva de referencia para indicar el No. de pedido, el cliente y el objeto a que va ser destinado. En la hoja anterior aparece ésta sección en el margen superior derecho.

b) Una sección que indique todas las características de operación y construcción, como lo es el voltaje, la frecuencia, el número de fases e hilos, etc. ; ésta sección se localiza en la parte media derecha de la hoja anterior.

c) Una sección que indique las medidas de distribución para el espaciamento de los instrumentos a colocar para el largo, ancho y grosor del tablero, todas éstas medidas están hechas a escala. Para nuestra ilustración, la localizamos en la parte superior izquierda.

d) Una sección que nos indique la totalidad de instrumentos a colocar en el tablero de control, con todas sus características individuales, como son el # del catálogo, el # del interruptor con su clase, operadores de control, relevadores, etc. , todas ellas localizadas en la parte media inferior a todo lo largo.

e) Una última sección que indique las personas que efectuarán la revisión en sus departamentos respectivos, así como el nombre de la compañía que elaboró el diseño para su funcionamiento.

Para ejemplificar la sección d, se dan a continuación algunos de los muchos instrumentos que se pueden localizar en un tablero de control de motores :

- Interruptor general termomagnético de 3P. \_\_\_\_\_ A.
- Voltmetro indicador de c.a. de escala 0 a \_\_\_\_\_ V.

- Selector de fases para voltmetro marca \_\_\_\_\_
- Ampérmetro indicador de corriente alterna escala 0 a \_\_\_\_ V.
- Transformador de corriente relación \_\_\_\_\_ 5A.
- Selector de fases para ampérmetro marca \_\_\_\_\_
- Watthorímetro trifásico de \_\_ elementos 5A. para \_\_\_\_ V.
- Interruptor derivado termomagnético
- Combinación de interruptor termomagnético y arrancador magnético a tensión completa \_\_\_\_\_ reversible tamaño NEMA \_\_\_\_ cat. \_\_\_\_ con \_\_\_\_ elementos térmicos de sobrecarga para los sig. motores :  
\_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ HP.  
\_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ HP.

Para finalizar éste estudio, se recomienda que los servicios de la compañía que diseña e instala los tableros de control, efectúe también su calibración y la comprobación del sistema, puesta en marcha y de diversos planes de funcionamiento, para evitarse problemas en lo futuro.

### CONCLUSION Y OBSERVACIONES PERSONALES

Se ha intentado cubrir todos los aspectos de mayor interés en el presente trabajo, lograndose en algunos de ellos un estudio casi completo, en otros, debido a su gran amplitud de información, se ha resumido convenientemente a nuestros propósitos para que en conjunto se tenga una base sólida que sirva de guía en éste proyecto de especialización del Ingeniero Químico, de acuerdo a nuestras necesidades y recursos.

Es bueno hacer notar que para redondear éste proyecto, sería conveniente - realizar otros estudios, uno de ellos bien pudiera ser el relacionado al estudio del comportamiento no lineal de las variables de proceso y la solución de éstos defectos para alcanzar su control; otro sería el ordenar el material en programas y asignaturas, etc.

Sería igualmente interesante y muy práctico el hecho de realizar prácticas en un laboratorio de Ingeniería Química y Electrónica en grupos reducidos de personas; visitas a industrias que estuvieran en disponibilidad de aceptar a estudiantes, para que de ésta manera se tuviera un mayor contacto y se fuerán adaptando a las actividades que se les presenten en su vida diaria.

En lo personal, debido a las visitas y pláticas sostenidas con diferentes personas, así como el tema desarrollado me ha servido enormemente para encausarme en la actividad a la que deseo llegar teniendo una base firme de conocimientos para ser útil en la sociedad.



La implantación de éste sistema de control en países altamente industrializados es muestra clara de sus beneficios, por lo cual se debe de proceder a instalar todo tipo de planta de proceso con éste sistema en nuestro país, previo estudio técnico-económico que nos indique si un artículo manufacturado va a abastecer únicamente al mercado nacional. ó bien, pueda competir en el extranjero.

Por otra parte, el costo de la automatización de una planta dependerá de la extensión y del grado de complejidad alcanzado en ella. Se deberá de proveer en cada una de ellas un posible aumento de su capacidad, para que de ésta manera se tenga una automatización subsecuente y sean fácilmente introducibles y superpuestos.

Una vez efectuada la instalación de éste sistema de control, el personal capacitado puede dedicarse a la investigación y al desarrollo de nuevos productos que tanta falta hace a nuestro país.

BIBLIOGRAFIA

1. Process Instruments and Controls Handbook  
Considine Douglas Maxwell  
Editorial McGraw Hill  
1957
  
2. Process Dynamics, Dynamic Behavior of the Production Process  
Campbell Donald Pierce  
Editorial J. Wiley  
1958
  
3. Automatic Process Control  
Eckman Donald Pierce  
Volumen 1 Control Automático  
Volumen 2 Industrias Químicas-Automatización  
Editorial J. Wiley 1958
  
4. Process Control  
Peter Harriot  
Volumen 1 Ingeniería Química  
Volumen 2 Control Automático  
Editorial McGraw Hill  
1964
  
5. Introduction to Chemical Process Control  
Daniel D. Perinutter  
Editorial J. Wiley  
1957

- 6 Control Engineers Handbook  
Truxal John G.  
Editorial McGraw Hill  
1958
  
- 7 Juego de boletines "Honeywell"  
Distribuido y elaborado por Honeywell de México 1972.
  
- 8 Electrónica Industrial y Control  
Tr. por Enrique Morales Ruiz  
Editorial Continental  
1962
  
- 9 Manual de Válvulas de recepción R.C.A.  
Radio Corporación de América  
Editorial ARO S.A. Buenos Aires Argentina  
1953
  
- 10 Manual de transistores R.C.A.  
Radio Corporación de América.  
Editorial ARO S.A. Buenos Aires Argentina  
1968
  
- 11 Introducción a los Tubos Electrónicos y Semiconductores  
E. C. Alvarez y David E. Fleckles.  
Editorial McGraw Hill  
1969
  
- 12 Revisión al plan de Estudios de la Carrera de Ingeniería Electrónica.  
Facultad de Ingeniería U.N.A.M.  
1972

- 13 Automatic Control Measuring and Regulating Devices.  
For I. V. Butusov translated by G. Segal  
Editorial McMillan Company according with Pergamon Press LTD  
1965
  
- 14 The effects and benefits of pilot plant automation  
C.D. Ackerman  
Gulf Res & Develop Co. Pittsburg Pa. Chem. Eng. Progr.  
Vol. 67 n4 April 1971 (p. 50 - 53)
  
- 15 Electronic control of chemical process plants.  
W. Sedlneir  
Siemens Review ( Siemens A.G. , Erlangen West Germany )  
37 n11 Nov. 1970 (p. 563 - 8).