

**CAPITULO 1.- INTRODUCCION A SISTEMAS
DE CONTROL.**

1.1 CONTROL DE LAZO ABIERTO.	2
1.2 CONTROL DE LAZO CERRADO.	4
1.3 CARACTERISTICAS DE SISTEMAS DE CONTROL.	6

1.- INTRODUCCION A SISTEMAS DE CONTROL.

A medida que el hombre ha ido avanzando en la tecnología, para producir satisfactores de sus necesidades, ha requerido avanzar en la misma medida en el control de sus Procesos.

Primero el hombre controlaba manualmente sus procesos por observación, estos eran lazos manuales de control ya que el operador manipulaba sus salidas dependiendo de lo que percibía del proceso. Posteriormente la necesidad de resolver problemas de control, condujo al desarrollo de los primeros lazos automáticos cerrados (control ON-OFF, de posiciones, proporcional, etc.). Apareció el Controlador Analógico y el avance que se logró en la industria fue sorprendente, en terminos de Eficiencia, Seguridad, Consistencia, etc. Más recientemente apareció la Computadora y su aplicación en el control de procesos, ha sido exitosa, la tendencia indica que la mayoría de las plantas industriales serán controladas por sistemas computarizados, buscando obtener máxima eficiencia y rentabilidad.

Un sistema de Control se puede definir como un grupo de componentes que responden a una señal, la respuesta de ellos tendría como objetivo en la mayoría de los casos el control de una variable física, tal como velocidad, temperatura, flujo, presión, etc.

1.1 CONTROL DE LAZO ABIERTO.

Los sistemas de control de Lazo Abierto representan la forma más simple de dispositivo de control.

La Fig. 1.1.1 muestra un sistema de control simple del nivel de un tanque. Nosotros debemos de mantener el nivel del tanque h , dentro de límites razonablemente aceptables, las válvulas de flujo V_1 (salida) y V_2 (entrada), abren automáticamente controladas por las señales de dos relevadores previamente ajustados por tiempo, si el flujo que se gasta a través de V_1 es igual al flujo de agua que se repone a través de V_2 , el nivel h se mantiene, pero cualquier perturbación de flujo ocasionaría que fallara el nivel. Este sistema no es preciso puesto que no tiene la capacidad de medir la razón de flujo de salida a través de la válvula V_1 , la razón de flujo de entrada a través de la válvula V_2 o el nivel del tanque. La Fig. 1.1.2 muestra la relación que existe en este sistema entre la entrada (el nivel deseado del tanque) y la salida (el nivel real del tanque).

Esta representación de flujo de señales del sistema físico se conoce como un diagrama a cuadros, las flechas se usan para mostrar la entrada o valor deseado y la salida del sistema de control. Este sistema de control, no tiene ninguna retroalimentación para comprobación y el termino Lazo Abierto se usa para describir ésta ausencia.

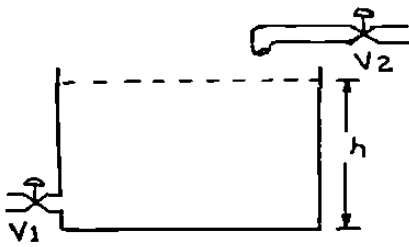


Fig. 1.1.1 Sistema de Control de Nivel del Tanque.

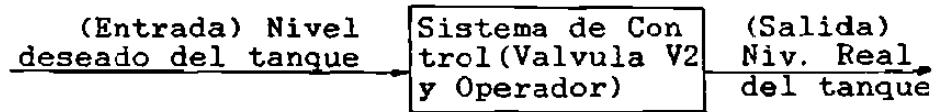


Fig. 1.1.2 Diagrama a cuadros del Sistema de Control de nivel del tanque.

La figura 1.1.3 ilustra un motor de corriente directa controlado por campo, que gira una rueda de corte a una velocidad constante. Cuando una pieza de madera se aplica a la superficie de la rueda de corte, actúa como un par perturbador al par de manejo del motor, como resultado se tiene una reducción de la velocidad de la rueda de corte, (considerando que la señal de control permanece constante). Esta situación se puede representar como se muestra en la Fig. 1.1.4. El símbolo que aparece entre el motor y la carga representa un substractor.

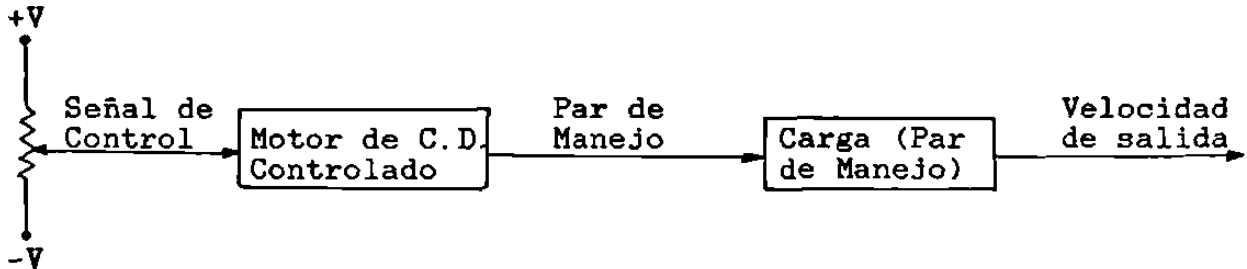


Fig. 1.1.3 Motor de C.D. controlado por campo.

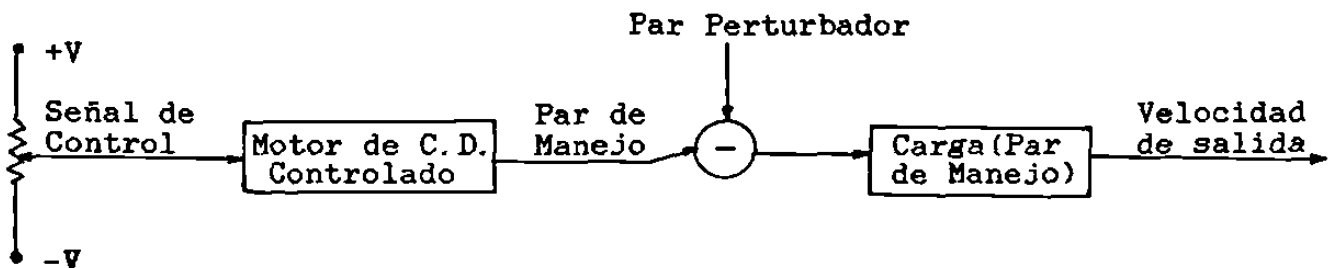


Fig. 1.1.4 Motor de C.D. controlado por campo que tiene un Par perturbador.

El efecto de Par perturbador u otras entradas secundarias, deterioran el funcionamiento correcto de un sistema de control de Lazo Abierto, puesto que no tiene forma de corregir automáticamente su salida, ya que no tiene retroalimentación de comparación. El control de una lavadora por tiempos, es otro ejemplo real de lazo abierto, no se tiene retroalimentación de como esta controlando el proceso y las acciones de control son independientes de dicha retroalimentación.

1.2 CONTROL DE LAZO CERRADO

Los Sistemas de Control de Lazo Cerrado derivan su valiosa exactitud de la retroalimentación de comparación. Un detector de error entrega una señal proporcional a la diferencia entre la referencia o ajuste y la retroalimentación de medición de la variable controlada. El sistema de control ajusta su salida hasta que se igualen referencia y retroalimentación y el error sea cero. Cualquier diferencia entre la salida real y la deseada producida por cambios en la carga, será automáticamente corregida en un sistema de control de Lazo Cerrado. Por medio de un diseño adecuado, el sistema puede hacerse relativamente independiente de entradas secundarias y cambios en características de componentes.

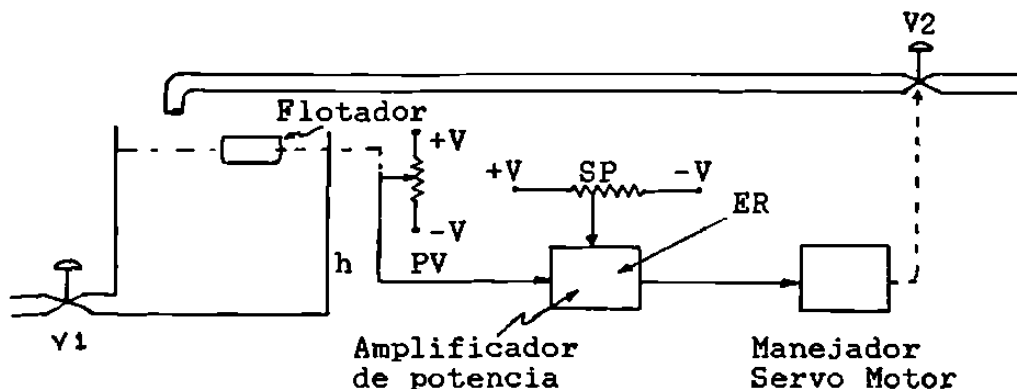


Fig. 1.2.1 Sistema Automático de Control de Nivel del tanque.

La Fig. 1.2.1 muestra la versión del control automático de nivel del tanque mostrado en la Fig. 1.1.1. Se puede mantener el nivel deseado "h" del tanque dentro de tolerancias, aunque la razón de flujo de salida a través de la válvula V1 se varíe. Si el nivel del tanque no es correcto, se presenta un voltaje de error. Este se amplifica y se emplea en alimentar un motor que posiciona la válvula V2 para ajustar la razón de flujo de entrada y restaurar el nivel del tanque deseado. Un diagrama a cuadros analógico a este sistema se muestra en la Fig. 1.2.2. Debido a que la comparación de retroalimentación esta presente, el termino Lazo Cerrado se usa para describir la operación del sistema, que comunmente se conoce como Control Automático.

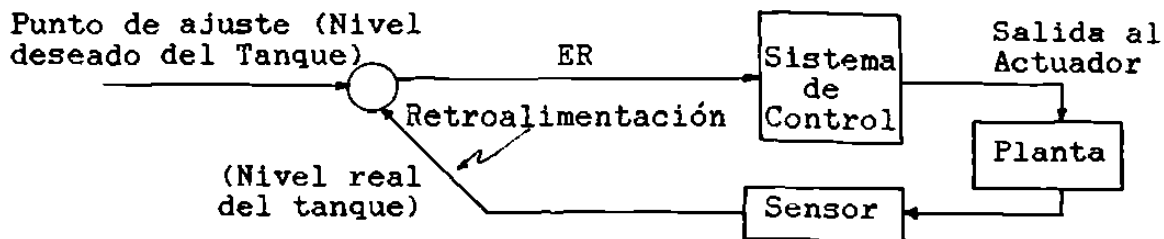


Fig. 1.2.2 Diagrama a cuadros de un Sistema de Lazo Cerrado.

Una versión de control de velocidad automática del motor de corriente directa controlado por campo, el cual se mostró en la Fig. 1.1.3 se muestra en la Fig. 1.2.3. Este sistema de retroalimentación tiene la capacidad de mantener la velocidad de salida relativamente constante, aunque se puedan presentar pares perturbadores. Un Tacómetro que funciona como transductor que transforma velocidad a voltaje, es el elemento de retroalimentación para este sistema de control. Si la velocidad de salida difiere de la velocidad deseada, el amplificador de diferencia desarrolla una señal de error, la cual ajusta la corriente de campo del motor, con objeto de restaurar la velocidad deseada a la salida. Los sistemas de control retroalimentados, usados para controlar posición, velocidad y aceleración son muy comunes y se les ha dado el nombre de Servo-mecanismos.

Con todas sus ventajas, los sistemas de retroalimentación tienen una muy seria desventaja, puesto que pueden inadvertidamente actuar como osciladores o volverse inestables, es decir pueden hacer que su salida se quede oscilando u oscile crecientemente, lo que sería sumamente perjudicial para cualquier proceso.

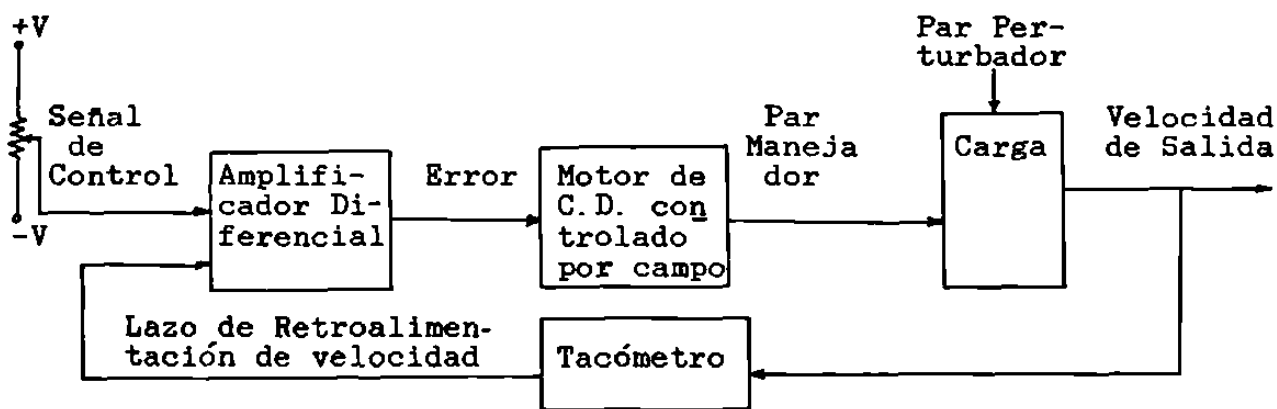


Fig. 1.2.3 Diagrama a cuadros del Control de Lazo Cerrado para un Motor de C.D. controlado por campo.

1.3 CARACTERISTICAS DE SISTEMAS DE CONTROL.

El controlador puede ser analógico o digital, pero en el controlador analógico, su estrategia de control debe ser tal que pueda implementarse físicamente, si se requieren modificaciones posteriores en la estrategia de control, se requerirían modificaciones físicas. La acción de control digital se representa por una fórmula. Las ecuaciones de Diferencia describen el funcionamiento de sistemas con entradas discretas y salidas discretas. En el análisis de sistemas discretos se utiliza la "Transformada Z" la cual es en muchos aspectos análoga al uso de la "Transformada de Laplace" para sistemas continuos. Los algoritmos utilizados por la Computadora para determinar la acción de control son en realidad ecuaciones de diferencia.

Los componentes que forman un Lazo de Control Analógico son: Transductores, Acondicionadores de Señal, Controladores, Actuadores y Planta.

Uno de los Lazos Típicos de Control Analógico sería:

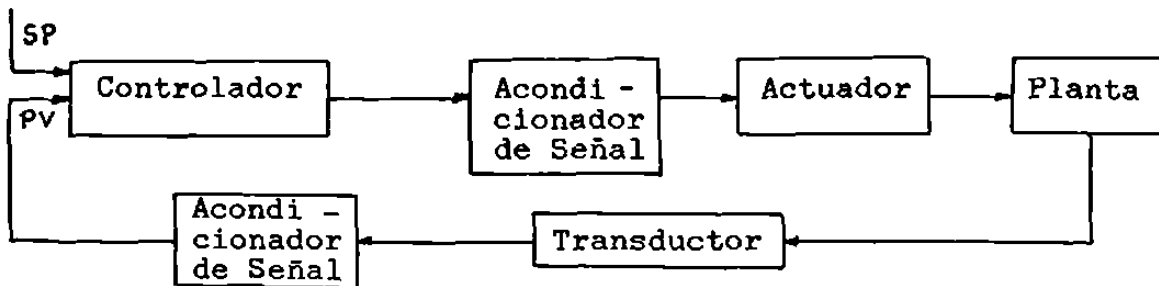


Fig. 1.3.1 Control de Lazo Cerrado Analógico.

El conjunto llamado Controlador involucra el Detector de -- Error, el Compensador, el Amplificador y en ocasiones acondicionadores de señal. Los Acondicionadores de señal se colocan en diferentes posiciones dependiendo de la aplicación, generalmente donde hay que transmitir información a distancia.

Los sistemas de Control Digital pueden ser: Directos cuando la computadora sustituye a los controladores analógicos (como se muestra en la Fig 1.3.2), Supervisorios cuando la computadora principal se comunica con los controladores analógicos y Jerárquico, cuando la computadora principal controla a otras computadoras de Control Digital Directo.

Los componentes que forman un Sistema de Control Digital son: Transductores, Subsistemas de Entrada, Subsistemas de Salida, Computadora, Controladores (si es control supervisorio), Actuadores y Planta.

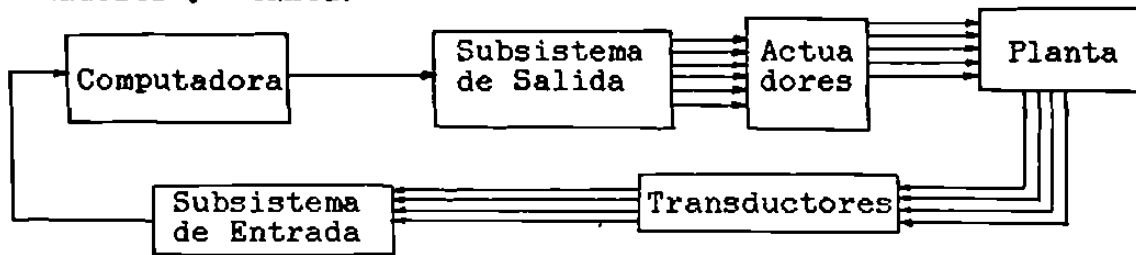


Fig. 1.3.2 Ejemplo de un Sistema de Control Digital Directo.

TRANSDUCTORES. -

Los transductores son los sensores primarios del proceso, - son los dispositivos que efectúan la medición inicial y convierten la señal de una variable dinámica en una información proporcional eléctrica, neumática, mecánica, etc. adecuada para ser utilizada por los otros componentes del Lazo de Control.

Los transductores pueden ser:

Mecánicos	{	Flujo (Venturis, Placas de Orificio, Toberas, etc.) Presión (Tubo Bourdon, Diafragma, Fuelles) Posición (Potenciómetros, Capacitivos o de reluctancia variable) Esfuerzos (Celdas de Carga) Movimiento (Acelerómetros, etc.)
Térmicos	{	Termopares Termistores Detectores de Temperatura por Resistencia
Opticos	{	Termómetros de Radiación Infrarroja Pirómetros de Comparación por colores Foto Detectores (Fotovoltaicos, Fotodiodo, -- Fototransistor)

En el capítulo #3 se analizarán los transductores mecánicos de orificio (Venturis y Placas de Orificio), se analizarán también los transductores térmicos (Termopares, Termistores y Detectores de Temperatura por Resistencia RTD).

ACONDICIONADORES DE SEÑAL. -

Son los componentes que adecúan la señal generada por él - sensor primario o por el controlador para ser transmitida a distancia y ser manejada por los otros elementos de control.

Por ejemplo pueden amplificar la señal primaria generada - por el transductor, y también pueden cambiar el tipo de va - riable, con el objeto de que pueda ser correctamente maneja - da por los demas dispositivos.

Si tenemos una placa de orificio para medir un flujo de - gas. Generando una presión diferencial en el rango de mm de Agua, entonces el transmisor que convierte el rango de mm de Agua en una señal de mA que pueda ser enviada a un cuarto de control donde se localice el controlador sería el acondicio - nador de señal y se colocaría entre el transductor y el de - tector de error, la señal en mamp. es mucho mas fácil y rápida de manejar que la señal en mm de Agua.

CONTROLADORES. -

Es una forma comercial de presentar las tres funciones Detección de Error, Compensación, y Amplifica - ción Primaria, en un sólo dispositivo. Al detector de error llegan por un lado la señal correspondiente al punto de ajuste ó de referencia y por otro lado la señal de campo o retroalimentación de la variable controlada, generalmente esta señal viene de un acondicionador de señal llamado transmisor el cual se conecta al transductor primario. Y tene - mos como salida una variable manipulada que será la que maneje los actuadores.

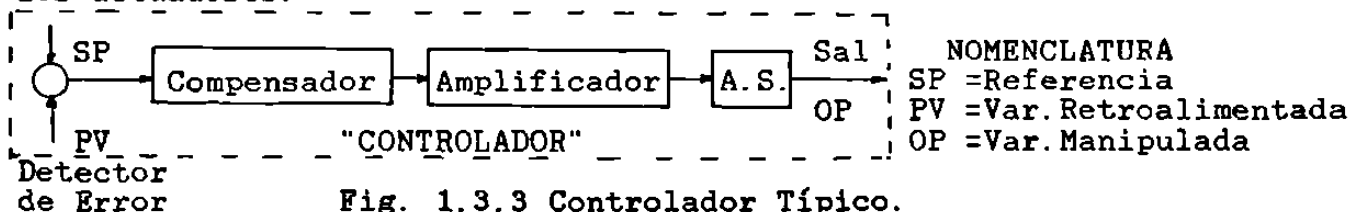


Fig. 1.3.3 Controlador Típico.

La salida del detector de error se conecta al Compensador, donde se encuentran generalmente Las Estrategias de Control , la salida del compensador ya afectada por la Estrategia de - Control correspondiente pasa al amplificador.

El amplificador y el acondicionador de señal, simplemente - permiten que la salida al actuador tenga la energía y naturale - za necesaria para operar el resto del sistema.

ACTUADORES. -

Son los dispositivos que modifican el medio ambiente de la - planta para obligar a la variable controlada a llegar al valor de control que deseamos. En esta Tesis se enfatizará en vál - vulas de control, pero también existen pistones, motores, resisto - res eléctricos para calentamiento, compuertas manejadoras de - flujo, etc.

PLANTA. -

La Planta es el Medio Ambiente ó Entorno en el que se deja sentir la Acción de Control y que afecta a la variable Controlada. Asi por ejemplo si deseamos controlar la temperatura de un horno, la Planta es precisamente la parte del horno que afecta a la Variable a controlar (Temperatura).

SUBSISTEMAS DE ENTRADA Y SALIDA. -

Los Subsistemas de Entrada reciben señales de transductores de campo y envían señales a computadoras de control digital, los Subsistemas de salida reciben señales de la computadora y transmiten información a actuadores. Estos van más allá de acondicionadores sencillos de señal, ya que involucran microprocesadores, multiseleccionadores de señales, convertidores A/D (Analógico/Digital) y D/A (Digital/Analógico) y presentan señales totalmente adecuadas para ser utilizadas por la computadora digital ó los actuadores, estos dispositivos tienen la ventaja de comunicarse por cable sencillo, y ahorran un 90% del cable que se requeriría para cientos de sensores, ó actuadores finales.

COMPUTADORA DE CONTROL. -

Si la computadora está instalada en un Sistema de Control Supervisorio o Jerárquico, se comunica con los controladores, para manejar información general, llevar archivos de datos, tendencias etc. Si se encuentra en un Sistema de Control Digital Directo entonces actúa como los controladores del Sistema, y en ella se configuran las estrategias de control.

CAPITULO 2.- CONTROLES ANALOGICOS Y DIGITALES.

2.1 DEFINICIONES.	10
2.2 CONTROL ANALOGICO.	12
2.2.1 Control de dos posiciones	12
2.2.2 Control de Posiciones Multiples.	13
2.2.3 Control Proporcional.	14
2.2.4 Control Integral.	15
2.2.5 Control Derivativo.	17
2.2.6 Controlador Proporcional.	18
2.2.7 Controlador Proporcional Integral P-I .	20
2.2.8 Controlador Proporcional Derivativo P-D .	21
2.2.9 Controlador Proporcional Integral-Derivativo PID .	22
2.3 CONTROL DIGITAL.	24
2.3.1 Adquisición de Datos Y Registro .	24
2.3.2 Control Digital Directo.	26
2.3.3 Control Supervisorio.	31
2.3.4 Concepto de Jerarquía de Computadoras.	34

2.- CONTROLES ANALOGICOS Y DIGITALES.

Los sistemas de control pueden definirse como sistemas que regulan el flujo de energía u otros recursos, su arreglo, complejidad y apariencia varían con su finalidad y función. En general los sistemas de control pueden dividirse en sistemas Analógicos y Sistemas Digitales, la característica que distingue estos dos tipos es el uso de controladores analógicos sin computadora en el primer caso, y el uso de la computadora en forma supervisoria o como control directo en el segundo caso.

A través de un sistema adecuado, las ventajas de la retroalimentación, pueden utilizarse sin tener un sistema inestable .

El controlador es el dispositivo que con mediciones de entrada resuelve ciertas ecuaciones y calcula la salida adecuada. La ecuación necesaria para obtener el control se proporciona por un cálculo analógico o digital. Se suele llamar a estas ecuaciones: Los modos de operación del controlador. La naturaleza del proceso mismo y la variable particular a ser controlada determina que modo o modos de control serán usados y el valor de ciertas constantes en la ecuación.

2.1 DEFINICIONES.

- Variable de Proceso.

La Variable de Proceso (P.V.) es el valor medido de aquel parametro de una Planta o proceso, el cual esta siendo controlado por el sistema de control.

- Punto de referencia o de Ajuste.

El Punto de referencia o de Ajuste (Set Point S.P.) es el valor requerido de aquella propiedad de la Planta o proceso la cual está siendo controlada por el Sistema de Control. La acción de cualquier Lazo Cerrado de sistema de control será la causa de que la Variable de Proceso medida tienda a igualar el Nivel de Ajuste o Referencia.

- Error.

El error ER dentro de un Lazo cerrado se define como la diferencia entre la Variable de Proceso y el punto de referencia en cualquier momento.

Mas exactamente:

$$\text{Error} = ER = SP - PV$$

Esta es la fórmula del error convencional, también se utiliza el negativo del error el cual se conoce generalmente como PV - SP.

- Variable Manipulada.

La Variable manipulada es la salida (OP) de un controlador, la cual vá al actuador o elemento final de control despues de haber sido acondicionada, modifica el nivel de señal de salida que actúa sobre la planta, para que a su vez se modifique la variable controlada.

$$O P = f(ER)$$

Donde el algoritmo de control se representa como una función del error.

La variable manipulada no necesita tener las mismas unidades de energía que el Punto de Referencia ó la Variable de Proceso. Por ejemplo, en un Lazo de Control de Temperatura SP y PV podrian representar la temperatura medida en °C. La salida del controlador podría variar la corriente a través de elementos calentadores y podría por consiguiente presentarse en Amps o Watts.

- Límites de Variable Manipulada: Hi, Lo.

El nivel de salida de un controlador está generalmente limitado dentro de ciertos valores normales de corriente o voltaje como:

0-10 Volts, 1-5 Volts, o 4-20 mA.

En el caso de 0-10 Volts por ejemplo esta señal representa el valor de OP cuando varia de 0 a 100% la variable manipulada. En ciertos procesos puede ser peligroso operar dentro de un rango completo de 0 a 100% la salida y se limitan los valores de OP antes de aplicarse al dispositivo. Algunos controladores usan un Parametro Hi que sirve como un límite de salida alta, mientras que el Parametro Lo actua como el límite de salida bajo. Entonces en general:

$$0\% \leq Lo \text{ y } Hi \leq 100\%$$

Esto es OP esta siempre obligada a permanecer dentro de Lo-Hi lo cual se conoce como el rango de operacion del instrumento.

2.2 CONTROL ANALOGICO.

El control analógico es aquél en el que su estrategia de control es físicamente realizable estos dispositivos normalmente utilizan acondicionadores de señal para los transductores de entrada y para los actuadores en la salida.

2.2.1 CONTROL DE DOS POSICIONES.

El Modo más elemental de controlador, es el ON-OFF ó modo de dos posiciones. Este es un ejemplo de un modo Discontinuo. Es el más simple pero el más barato y a menudo suficiente cuando sus desventajas son toleradas, aunque una ecuación analítica no puede ser escrita podemos en general decir que su estrategia de control es:

$$\begin{aligned} OP &= 100\% & \text{Si } ER > 0 \\ OP &= 0\% & \text{Si } ER < 0 \end{aligned}$$

Esta relación muestra que cuando el valor medido excede al Punto de Referencia se obtiene la salida del controlador al 100%, cuando es menor que el (S.P), la salida del controlador es cero. Un calentador de agua es un ejemplo comun, si la temperatura cae abajo del Punto de Referencia, el calentador se enciende. Si por el contrario la temperatura esta arriba (del SP), se apaga.

- ZONA NEUTRA.

En la implementación practica, del controlador de dos posiciones, existe un traslape, cuando ER se incrementa de cero ó disminuye de cero, en este rango, ningún cambio en la salida del controlador ocurre. Esto se muestra mejor en la Fig. 2.2.1, la cual grafica OP contra ER para un controlador de dos posiciones. Aqui nosotros vemos que hasta que el error se incrementa por ΔER arriba de cero, la salida del control no cambiaría de estado. Al disminuir caera ΔER abajo de cero antes de que cambie el controlador a cero % de su salida. El rango $2 \Delta ER$ el cual es la Zona Neutra o Traslape Diferencial se diseña a menudo sobre una cierta cantidad mínima para prevenir un ciclaje excesivo. La existencia de tal Zona Neutra, es un ejemplo de Hysteresis deseable.

S
A
L
I
D
A
D
E

C
O
N
T
R
O
L
A
D
O
R

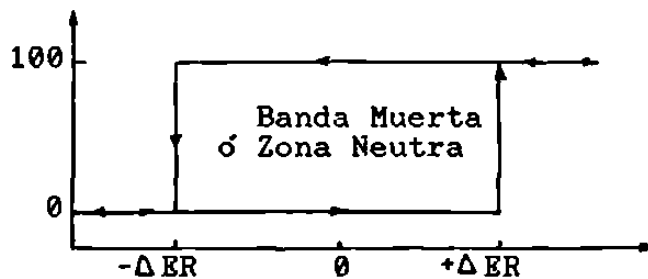


Fig. 2.2.1 Acción del controlador de dos posiciones con una zona neutra.

2.2.2 CONTROL DE POSICIONES MULTIPLES.

Una extensión lógica del modo de control previo de dos posiciones, es proporcionar varias salidas intermedias en lugar de solo dos. Este modo de control discontinuo, se usa en un intento de reducir el comportamiento cíclico del controlador de dos posiciones. Este modo está representado por:

$$OP = OP_i \quad \text{Si} \quad ER > E_i \quad \text{para} \quad i=1,2,3,\dots,n$$

El significado es que si el error excede ciertos límites de ajuste \pm , la salida del controlador se ajusta a valores prefijados OP_i , el ejemplo mas comun es el control de 3 posiciones donde:

$$OP = \begin{array}{ll} 100\% & ER > E_1 \\ 50\% & -E_1 < ER < E_1 \\ 0\% & ER < -E_1 \end{array}$$

Esto significa que tan pronto como el error este entre $-E_1$ y E_1 del Punto de Referencia, el controlador permanece en algún ajuste nominal indicado por la salida del controlador del 50%. Si el error excede del (SP) por mas de E_1 , entonces la salida se incrementa al 100%. Si el error negativo excede a $-E_1$ la salida del controlador se reduce a 0. La Fig. 2.2.2 ilustra este modo graficamente.

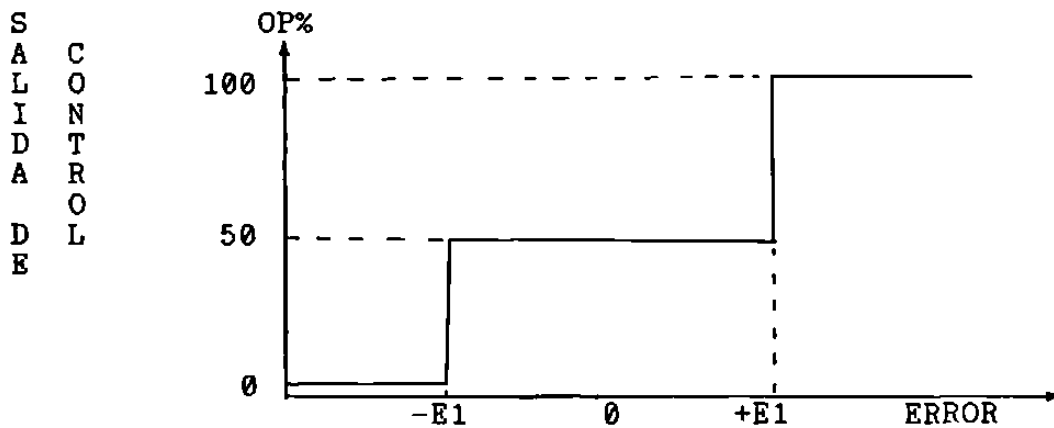


Fig. 2.2.2 Acción del controlador de tres posiciones.

2.2.3 CONTROL PROPORCIONAL.

El control que tenía el modo de dos posiciones daba una salida de 100% ó 0%, dependiendo de si el error era mayor o menor que la Zona Neutra. En el modo de Posiciones Múltiples más divisiones de las salidas del control contra el error se habían desarrollado. La extensión natural de este concepto, es el Modo Proporcional. Donde una suave relación lineal existe entre la salida del control y el error. Entonces sobre algunos rangos de error con respecto al Punto de Referencia, cada valor de error tiene un valor único de salida del controlador en correspondencia de 1 a 1. El rango de error para cubrir la salida del controlador de cero a 100% es la BANDA PROPORCIONAL, debido a que la correspondencia existe solo para errores en este rango, este modo puede expresarse por:

$$OP = K_p ER + OP(0)$$

Donde: K_p = Constante proporcional entre la salida del controlador y el error (%/%)
 $OP(0)$ = Salida del controlador sin error (%)

La Banda Proporcional está dada en % ($100/K_p$). La salida del controlador para errores que exceden la Banda Proporcional se satura al 100% ó al 0% dependiendo del signo de error. En la Fig. 2.2.3 se muestra la gráfica de este modo de control. Notar que la constante proporcional determina la Banda Proporcional. El valor de $OP(0)$ a menudo se escoge como el 50% para dar igual salida al controlador para girar con errores que ocurran arriba y abajo del Set Point.

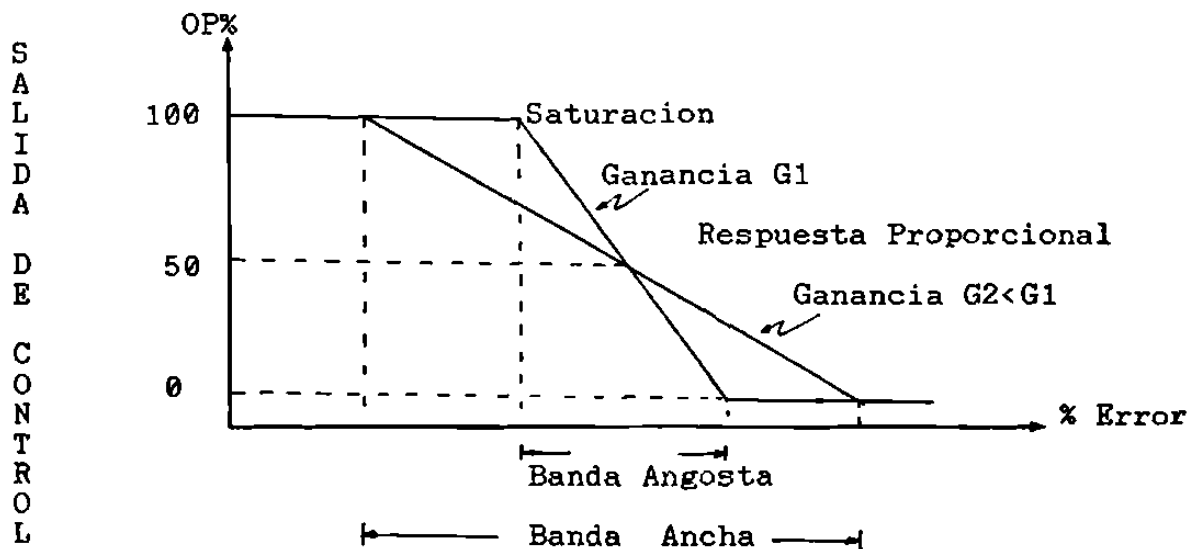


Fig. 2.2.3 La Banda Proporcional del Control depende de la ganancia en una relación inversa.

2.2.4 CONTROL INTEGRAL

Este modo presenta una extensión natural del principio de control flotante, produciendo cambio infinitesimal en la razón de salida del controlador, por cambio infinitesimal en el tiempo si el error permanece. En lugar de velocidad sencilla o aún multiples velocidades, nosotros tenemos un cambio continuo en velocidad de salida del controlador dependiendo del error. Este modo se conoce a menudo como Acción de Reajuste. Analíticamente, nosotros podemos escribir:

$$\frac{dOP}{dt} = K_i ER$$

Donde:

$$\frac{dOP}{dt} = \text{Razón de cambio de salida del controlador (\%/s)}.$$

$$K_i = \text{Constante que relaciona la razón de cambio al error (\%/s/\%)}$$

Las unidades de K_i estan en porcentaje de salida del controlador por segundo por porcentaje de error. En algunos casos la inversa de K_i llamada el Tiempo Integral $T_i = 1/K_i$, se usa para describir el Modo Integral, con unidades en segundos.

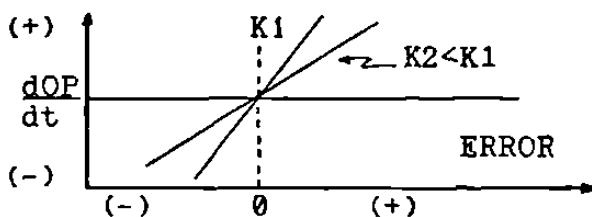
Si integramos podemos encontrar la aportación del modo integral a la salida del controlador en cualquier momento como:

$$OP(t) = K_i \int ER(t) dt + OP(0)$$

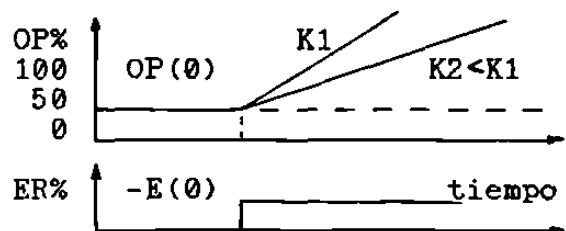
Donde $OP(0) =$ Salida del controlador en $t=0$.

Esta ecuación muestra que la salida real del controlador, $OP(t)$, depende de la historia del error de cuando la observación empezó en $t=0$.

Un valor grande de K_i significa que un error pequeño produce una razón grande de cambio de OP y viceversa. La Fig 2.2.4.1.a ilustra gráficamente la relación entre la razón de salida OP y el error ER para dos valores diferentes de K_i . La Fig 2.2.4.1.b, muestra como para un error fijo los valores diferentes de K_i producen valores diferentes de OP como una función del tiempo. Se vé que la razón mas rápida proporcionada por K_1 ocasiona una salida del controlador mayor en un tiempo particular despues de que el error se generó.



a) La razón de cambio de la salida depende del error.



b) Respuesta del modo integral a un error constante.

Fig. 2.2.4.1. Respuesta Teórica al modo de acción integral.

APLICACIONES.

La aplicación de este control puede entenderse usando la Fig 2.2.4.2 aquí un cambio de carga indujo que un error ocurriera en el tiempo $t(1)$. La posición adecuada de la válvula bajo la nueva carga para mantener el flujo constante, se muestra como una línea en la gráfica de la Fig 2.2.4.2.

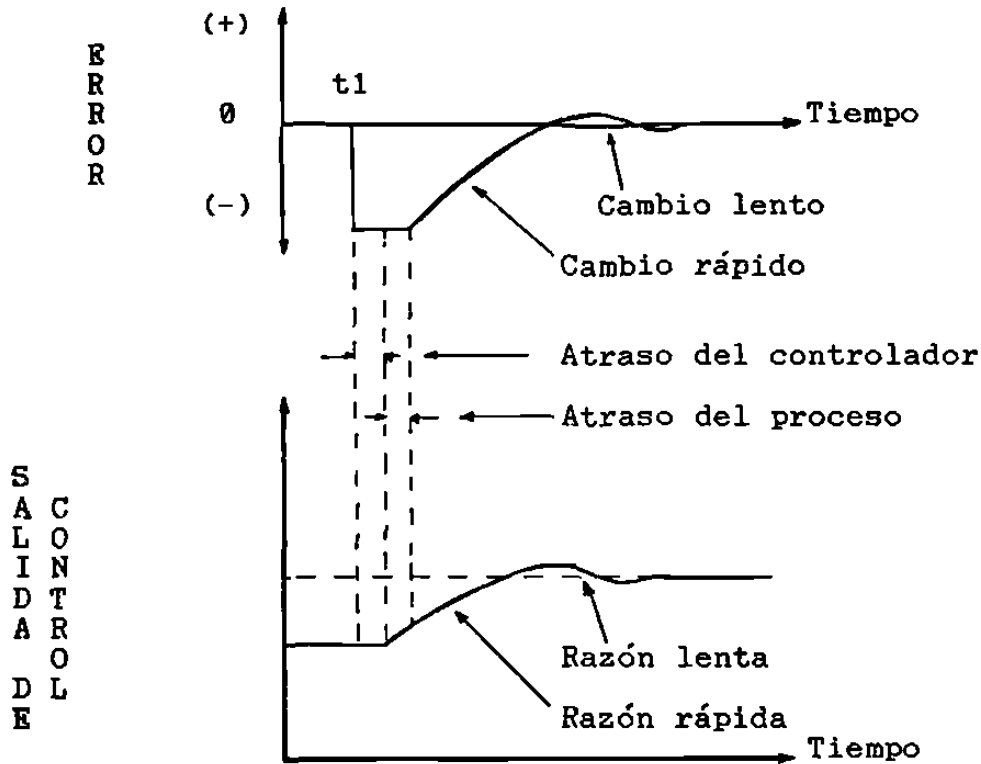


Fig. 2.2.4.2. Ilustración de la Salida Teórica de modo Integral VS el error. Se muestra el efecto del proceso y retrasos.

En el modo integral el valor de salida inicialmente empieza a cambiar muy rápidamente, cuando la válvula va abriendo, el error disminuye y la razón de abertura de la válvula también disminuye. El último efecto es que el sistema maneja el error a cero a una razón controlada. El efecto del proceso y el atraso de control se muestra como un simple retardo en el cambio de salida del controlador y en la reducción del error cuando la acción de control ocurre. Si los atrasos de proceso son demasiado largos, el error podría oscilar con respecto a cero y volverse cíclico. El Modo Integral no existe solo, complementa al Modo Proporcional, por lo que se aclara que la acción de control descrita es teórica y se da en la realidad combinandola con la acción proporcional, obteniendose de esta forma el control PI que se discutirá posteriormente.

2.2.5 CONTROL DERIVATIVO.

Este tipo de control proporciona la salida del controlador dependiente de la razón de cambio del error. Este modo también se conoce como Control de Razón, o Control Anticipatorio. Este modo como el Integral, no puede utilizarse sólo, debido a que requiere combinarse con la Acción Proporcional, además si el error fuera constante, éste modo por si sólo no presentaría salida.

La expresión analítica es:

$$OP(t) = K_d \frac{dER}{dt} + OP(0)$$

Donde: K_d = Constante de ganancia derivativa (%) (seg)/ (%)
 $(dER)/dt$ = Razón de cambio de error (%/seg)
 $OP(0)$ = Salida sin razón de error (%).

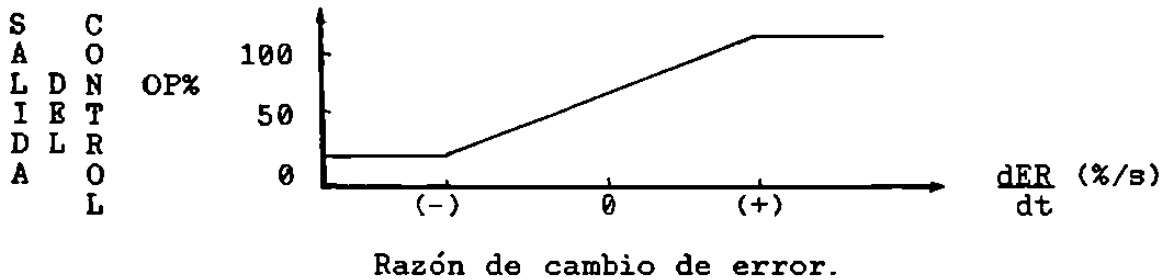


Fig 2.2.5.1 Acción de Control de modo Derivativo donde una salida del 50% ha sido considerada para un estado de cero Derivativo.

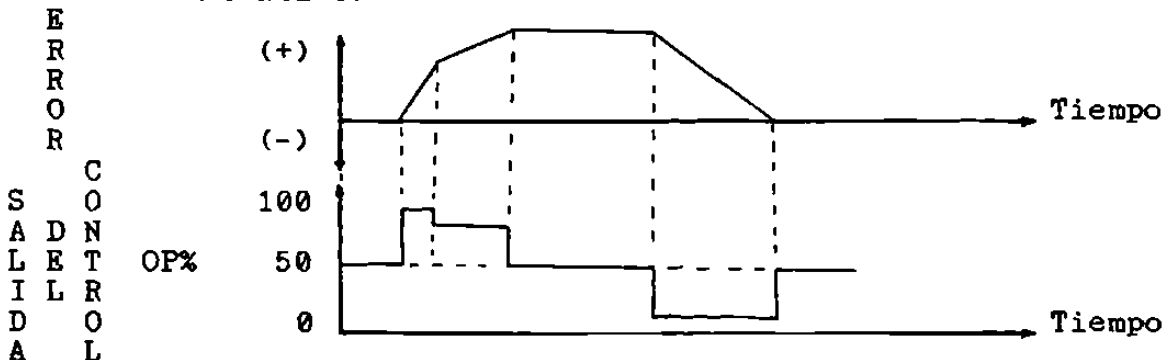


Fig 2.2.5.2. Acción de Control de modo Derivativo para señales de error diversas.

La constante de Ganancia Derivativa también se conoce como la Razón de Tiempo Derivativo y se expresa en min. o seg. La característica de éste dispositivo puede verse en la gráfica de la Fig 2.2.5.1 en la que se observa la salida del control para la razón de cambio de error. Esto muestra que para una razón dada de cambio de error, existe un valor único de salida del control.

La gráfica del error contra el tiempo y la respuesta del control muestra el comportamiento de este modo en la Fig 2.2.5.2. Notar que la salida del control depende de la razón a la cual éste error cambia y no del valor del error.

2.2.6 CONTROLADOR PROPORCIONAL.

Una característica importante del controlador de Modo Proporcional, es que produce un error residual o permanente en el punto de operación de la variable controlada cuando un cambio en carga ocurre. Este error se conoce como desajuste, y puede minimizarse seleccionando una constante k_p mas grande lo cual reduce la Banda Proporcional.

Para ver como se presenta el desajuste consideramos un sistema bajo carga nominal con el controlador al 50% y el error cero como se muestra en la Fig. 2.2.6. Si un error transitorio ocurre, el sistema responde cambiando la salida del controlador en correspondencia con el transitorio a efecto de regresarlo al error cero. Supongamos, sin embargo que un cambio de carga ocurre lo cual requiere un cambio permanente en la salida del controlador para producir el estado de error cero. Debido a la correspondencia que existe una a una entre la salida del controlador y el error es claro que una salida nueva del controlador para dar error cero nunca podría obtenerse. En lugar de ello el sistema produce un pequeño desajuste permanente al alcanzar una posición de compromiso de la salida del controlador bajo nuevas cargas.

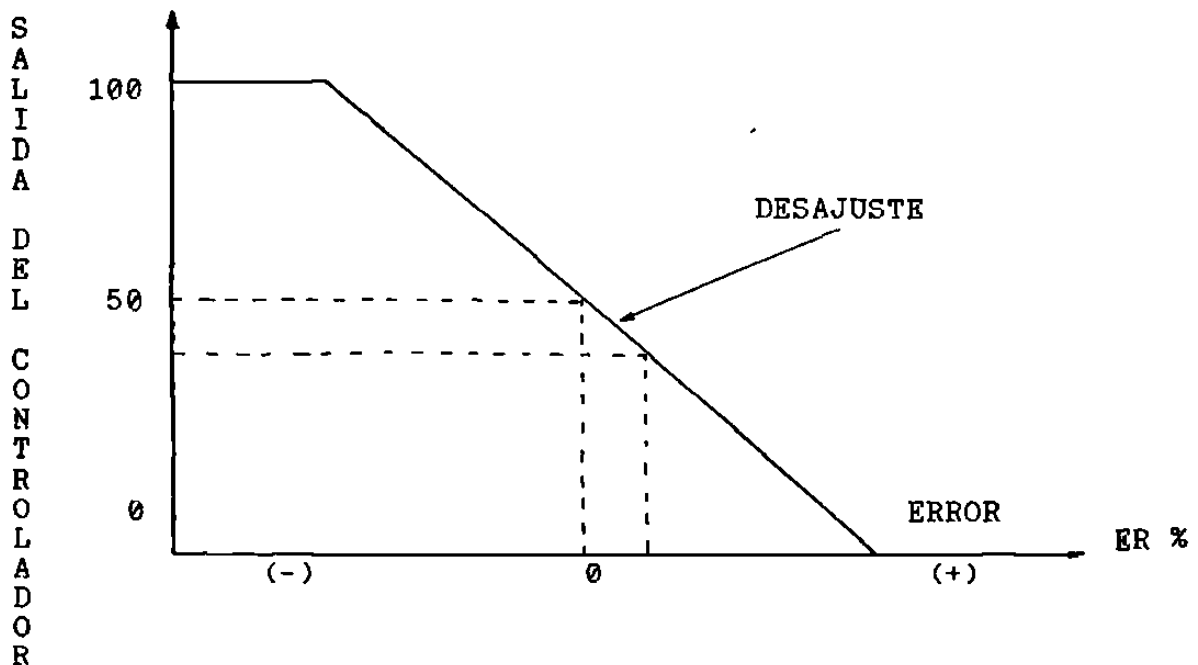


Fig. 2.2.6 Error por desajuste (OFF-SET).

El desajuste se presenta si un controlador proporcional requiere una salida nueva del controlador para dar seguimiento a un cambio de carga.

Los límites de error por desajuste limitan al controlador de modo proporcional a unos cuantos casos, particularmente aquellos donde un reajuste manual del punto de operación se puede dar para eliminarlo. El control Proporcional generalmente se usa en procesos donde cambios grandes de carga son indeseados o con moderación a procesos con pequeños retrasos del tiempo. Ya que si el retraso de tiempo de proceso es pequeño, la Banda Proporcional puede hacerse muy pequeña (k_p grande) lo cual reduce el error (OFF-SET).

Es muy común (en procesos complejos industriales) encontrar requerimientos de control que no satisfacen las normas de aplicación del controlador proporcional. Se ha encontrado la necesidad de combinar varios modos básicos, para ganar la ventaja de cada uno. En algunos casos, una ventaja adicional es que los modos combinados, tienden a eliminar algunas limitaciones que ellos individualmente poseen.

2.2.7 CONTROLADOR PROPORCIONAL INTEGRAL (PI).

Este controlador resulta de la combinación del modo Proporcional y el Integral. La expresión Analítica para éste control de proceso se encuentra de la combinación aditiva del modo Proporcional y el Integral.

$$OP(t) = K_p ER(t) + K_p K_i \int ER(t) dt + OP(0)$$

Donde: Todos los terminos ya se han definido previamente.

La ventaja principal de este modo de control compuesto, es que se dispone de la correspondencia uno a uno del modo Proporcional, y el modo Integral elimina el desajuste inherente. (OFF-SET).

Debe notarse que la ganancia Proporcional, por diseño, también cambia la ganancia neta de integración, pero la ganancia de integración K_i , puede ajustarse independientemente. Recordemos que el desajuste del Modo Proporcional, ocurrió cuando se presentó un cambio de carga que requería una nueva salida nominal del controlador y no podía ser proporcionada excepto para un error fijo del punto de ajuste. En el modo presente, la función Integral proporciona la salida nueva requerida, y por consiguiente, permite que el error sea cero después de un cambio de carga. La característica Integral efectivamente proporciona el punto de reajuste de operación cuando un cambio de carga ocurre. Esto puede verse en la Fig. 2.2.7.

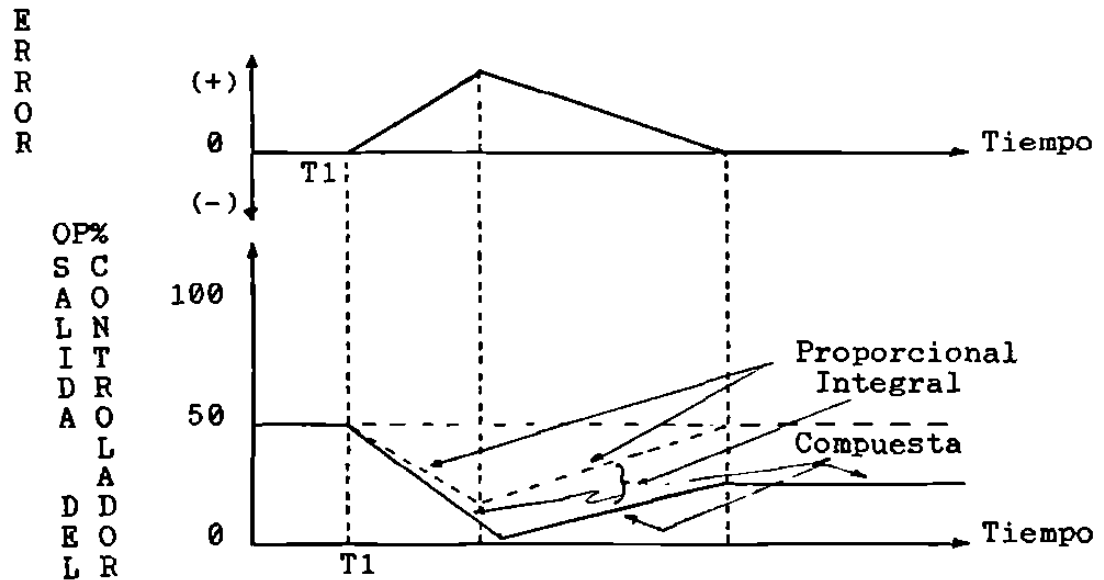


Fig. 2.2.7 Acción Proporcional-Integral que muestra la contribución de reajuste del modo Integral (se considera K_p negativa).

En la gráfica de la Fig. 2.2.7 en el tiempo t_1 ocurrió un cambio de carga, lo cual produjo el error mostrado. Para acomodarnos a la nueva condición de carga se requiere una salida nueva del controlador. Nosotros vemos que la salida del controlador se proporciona a través de una suma de acciones Proporcional mas Integral, lo cual finalmente lleva el error a cero. Se debe notar que la parte proporcional es obviamente una imagen del error.

2.2.8 CONTROLADOR PROPORCIONAL-DERIVATIVO (PD).

Una segunda combinación de modos de control que encuentra muchas aplicaciones industriales, involucra la serie (cascada) del uso de los Modos Proporcional y Derivativo. La expresión analítica para esta combinación, es la siguiente:

$$OP(t) = K_p ER(t) + K_p K_d \frac{dER}{dt} + OP(0)$$

Es claro que en éste sistema no puede eliminarse el desajuste corregido por el controlador Proporcional. Puede sin embargo manejar procesos rápidos con cambios de carga si el error por desajuste (OFF-SET) de estos cambios de carga es aceptable. Un ejemplo de la operación de este modo para un cambio de carga hipotético, se muestra en la Fig.2.2.8. Nótese el efecto de la acción derivativa al mover la salida del controlador en relación a la razón de cambio de error.

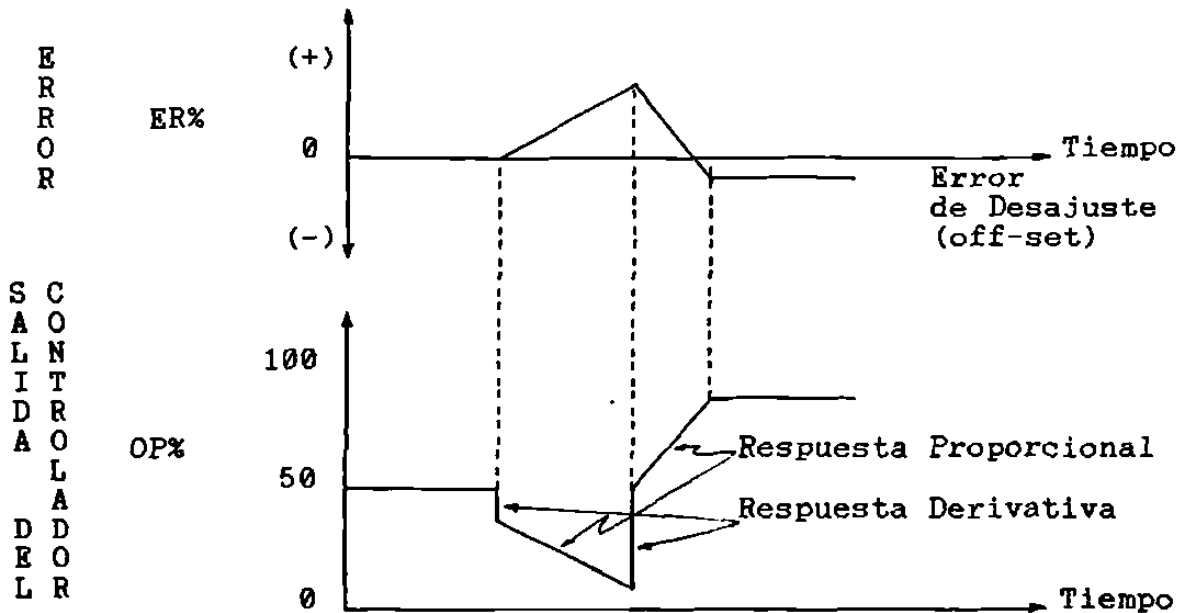


Fig. 2.2.8 Acción Proporcional-Derivativa que muestra el Error de desajuste (OFF-SET). (K_p negativa).

2.2.9 CONTROLADOR PROPORCIONAL INTEGRAL Y DERIVATIVO (PID).

Uno de los controladores mas poderosos, pero complejos, es aquel que combina el Modo Proporcional Integral y Derivativo. Este sistema puede usarse virtualmente para cualquier condicion de proceso, la expresi3n analitica es:

$$OP(t) = K_p ER(t) + K_p K_i \int ER dt + K_p K_d \frac{dER}{dt} + OP(0)$$

Este modo elimina el OFF-SET con el modo Proporcional y limita la tendencia hacia la oscilacion. En la Fig. 2.2.9.1 se muestra la respuesta del sistema de tres Modos a un error dado.

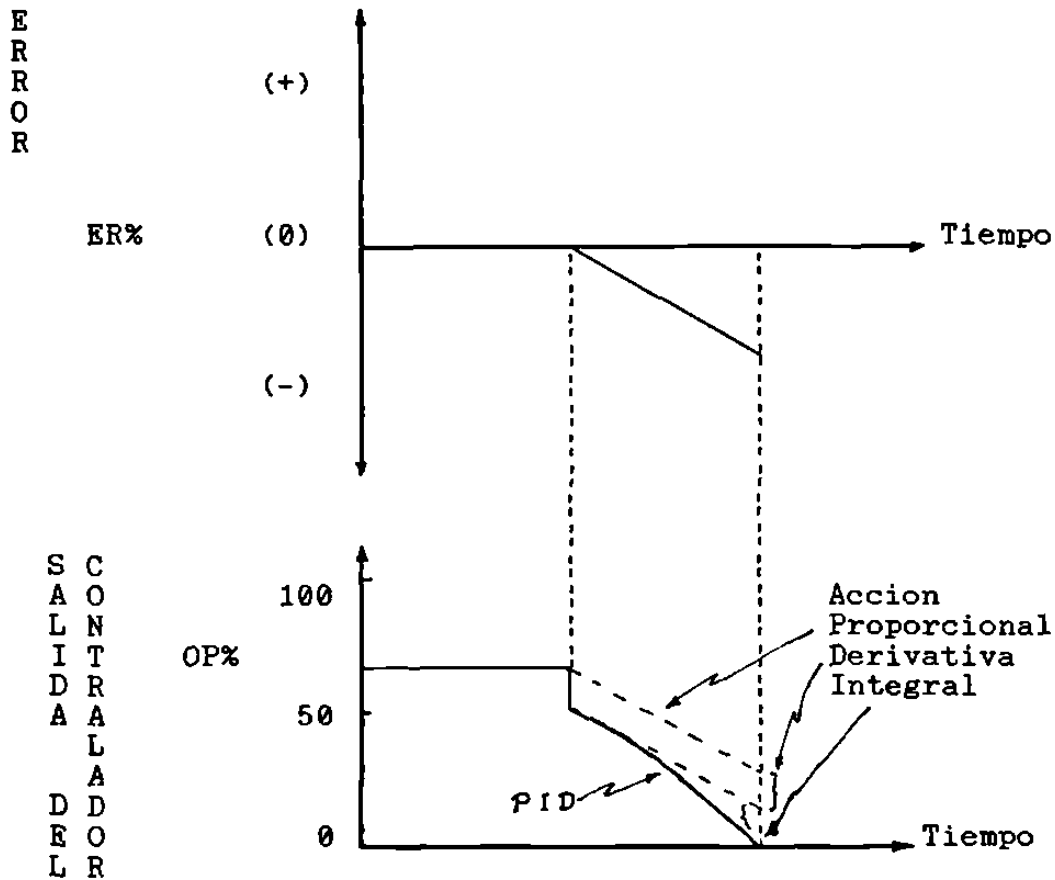


Fig. 2.2.9.1 Acción del Controlador de tres modos. (Acción Proporcional Integral y Derivativa).

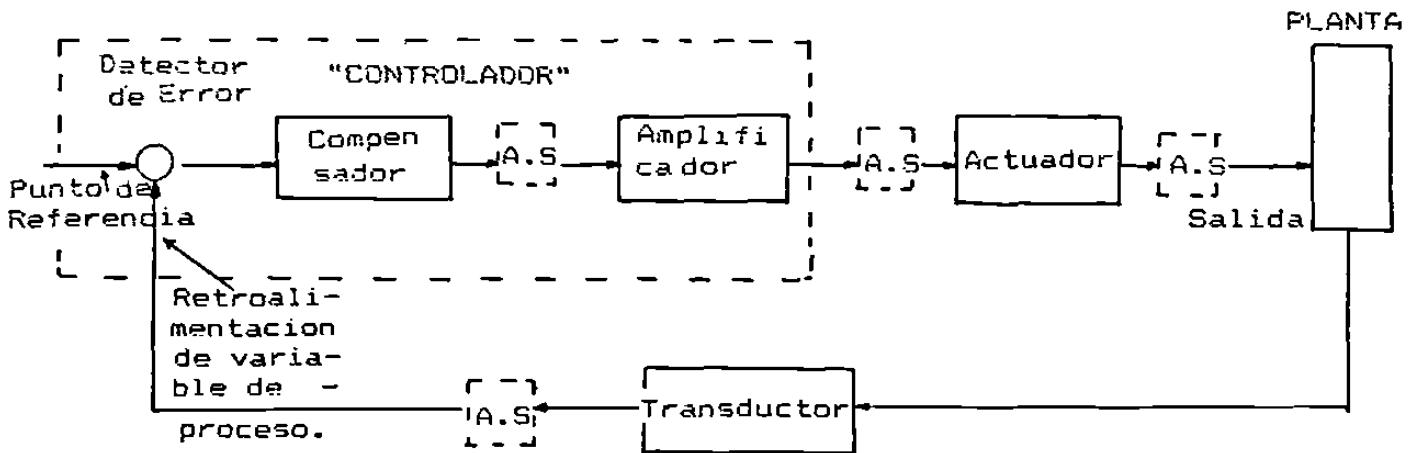


Fig 2.2.9.2 Lazo Convencional de Control Analógico.

El controlador analógico, nos proporciona un control automático del lazo, pero requiere intervención del operador para proporcionar decisiones que afectan al control, como fijar los puntos de referencia, ajustar límites de operación, etc.

Ahora bien, si la acción de control la realiza una persona en forma manual, se tiene una capacidad de decisión limitada, falta de consistencia, y lentitud de respuesta.

2.3 CONTROL DIGITAL.

La mayor fuerza del control digital estriba en que el proceso se puede considerar como un conjunto entero, más que una variedad de partes independientes. Con este panorama total el control computarizado es capaz de operar el proceso en su punto óptimo, otras ventajas son una mejor utilización del equipo, un cambio más rápido de parámetros, cuando se requiere modificar la operación, arranques y paros adecuados y mantenimiento de registros para finalidades de estadística.

Con las computadoras prácticamente se puede programar cualquier estrategia de control, y la mayoría de las modificaciones de la estrategia son cambios sencillos del programa.

El Control Digital inició utilizando la computadora para la adquisición de Datos del Proceso para fines estadísticos y de recomendaciones de control para el operador. Actualmente podría clasificarse en tres Grupos: Control Digital Directo, Control Supervisorio y Control Jerárquico.

2.3.1 ADQUISICION DE DATOS Y REGISTRO.

La adquisición de datos (Data logger) representó una de las primeras aplicaciones de las computadoras digitales en tiempo real para plantas industriales. Las funciones primarias de estos sistemas son monitoreo de estados, revisar alarmas y registro de datos.

El CPU constantemente barre un conjunto de entradas analógicas, las cuales describen el estado de ciertas variables en la planta tales como flujo, temperatura, posición, peso, presión, etc., la máquina también revisa el estado de las entradas digitales contra las lecturas previas, constantemente buscando cambios de estado. La alarma se presenta cuando la entrada analógica excede el conjunto de fronteras para ese punto particular, o cuando en una entrada digital ocurrió un cambio de estado indeseado. Normalmente al presentarse una alarma la computadora imprime un mensaje, enciende una luz, una alarma audible o ambas.

El registro de datos normalmente se da en unidades de ingeniería y el CPU puede manejar la información y hacer cálculos con todos los datos para dar una figura de merito y que el operador pueda obtener información rápida para ajustar el proceso.

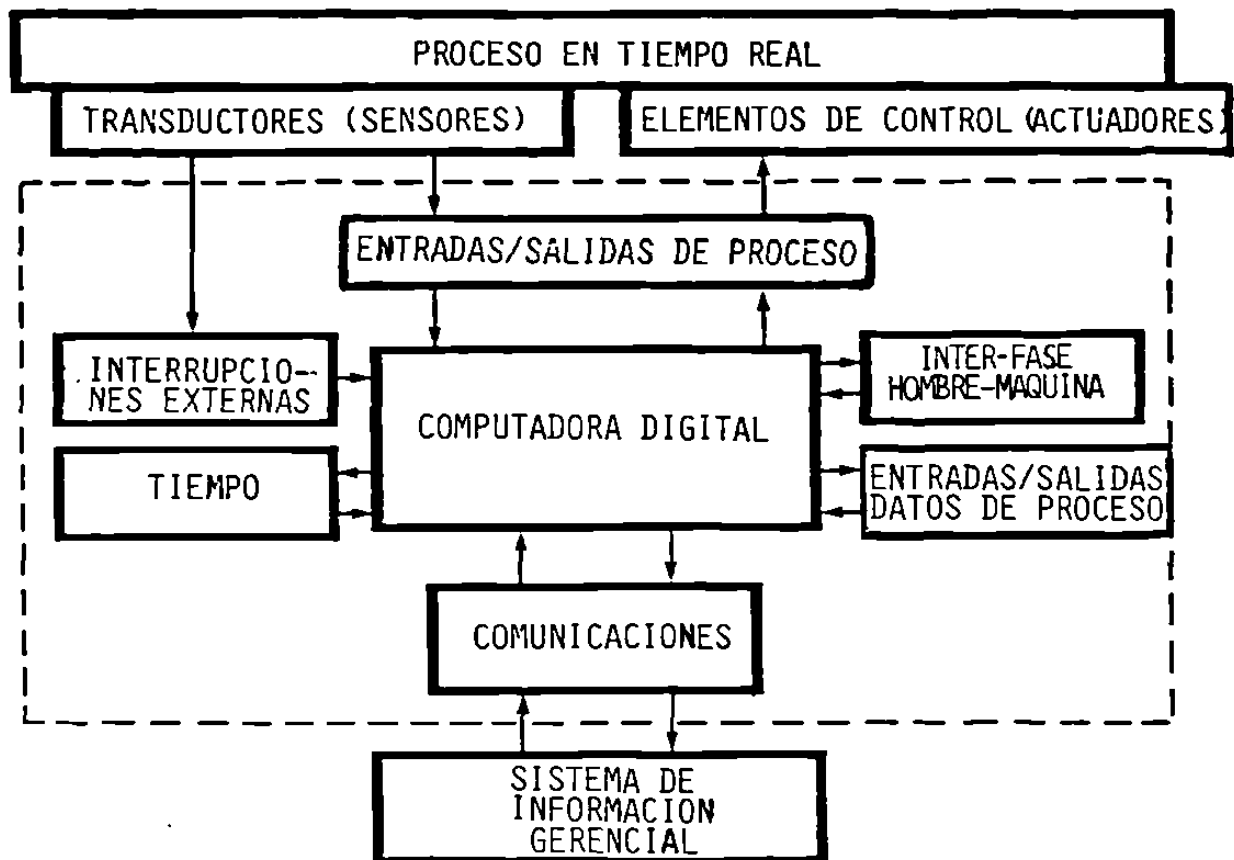


Fig. 2.3.1 Sistemas de Control y Adquisición de Datos.

2.3.2 CONTROL DIGITAL DIRECTO.

En este tipo de control, la computadora calcula los valores de las variables de salida (posición de válvulas, pistones, etc.) directamente de sus cálculos de error y otras mediciones de proceso. Las decisiones de la computadora se aplican directamente al proceso y de aquí su nombre. Ver Fig. 2.3.2.1.

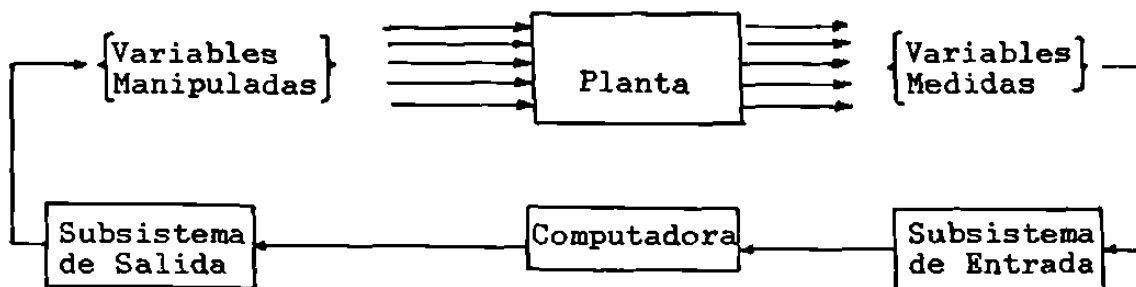


Fig. 2.3.2.1 Control Digital Directo.

En éstos sistemas se sustituyen los controladores individuales por la computadora, que por algoritmos de control calcula los valores de las variables manipuladas.

La computadora debe ser capaz de interpretar adecuadamente las señales de entrada y asegurar transiciones suaves de manual a automático.

Al principio se pensó en instalar éste sistema buscando ahorros económicos en la compra de equipos de Control, hoy en día lo que motiva estas instalaciones es conseguir estrategias de control más finas y exactas que las que se obtendrían con equipo analógico. Esto resulta en un control más preciso de los Procesos y más eficiente.

El inconveniente es que si falla la computadora se pierde el control de todo el proceso y aunque esto no es frecuente, representa para la mayoría de los procesos un riesgo muy elevado. Requiere pensar en controladores ó sistemas de soporte.

La Fig. 2.3.2.2 muestra un lazo de control básico de los varios que maneja la computadora que se utiliza en Sistemas de Control Digital Directo.

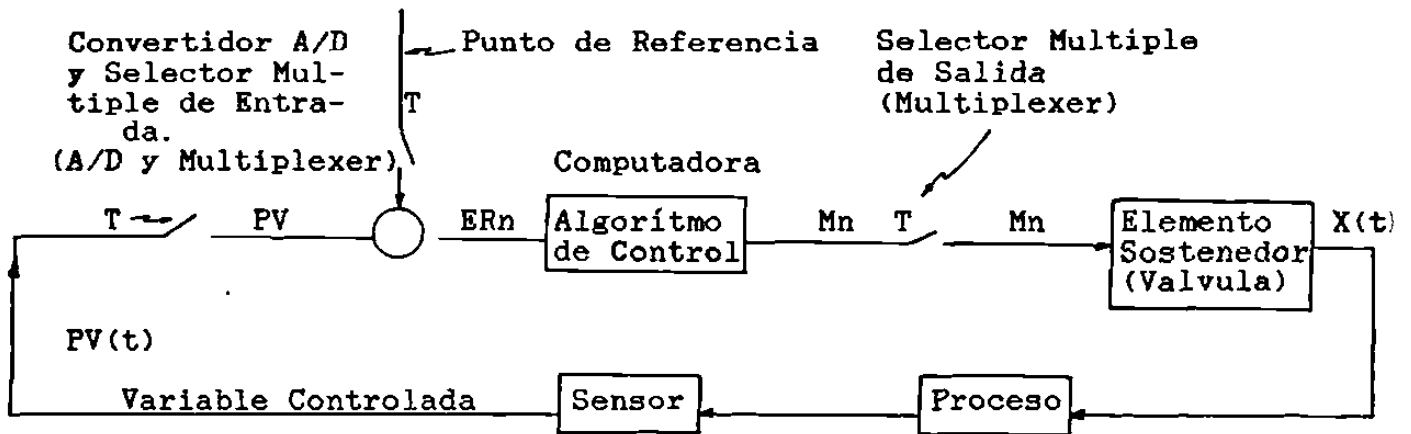


Fig. 2.3.2.2 Lazo Típico de Control Digital.

La función básica del selector múltiple de entrada es obtener valores de una función a ciertos intervalos, en una operación conocida como muestreo, normalmente a intervalos de tiempo regulares T . La salida del sensor es una función continua del tiempo $PV(t)$, la salida del selector múltiple de entrada es un número secuencial PV_n , $PV_1 = PV(T)$, $PV_2 = PV(2T)$, etc.

La computadora compara la salida del selector múltiple de entrada con un valor deseado o Punto de Referencia SP (de alguna localidad de almacenamiento dentro de la computadora misma). La diferencia de estos dos es el error.

$$ER = SP_n - PV_n$$

Utilizando un algoritmo adecuado de control, la computadora calcula un valor para la variable manipulada M_n a partir del error secuencial ER_n . El selector múltiple de salida transfiere el valor secuencial M_n al elemento sostenedor, cuya función es construir una señal continua $X(t)$ que llega a ser la entrada al proceso. Como el Proceso es típicamente continuo, no puede aceptar valores de M_n directamente. El sostenedor lógico normalmente usado es el de orden cero, el cual mantiene el último valor de salida durante el siguiente intervalo de tiempo.

$$x(t) = M_i \quad i \leq t < (i+1)T$$

Los sistemas de control digital directo, tendieron a ser

demasiado grandes, complejos, difíciles de programar y correr mantenían todo el control en un sólo dispositivo, tener sistemas duales (sistemas iguales de soporte) los hacía mas aceptables, pero aún así el número de instalaciones no fue muy grande.

Recientemente las microcomputadoras han permitido la implementación de sistemas mas pequeños que el usuario instala en cualquier parte del proceso, en lugar de tener un complejo sistema único.

Las industrias que utilizan el CDD no son sólo los procesos continuos tales como refinerías, sino también procesos industriales semicontinuos que involucran el arranque de maquinarias y procesos, los cuales entonces trabajan por horas y finalmente paran. La computadora puede ayudar en esta transición con mensajes y monitoreo de las variables.

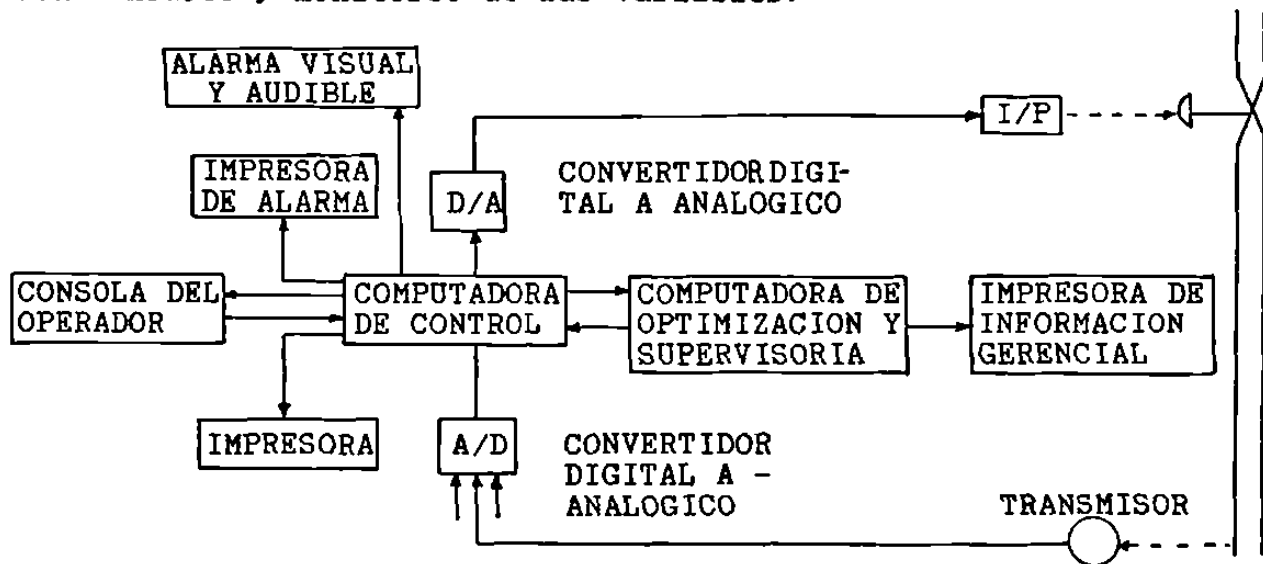


Fig. 2.3.3 Lazo de Control Configurado en Computadora CDD.

CONTROL DIGITAL DIRECTO.

- * EL SISTEMA CALCULA NUEVAS POSICIONES DE VALVULAS.
- * PUEDE IMPLEMENTAR TECNICAS SOFISTICADAS DE CONTROL.
- * ELIMINA LA NECESIDAD DE CONTROLADORES ANALOGICOS.
- * DEBE TENER ALGUN EQUIPO DE SOPORTE.
- * MANEJA MULTITUD DE LAZOS.
- * SE PUEDE DISEÑAR EL PROGRAMA PARA QUE LA ESTRATEGIA DE CONTROL SE AUTO SINTONICE.

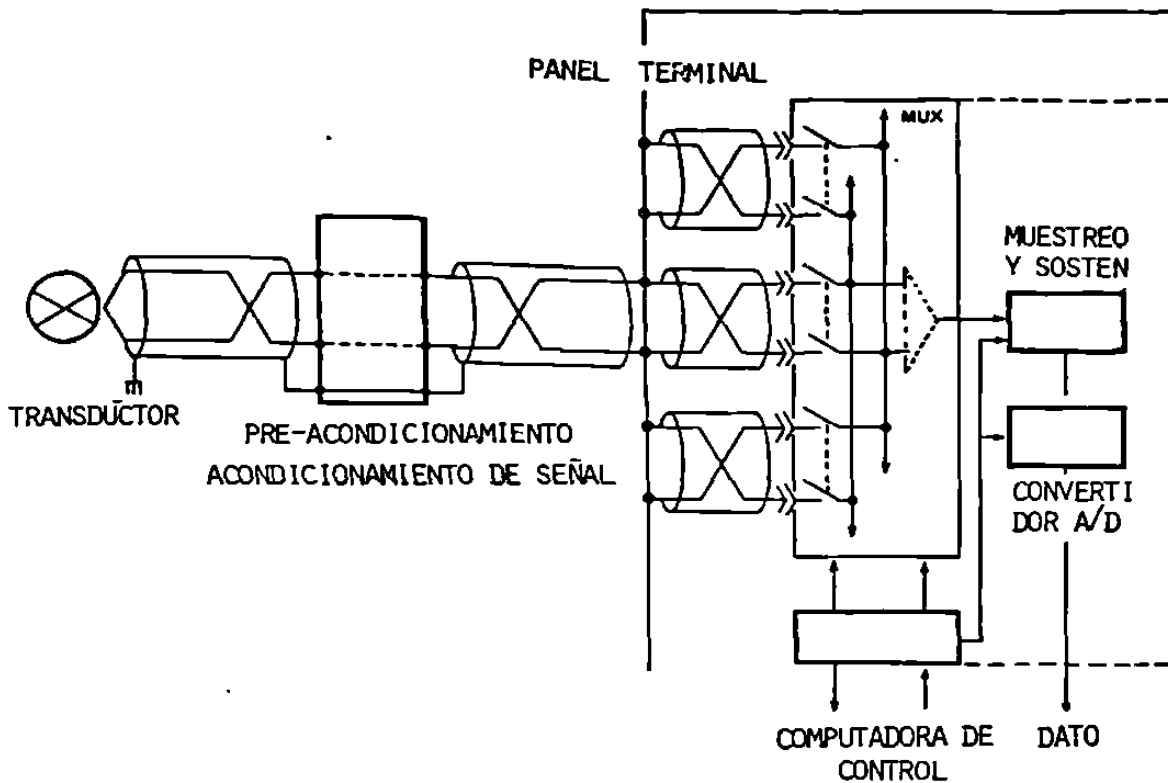


Fig. 2.3.4 Trayectoria de Entrada Analógica.

TRAYECTORIA DE ENTRADA.

Es aquella que una señal analógica típica sigue de su punto de origen el proceso, hasta que finalmente se presenta en la computadora en forma digital como se muestra en la Fig.2.3.4. Funcionalmente, las etapas en esta secuencia serán de alguna forma similares ya sea que las señales sean voltaje análogo o corriente, o un tren de pulsos, tal como aquel producido por un tacómetro digital. Los elementos en esta trayectoria pueden entonces categorizarse en:

- 1) **Transductores:** Generan una señal de salida, por ejemplo, presión, corriente, voltaje, o razón de pulsos, en respuesta a una variable de procesos tal como flujo, temperatura, nivel ó velocidad.

- 2) Transmisión: Movimiento de señales primarias de transductores a través de distancias. El medio portador es más comunmente, corriente eléctrica, voltaje, o tren de pulsos, señales de radio de frecuencia modulada, etc. Esta transferencia debe efectuarse con un mínimo de pérdida de señal o distorsión.
- 3) Preacondicionamiento y Acondicionamiento: Quita ruido - indeseado por medio de filtraje, ajusta los niveles de señal para tener compatibilidad con la computadora, puede involucrar conversión analógica a digital, conteo de pulsos, ú otros dispositivos de entrada al sistema.
El cable torcido mostrado en la Fig.2.3.4 tiene como objeto evitar ruido e interferencias.
- 4) Selección Multiple: Permite que muchas entradas del proceso puedan pasarse a través de un solo convertidor analógico a digital. La computadora normalmente por medio de programas, ordena la selección de todas las entradas. Se tienen selectores múltiples de alto y bajo nivel de tipo FET limitados a 10 Volts y relevación de bajo nivel (REED) limitado a 200 Volts.
- 5) Amplificación: Proporciona un incremento o disminución en el nivel de voltaje de entrada para balancear el rango del convertidor analógico a digital. La ganancia del amplificador está bajo control del programa.
- 6) Muestreadores y Sostenedores: Reciben señales discretas y mantienen el valor por un tiempo determinado, hasta que llegue la siguiente señal de muestreo. Reducen el error en la medición, reduciendo la abertura efectiva del convertidor analógico a digital.
- 7) Convertidor Analógico a Digital: Convierte señales análogas (voltajes) a señales compatibles con la computadora, datos binarios paralelos. Se utiliza ampliamente la técnica de aproximaciones sucesivas.

2.3.3 CONTROL SUPERVISORIO.

En este tipo de sistemas la computadora determina la estrategia óptima de operación, pero el sistema de control analógico todavía implementa las acciones. Entonces en muchos casos la computadora de control simplemente proporciona las señales de referencia para los lazos de control analógico, Fig.2.3.3.1. El sistema computarizado no reemplaza al controlador análogo.

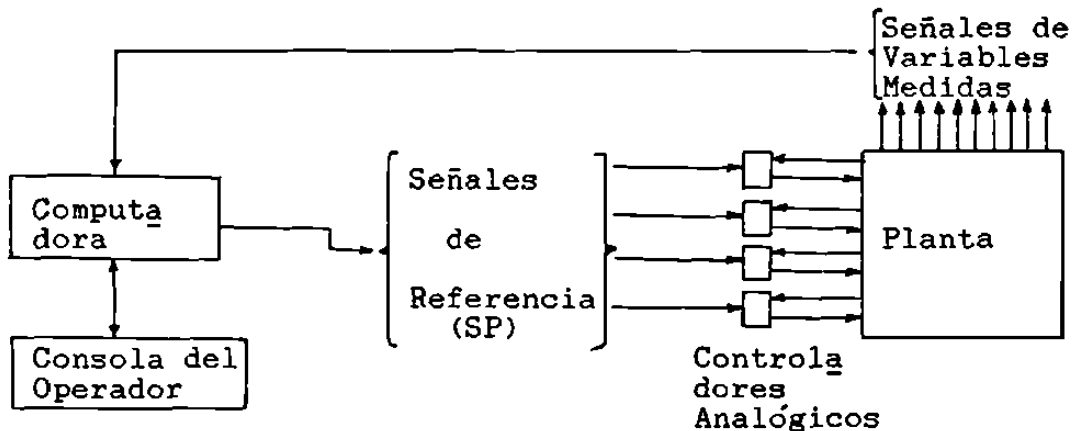


Fig 2.3.3.1 Sistema de Control Supervisorio.

En este sistema el problema de soporte no es crítico, ya que en caso de falla de la computadora los puntos de referencia simplemente permanecen en su valor anterior. Esto presenta una ventaja sobre el Control Digital Directo.

La justificación económica de este sistema se basa en mejorar la operación del proceso para justificar la inversión de la computadora. Por ejemplo en Plantas grandes, donde cualquier mejora genera un enorme retorno, en Plantas muy complejas donde la computadora es ideal para satisfacer el modelo matemático, en Plantas con disturbios frecuentes en las que los objetivos de operación deben ser modificados por otros, un trabajo para el cual la atención frecuente de la computadora será muy superior a la de los operadores. El obstáculo principal a la instalación de sistemas supervisorios es que no se tienen los modelos matemáticos de las Plantas con anticipación, y el esfuerzo para obtener este es considerable.

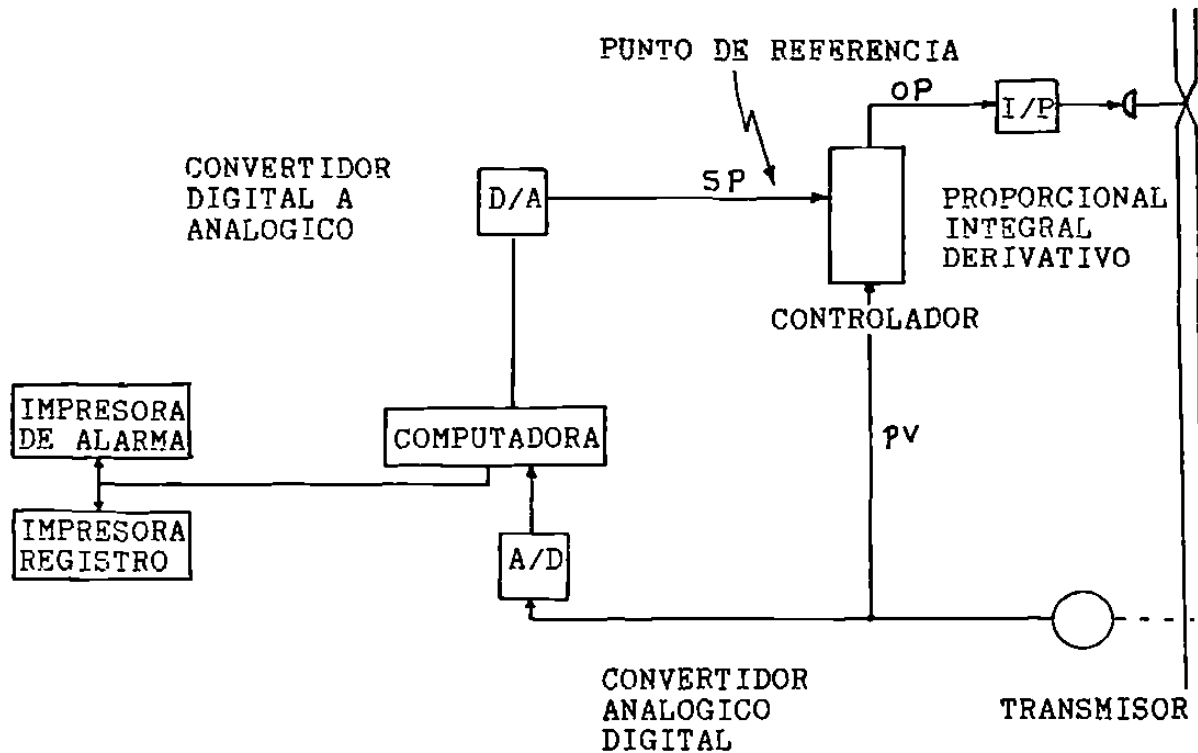


Fig. 2.3.3.2 Lazo de Control Configurado en Control Supervisorio.

- * EL SISTEMA AUTOMATICAMENTE SINTONIZA LOS PUNTOS DE REFERENCIA DE LOS CONTROLADORES ANALOGICOS.
- * PUEDE IMPLEMENTAR TECNICAS DE CONTROL SOFISTICADO.
- * REQUIERE MENOS INVERSION DE EQUIPO DE SOPORTE.

La tendencia actual en la industria está encaminada al Control Supervisorio, esto es los controladores analógicos ó computadoras de control digital directo son las que manejan directamente los actuadores finales de control en la Planta y la Computadora Principal se encarga de las estrategias de control y de mandar los puntos de referencia a los Controladores (Analógicos ó Digitales).

Pero para implementar un esquema de control supervisorio se requiere:

- 1) Desarrollar un modelo de Planta.
- 2) Optimizar las condiciones de Operacion.

Los sistemas de control supervisorio estan basados en modelos. El costo de desarrollo del modelo es generalmente una porción substancial del costo total del proyecto, y es difícil de estimarlo con anticipación. La mayoría de los controladores supervisorios contienen al menos uno de cada uno de los siguientes tipos de modelos.

MODELOS

- MODELO FISICO.

Consiste en la relación matemática entre las diferentes variables de operación, considera varios mecanismos de transferencia y relaciones cinéticas entre las variables de operación. Se deben considerar varios factores, por ejemplo si las relaciones serán dinámicas o de estado físico. Debe darse una aproximación analítica o empírica?, Cual es el objetivo del modelo?. Este modelo es complicado y requiere un amplio conocimiento no solo de las matemáticas involucradas sino fundamentalmente del Proceso mismo.

- MODELO DE PROCEDIMIENTO.

En muchos casos estos modelos se utilizan para instruir a la Computadora a duplicar las mismas funciones que de otra forma serían ejecutadas por el operador, esto mejora en mucho la consistencia de las operaciones, además éste modelo mejora las operaciones con seguridad, ya que la computadora puede ser instruida si encuentra una situación peligrosa para abortar funciones normales y seguir algunas instrucciones preasignadas de un modelo de procedimiento para asegurar que la Planta regrese a una región segura de operación, de tal manera que el personal y la Fábrica misma no sufran un accidente.

En el área de modelo de procedimiento, una buena relación entre el personal de operación de la Planta y el personal de Control puede dar muy buenos resultados.

- MODELO ECONOMICO.

Relaciona matemáticamente factores económicos más que variables del Proceso. Su objetivo básico es obtener máximas utilidades o minimizar los costos. Implementar éstos modelos resulta bastante complicado ya que muchos Procesos operan dentro de grandes complejos, y lo que para una Planta particular puede ser lo mejor, puede no serlo para la corporación completa. En algunos casos la producción está limitada por la capacidad de la planta, en otros por la situación del mercado. Las limitaciones del sistema deben ser reconocidas lo más temprano posible en el desarrollo del modelo, para simplificarlo y obtener resultados positivos, en tiempo, esfuerzo y exactitud.

2.3.4 CONCEPTO DE JERARQUIA DE COMPUTADORAS.

Este concepto aparece cuando en un sistema supervisorio la computadora principal se comunica con otras computadoras y estas sucesivamente con otras, hasta que en el ultimo escalafón se encuentran computadoras de control digital directo controlando los lazos de las Plantas.

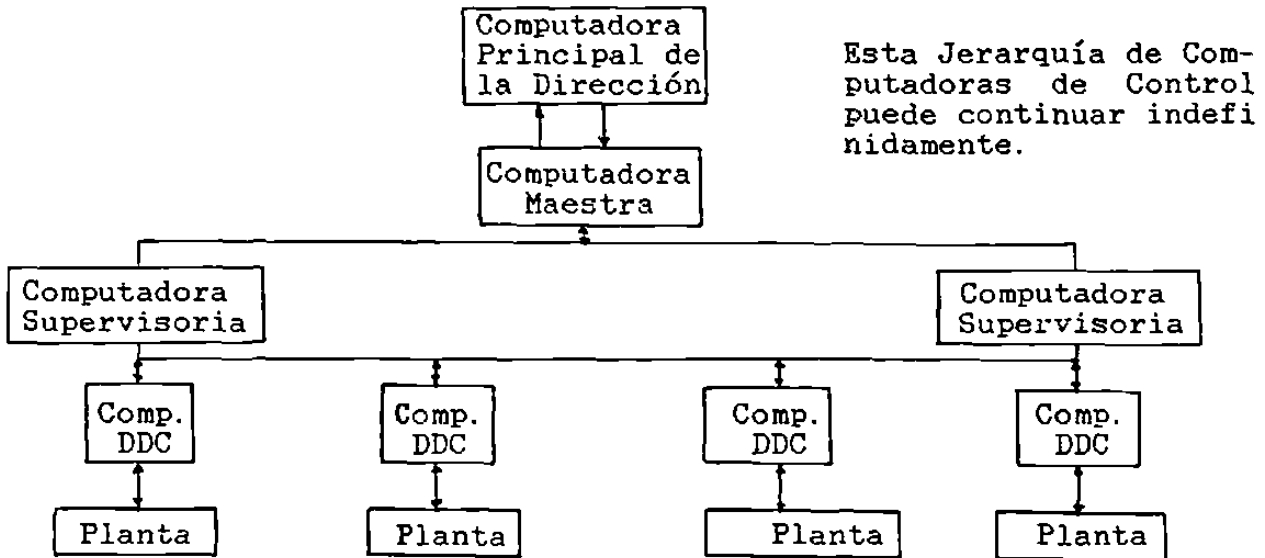


Fig. 2.3.4 Sistema de Control Jerárquico.

Este sistema es más atractivo porque:

- 1) La comunicación entre dos computadoras digitales es muy superior a la comunicación entre computadora y controladores analógicos.
- 2) El problema de soporte puede resolverse si la computadora supervisoría toma el control en caso de falla de la computadora de Control Digital Directo, o en caso de falla de las computadoras de mayor nivel, estas se encuentran respaldadas adecuadamente.

En los últimos sistemas más avanzados la computadora es responsable de coordinar un complejo entero de varias Plantas. En la cima de la escalera, la computadora es una parte importante del sistema de información para la dirección.

CAPITULO 3.- TRANSDUCTORES.

3.1 MECANICOS PARA MEDICION DE FLUJO.	35
3.1.1 Principios de operaci3n.	35
3.1.2 Tubo Venturi.	53
3.1.3 Placa de Orificio.	55
3.2 TERMICOS	59
3.2.1 Termopares.	59
3.2.2 Termometros de Resistencia (RTD).	66
3.2.3 Termistores.	70

3.- TRANSDUCTORES

3.1 MECANICOS PARA MEDICION DE FLUJO TIPO DE ORIFICIO.

Los dispositivos primarios de orificio para medición de flujo entre los que destacan los tubos Venturis y las placas de orificio entre otros, producen una señal con -- una relación definida al flujo del fluido de acuerdo con leyes físicas conocidas que relacionan la interacción del fluido a la presencia del dispositivo primario.

3.1.1 PRINCIPIOS DE OPERACION.

Las ecuaciones de razón de flujo para los medidores de orificio se desarrollaron de consideraciones teóricas modificadas por factores de corrección basados en evidencia empírica y adicionalmente se alteraron basados en consideraciones geométricas.

ECUACION PARA LIQUIDO.

La Ec. Dinámica para flujo de fluidos incompresibles en una dimensión se deriva de aplicar la 2da. Ley de Newton. La suma de las tres fuerzas en la dirección del flujo se iguala a la masa del elemento por su aceleración. Las fuerzas externas que actúan sobre las partículas del fluido en la dirección del flujo son:

- 1.- Fuerza producida por la acción de la presión estática.
- 2.- Fuerza debida al peso de las partículas.
- 3.- Esfuerzo de corte por viscosidad que actúa en las partículas.

Además la energía a lo largo de la corriente del fluido incompresible , no viscoso permanece constante.

La Figura 3.1.1 muestra la aplicación de la Ec. de Bernoulli a una corriente convergente en un tubo. La densidad es constante en todas las secciones, la velocidad es uniforme a través de cada sección, y la suma de la energía de -- presión, energía cinética y la energía potencial es constante.

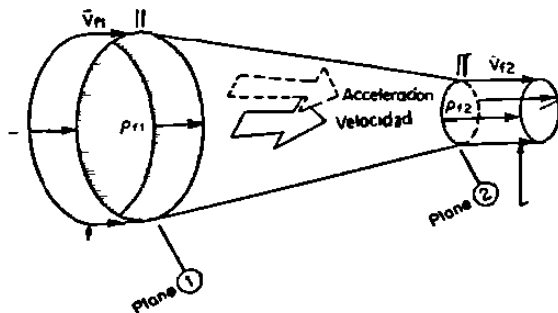


Fig.3.1.1 Secciones de un Venturi.

Si medimos la presión en estas dos posiciones la presión estática en el plano de mayor Area(1) sería mayor que la -

presión en el plano 2 (menor área). Considerando el centro de los planos 1 y 2 en un eje horizontal para que la altura promedio sea constante y se compense el efecto de peso por la acción de la fuerza de gravedad y considerando la densidad del fluido constante, la Ec. de Bernoulli se reduce a:

$$(P_{f1} - P_{f2}) / \rho_f = (V_{f2}^2 - V_{f1}^2) / 2gc \quad (\text{Ec. 3.1.1})$$

Donde :

- P_{f1} = Presión absoluta en la toma Plano 1
a condiciones de Flujo Kilo Pascals (kPa)
- P_{f2} = Presión absoluta en la toma Plano 2
a condiciones de flujo Kilo Pascals (kPa)
- ρ_f = Densidad a condiciones de flujo
Kilogramo/metro cubico (kg/m³)
- V_{f2} = Velocidad de flujo en la toma del Plano 2
metros/segundos (m/s)
- V_{f1} = Velocidad de flujo en la toma del Plano 1
metros/segundos (m/s)
- gc = Constante de conversión dimensional=32.17405
kg.m/(N.s²)

Mediante manipulación matemática de esta Ec. se puede llegar a:

$$q_{mcs \text{ teorico}} = 3.512407 \times 10^{-5} \left(\frac{d^2}{\sqrt{1 - (d/D)^4}} \right) \sqrt{\Delta P \rho_f} \quad (\text{Ec. 3.1.2})$$

Donde:

- q_{mcs teorico} = Flujo teórico en metros cubicos/seg.
- ΔP = Presión Diferencial en Kilopascals (Kpa).
- d = Diámetro interior de la restricción - en mm.
- D = Diámetro interior de la tubería en mm.

ECUACION PARA GAS O VAPOR.

Para flujos de Gas o Vapor, la densidad de flujo no es constante entre los planos 1 y 2. Cuando la presión de gas disminuye para acomodar el incremento de energía cinética, la densidad disminuye, y la consideración de densidad constante ya no se aplica. Sólo para presiones diferenciales muy pequeñas se podrían aplicar con alguna exactitud las Ecs. 3.1.1 y 3.1.2. Con objeto de corregirlas se desarrolló un factor de expansión de gas de las Ecs. de Flujo termodinámicas, la cual expresa el balance de energía entre los planos 1 y 2, para un proceso adiabático, sin trabajo desarrollado ni diferencia de elevación, la ecuación para

gas se reduce a:

$$q_{\text{teorico}}(\text{mcs}) = 3.512497 \times 10^{-5} \frac{\gamma_1 d^2}{\sqrt{1 - (d/D)^4}} \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho_{f1}}}$$

(Ec. 3.1.3)

γ_1 = Factor de expansión adiabática, depende de la razón de diámetros, el exponente isoentropico y la razón de presiones medidas corriente abajo y corriente arriba.

De esta forma la Ec. de energía para flujo compresible (3.1.3) quedó similar a la Ec. de flujo másico (3.1.2) con la única diferencia del factor adicional γ_1 . La ecuación requiere determinar la densidad corriente arriba, por lo tanto la presión, temperatura y densidad se deben determinar también.

CORRECCIONES A LAS ECUACIONES.

Las ecuaciones de flujo teórico calculan la razón de flujo verdadero sólo cuando todas las consideraciones usadas para desarrollarlas son válidas. Esto es rara vez el caso, y el flujo verdadero es casi siempre menor que el valor teórico calculado. Que tan cerca se está del flujo verdadero, depende casi enteramente de la geometría de la contracción. Para un Venturi, donde la reducción del área es gradual. Fig. 3.1.1.2 el error esta dentro del 3%.

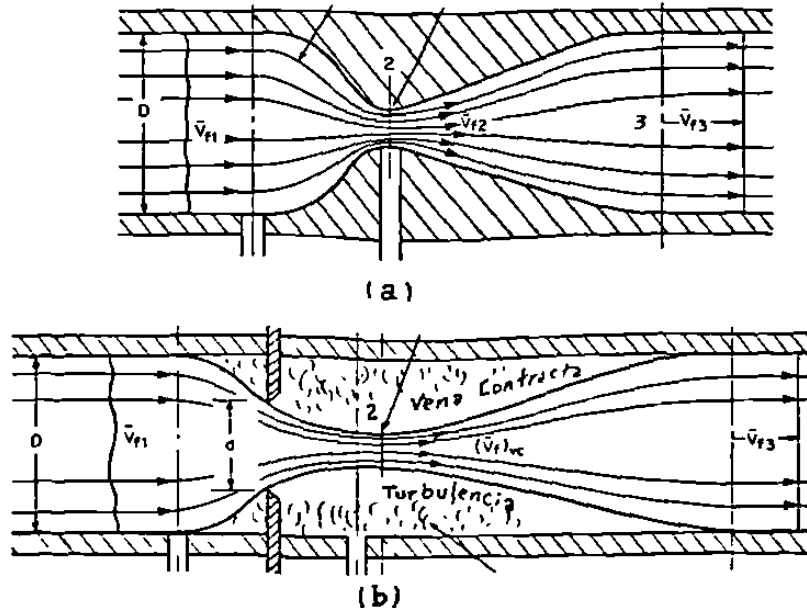


Fig. 3.1.1.2 Tipos de Contracción (a) Gradual (b) Abrupta.

Para una placa de orificio la reducción abrupta del área coloca el área de mínimo flujo corriente abajo de la placa en el plano de la vena contracta. Puesto que el diámetro de la vena contracta para un orificio no puede ser medido, la ecuación teórica incluye el orificio medido como el diámetro de correlación. También se incrementa la turbulencia corriente abajo, lo que resulta en una pérdida de energía que no se tomó en cuenta en la Ec. de Bernoulli, o en la Ec. Termodinámica de Energía para flujo constante. Estos dos factores ocasionan que el flujo verdadero venga a ser aproximadamente el 60% del valor teórico calculado. La ubicación de las dos tomas de medición es también importante debido a que establece la diferencial medida.

La Ec. Teórica se ajusta por estos efectos con dos correcciones empíricamente determinadas. La primera es el coeficiente de descarga C, el cual corrige por perfil de velocidad (número de Reynolds), localización de las tomas, y geometría de la contracción, el segundo es el factor de expansión térmica.

COEFICIENTE DE DESCARGA

Para un elemento primario dado, el coeficiente de descarga se deriva de datos de laboratorio relacionándolos a las razones de flujos verdaderos y teóricos. El flujo verdadero se determina pesando una colección volumétrica del fluido sobre un intervalo de tiempo medido, y la razón de flujo teórico se calcula con la Ec. 3.1.2. El coeficiente de descarga (C) se define como:

$$C = \text{Flujo Verdadero} / \text{Flujo Teórico} \quad \text{Ec. 3.1.4}$$

Se tienen gráficas de coeficiente de descarga, contra perfil de velocidad (Número de Reynolds).

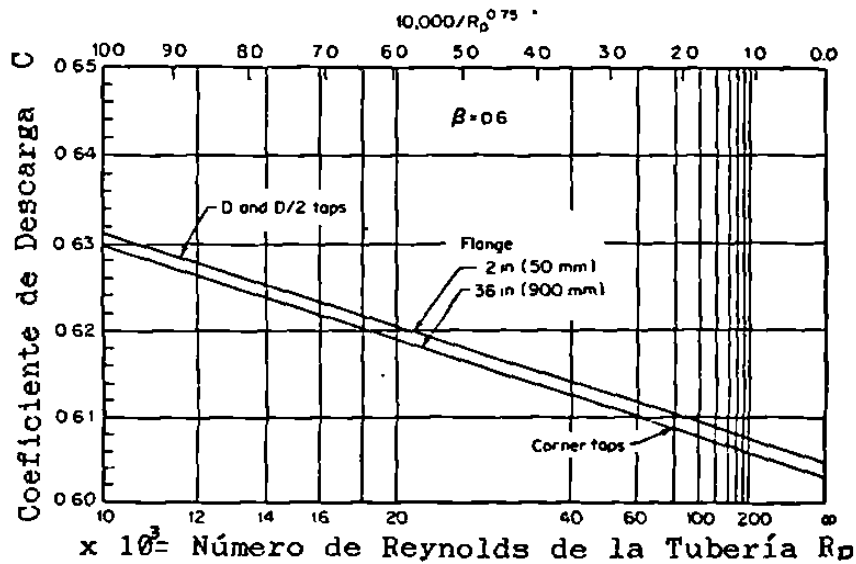
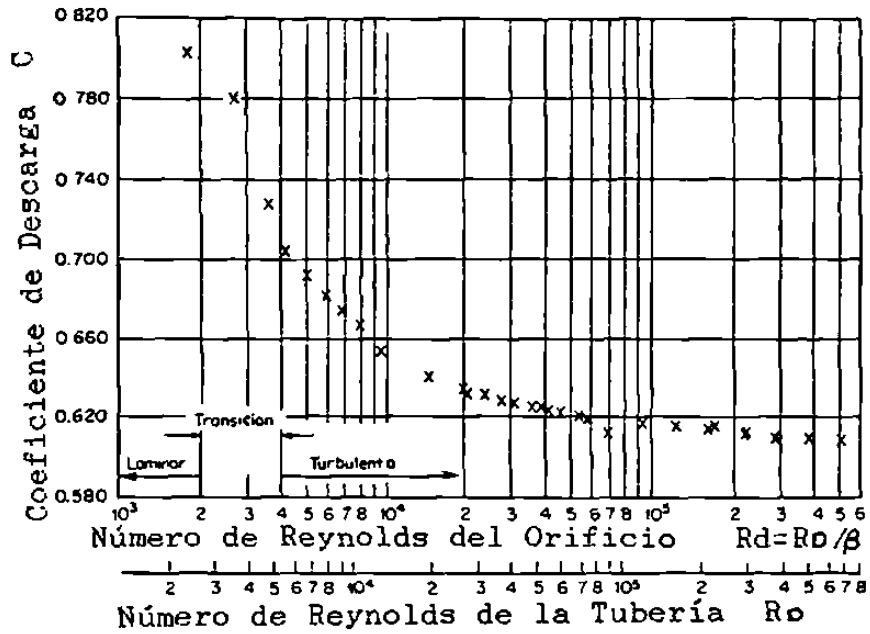


Fig. 3.1.1.3 Métodos de presentar gráficamente variaciones del coeficiente de descarga con el número de Reynolds de la tubería. a) Coeficiente de descarga de orificio para $D=4$ pulgadas $=100$ mm, $\beta = 0.73$ b) Curvas de Coeficiente de descarga, para diferentes tipos de toma de presión diferencial (Placa de orificio).

FACTOR DE EXPANSION TERMICA.

El material del elemento primario y la tubería se expanden o contraen contra la temperatura. Los diámetros de la tubería y del orificio se miden a temperaturas del laboratorio, pero serán mayores o menores cuando se usen a otras temperaturas. Un factor de expansión térmica (Fa) se ha desarrollado para corregir estas diferencias.

Cuando la tubería y el elemento primario son de materiales diferentes se tiene:

$$Fa = 1 + \frac{2}{1 - \beta^4} (\alpha_{pe} - \beta^4 \alpha_p) (T^{\circ}C - 20) \quad \text{Ec. 3.1.5}$$

Donde: α_{pe} = Coeficiente de expansión térmica del elemento primario mm/mm °C.

α_p = Coeficiente de expansión térmica de la tubería mm/mm °C.

β = Relación de diámetros = d/D.

Cuando $\alpha_{pe} = \alpha_p$ (lo cual es generalmente el caso)

$$Fa = 1 + 2\alpha_{pe} (T^{\circ}C - 20) \quad \text{Ec. 3.1.6}$$

Se tienen tablas con éstos coeficientes para los materiales mas comunes y figuras que representan Fa gráficamente.

FACTOR DE EXPANSION DE GAS PARA EL ORIFICIO.

Por conveniencia la Ec. de Energía Termodinámica para flujo constante para Gases se arregló en la forma de la Ec. de Líquidos, introduciendo el factor de expansión de Gas (Y1) para corregir cambios de densidad entre las tomas.

A presiones diferenciales pequeñas, el factor de expansión de gas (Y1) se aproxima a la unidad.

Para Venturis y Toberas la expansión de gas se considera puramente axial, y;

$$Y_1 = \left\{ \frac{[1 - (d/D)^4] [k/(k-1)] (P_{f2}/P_{f1})^{2/k} [1 - (P_{f2}/P_{f1})^{(k-1)/k}]}{[1 - (d/D)^4] (P_{f2}/P_{f1}) (1 - P_{f2}/P_{f1})} \right\}^{1/2} \quad \text{Ec. 3.1.7}$$

Para placas de Orificio, la expansión es axial y radial y una ecuación empírica se usa para calcular el factor de expansión de gas.

Para medición de Presión corriente arriba y localización de las tomas a menos de D/2 de la cara del orificio.

$$Y_1 = 1 - (0.41 + 0.35 \beta^4) \frac{\Delta P}{P_{f1} \cdot k} \quad \text{Ec. 3.1.8}$$

Para tomas (2 1/2D y 8D) la Ec. es:

$$Y1 = 1 - [0.333 + 1.145(\beta^2 + 0.7\beta^5 + 12\beta^3)] \frac{\Delta P}{Pf1 \cdot k}$$

Ec. 3.1.9

k = Coeficiente isoentrópico.

$$k = \frac{\text{Calor Específico a Presión constante}}{\text{Calor Específico a volumen constante}}$$

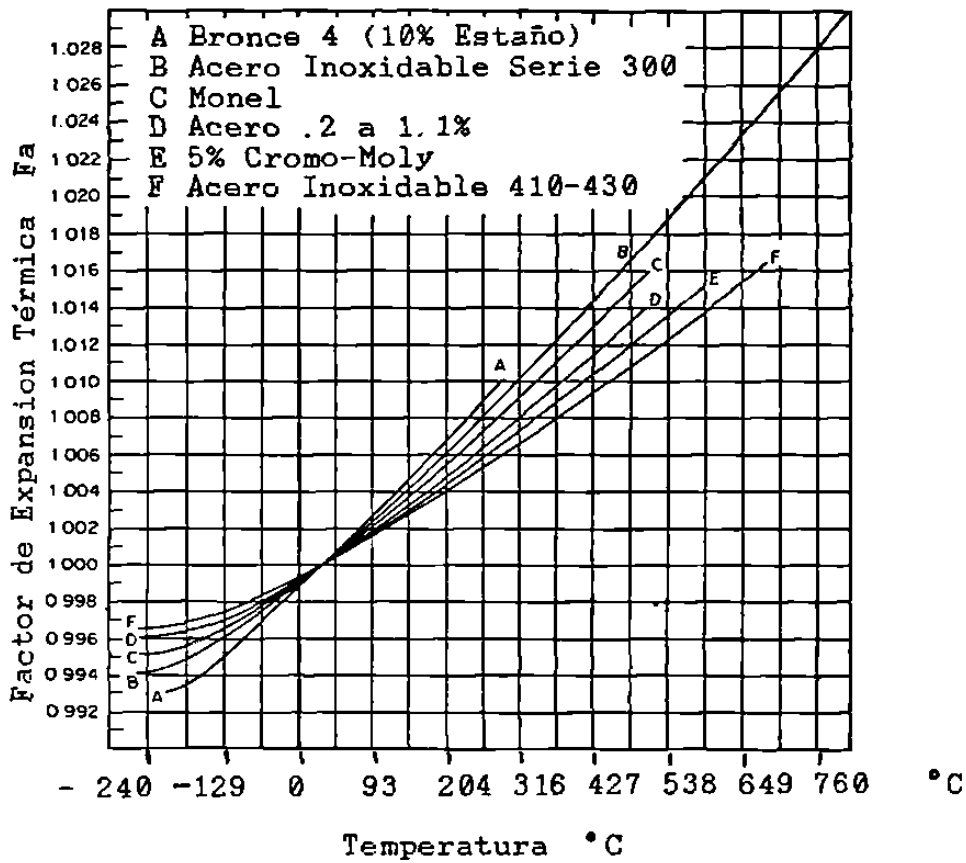


Fig. 3.1.1.4 Factor de Expansión Termica "Fa".

ECUACION FUNDAMENTAL PARA LIQUIDOS Y GASES.

La Ec. de razón de flujo másico verdadero para ambos - Líquidos y Gases (ó vapores) se obtiene de multiplicar la Ec. de flujo másico teórico 3.1.2 por el coeficiente de - descarga (C), el factor de expansión de gas Y1, y el factor de expansión térmica (Fa), La Ec. es entonces:

$$Q_{kps} = 3.512407 \times 10^{-5} \frac{CY_1 F_{ad}^2}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{\Delta P \cdot \rho_{f1}} \quad \text{Ec. 3.1.10}$$

FACTOR N

Este factor se obtiene de las relaciones entre flujo -- másico y volumétrico a condiciones de flujo y a condiciones de referencia. Por lo tanto se tiene una Ec. para cada tipo de unidades (Sistema Metrico Decimal Internacional (SI) y Sistema Ingles (US)).

Las tres razones de Flujo que se usan son:

- 1.- Razón de Flujo másico (kilogramos masa/hr), o (libras masa/hr)
- 2.- Razón de flujo volumétrico (metros cúbicos/hr), o (pies cúbicos/hr)
- 3.- Razón de flujo volumétrico a presión y temperatura base standard (metros cúbicos/hr) o (pies cúbicos/hr) a (101.325 kPa)(14.69595 psia) y (15°C) (59°F)

En este trabajo nos referimos al sistema S. I. (Standard Internacional) las unidades que se utilizarán son como ya se mencionó, Pf y ΔP en (kpa), d y D en (mm), ρ (kg/m³) y Tk (Temperatura absoluta en Grados Kelvin °K).

A continuación se darán las tablas de Factores N para las diferentes Ecuaciones en sistema S. I. (Tablas 3.1.1 y 3.1.2).

Tabla 3.1.1 factor N para Flujo Masico Unidades S. I.

Nmp Ecuación de Densidad, Liquido y gas (Vapor).

Tiempo	Kilogramos(kg)	Gramo(g)
s	0.00003512407	0.03512407
min	0.0021074444	2.1074444
h	0.1264467	126.4467
24 h	3.034720	3034.720

Nmg Ecuación de Gravedad Especifica, (Liquido)

Tiempo	Kilogramos(kg)	Gramo(g)
s	0.001110172	1.110172
min	0.06661032	66.61031
h	3.996619	3996.619
24 h	95.91886	95918.86

NmpT Ecuación pvT, gas (vapor)

Tiempo	Kilogramos(kg)	Gramo(g)
s	0.00006555517	0.06555517
min	0.003933310	3.933310
h	0.2359986	235.9986
24 h	5.663967	5663.967

Tabla 3.1.2 Factor N para Flujo Volumétrico Unidades S. I.

Nvp Ecuación de Gravedad Especifica (Liquido)			Nvg Ecuación de Densidad Liquido y Gas (Vapor)		
Tiempo	Metros Cubicos	Litros	Tiempo	Metros Cubicos	Litros
s	0.00003512407	0.03512407	s	0.00000111127	0.00111127
min	0.002107444	2.107444	min	0.00006667619	0.06667619
h	0.1264467	126.4467	h	0.004000571	4.000571
24 h	3.034720	3034.720	24 h	0.09601371	96.01371

Ecuación pvT, Gas (Vapor)

Base Seleccionada (NvpT)b			Base estandard (NvpT)		
Tiempo	Metros Cubicos	Litros	Metros Cubicos	Litros	
s	0.00001881927	0.01881927	0.00005351861	0.05351861	
min	0.001129156	1.129156	0.003211117	3.211117	
h	0.06774938	67.74938	0.1926670	192.6670	
24 h	1.625985	1625.985	4.624008	4624.008	

FACTOR DE TAMAÑO S_m .

La Ec. fundamental 3.1.3 puede reescribirse en una forma general para cualquier conjunto de unidades de razón de flujo, usando el factor de conversión de unidades N .

$$q = \frac{NCFaYd^2}{\sqrt{1 - \beta^4}} \cdot f(\rho) \sqrt{\Delta P} \quad \text{Ec. 3.1.11}$$

Donde la función de densidad $f(\rho)$ depende de la razón de flujo que se desea manejar, másico o volumétrico.

Inicialmente, el orificio se determina para satisfacer una razón de flujo de diseño, tamaño de tubería, y presión diferencial deseada. La razón de Ecuación de flujo se reescribe en terminos de estas cantidades conocidas introduciendo un factor de tamaño o S_m , definido como

$$S_m = \frac{CY \beta^2}{\sqrt{1 - \beta^4}} \quad \text{EC. 3.1.12}$$

Puesto que $d = \beta D$ la Ec. 3.1.11 puede expresarse para líquidos y gases (vapores) como:

$$q = N S_m F_a D^2 f(\rho) \sqrt{\Delta P} \quad \text{Ec. 3.1.13}$$

Rearreglando esta Ec. para resolver para S_m en unidades SI:

$$S_m = \frac{q}{N F_a D^2 f(\rho) \sqrt{\Delta P}} \quad \text{Ec. 3.1.14}$$

El valor del factor S_m es constante sobre el rango de razón de flujo. Se calcula sustituyendo los datos de operación de diseño en el lado derecho de la Ec. 3.1.14. A continuación se da la Tabla 3.1.3 de Factores S_m para unidades de flujo SI.

Tabla 3.1.3 Ecuaciones de Factor de Tamaño S_m , para unidades de flujo S. I.

	Líquido	Gas (vapor)
RAZON DE FLUJO MASICO		
Densidad	$S_M = \frac{q_M}{N_{M,p} F_p D^{0.2} \sqrt{F_p} \sqrt{\rho_f} \sqrt{\Delta p}} \quad (a)$	$S_M = \frac{q_M}{N_{M,p} F_p D^{0.2} \sqrt{\rho_{f1}} \sqrt{\Delta p}} \quad (g)$
Gravedad Específica	$S_M = \frac{q_M}{N_{M,g} F_p D^{0.2} \sqrt{F_p} \sqrt{G_f} \sqrt{\Delta p}} \quad (b)$	
Ecuación pvT		$S_M = \frac{\sqrt{Z_{f1}} \sqrt{T_{f1}} q_M}{N_{M,p} F_p D^{0.2} \sqrt{G} \sqrt{\Delta p} \rho_{f1}} \quad (h)$
RAZON DE FLUJO VOLUMETRICO A CONDICIONES DE FLUJO.		
Densidad	$S_M = \frac{\sqrt{F_p} \sqrt{\rho_f} q_v}{N_{v,p} F_p D^{0.2} \sqrt{\Delta p}} \quad (c)$	$S_M = \frac{\sqrt{\rho_{f1}} q_v}{N_{v,p} F_p D^{0.2} \sqrt{\Delta p}} \quad (i)$
Gravedad Específica	$S_M = \frac{\sqrt{F_p} \sqrt{G_f} q_v}{N_{v,g} F_p D^{0.2} \sqrt{\Delta p}} \quad (d)$	
Ecuación pvT		$S_M = \frac{\sqrt{G} \sqrt{\rho_{f1}} q_v}{N_{v,p} F_p \sqrt{Z_{f1}} \sqrt{T_{f1}} D^{0.2} \sqrt{\Delta p}} \quad (j)$
RAZON DE FLUJO VOLUMETRICO A CONDICIONES BASE.		
Densidad	$S_M = \frac{\rho_b q_v}{N_{v,p} F_p D^{0.2} \sqrt{F_p} \sqrt{\rho_f} \sqrt{\Delta p}} \quad (e)$	$S_M = \frac{\rho_b q_v}{N_{v,p} F_p D^{0.2} \sqrt{\rho_{f1}} \sqrt{\Delta p}} \quad (k)$
Gravedad Específica	$S_M = \frac{G_b q_v}{N_{v,g} F_p D^{0.2} \sqrt{F_p} \sqrt{G_f} \sqrt{\Delta p}} \quad (f)$	
Ecuación pvT		
Base Estandar		$S_M = \frac{\sqrt{Z_{f1}} \sqrt{T_{f1}} \sqrt{G} q_v}{N_{v,p} F_p Z_b D^{0.2} \sqrt{\Delta p} \rho_{f1}} \quad (l)$
Base Seleccionada		$S_M = \frac{\sqrt{Z_{f1}} \sqrt{T_{f1}} \sqrt{G} \rho_b q_v}{(N_{v,p})_b F_p Z_b T_b D^{0.2} \sqrt{\Delta p} \rho_{f1}} \quad (m)$

Tabla 3.1.4 Número de Reynolds relacionado a Razón de Flujo Unidades S. I.

Líquido		Gas (vapor)	
RAZON DE FLUJO MASICO.			
Densidad	$R_D = \left[44.72136 \frac{1}{\mu_{\phi} D^* N_{\phi}^*} \right] q_{\dot{M}} \quad (a)$	$R_D = \left[44.72136 \frac{1}{\mu_{\phi} D^* N_{\phi}^*} \right] q_{\dot{M}} \quad (g)$	
Gravedad Específica	$R_D = \left[1413.515 \frac{1}{\mu_{\phi} D^* N_{\phi}^*} \right] q_{\dot{M}} \quad (b)$		
Ecuacion pvT		$R_D = \left[83.46744 \frac{1}{\mu_{\phi} D^* N_{\phi}^*} \right] q_{\dot{M}} \quad (h)$	
RAZON DE FLUJO VOLUMETRICO A CONDICIONES DE FLUJO.			
Densidad	$R_D = \left[44.72136 \frac{\rho_{\phi}^*}{\mu_{\phi} D^* N_{\phi}^*} \right] q_{\dot{V}} \quad (c)$	$R_D = \left[44.72136 \frac{\rho_{\phi}^*}{\mu_{\phi} D^* N_{\phi}^*} \right] q_{\dot{V}} \quad (i)$	
Gravedad Específica	$R_D = \left[1413.515 \frac{F_p G_p}{\mu_{\phi} D^* N_{\phi}^*} \right] q_{\dot{V}} \quad (d)$		
Ecuacion pvT		$R_D = \left[83.46744 \frac{G_p \rho_{\phi}^*}{Z_{\phi} T_{K\phi} \mu_{\phi} D^* N_{\phi}^*} \right] q_{\dot{V}} \quad (j)$	

RAZON DE FLUJO VOLUMETRICO A CONDICIONES BASE.			
Densidad	$R_D = \left[44.72136 \frac{\rho_{\phi}^*}{\mu_{\phi} D^* N_{\phi}^*} \right] q_{\dot{V}} \quad (e)$	$R_D = \left[44.72136 \rho_{\phi}^* \frac{1}{\mu_{\phi} D^* N_{\phi}^*} \right] q_{\dot{V}} \quad (k)$	
Gravedad Específica	$R_D = \left[1413.515 \frac{G_{\phi}}{\mu_{\phi} D^* N_{\phi}^*} \right] q_{\dot{V}} \quad (f)$		
Ecuacion pvT Base Estandar Base Seleccionada		$R_D = \left[83.46744 \frac{G}{Z_{\phi} \mu_{\phi} D^* N_{\phi}^*} \right] q_{\dot{V}} \quad (l)$	
		$R_D = \left[83.46744 \frac{G \rho_{\phi}^*}{Z_{\phi} T_{K\phi} \mu_{\phi} D^* (N_{\phi}^*)_{\phi}} \right] q_{\dot{V}} \quad (m)$	

TAMAÑO DEL ORIFICIO APROXIMACION β_0 .

Para rangos normales de operación para líquidos y gases (vapores), el coeficiente de descarga no varía significativamente con el número de Reynolds, y puede expresarse con seguridad razonable como:

$$C = k_1 + k_2 S_m \quad \text{Ec. 3.1.15}$$

Donde k_1 y k_2 son constantes que se obtienen considerando el coeficiente de descarga a un número infinito de Reynolds o a un valor seleccionado dentro de un rango al cual se calcula S_m . Si el factor de expansión de gas Y es 1 se tiene la primera aproximación a β , como β_0 :

$$\beta_0 = \left[1 + \left(\frac{k_1 + k_2 S_m}{S_m} \right)^2 \right]^{-1/4} = \left[1 + \left(\frac{k_1}{S_m} + k_2 \right)^2 \right]^{-1/4} \quad \text{Ec. 3.1.16}$$

Esto simplifica los cálculos permitiendo calcular directamente del factor S_m . Y únicamente se requiere verificar el número de Reynolds (RD) de la tubería para asegurar que está arriba del mínimo. (Tabla 3.1.4)

La Tabla 3.1.5 da los límites de las variables para una exactitud en el tamaño del orificio entre 1 y 3%. La Tabla 3.1.6 muestra las Ecs. de Aproximación de β_0 . La Tabla 3.1.7 resume el procedimiento de cálculo para líquidos y la Tabla 3.1.8 el procedimiento para gas (vapor).

Tabla 3.1.5 Método de Límite de tamaño sobre β_0 para aproximación al 3% de seguridad.

	Líquido	Gas (vapor)
Número de Reynolds		
Placa de orificio	$R_D \geq 10,000$	$R_D \geq 10,000$
Tobera Venturi	$R_D \geq 100,000$	$R_D \geq 10,000$
Lo-Loss	$R_D \geq 100,000$	$R_D \geq 10,000$
Factor de Expansión	$Y_1 = 1.0$	$\frac{h_w}{P_n} \leq 0.5; \frac{\Delta p^*}{P_{f1}} \leq 0.02$
	$Y_2 = 1.0$	$\frac{h_w}{P_n} \leq 1.0; \frac{\Delta p^*}{P_{f1}} \leq 0.04$

La razón de flujo se considera de 0.8 del límite superior y la Presión diferencial de 0.64 del límite superior.

Tabla 3.1.6 Ecuaciones para tamaño aproximado de β_0 .

SENSOR	ECUACION	
VENTURI		
Entrada Maquinada	$\beta_0 = \left[1 + \left(\frac{0.995}{S_M} \right)^2 \right]^{-1/4}$	(a)
Entrada Tosca	$\beta_0 = \left[1 + \left(\frac{0.984}{S_M} \right)^2 \right]^{-1/4}$	(b)
Lamina de hierro soldada	$\beta_0 = \left[1 + \left(\frac{0.985}{S_M} \right)^2 \right]^{-1/4}$	(c)
Tubo Venturi Universal	$\beta_0 = \left[1 + \left(\frac{0.9797}{S_M} \right)^2 \right]^{-1/4}$	(d)
Tubo Lo-loss	$\beta_0 = \left[1 + \left(\frac{0.92}{S_M} - 0.31 \right)^2 \right]^{-1/4}$	(e)
TOBERA		
Radio largo "ASME"	$\beta_0 = \left[1 + \left(\frac{0.9975}{S_M} \right)^2 \right]^{-1/4}$	(f)
ISA	$\beta_0 = \left[1 + \left(\frac{0.9944}{S_M} - 0.118 \right)^2 \right]^{-1/4}$	(g)
Tobera Venturi (Entrada ISA)	$\beta_0 = \left[1 + \left(\frac{0.989}{S_M} - 0.09 \right)^2 \right]^{-1/4}$	(h)
PLACA DE ORIFICIO		
Tomas de Esquina, Brida, D y D/2		
$R_D < 200,000$	$\beta_0 = \left[1 + \left(\frac{0.6}{S_M} + 0.06 \right)^2 \right]^{-1/4}$	(i)
$R_D > 200,000$	$\beta_0 = \left[1 + \left(\frac{0.6}{S_M} \right)^2 \right]^{-1/4}$	(j)
Tomas 2 1/2 D y 8D	$\beta_0 = \left[1 + \left(\frac{0.61}{S_M} + 0.55 \right)^2 \right]^{-1/4}$	(k)
Placa Excéntrica	$\beta_0 = \left[1 + \left(\frac{0.607}{S_M} + 0.068 \right)^2 \right]^{-1/4}$	(l)
Placa Segmental	$\beta_0 = \left[1 + \left(\frac{0.634}{S_M} - 0.062 \right)^2 \right]^{-1/4}$	(m)
Cuadrante ($\beta \leq 0.6$)	$\beta_0 = \left[1 + \left(\frac{0.76}{S_M} + 0.26 \right)^2 \right]^{-1/4}$	(n)
Esquina, Conica ($\beta \leq 0.3$)	$\beta_0 = \left[1 + \left(\frac{0.734}{S_M} \right)^2 \right]^{-1/4}$	(o)

Tabla 3.1.7 PROCEDIMIENTO PARA OBTENER β . PARA LIQUIDOS.

PROCEDIMIENTO	PARAMETROS	REFERENCIA
1.-Seleccionar la razón de Flujo, Tamaño de la Línea, Diferencial de Presión, y la Ec. para factor S_m .		
a) Seleccionar el valor de la razón de flujo para el rango superior, la unidad de flujo puede ser masa o volumen.	q_{max}	
b) Seleccionar la Ec. para el factor S_m para líquidos o gases basados en las unidades de razón de flujo y el método de determinación de densidad ($\rho_f G_f$).	S_m	Tabla 3.1.3
c) Obtener el factor N para las unidades de razón de flujo deseadas.	N	Tablas 3.1.1 y 3.1.2
d) Seleccionar la diferencial de presión de rango superior, para la razón de flujo de rango superior, (Usar 25 Kpa si no se especifica otro valor).	ΔP_{max}	
e) Obtener el diámetro nominal de la tubería.	D	
2.-Escalar a la razón de flujo -- normal de operación.		
a) Multiplicar la razón de flujo máximo por 0.8 y usar este en todos los cálculos -- subsecuentes.	$(q)n$	
b) Multiplicar la diferencial de presión de rango superior por 0.64 y usar esta en todos los calculos subsecuentes.	ΔP_n	
3.-Obtener las propiedades de los flujos.		
a) De la Ec. de factor seleccionado S_m , tabular las propiedades necesarias de flujo para resolver para S_m .	S_m	Tabla 3.1.3
b) Obtener la densidad o gravedad específica necesaria de mediciones, tablas, gráficas, o Ecs. de predicción.		

PROCEDIMIENTO	PARAMETROS	REFERENCIA
c) Obtener la viscosidad del fluido de mediciones, tablas ó gráficas convertir a centipoises si es necesario.	Gf, μ_{cp}	
d) Calcular el número de Reynolds de la tubería y asegurar que esté arriba del rango del mínimo número de Reynolds dado en la tabla.	R_D	Tabla 3.1.4
4.-Calcular el factor S_m .		
a) Ajustar el valor de compresibilidad F_p a 1.0 si es desconocido o considerado ser despreciable.	F_p	
b) Calcular u obtener gráficamente el factor de expansión térmica.	F_a	
c) Sustituir valores en la Ec. de factor S_m y resolverla para S_m .	S_m	Tabla 3.1.3
5.-Calcular β_0 . Para el dispositivo primario seleccionado, - sustituir el valor de S_m en la Ec. de β_0 .		Tabla 3.1.6
6.-Calcular el diámetro de la restricción del elemento primario como $d = \beta_0 D$.	d	

Tabla 3.1.8 PROCEDIMIENTO PARA OBTENER β_0 PARA GASES (VAPORES).

PROCEDIMIENTO	PARAMETROS	REFERENCIA
1.-Seleccionar la razón de Flujo, Tamaño de la Línea, Diferencial de Presión y Factor N.		
a) Seleccionar el valor de razón de flujo para el rango superior, y el mínimo suficiente para una lectura adecuada. La unidad de flujo - puede ser masa o volumen; - para volumen de flujo a condiciones base, usar (101.325 Kpa) y (15°C) como standard a menos que se especifiquen otras condiciones industriales como referencia o base-standard.	q_{max}	
b) Seleccionar el Factor N para las unidades de razón de flujo deseadas.	N	Tablas 3.1.1 y 3.1.2
c) Seleccionar la Presión Diferencial de rango superior, - para razón de flujo máximo. (Usar 25 Kpa si no se especifica otro valor).	ΔP_{max}	
d) Limitar $\Delta P/P_f^2 < .04$ (Cuando esto sea posible).		
e) Obtener el Diámetro nominal de la tubería.	D	
2.-Escalar a la razón de flujo -- normal de Operación.		
a) Multiplicar la razón de flujo máximo por 0.8 y usar -- este en todos los cálculos subsecuentes.	$(q)_n$	
b) Multiplicar la presión diferencial de rango superior - por 0.64 y usar esta en todos los cálculos subsecuentes.	$(\Delta P)_n$	
3.-Obtener las propiedades de los flujos.		
a) Obtener la densidad, para el fluido que se va a medir, de Tablas, Gráficas, o calcularla de las leyes de Gases (PVT).	ρ_f	

PROCEDIMIENTO	PARAMETROS	REFERENCIA
b) Para la Ec. PVT, seleccionar: Temperatura de Operacion Gravedad Específica Factor de Compresibilidad	Tk G Zf	
c) Para la Ec. de Factores de Gas, calcular u obtener de Tablas los factores de multiplicación. Temperatura base (para base standard Ftb=1.0) Presion base (para base -- standard F=1.0) Temperatura de flujo Gravedad específica Factor de Super compresibilidad.	Ftb Fpb Ftf Fg Fpv	
d) Obtener la viscosidad del fluido de mediciones, tablas o gráficas; convertir a centipoises si es necesario.	μ_{cp}	
e) Calcular el número de Reynolds de la tubería para asegurar que está arriba del número mínimo dado en la tabla.	R _D	
4.- Calcular el factor Sm.		
a) Ajustar el factor de compresibilidad base Zb a -- 1.0 para la mayoría de las aplicaciones prácticas.	Zb	
b) Calcular o determinar gráficamente el factor de expansión térmica.	Fa	
c) Sustituir valores en la -- Ec. del factor Sm para determinarlo.	Sm	Tabla 3.1.3
5.- Calcular β_0 : Para el dispositivo primario seleccionado, sustituir el valor de Sm en la -- Ec. de β_0 .	β_0	Tabla 3.1.6
6.- Calcular el diámetro de la -- restricción del elemento primario como $d = \beta_0 D$.	d	

3.1.2.- TUBO VENTURI.

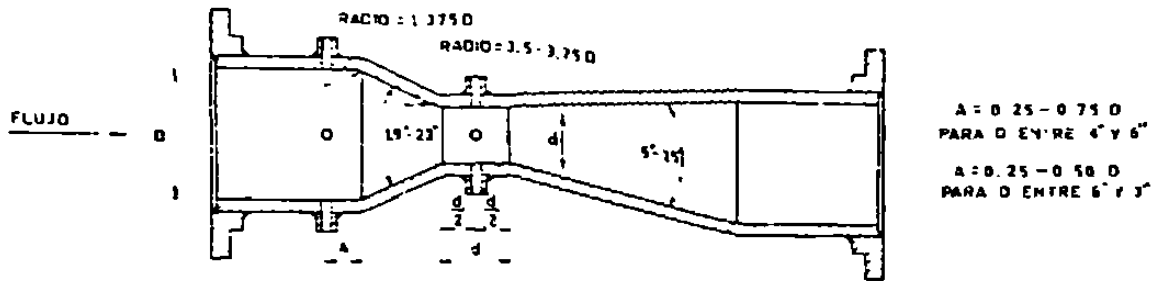


Fig. 3.1.2.1 Tipo Clásico.

El Tubo Venturi clásico consiste en un breve tramo de tubo recto de entrada unido a un cono truncado con un ángulo de 19° a 23°.

Este cono de entrada está, a su vez, unido a una sección cilíndrica de diámetro menor del tubo recto de entrada.

Esta sección es la restricción del Tubo Venturi y es denominada "Garganta".

A la garganta sigue, el cono difusor de salida, con un ángulo de 5° a 15°.

En algunos casos, después del cono de salida, se coloca un tramo recto de tubo.

Donde existe problema de espacio o por razones de economía, se puede conectar directamente el cono de salida a la línea.

Las tomas de presión de diferencial están localizadas: Las de alta presión en el tramo recto de entrada y las de baja presión en el centro de la garganta.

En algunos casos, con el objeto de promediar las presiones, las tomas son varias, distribuidas en el mismo diámetro y unidas con un anillo que se denomina "Anillo Piezométrico".

El Tubo Venturi se instala en la línea por medio de bridas o soldado.

Este elemento primario de flujo tiene ventajas y desventajas respecto a la Placa Orificio:

Ventajas: - Menor perdida de presión permanente.

- Tomas integrales.
- Requiere menor longitud de tubo recto a la entrada.
- No está sujeto a obstrucciones por solidos suspendidos en el fluido.
- Se puede usar en una tubería que no tiene bridas.
- Su coeficiente de descarga es bien conocido.

Desventajas:

- Es el elemento primario de mayor costo.
- Es el de mayor peso y dimensiones.

Las características arriba descritas hacen que el Tubo Venturi sea particularmente recomendable cuando el fluido contiene grandes cantidades de solidos en suspensión y cuando es necesario tener una caída de presión muy baja.

También en el Tubo Venturi es importante observar las normas sobre el acabado de las tomas de presión, para obtener la máxima exactitud de la medición.

Del Tubo Venturi clasico, derivan varios elementos primarios de flujo, patentados, cuyas características sobresalientes son: menores dimensiones y menor perdida permanente de presión, respecto al Venturi clasico. En estos, mencionamos: El tubo de flujo de baja perdida, el tubo Dall y el tubo de flujo Foster.

3.1.3.- PLACA DE ORIFICIO.

PLACA DE ORIFICIO CONCENTRICA CON ESQUINAS RECTAS.

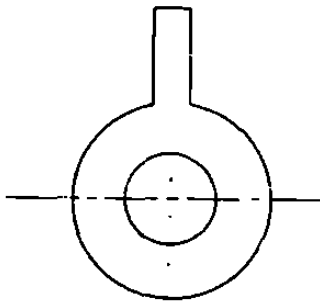


Fig. 3.1.3.1
Concentrica.

Es el elemento primario que, por su bajo costo, debería tener prioridad, todas las veces que es compatible con el sistema. Esta constituido por un disco metálico pulido a espejo, de espesor relativamente pequeño. El diámetro exterior es tal que la Placa pueda montarse entre los tornillos de la Brida Porta-Placa.

Tiene una oreja, con los datos de flujo grabados, que en el montaje, sobresale de la Brida.

La restricción, que se denomina "Orificio", es circular y concentrica con el diámetro exterior. El orificio es maquinado recto, sin chaflanes. El diámetro del orificio se identifica en general con la letra "d" y la relación d/D , donde D es el diámetro interior de la línea, se denomina "Relación Beta".

PLACA DE ORIFICIO EXCENTRICA

En este tipo de placa, el orificio es excéntrico respecto al diámetro exterior.

Se usa especialmente para fluidos que tienen sólidos en suspensión. Se instala en forma tal que el borde inferior del orificio sea tangente con el orificio inferior del tubo.

En esta forma, se evita acumulación de sólidos en el lado de entrada de la Placa.

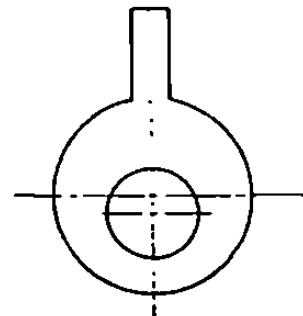


Fig. 3.1.3.2
Excentrica.

PLACA DE ORIFICIO SEGMENTAL.

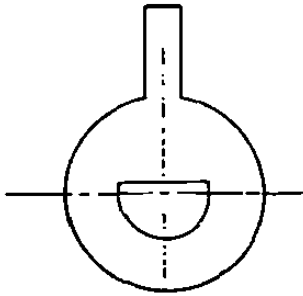
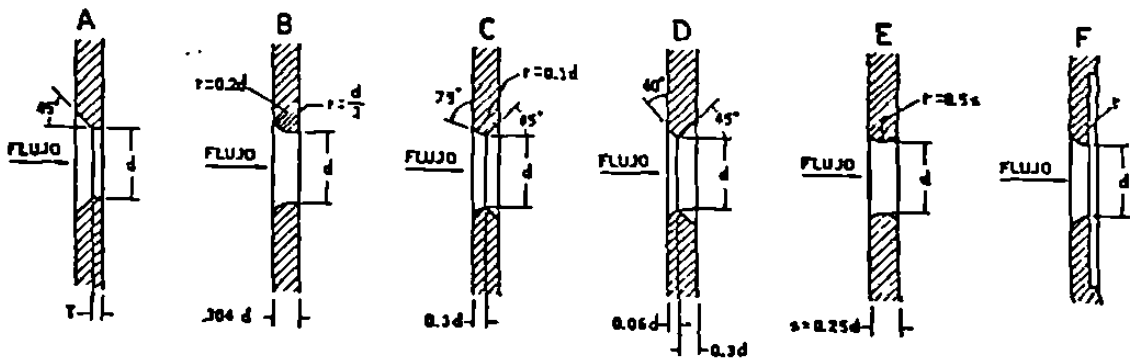


Fig. 3.1.3.3
Segmental.

En éste tipo de Placa, el orificio está constituido por un segmento de círculo y es montada en forma tal, que la parte circular del segmento coincida con la superficie interior del tubo.

Este tipo es apropiado para flujos de gases y líquidos que contienen muchos sólidos porque previene la acumulación de sólidos en el lado de entrada.

Para tratar de balancear los efectos de las variaciones de velocidad y viscosidad en las mediciones con bajo número de Reynolds, se han desarrollado varios perfiles especiales de orificio que minimizan éstos efectos:



El espesor de la placa debe ser despreciable, comparado con el diámetro del orificio.

Fig. 3.1.3.4 Perfiles de Placa.

INSTALACION DE PLACAS ORIFICIO.

Después de la restricción representada por el orificio, normalmente el área de la corriente de fluido sigue disminuyendo hasta un valor mínimo y luego vuelve a aumentar, hasta alcanzar nuevamente el área total del tubo. La sección donde el área de la corriente tiene su valor mínimo se denomina "Vena Contracta".

Este es el punto que genera la máxima presión diferencial. De esto, se deduce la importancia de la localización de las tomas de presión diferencial (taps), respecto a la placa. Los métodos utilizados más frecuentemente para localizar las tomas de presión diferencial en placas orificios son:

TOMAS DE BRIDA

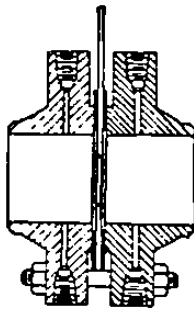


Fig. 3.1.3.5

Tomas de Brida.

Las tomas de presión diferencial están localizadas a 1" -- de distancia, antes y después de las caras de la Placa Orificio.

Es aplicable a tuberías de 2" de diámetro y mayores .

Como las tomas son colocadas por el mismo fabricante de las bridas, este sistema elimina posibles errores de localización en el campo.

Es el método mayormente utilizado.

TOMAS DE ESQUINA.

Las tomas de presión diferencial están localizadas directamente e inmediatamente antes y después de las caras de la Placa Orificio

Se utilizan en tuberías con diámetro menor de 2".

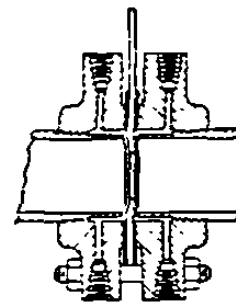
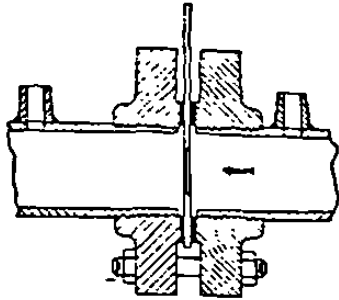


Fig. 3.1.3.6

Tomas de Esquina.

TOMAS DE VENA CONTRACTA.

Las tomas de presión diferencial están localizadas, la de alta presión a una distancia igual a 1 diámetro de tubería y la de baja presión en el punto de mínima presión estática, o sea en la sección de "Vena Contracta".



Vena Contracta.

Fig. 3.1.3.7

Esta localización genera el máximo de presión diferencial. Tiene el inconveniente que las tomas se localizan en el campo con la consiguiente posibilidad de errores. Es bastante usada en mediciones de flujo de vapor.

Los taladros de las tomas de presión diferencial deben tener superficies lisas, ser ligeramente redondeados en los extremos y ser rectos desde la entrada por una longitud no inferior a 2 1/2 veces el diámetro de la toma.

La Placa Orificio debe ser instalada en forma tal que la cara de la oreja, grabada con los datos, mire hacia el lado antes de la Placa Orificio, respecto al flujo.

Esto asegura que el perfil del orificio quede en el lado correcto.

Además, la oreja debe ser alineada con las tomas de presión.

TUBO DE MEDICION.

Para el máximo de precisión en la medición de flujo con Placas Orificios, son disponibles Tubos de Medición, completamente prefabricados, hechos de tubos seleccionados, con bridas y tomas de presión exactamente instaladas.

Estos Tubos de Medición tienen la ventaja de ser fabricados por personal especializado, en los talleres bien equipados, así que los resultados son en general, más satisfactorios y, a la larga, más económicos de los que se obtienen con la fabricación en el campo.

El Tubo de Medición tiene una longitud mínima igual a 10 diámetros antes de la Placa Orificio y 5 diámetros después.

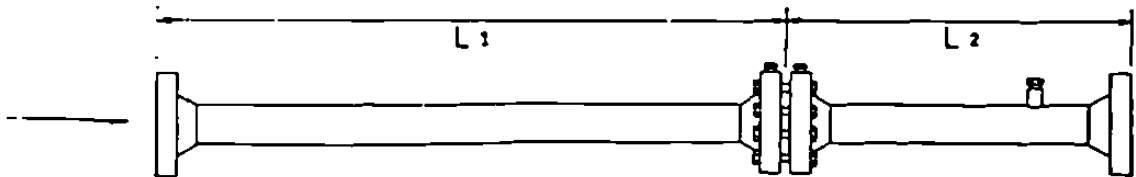


Fig. 3.1.3.8 Tubo de Medición.

3.2 TERMICOS .

Entre los sensores térmicos más aplicados en la industria se tienen los Termopares, Detectores de Temperatura por resistencia ó RTD, Termistores, Pirómetros de radiación, Pirómetros Ópticos, etc. A continuación se describirán los 3 primeros ampliamente.

3.2.1 TERMOPARES.

Un termopar es básicamente un elemento primario de medición, que consiste en dos metales distintos, tales como el hierro y el constantan que unidos producen una Fem cuando las uniones están a diferentes temperaturas. La unión caliente o de medición es el extremo insertado en el medio donde la temperatura va a ser medida. La unión fría o de referencia es la parte normalmente conectada a las terminales de medición del instrumento.

La Fem de un termopar aumenta, cuando la diferencia en temperatura de las uniones aumenta. Por lo tanto, un instrumento sensible capaz de medir una Fem se puede usar para leer temperatura directamente.

UNION DE REFERENCIA. Las curvas de Fem vs. temperatura para termopares están basadas en temperaturas de unión de referencia de 0°C , el termopar genera cero milivoltaje cuando ambas uniones, la de medición y la de referencia están a la misma temperatura, además podría existir una variación no compensada en la temperatura de la unión de referencia, entonces habría un cambio correspondiente en el milivoltaje con un error resultante en la medición de temperatura.

No siempre es posible mantener la unión de referencia en una temperatura deseada, pero si la temperatura de la unión de referencia se mide o se conoce, es posible aplicar correcciones a la Fem observada, para efectuar una medición correcta. Cuando se trabajaba en laboratorios muy en el pasado la unión de referencia del termopar se colocaba en una botella al vacío, llena con hielo, este método daba un control cerrado de temperatura (dentro de una fracción de grado) y permitía una lectura segura.

Para asegurarse de tener lecturas seguras, los termopares están ahora instalados en instrumentos, los cuales tienen una compensación automática. En muchos instrumentos, esto se realiza pasando una corriente a través de un resistor que aumenta su valor de resistencia proporcionalmente con la temperatura la cual mide las variaciones en la temperatura de referencia, y automáticamente provee la Fem necesaria de compensación por medio de la caída de voltaje producida a través de él.

Las instalaciones industriales; consisten generalmente de un termopar con su cabeza de conexiones, la longitud necesaria de alambre de extensión y un indicador, registrador o controlador con compensación automática interna de la unión de referencia.

La interferencia eléctrica puede ser dañina si los alambres de extensión pasan cerca de conductores que llevan corriente de generadores, motores, circuitos, etc., una solución a esto es proteger el alambre con malla o quitar el alambre de su posición cercana a los conductores.

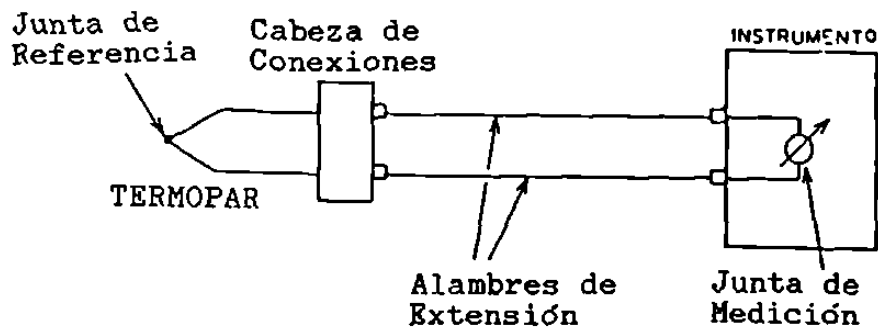
TIPOS COMUNES DE TERMOPARES.

Termopares de metal base

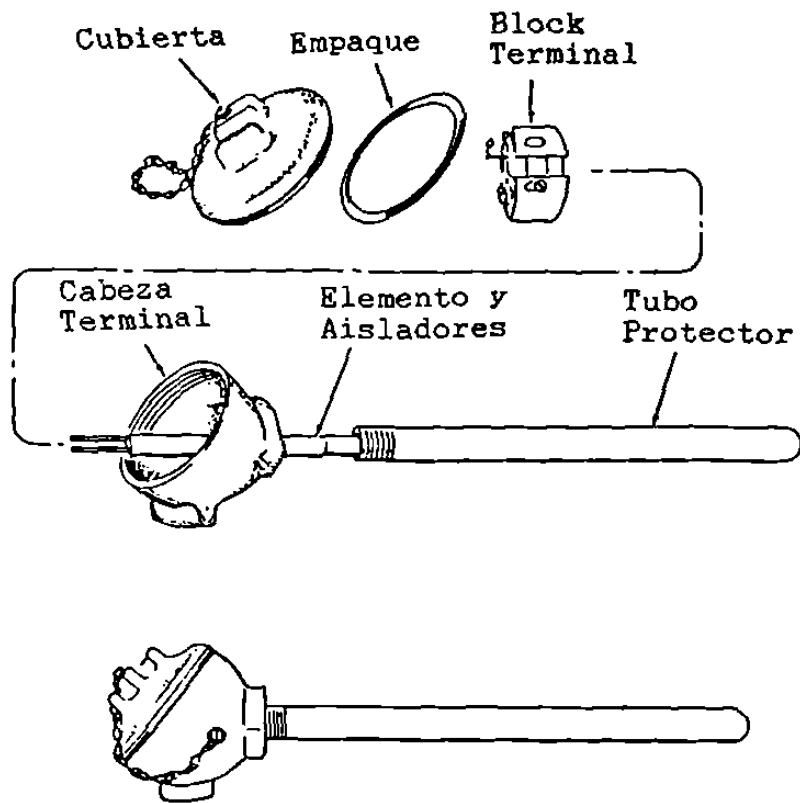
- a) Tipo T (cobre-constantan)
- b) Tipo J (hierro-constantan)
- c) Tipo K (chromel-alumel)

Termopares de metal noble

- d) Tipo R (platino-13% rodio platino)
- e) Tipo S (platino-10% rodio platino)



La Fig. 3.2.1.1 muestra la junta caliente y la fría o de referencia.



La Fig. 3.2.1.2 muestra el ensamble completo de un termopar típico.

Termopares tipo I (cobre constantan)

Estos termopares tienen como positivo un alambre de cobre puro y como negativo una aleación nickel cobre(constantan), son apropiados para medir temperaturas de -185°C a $+316^{\circ}\text{C}$ y son bajos de costo. Una ventaja es su alta resistencia a la corrosión debida a la humedad atmosférica o condensación de humedad, la cual ocurre al medir temperaturas de sub-cero. Pueden usarse en atmósfera oxidante o reductora a su rango recomendable.

Termopares Tipo J (hierro-constantan)

Estos termopares tienen como positivo hierro y como negativo el constantan, son aplicados normalmente para temperaturas de -30°C a 705°C , y son aplicados para atmósferas oxidantes y reductoras, son bajos de costo y populares en su rango.

Termopares Tipo K (chromel-alumel)

Estos termopares tienen una aleación de nickel-aluminio. Es generalmente recomendado para temperaturas de $300^{\circ}\text{a } 1100^{\circ}\text{C}$. Se obtiene un mejor servicio cuando se le utiliza en atmósfera oxidante, pero puede ser usado en atmósferas reductoras si está con tubos protectores, cuesta un poco más que el tipo J.

Termopares Tipo R y S (platino y platino rodio)

Estos termopares tienen como negativo platino, y como positivo una aleación de 87% platino y 13% rodio o una aleación de 90% platino y 10% rodio. Si está protegido adecuadamente son recomendables para medir temperaturas hasta de $1,690^{\circ}\text{C}$ en atmósferas oxidantes y cerca de $1,482^{\circ}\text{C}$ en atmósferas reductoras, se contaminan fácilmente, por tanto siempre deben usarse con tubo protector. El silicio así como el hidrógeno o vapores metálicos contaminan estos termopares (aun el rodio puede vaporizar algo y contaminar el platino a altas temperaturas). Para evitar esto, se deben usar aisladores de doble agujero sobre el par de alambres, por su costo comparativamente alto, y su baja fem producida, las aplicaciones prácticas industriales del tipo R y S se limitan a medición de temperaturas que son más altas que aquellas en las que se puede usar tipo K.

Aún con esto, los termopares de metal noble son usados extensamente debido a:

- 1) La reproducibilidad de sus curvas de calibración.
- 2) Efectividad de los metales en forma pura.
- 3) Estabilidad química de los metales, y
- 4) La alta precisión sobre un amplio rango de temperatura.

Son usados en forma estandar en temperaturas de 600 °C a 1,600 °C.

El calibre (espesor de las piernas de los termopares) recomendados varía de acuerdo con su temperatura y el tipo de termopar usado. En general, los tamaños mas pequeños son preferidos para altas velocidades de respuesta, debido a su pequeña masa. La vida de un termopar aumenta si el alambre es mas grueso, el cual resiste más contaminación a temperaturas elevadas y deterioro, factores que van causando una desviación en su calibración.

Alambre de extensión. El alambre de extensión se prepara generalmente en la forma de un par de conductores con un tipo de aislamiento diseñado según las necesidades de la instalación en particular. Básicamente el procedimiento más simple para fabricar los alambres de extensión sería usar los mismos tipos de alambre de que esta hecho el Termopar. Pero en las instalaciones reales sin embargo, donde algunas decenas de metros de extensión salen de un termopar y donde se usan muchos termopares llegaría a ser muy caro con el tipo K y prohibitivo con el tipo R, por ello se usan aleaciones de mas bajo costo y de características similares a los alambres del termopar.

Los cuales generan esencialmente el mismo milivoltaje que el termopar para aplicaciones hasta 204 °C aproximadamente.

Aislamiento del alambre de extensión. Siempre que sea práctico, el alambre de extensión debera correr desde el termopar, dentro de un conduit y protegerlo de calor excesivo humedad, daños mecánicos e interferencia eléctrica. La variedad de condiciones a las cuales puede estar sujeto ha llevado al desarrollo de un número de diferentes tipos de aislamientos que pueden ser: Plastico polivinilo, forro de asbesto o revestimiento de plomo.

Tubos de protección. Como ha sido indicado, con pocas -- excepciones los termopares deben ser equipados con protección adecuada en la forma de tubo particularmente en altas temperaturas. El término tubo de protección se refiere a un tubo cerrado en un lado y por el otro diseñado para fijar la cabeza del termopar.

Se usa por las razones siguientes:

- 1) Protege al termopar de gases (oxidantes, reductores contaminados etc.).
- 2) Protege al termopar de líquidos corrosivos.
- 3) Protege al termopar de daños mecánicos
- 4) Soporta al termopar
Obviamente disminuye la sensibilidad de medición y aumenta el espacio requerido para instalación así como el costo.

Debe satisfacer las siguientes calidades:

- 1) Resistencia a altas temperaturas.
- 2) Resistencia a la acción de gases oxidantes y reductores.
- 3) Alta conductividad térmica para asegurar rápida transmisión de cambios de temperatura al termopar.
- 4) Resistencia al choque térmico causado por repentino cambio de temperatura.
- 5) Habilidad para soportar choques mecánicos.
- 6) Baja porosidad en temperaturas de operación (prevenir fugas de gas).
- 7) Resistencia a la erosión.

Aunque no es una regla se utilizan tubos de cerámica, esto depende de las condiciones del ambiente.

INSTALACION DE TERMOPARES

Hay numerosos factores prácticos que considerar al hacer una instalación propia y al conectar el alambre de extensión en el instrumento. Algunos son:

- 1) Seleccionar la localización y profundidad de inmersión en el proceso, con cuidado de áreas para que se puedan tener temperaturas representativas.
- 2) Cuidarse de temperaturas ocasionadas por flama directa sobre el tubo de protección, porque materialmente acortarán la vida del tubo, y las temperaturas no serían representativas.
- 3) Cuando se mide alta temperatura, instalar el termopar verticalmente donde sea posible para prevenir pandeo del tubo.

Los termopares instalados deben chequearse regularmente en un tiempo determinado por la experiencia, ya que es una parte vital del sistema y su vida es limitada.

Los termopares llegan por medio de las líneas de extensión a dispositivos transmisores de señal que convierten al pequeño voltaje generado por ellos, en una señal mas grande de 4 a 20 mili-amperes, mas fácil de manejar, y que a su vez se lleva a indicadores, reguladores o controladores de temperatura, también pueden llegar a dispositivos o cajas multiplexoras para de ahí salir en un sólo cable, una gran cantidad de señales de termopares individuales a una computadora de control.

3.2.2 TERMOMETROS DE RESISTENCIA (RTD).

El termómetro de resistencia esta basado en la propiedad de cambio de resistencia con la variación de temperatura exhibida por ciertos metales. La selección de un metal para usarse en esta aplicación depende de varios factores. Entre estos, los más importantes son la facilidad de obtener un metal puro y la capacidad de estirarlo en un alambre fino. Los requisitos adicionales son su habilidad para seguir cambios rápidos de temperatura, repetibilidad, linealidad y una relativamente alta razón de cambio de resistencia.

Los factores que afectan las mediciones del termometro de resistencia incluyen esfuerzo sobre los alambres, resistencia de las terminales, calentamiento propio del sensor debido al paso de corriente a través del alambre.

Por el momento cuatro metales son los comunmente usados: Platino, Nickel, Tungsteno y Cobre. Ocasionalmente se usan Iridio, Rodio, Plata, Hierro y Tantalio.

El platino cumple con los requisitos de alta pureza y ser capaz de estirarse en alambres muy finos. Además tiene un alto punto de fusión, resiste la oxidación y es químicamente estable, no volatiliza apreciablemente abajo de 1000 °C y es bastante lineal en su rango útil. Aunque puede contaminarse con gases en atmósferas reductoras y puede actuar como catalizador cuando estan presentes ciertos hidrocarburos; por consiguiente los buenos transductores de platino son generalmente encapsulados.

El nickel tambien es disponible en forma cercanamente pura. Entre 0 °C y 100 °C tiene el mayor cambio de resistencia de cualquier metal, pero su sensibilidad disminuye abruptamente arriba de 288 °C y es bastante no lineal. Una aleacion de 70% Nickel y 30% Hierro tiene un coeficiente de variación de resistencia con la temperatura relativamente alto, y cuando se emplea en un circuito puente adecuado, dá salidas de varios volts para cambios de temperaturas de 100 °C. El tungsteno tiene un punto de fusion relativamente alto, como el iridio, lo cual lo haría útil a temperatura arriba de 1000 °C, tiene características bastante lineales, alta resistencia a la tensión (10 veces mas que el platino), lo cual lo hace bueno para tamaños de alambre pequeños y alta resistencia total y resistencia nuclear. El cobre se oxida rápidamente y pierde su pureza, lo que lo hace menos deseable que aquellos mencionados previamente, los puntos a su favor es que es fácilmente refinado y estirado en alambres uniformes y absorbe calor uniformemente. A continuación se dá un sumario de coeficientes de resistencia.

TABLA 3.2.2.1

PROPIEDADES DE MATERIALES P/RTD	
METAL	Coefficiente de Cambio de Resistencia por Temperatura Ohms/Ohms °C.
Platino	0.00392
Niquel	0.00672
Cobre	0.0038
Tungsteno	0.0045
Oro	0.0040
Plata	0.0041

Los sensores pueden ser construidos con dos, tres o cuatro terminales, dependiendo de la aplicación. Cuatro conductores terminales se usan normalmente para incrementar la seguridad para mediciones de baja resistencia. Tres terminales se usan para medir alta resistencia. Y dos se utilizan para aplicaciones industriales. La medición en cuatro terminales es menos susceptible a pérdidas y cambios de resistencia en los conductores y terminales.

Los termómetros de resistencia para aplicaciones industriales que se usan en ambientes con vibración o choque mecánico deben estar protegidos para trabajo duro. El sensor en ocasiones esta devanado en un nucleo de ceramica, se calibran preliminarmente agregando alambres para dar las tolerancias deseadas en resistencia.

Los termómetros de resistencia tipo certificado por Bureau of Standards son de alambre de la mas alta pureza devanados sobre micas transversales. El alambre fino se devana de forma floja para prevenir esfuerzos. La resistencia se ajusta; el devanado se coloca en un tubo de vidrio o platino y se sella herméticamente. Algunas veces se utiliza un gas inerte en la capsula. Se proporcionan con cuatro conectores terminales. El bulbo se libera de esfuerzos. Se calibra a puntos fijos incluyendo el punto de oxigeno, punto de hielo, punto de vapor y punto de sulfuro.

Los termómetros industriales no se calibran tan estrictamente sin embargo se pueden encontrar con precisión de 1 °C, contra hasta .1 °C de los calibrados. La Fig.3.2.2.1 muestra RTD'S industriales.

Las lecturas se obtienen ordinariamente a través del uso del puente de Wheatstone en aplicaciones industriales. Rango de trabajo de -250°C a 1000°C.

La Fig.3.2.2.2 muestra la aplicación industrial del Puente de Wheastone.

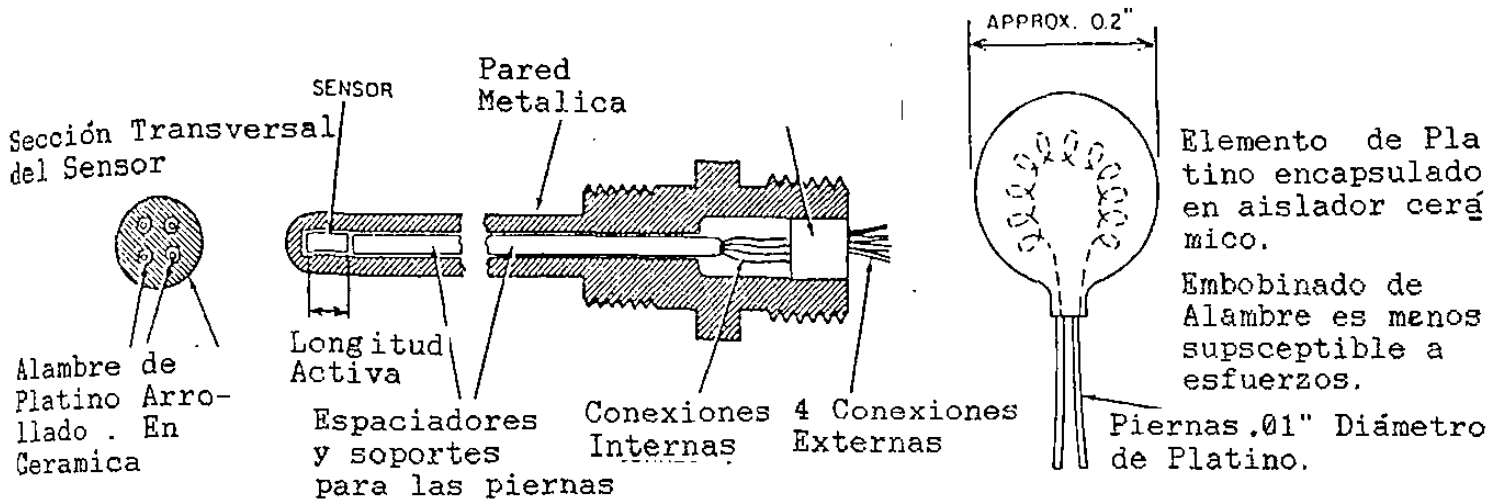
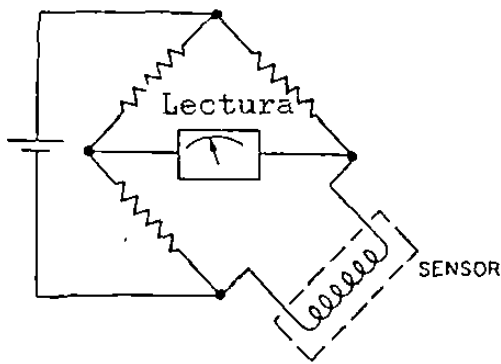
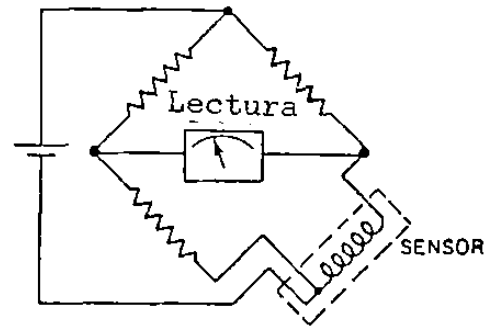


Fig.3.2.2.1.a.Sensor Tipo RTD industrial con tubo de protección.

Fig.3.2.2.1.b.Sensor Tipo RTD de superficie.



(2 Terminales)



(3 Terminales)

Fig.3.2.2.2 Puentes de Wheatstone.

Los Termómetros de Resistencia tienen las siguientes ventajas y desventajas:

Ventajas:

- 1.- En un sistema es capaz de alta exactitud.
- 2.- Se pueden medir rangos muy angostos (5°C).
- 3.- Su reproducibilidad no se afecta por cambios de temperatura.
- 4.- Su reproducibilidad a corto plazo es mejor que la de un termopar.
- 5.- No requiere compensación.
- 6.- Puede manejar fácilmente rangos con cero suprimido.
- 7.- Son disponibles en tamaños relativamente pequeños.
- 8.- Su velocidad de respuesta es rápida.

Desventajas:

- 1.- Algunos son frágiles
- 2.- Pueden ser caros.
- 3.- Algunas configuraciones son difíciles de montar.
- 4.- Su corrimiento a largo plazo excede al de un termopar.
- 5.- Su propio calentamiento puede ser problemático.

3.2.3 TERMISTORES.

Los termistores son semiconductores hechos de mezclas de oxidos puros de nickel, manganeso, cobre, cobalto, hierro, magnesio, titanio, y otros metales sinterizados a temperaturas arriba de 1000°C . Su resistencia es una función de la temperatura absoluta y tienen un alto coeficiente de temperatura. Pueden ser intercambiables lo que los habilita para usarse en puentes de Wheatstone de registradores y controladores (Fig.3.2.3.1) tomando ventaja de su tamaño pequeño y gran sensibilidad de respuesta.

Su coeficiente de temperatura es usualmente negativo, aunque puede ser positivo tambien. En algunos casos, con el coeficiente de tipo negativo, la resistencia del termistor disminuye a la razon de 5% por cada $^{\circ}\text{C}$ de elevación de temperatura. Esto los hace muy buenos para mediciones de rangos angostos pero dificiles para manejar aplicaciones de rangos amplios.

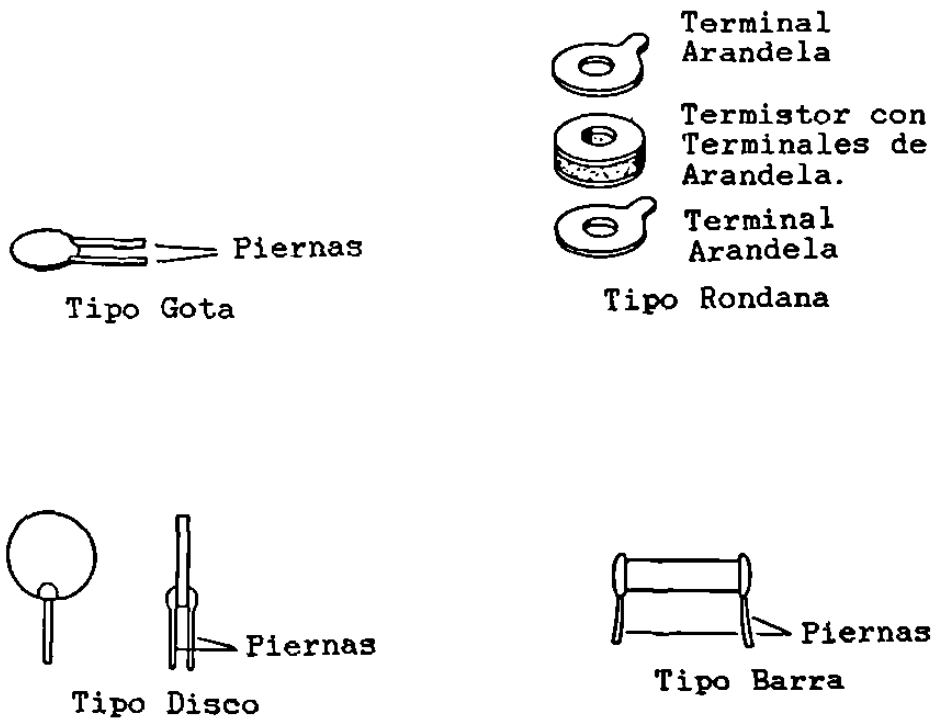


Fig. 3.2.3.1 Diferentes Tipos de Termistores.

Mediciones de Temperatura muy exactas se pueden hacer con un circuito diferencial Fig.3.2.3.4. Con dos termistores en localidades diferentes en un puente, el desbalance será determinado por la diferencia de resistencias causadas por la diferencia de temperaturas de los sensores. Con amplificadores de alta ganancia, se puede medir diferenciales de 0.001°C .

Se ha hablado principalmente de termistores de coeficiente negativo, puesto que son los mas ampliamente usados. Sin embargo, Termistores con coeficientes positivos de temperatura tambien se usan, para proteger motores de sobre calentamiento, para limitadores de corriente, para mediciones a altas temperaturas, y medidores de flujo.

Las Ventajas y Desventajas de los termistores se pueden enlistar como sigue:

Ventajas:

- 1.- Los tamaños pequeños dan una respuesta rápida.
- 2.- Con el coeficiente de temperatura negativo, el sensor exhibe una mayor sensibilidad a las caidas de temperatura.
- 3.- Muy buenos para rangos de temperatura angostos.
- 4.- La resistencia es una funcion de la temperatura absoluta,asi que la compensacion de junta fria es innecesaria.
- 5.- No se tiene problemas de polaridad.
- 6.- El 90% de los fallas se presentan en la primera semana.
- 7.- La estabilidad incrementa con la edad.
- 8.- Bajo costo.

Desventajas:

- 1.- Curva bastante no lineal de Temperatura contra resistencia.
- 2.- Intercambiar los termistores puede ser problemático.
- 3.- Estabilidad a temperaturas mayores de 320°C es problemático.
- 4.- No son adecuados para rangos amplios.
- 5.- Se les puede presentar interferencia por líneas de potencia.

CAPITULO 4.- ACONDICIONADORES DE
SEÑAL Y SUBSISTEMAS
DE ENTRADA.

4.1 TRANSMISORES DE FLUJO 73
POR PRESION DIFERENCIAL.

4.2 SUBSISTEMA DE ENTRADA PARA 78
SEÑALES DE TEMPERATURA.

4.- ACONDICIONADORES DE SEÑAL Y SUBSISTEMAS DE ENTRADA.

De los diferentes tipos de acondicionadores de señal y subsistemas de entrada que existen, se discutirán solamente un ejemplo de cada uno, estos son dispositivos que adecúan la señal generada por sensores primarios de flujo y temperatura, para poderla transmitir a distancia, sin ellos sería prácticamente imposible llevar la señal del transductor de medición, hasta el detector de error o la computadora, normalmente muy alejados de los sensores. Por esta razón estos acondicionadores de señal y subsistemas de entrada trabajan como transmisores de señal.

4.1.- TRANSMISORES DE FLUJO POR PRESION DIFERENCIAL.

Estos transmisores se usan principalmente, con transductores tipo placas de orificio y tubo venturi, y en general para sensar diferencias de presión.

Un ejemplo de estos transmisores son aquellos que usan la tecnología del alambre de resonancia, la cual proporciona una alta estabilidad y exactitud, también proporcionan un funcionamiento excelente bajo cambios en temperatura ambiente y presión estática.

Miden presiones diferenciales en rangos entre 1.2 y 180 kPa, 5 y 750 pulg de Agua, o 12 y 1800 mbar. Con cubiertas y ensambles que soportan hasta 40 MPa (6000 libras/pulg², 400 bar o kg/cm². Tienen salidas en rangos de 4-20 o 10-50 miliamp C.D.

PRINCIPIO DE OPERACION.

El principio básico de operación es tener un alambre resonando a su frecuencia natural, y convertir los cambios en presión diferencial en cambios de su frecuencia de resonancia. La aplicación de este principio se ilustra en la Fig.4.1.1.

Un alambre bajo tensión se localiza en el campo de un iman permanente. El alambre es una parte integral de un circuito oscilador el cual permite que el alambre resuene continuamente.

Un extremo del alambre se conecta al extremo cerrado de un tubo metálico el cual esta sujeto al cuerpo del sensor cerca del diafragma de alta presión. El otro extremo del alambre se conecta al diafragma de baja presión. Los resortes de tensión inicial aplican esta al alambre.

Los espacios entre los diafragmas y las placas soporte, el puerto de transferencia de fluido, y el tubo estan llenos con aceite de silicio perfluorinado. Un incremento en la presión diferencial a través del ensamble sensor ocasiona que el diafragma de alta presión se mueva hacia su placa soporte. El fluido de llenado entonces se desplaza a través del puerto de transferencia de fluido y tiende a empujar el diafragma del lado de baja presión hacia afuera de su placa soporte. Esto incrementa la tensión en el alambre, elevando por consiguiente su frecuencia de resonancia.

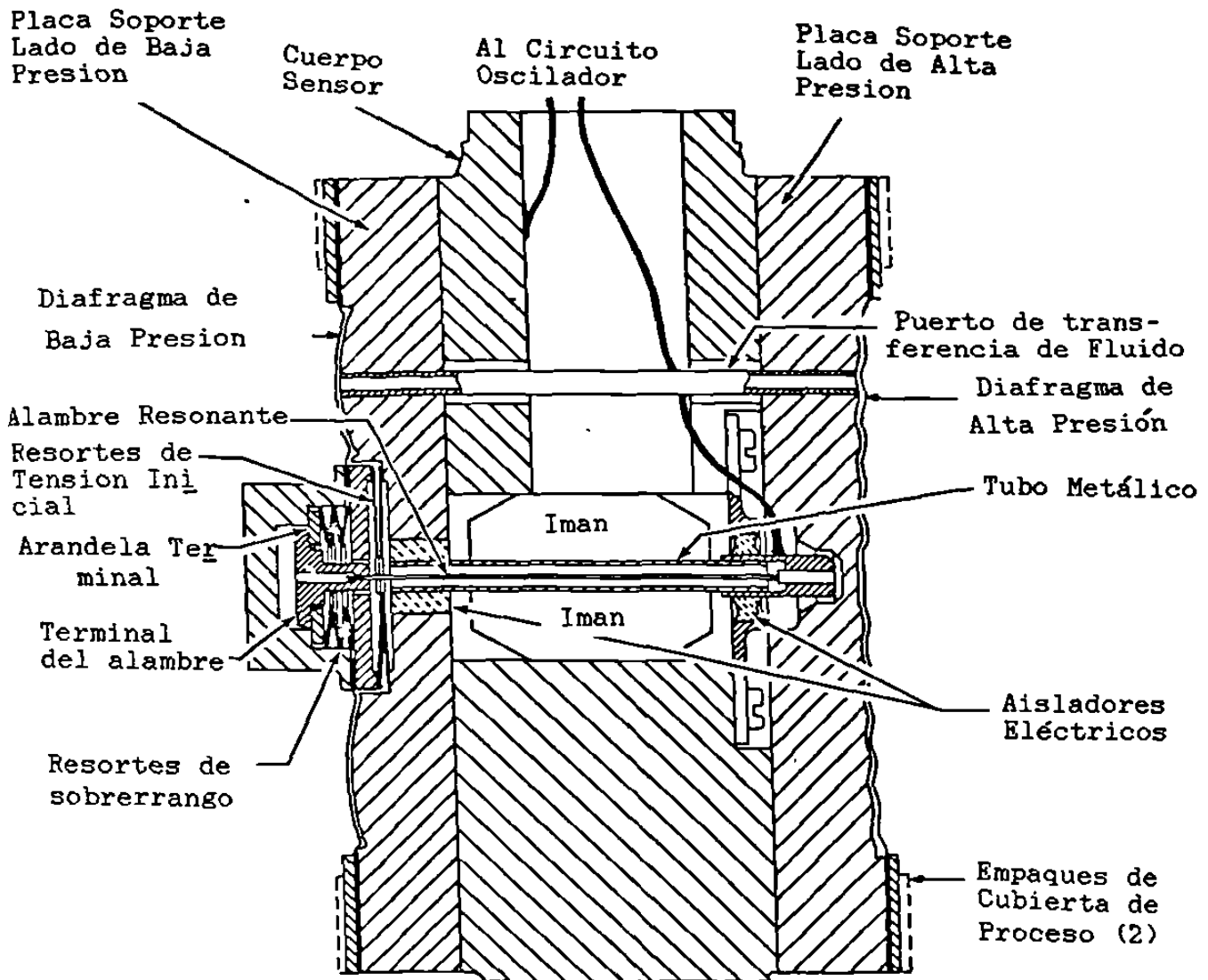


Fig. 4.1.1 Diagrama Esquemático del Sensor.

La frecuencia de resonancia de un alambre ideal es una función de la longitud, la raíz cuadrada de la tensión, y la masa del alambre.

Puesto que la longitud y la masa del alambre son constantes, se puede decir que : $f^2 \propto \text{tension}$.

El circuito electrónico efectúa una operación cuadrática sobre la frecuencia de resonancia para desarrollar una señal de salida proporcional a la presión diferencial.

Se debe notar que la tensión en el alambre resonante puede aplicarse en una sola dirección, esto es, jalando el alambre. En la práctica esto significa que el lado de alta presión del transmisor se conecta generalmente a la mayor de las dos presiones medidas. Esto es especialmente importante al tratar con aplicaciones de rango de cero elevado.

GENERACION DE LA SEÑAL DE SALIDA.

Un diagrama a cuadros de los circuitos electrónicos para las versiones de salida de corriente se muestra en la Fig.4.1.2.

Como ya se mencionó el alambre resonante es parte del circuito oscilador, y este circuito mantiene un movimiento continuo del alambre a su frecuencia de resonancia, el balance de las componentes que se muestra en la Fig 4.1.2 monitorea los cambios de frecuencia a la salida del oscilador y los convierte en una señal standard de 4 a 20 o 10-50 miliamp. de C.D.

La frecuencia de salida del circuito oscilador es la entrada a un circuito formador de pulsos. Este circuito produce dos señales complementarias las cuales se aplican en cascada a dos etapas convertidoras de frecuencia.

Cada convertidor da una salida la cual es proporcional al producto de la frecuencia aplicada y un voltaje de entrada. El voltaje de salida del segundo convertidor es proporcional al cuadrado de la frecuencia y por lo tanto es proporcional a la tensión del alambre.

Este voltaje, directamente proporcional a la presión diferencial se convierte a una señal de 4-20 mA o 10 a 50 mA c.d. en el amplificador de salida.

Un circuito regulador de voltaje se incluye también para estabilizar voltajes internos y proporcionar voltajes de referencia estables para las etapas de conversión.

Todos estos circuitos, incluyendo el oscilador, están encapsulados en un modulo sencillo, que se muestra en la Fig.4.1.3.

AJUSTES (CALIBRACION).

Varios ajustes del transmisor se muestran en la Fig.4.1.2.

CERO.

El potenciómetro de cero se ajusta externamente por medio de un desarmador, accesible quitando la cubierta.

RANGO.

El ajuste de rango se obtiene colocando un puente en una de tres posiciones, el cual es accesible quitando la cubierta del modulo electrónico. Existen tres posiciones: N (angosta), M (mediana), y W (amplia).

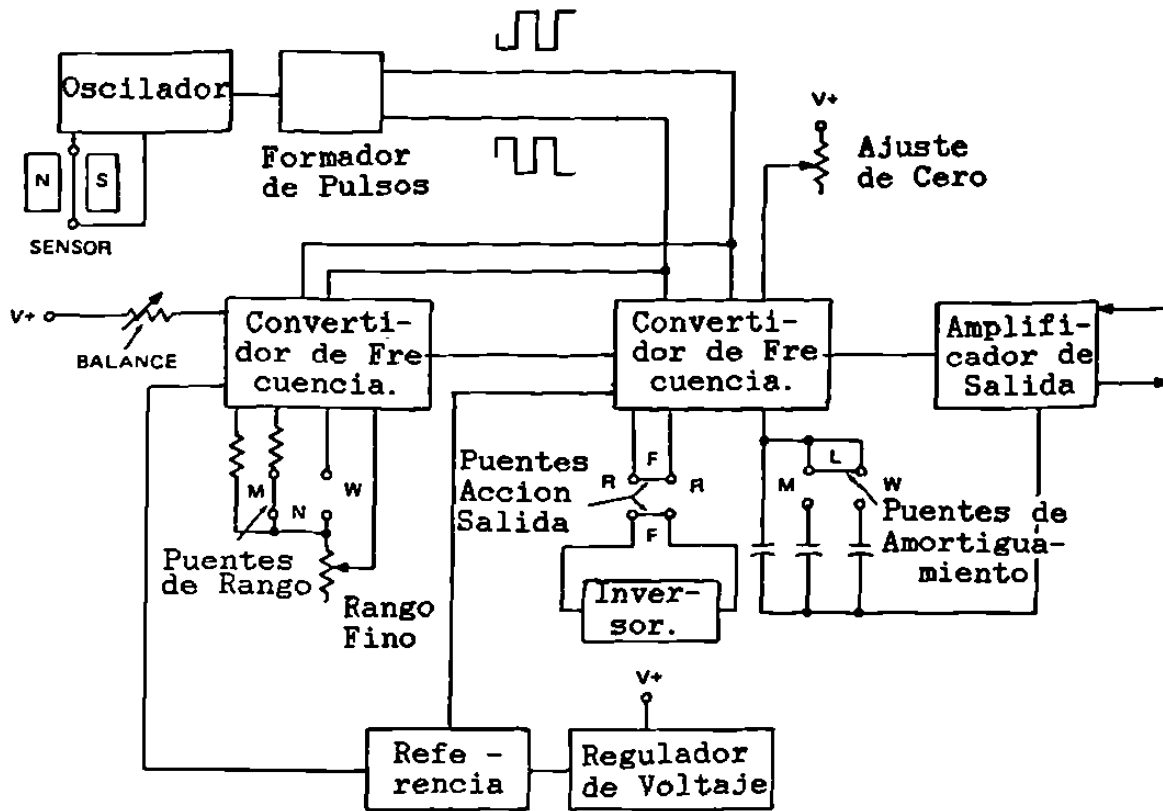


Fig. 4.1.2 Diagrama a Cuadros de los Circuitos Electrónicos del Transmisor de Presión Diferencial.

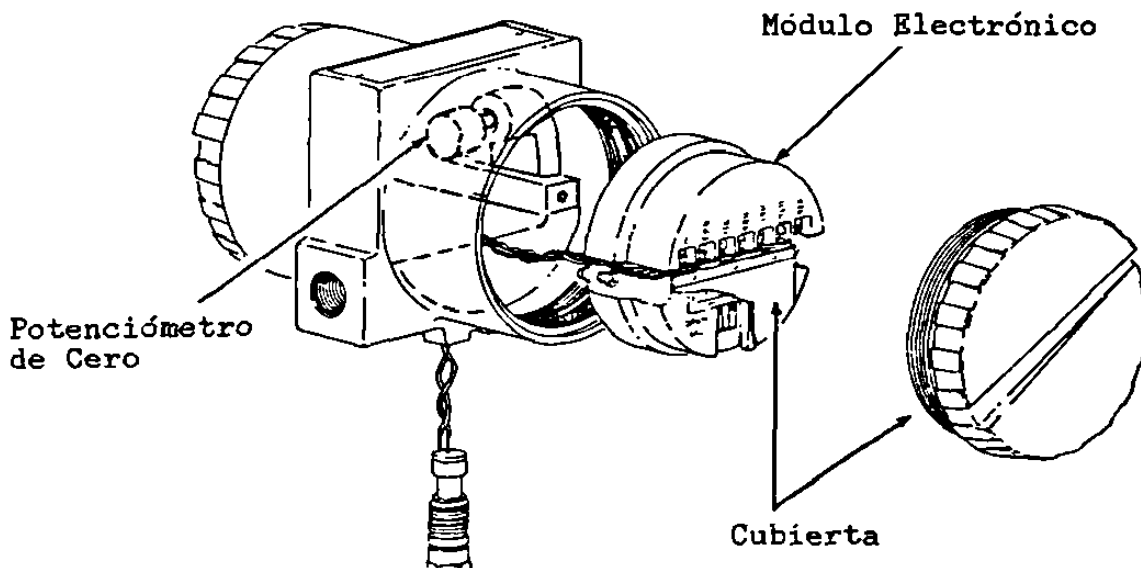


Fig. 4.1.3 Ensamble Típico del Transmisor de Flujo de Presión Diferencial.

POSICION DEL PUENTE.

La posición adecuada del puente se selecciona de acuerdo al rango que se desea calibrar.

RANGO FINO.

Este es un ajuste de desarmador y se localiza próximo al ajuste de balance en el módulo electrónico.

BALANCE.

El potenciómetro de balance, se localiza bajo las cubiertas en el módulo electrónico, se usa para compensar electrónicamente variaciones menores que ocurren de sensor. Esto habilita un óptimo ajuste basado en la linealidad del transmisor.

ACCION DE SALIDA.

Se puede seleccionar acción directa o inversa por medio de puentes, acción inversa significa que la señal de mA disminuye al aumentar la presión diferencial.

PROTECCION DE SOBERRRANGO.

El alambre resonante se protege de soberrrango en ambas direcciones. Refiriendonos a la Fig.4.1.1 la protección de soberrrango positivo se proporciona por medio de resortes, si se presentara una sobre-presión positiva, estos resortes se flexionarían para prevenir que se aplicara excesiva tensión al alambre. Para soberrrango negativo, los extremos terminales del alambre se deslizan fuera de su arandela terminal para prevenir que el alambre se coloque en compresión.

4.2.- SUBSISTEMA DE ENTRADA PARA SEÑALES DE TEMPERATURA.

Existen en el mercado una gran variedad de transmisores de temperatura, el ejemplo que se describirá a continuación, es una interfase de proceso para bajo nivel de energía, conocido por sus iniciales en ingles como LEPIU (Low Energy Process Interfase Unit). Esta unidad es todo un subsistema de entrada para acondicionar la señal de termopares y RTD'S maneja hasta 254 entradas que seran multiplexadas y transmitidas a distancia.

CARACTERISTICAS DE OPERACION.

Este sistema transmisor acondicionador (LEPIU) es de construcción modular, consta de un ensamble común de tarjetas por sus iniciales en ingles CCFA (Common Card File Assembly) y hasta 16 cajas multiplexoras (ver Fig.4.2.1). El CCFA se comunica y proporciona potencia de operación a cada caja remota, via cables dedicados hasta una distancia de 1525 metros.

Cada caja multiplexora contiene una tarjeta de entrada para manejar hasta 16 termopares o RTD'S, una tarjeta con relevación para multiplexar las señales (reed relays) y lógica CMOS.

La unidad de Interfase de Proceso (PIU) se controla por medio de microprocesador (μ P). El programa del μ P y las tablas de constantes se almacenan en memorias PROM. Todos los datos variables se almacenan en memoria RAM. Todas las funciones de computación y control involucradas en el rastreo, selección de ganancia de amplificación, y conversión se efectúa por el μ P. La PIU esta diseñada para una expansión sencilla desde 1 hasta 16 cajas remotas las que acomodarán desde 1 hasta 16 entradas. El lazo de comunicación entre la unidad central CCFA y las cajas remotas (Multiplexoras) es por medio de bits en serie. La longitud de palabra es de 15 bits y la razon de bit es 1 kbps.

La Unidad de Interfase de Proceso (PIU) tambien:

- Amplifica las entradas cuando se requiera a una ganancia óptima.
- Convierte a valor digital y efectúa verificación de rango.
- Prueba termopares abiertos, y corrige su lectura por compensación de junta fria.
- Lineariza Termopares, RTD'S, y Radiómetros (Pirómetros de radiación Infrarroja).
- Normaliza valores digitales (conteos) a porcentaje (%) de rango de operación.

Reporta valores actualizados de puntos seleccionados sobre demanda (Lectura) de otros dispositivos sobre el transportador de datos.

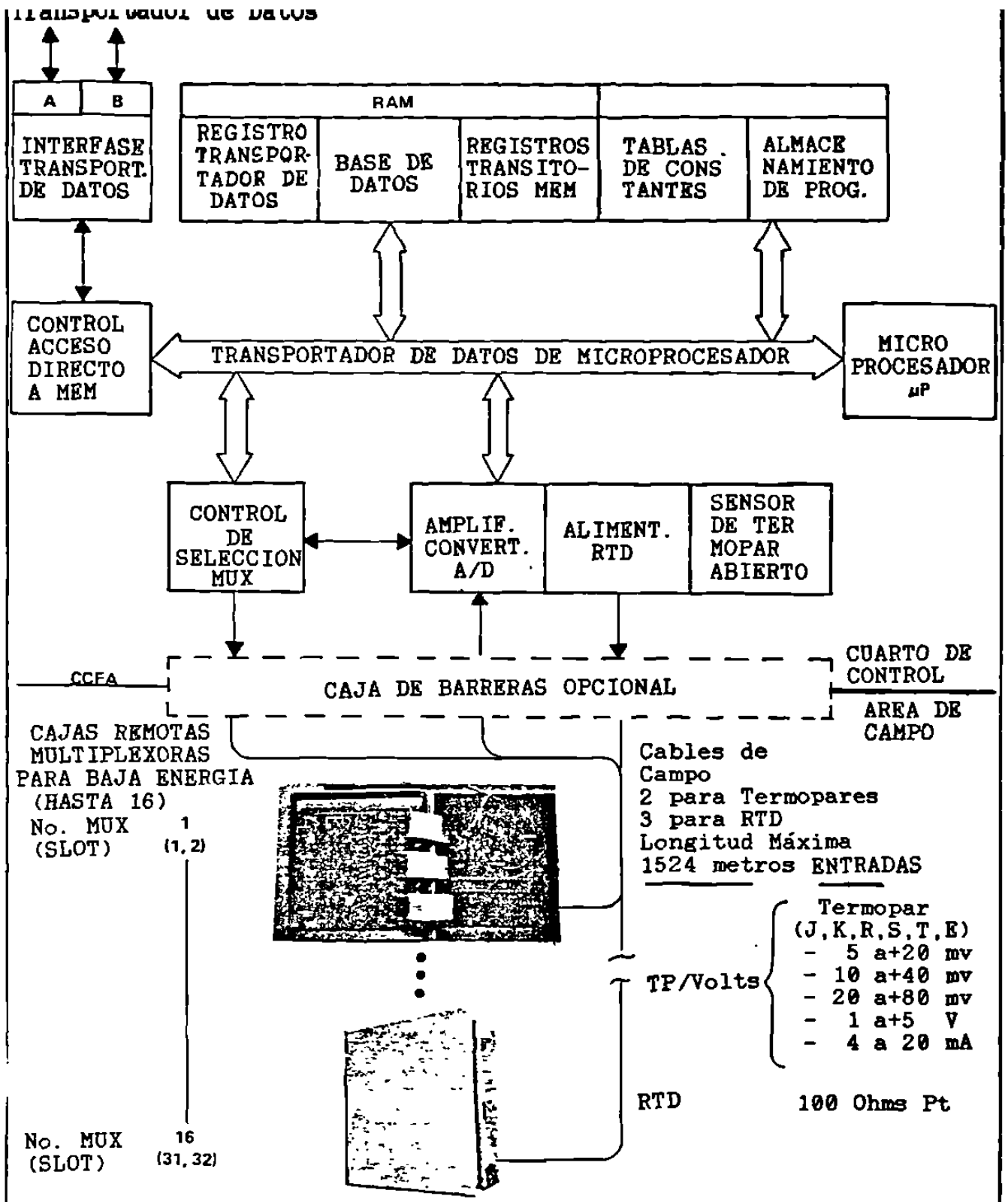


Fig. 4.2.1 CONSTRUCCION MODULAR DE LA UNIDAD DE INTERFASE DE PROCESO DE BAJA ENERGIA

Efectúa autodiagnosticos y revisa estados, errores y alarmas. La PIU responde a palabras de comandos y de datos, el lazo de comunicación digital entre esta y otros dispositivos en el transportador de datos es un cable coaxial en el que se transmiten los datos en serie (bits serie).

Las palabras de comando contienen información de la operación a efectuarse, la identidad del dispositivo (entrada determinada de una caja multiplexora específica), identidad del dispositivo que requiere la lectura, y la dirección de la palabra de memoria, dentro de la base de datos del PIU que identifica la función o tabla de memoria involucrada. El trafico de datos en el transportador se monitorea y se controla por la computadora.

OPERACION.

Todos los circuitos funcionales (Lógicos y memoria) se montan en tarjetas. La Fig.4.2.2 muestra el arreglo de tarjetas para ambos, CCFA y la caja seleccionadora (MUX Multiplexora de campo), la Fig.4.2.3 muestra un diagrama a cuadros de la LEPIU el cual define la función de cada tipo de tarjeta. El Transportador de datos es un cable coaxial, de hasta 6000 metros, el cual conecta la PIU con la computadora.

Una breve descripción de cada tarjeta, comenzando con la CCFA, se da a continuación.

REGULADOR DE POTENCIA DE CCFA.

Convierte el voltaje nominal de 24 volts C.D. del suministro de potencia a los voltajes regulados requeridos por las otras tarjetas en el CCFA. También proporciona la señal de falla de potencia al microprocesador y una señal de restablecimiento a todas las tarjetas del CCFA para asegurar la inicialización al encendido de potencia.

INTERFASE PARA TRANSPORTADOR DE DATOS.

Efectúa la conversión entre las señales paralelas TTL usadas en la PIU y los datos serie transmitidos en el Transportador de Datos (Cable coaxial de 75 Ohms). Utiliza acceso directo a memoria (DMA) para pasar datos "a" y "de" la memoria a través de Registros RAM dedicados.

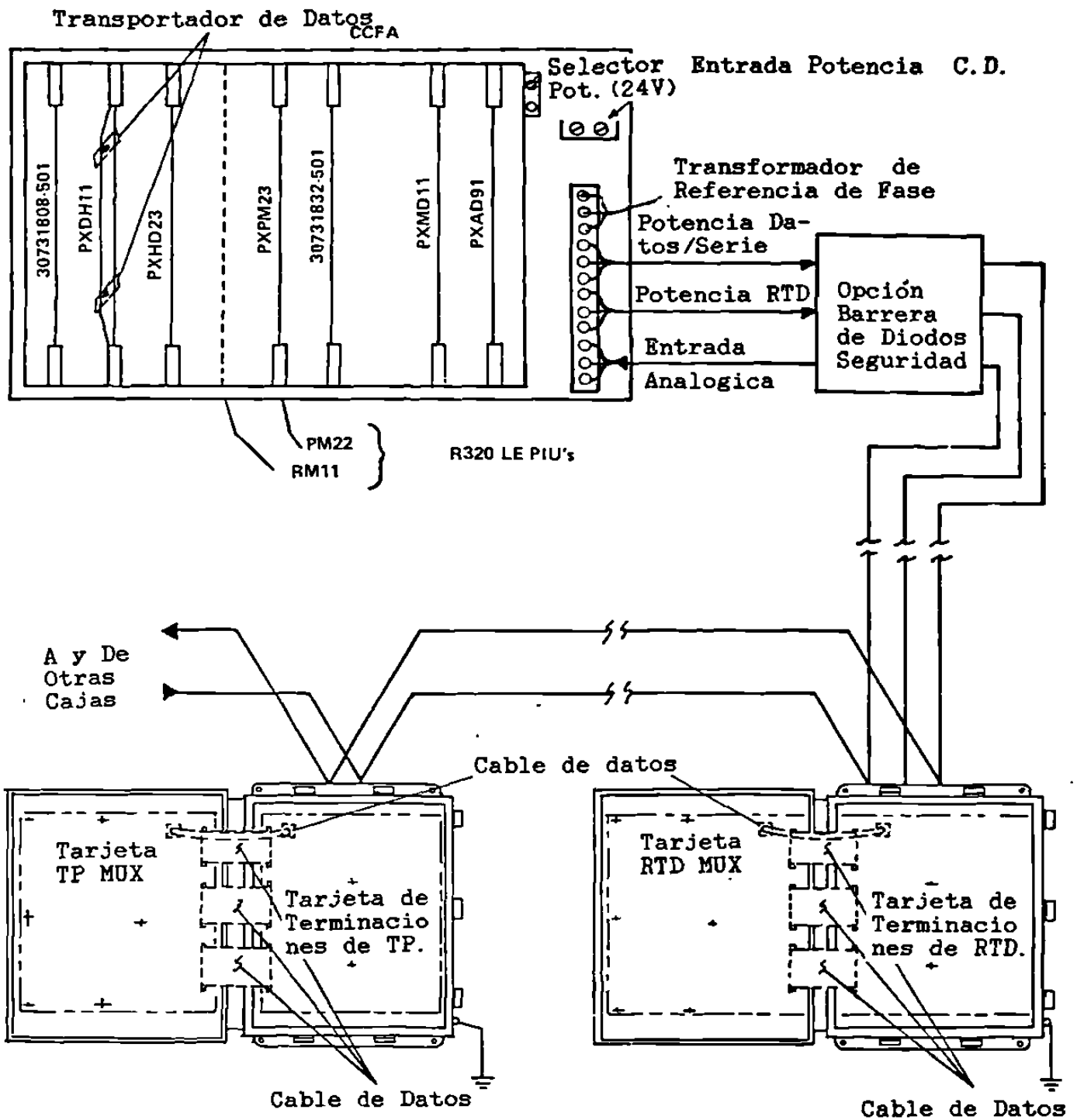


Fig 4.2.2 COMPONENTES DE LA UNIDAD DE INTERFASE DE PROCESO DE BAJA ENERGIA.

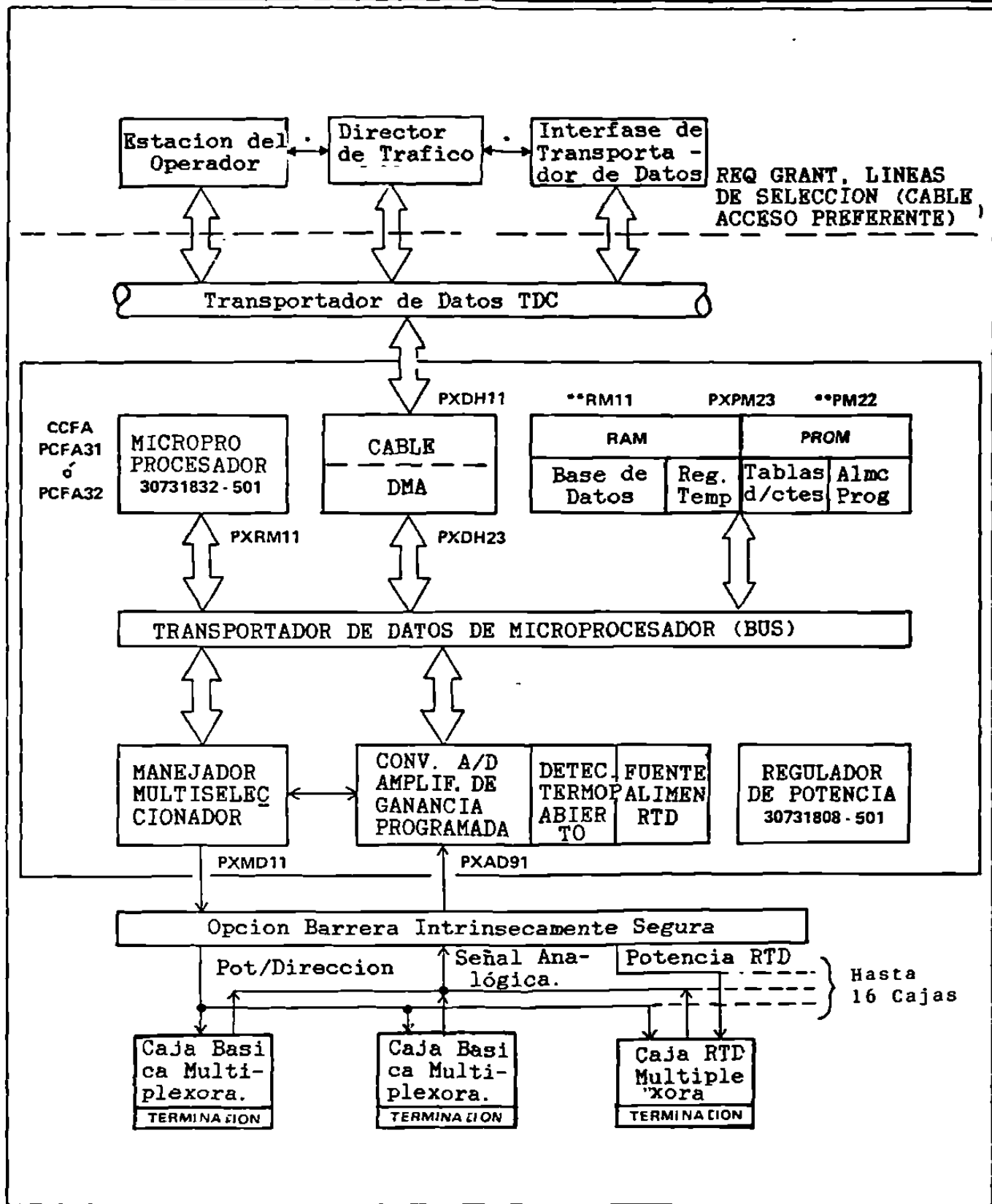


Fig 4.2.3 DIAGRAMA A CUADROS DE LA UNIDAD DE INTERFASE DE PROCESO DE BAJA ENERGIA.

TARJETA DE MEMORIA (PROM/RAM).

Contiene ambos tipos de memoria de acceso aleatorio (RAM) y programable de sólo lectura (PROM). La base de datos se acomoda en 64 palabras de RAM por espacio (slot). Se consideran dos espacios (slots) para cada caja (Seleccionadora MUX), las entradas análogas requieren 8 palabras por punto.

El comando de lectura accesa una palabra sencilla de la información en la base de datos para transferencia al dispositivo especificado en el campo de dirección fuente.

El comando escritura precede al dato que va a ser almacenado en RAM. El dato se transfiere en palabras sencillas o en bloques de hasta 64 palabras.

El PROM se utiliza para almacenar las instrucciones del microprocesador y constantes usadas en ciertos algoritmos de procesos, tales como tablas para construcción de curvas de calibración de sensores térmicos.

El diagrama a cuadros de la Fig. 4.2.4 muestra el arreglo de esta tarjeta. El dato se lee de la memoria y se carga directamente en el registro de dirección de la tarjeta microprocesador, durante la instrucción de dirección directa. La tarjeta incluye 16 indicadores (diodos emisores de luz), los cuales muestran mensajes de estados y error del microprocesador y la base de datos.

MICROPROCESADOR.

La tarjeta Microprocesador efectúa los cálculos y el control involucrados en interfases con procesos. Mantiene el control total de el convertidor A/D y las tarjetas seleccionadoras (Multiplexoras).

Como se muestra en el diagrama a cuadros de la Fig. 4.2.5, la tarjeta se configura alrededor del circuito MOS LSI (CP1600).

La generación de pulsos de reloj proporciona las señales de tiempo básicas para el CPU. El sistema de reloj también proporciona señales para sincronía fuera del microprocesador, para uso general. Las 16 líneas sensoras externas se están muestreando periódicamente para verificar estados de líneas. Un indicador (diodo emisor de luz) se incluye en el microprocesador, como una indicación de que está trabajando, si una condición de bloqueo ocurriera, el diodo se apagaría. El procesador se podría reanunciar con un comando de CPU de reanunciar, en el transportador de datos.

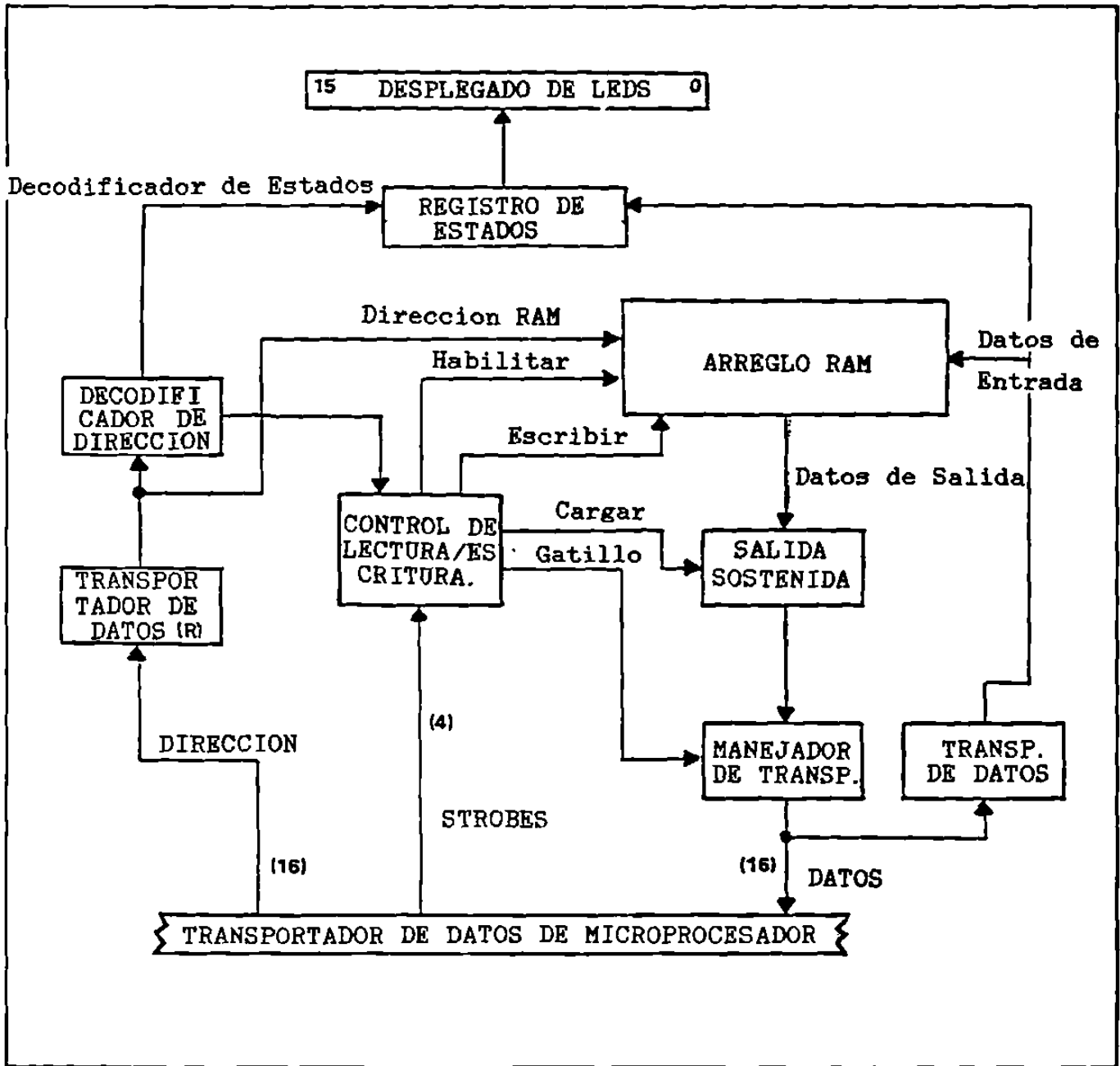


Fig.4.2.4 Diagrama a cuadros de la Tarjeta PROM/RAM .

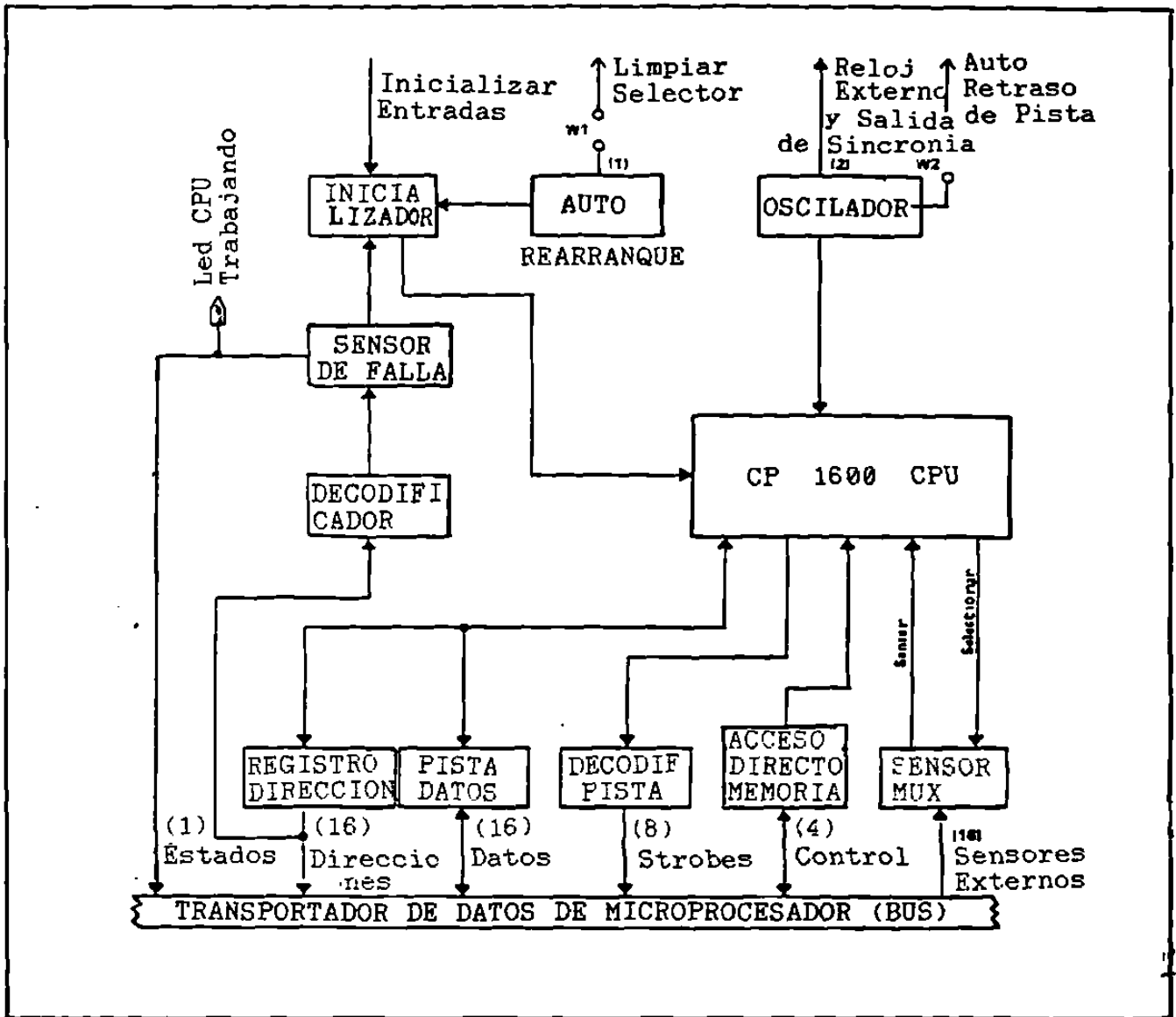


Fig. 4.2.5 Diagrama a cuadros de la Tarjeta Microprocesador

TARJETA MANEJADORA DE MUESTREO (MULTIPLEXER, MUX DRIVER)

Esta tarjeta interconecta el Microprocesador, el Convertidor Analógico a Digital (A/D), y las cajas seleccionadoras (Multiplexoras) (ver Fig.4.2.3). Cuando recibe un requerimiento de barrido, escribe la dirección en el transportador de datos del Microprocesador. La dirección del punto se envía en serie a la caja multiplexora. La tarjeta de muestreo (Mux Driver), monitorea el flujo de corriente de salida para asegurarse que el relevador de un punto responde en una de las cajas. Cuando no esta transmitiendo la dirección de un punto, esta tarjeta suministra potencia de alimentación a las cajas de muestreo sobre sus líneas de dirección.

CONVERTIDOR A/D.

Descarga la señal de la línea justo antes de una conversión y efectúa una verificación de tierras abiertas. Amplifica el voltaje de entrada a una ganancia especificada por el microprocesador y la convierte a un conteo digital. Durante la conversión se verifica que no exista señal excesiva. El convertidor A/D tiene una fuente de corriente, de potencia constante para sensores RTD y otra fuente de corriente que se usa para probar entradas de contactos y termopares abiertos.

SELECCION DE PUNTO.

Salida serie.

La Fig. 4.2.6 es un diagrama a cuadros simplificado de los circuitos de la Tarjeta de Salida Serie Manejadora de Muestreo (Multiplexer). Una palabra de requerimiento de barrido luce como:

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
X	X	O	P	C	A	J	A	P	U	N	T	O	C	Z	G

Codigo de operación

10 = Lectura de punto

11 = Lectura Especial

Dirección de la caja Seleccionadora (Multiplexer)

Dirección del Punto

Encender Fuente de Corriente

ZCHK (Corta entrada al convertidor para diagnostico Auto Prueba)

Rango de Ganancia

00 = 5V

01 = 80 mV

10 = 40 mV

11 = 20 mV

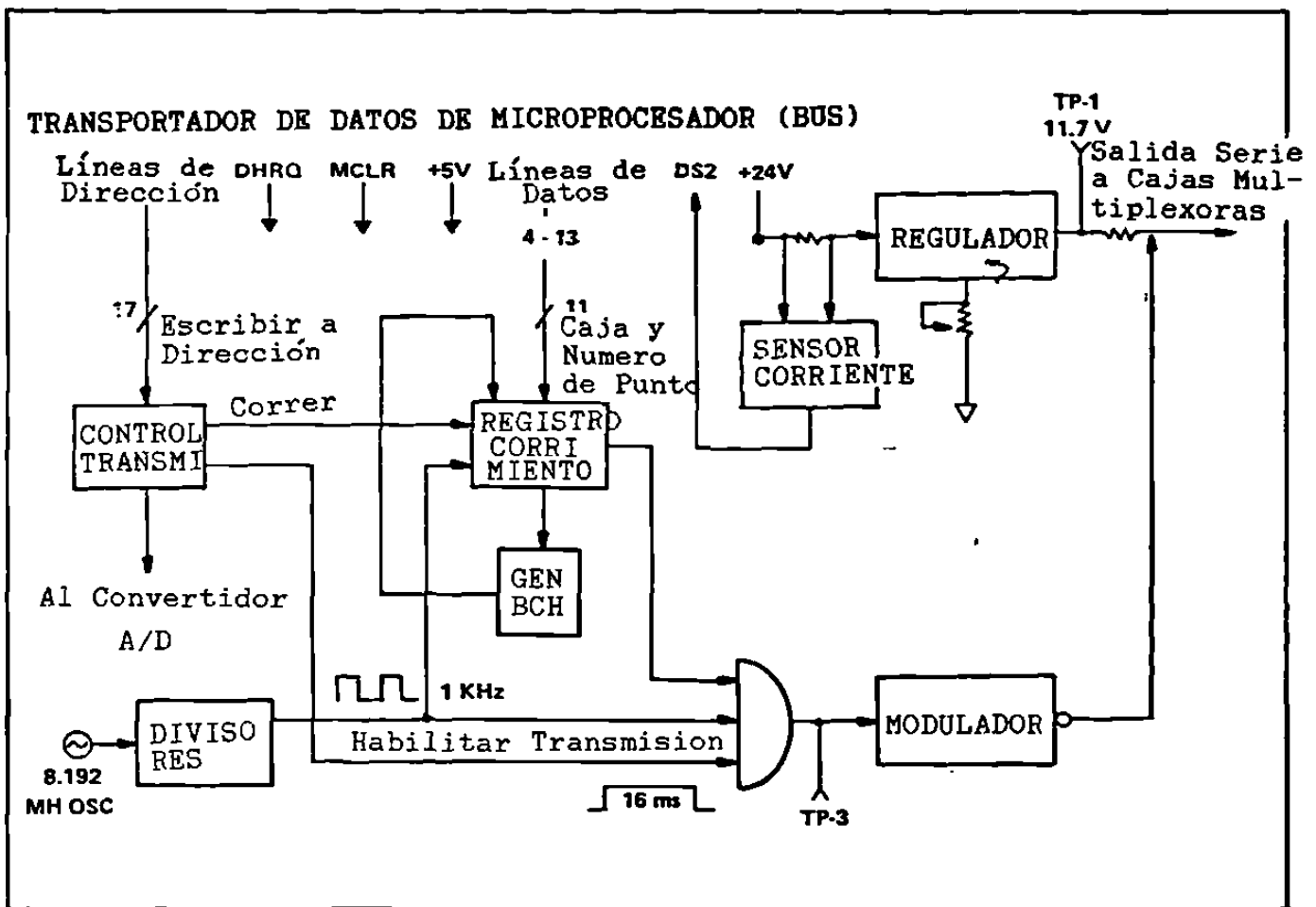


Fig.4.2.6 Salida Serie.

Los bits de datos 4-13 del transportador del Microprocesador se cargan en un registro de corrimiento con un bit de arranque. Estos datos especifican la dirección de la caja seleccionadora (Multiplexer) (MUX), dirección del punto y código de función. El código de función especifica que grupo de relevadores van a ser direccionados, puntos de entrada del usuario o relevadores de funciones especiales. El circuito de control de transmisión habilita al registro de corrimiento y pulsos de reloj de 1 KHz empiezan a mover datos en serie al modulador. El voltaje de 24 volts se regula bajando a 11.7 volts c.d. Cuando se tiene modulación de datos serie, un bit cero lleva estos 11.7 v a tierra durante 0.5 mseg de tiempo. La potencia permanece alta durante 1 mseg cuando se envía un bit uno.

Diez y seis milisegundos despues del requerimiento de barrido, todos los datos serie han sido transmitidos a una caja MUX, donde la potencia se aplica al relevador especifico. La

carga del relevador puede llevar la línea de salida serie tan bajo como 4.5 volts mientras esté energizado, cuando el relevador se suelta aproximadamente 30 ms después, el circuito sensor de carga prueba que exista un cambio de corriente. Si un relevador falla de energizar o de soltar, no se presentará cambio de corriente. El microprocesador puede sensar esta situación y tomar acción.

OPERACION DEL PAQUETE MUESTREADOR (MULTIPLEXER).

La Fig.4.2.7 es un diagrama a cuadros simplificado de una caja MUX para termopares, la Fig 4.2.8 muestra un diagrama similar para una caja MUX de RTD'S. Ambas son muy similares excepto que la caja para RTD'S no tiene referencia de junta fría y utiliza contactos extra para la aplicación de potencia a RTD'S.

Todas las cajas MUX en un PIU reciben el mensaje, pero están en estado de alta impedancia y solo una no lo está y es aquella que tiene la dirección adecuada para responder.

El bit de arranque prepara la lógica para el resto del mensaje y sincroniza el circuito de control. Quince pulsos de 1 mseg mueven el mensaje en un registro de corrimiento y generan sus cuatro bits de código. El circuito de control inhibe corrimiento adicional por los siguientes 30 mseg. Si esta es la caja MUX seleccionada y el código de prueba coincide con el código regenerado, uno de los dos decodificadores se habilita. La función del código de dos bits es seleccionar un punto de entrada por relevación o una función especial. Los relevadores de funciones especiales son:

- Un punto en corto
- Relevadores para desconectar cajas
- Punto de Referencia de Junta Fría (Caja Básica)

La salida del registro de corrimiento se decodifica por el decodificador que selecciona la potencia que se aplica a un relevador durante los siguientes 30 mseg. Antes de que cualquier punto de relevador se pueda usar, los relevadores de desconexión deben cerrarse. Estos son de enclave magnético y se mandan cerrar en el momento de arranque. Si una caja dejara de trabajar adecuadamente, el microprocesador puede abrir sus relevadores de desconexión y llevar la caja fuera de servicio.

Cuando se cierra el relevador de cualquier punto, lleva el voltaje de entrada de proceso a las terminales de salida en TB2. Un par de alambres torcidos y blindados llevan la señal de TB2 al convertidor analógico a digital en el ensamble común de tarjetas (CCFA), todas las señales de salida de las cajas seleccionadoras (MUX) se conectan en paralelo.

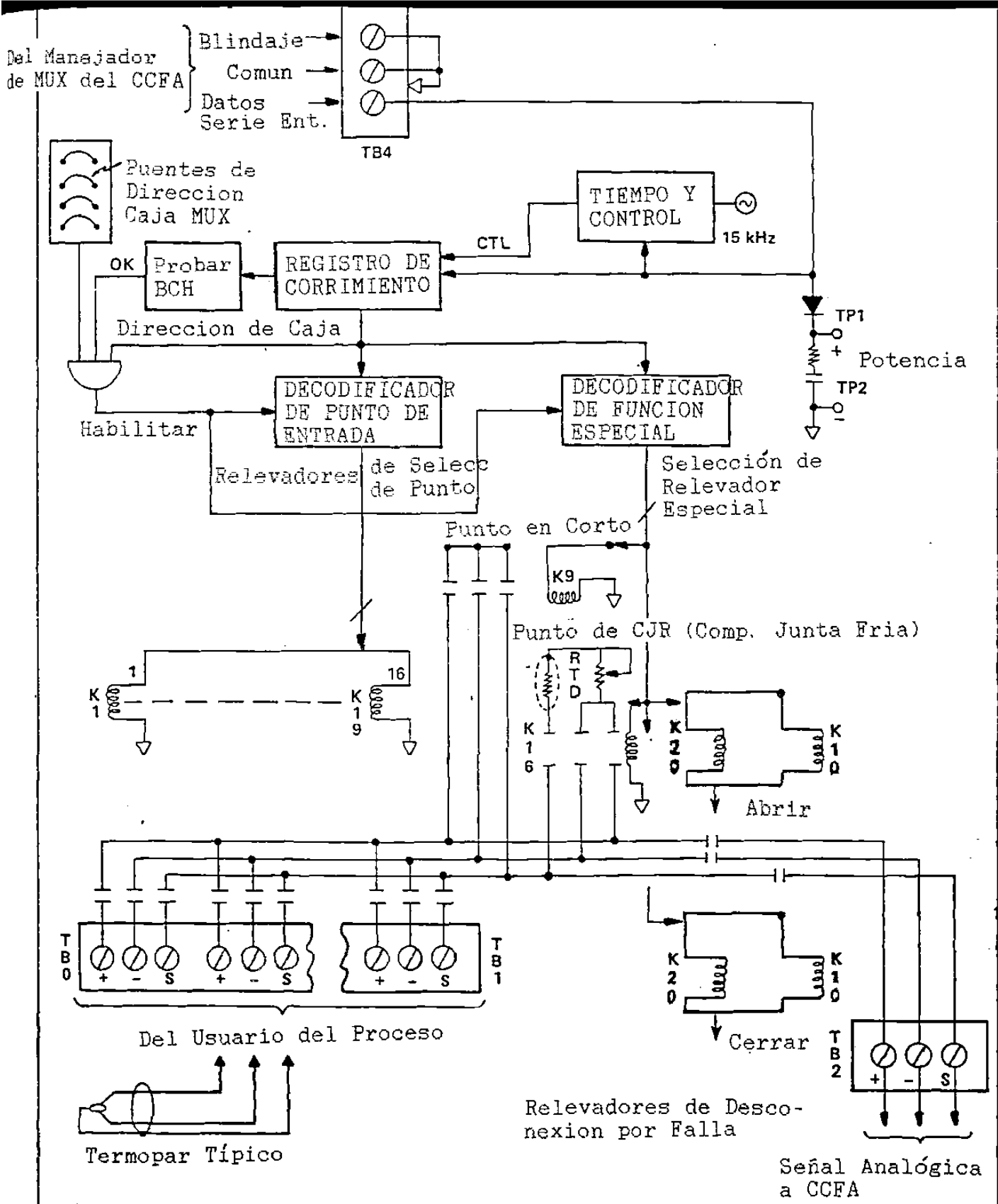


Fig. 4.2.7 Caja Seleccionadora (Multiplexer) para Termopares.

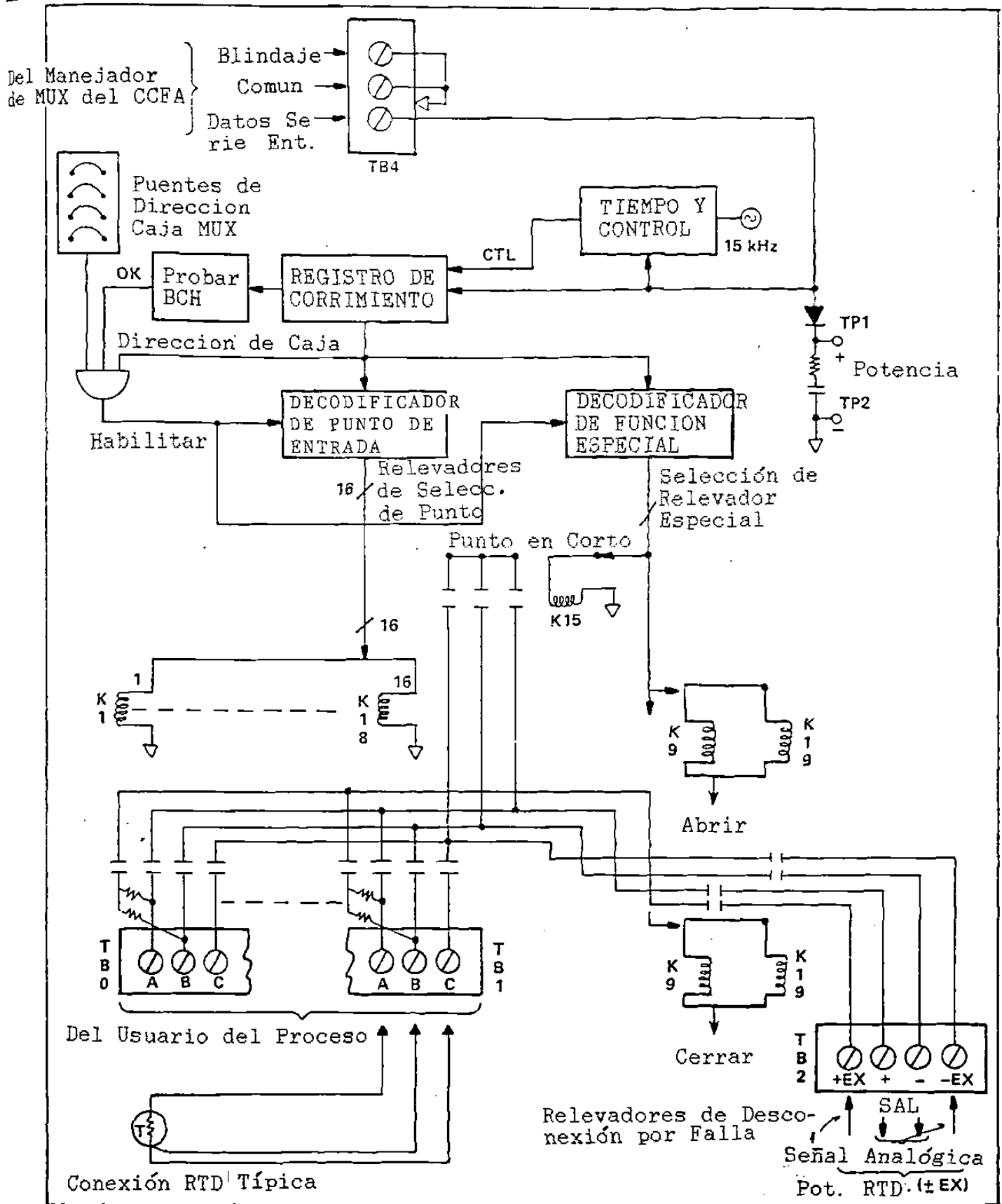


Fig. 4.2.8 Caja Seleccionadora (Multiplexer) para RTD'S

CAPITULO 5.- ACTUADORES.

5.1 VALVULAS DE CONTROL. 91

5.2 CALCULO DEL TAMAÑO 97
DE VALVULAS.

5.3 CAIDA DE PRESION A 100
TRAVES DE LAS VALVULAS.

5.- ACTUADORES.

Un actuador es el dispositivo final de control, cuya actuación en base a la variable manipulada, hace que se modifique el medio ambiente de la Planta, obligando así a la variable controlada a llegar a su valor de control. Esto es que la variable controlada iguale el punto de referencia o ajuste ($PV=SP$). En el caso de las válvulas de control, ellas ajustan el fluido controlado, por la modificación de la sección transversal del área de flujo, lo cual se logra variando su posición o carrera entre el 0 y 100%.

5.1 VALVULAS DE CONTROL.

El lazo de control se complementa con una válvula de control adecuadamente seleccionada para ser utilizada como actuador. Se tiene disponible una amplia variedad de modelos, tamaños y diseños entre los que destacan las válvulas de Igual Porcentaje, las Lineales, de Aguja, las Saunders y las de Mariposa entre otras.

Básicamente la válvula de control consta de dos componentes principales, el posicionador de vástago que puede ser de 3 Tipos: Eléctrico, Hidráulico y Neumático. Y el subensamble de la válvula. El posicionador de diafragma debe posicionar la válvula internamente de una forma rápida y precisa para responder con cambio de posición a cualquier cambio de la presión neumática que le llegue. El diafragma y el resorte se diseñan para dar la carrera completa de la válvula, para el rango especificado de presión de entrada a ella. La mayoría de los ajustes de resortes, se hacen para que la válvula opere completamente sobre un cambio de señal neumática de 3 a 15 psig o 0.2 a 1 Kg/cm². Para rango completo de carrera.

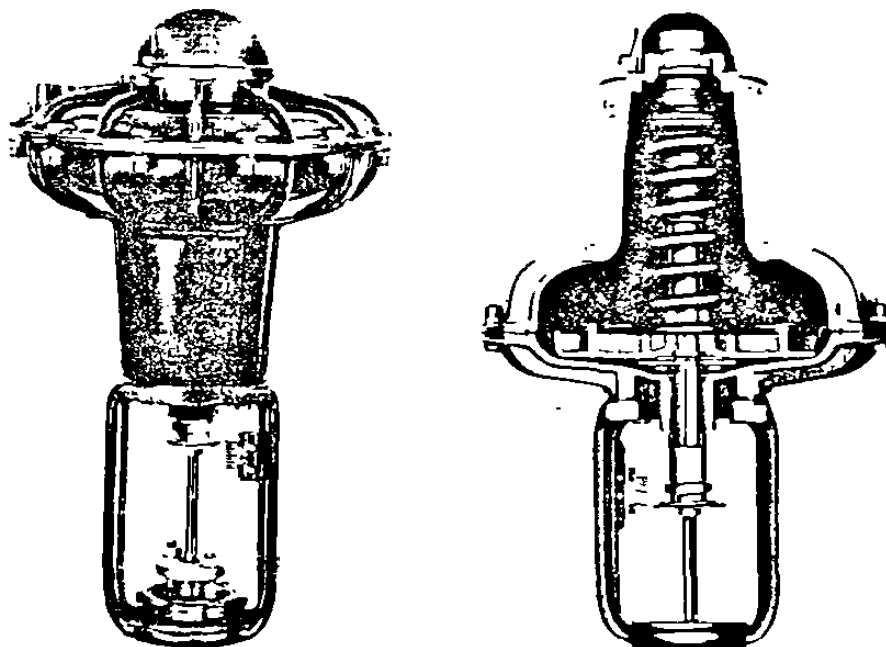


Fig. 5.1 Válvulas Neumáticas Reversibles con Actuadores Neumáticos.

Las válvulas pueden ser de aire para abrir, o aire para cerrar.

Como resultado de años de experiencia de aplicación ha sido casi universalmente aceptado que los procesos que necesitan rango de control proporcional deben tener válvulas de control con dos características de respuesta.

- 1.- Características de Igual Porcentaje o Lineal.
- 2.-. Amplia Rangeabilidad.

VALVULA DE IGUAL PORCENTAJE.

Esta válvula esta diseñada de tal forma que sus aberturas - producirán iguales cambios de porcentaje en flujo con respecto al flujo anterior para iguales cambios de carrera de la válvula. Para una válvula ideal la sensibilidad o ganancia sería :

$$dF/dX=kF ; \Delta F/ \Delta X=kF \text{ si } k=4.8$$

y consideramos incrementos del 10% de Carrera $\Delta X=0.1$

$$\Delta F= k(\Delta X)F = 4.8 \times .1 \times F=.48 \text{ (Flujo)}$$

Cuando las características de diseño se grafican en coordenadas semilogarítmicas la relación flujo carrera produce una línea recta como se aprecia en la fig. 5.3. En esta fig.se aprecia que por cada incremento de 10% en carrera de la válvula el flujo a través de ella se incrementa un 48% del flujo previo.

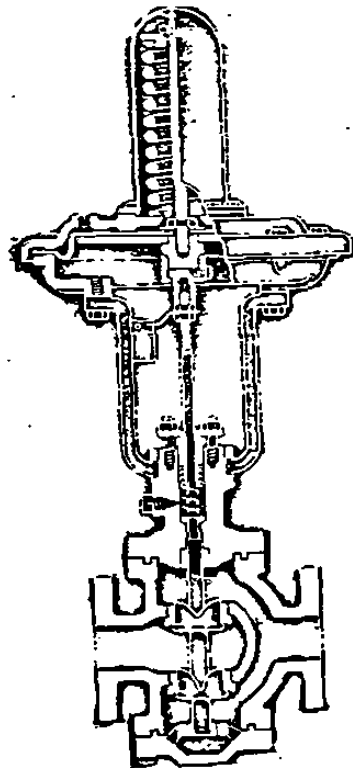


Fig. 5.2 (a)
Válvula de --
Igual Porcentaje.

Porcentaje de Carrera	Porcentaje de Flujo
10	2.93
20	4.34
30	6.42
40	9.51
50	14.08
60	20.84
70	30.84
80	45.65
90	67.56
100	100%



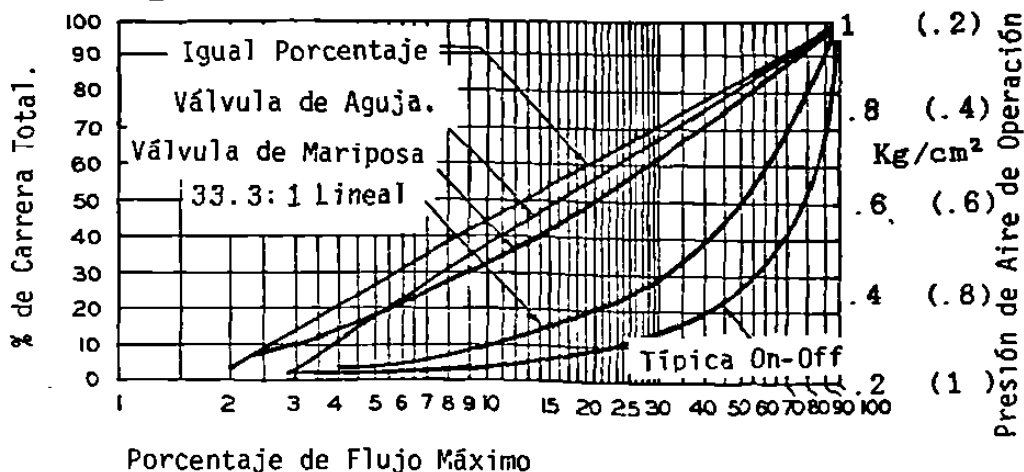
Fig.5.2 (b) Plug Parabólico para Válv. Lineal

El diseño de la válvula de Igual Porcentaje permite controlar el flujo de 2 a 100% de capacidad, de esta forma se tiene una rangeabilidad de 50:1.

VALVULA LINEAL.

Esta válvula fue diseñada para que todas las aberturas de la válvula produzcan iguales cambios en flujo para iguales cambios de carrera, bajo condiciones de caída de presión constante. Cuando su característica se grafica en coordenadas lineales, la relación flujo-carrera produce una línea recta, como se observa en la Fig. 5.4. Por ejemplo cualquier cambio en la carrera del 10% produciría un cambio de flujo de 10% del total.

El diseño de la válvula lineal permite control de flujo del 3 al 100% de la capacidad, con la característica de línea recta, una rangeabilidad de 33.3:1.



Porcentaje de Flujo Máximo
Fig. 5.3 Relación Flujo-Carrera Graf. Semi Log.

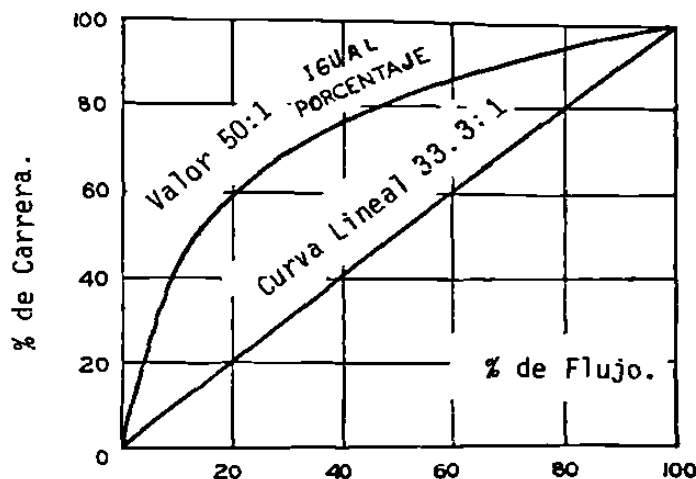


Fig. 5.4 Relación Flujo-Carrera. Graf. Lineal.

La Fig. 5.5 muestra una válvula proporcional, tipo jaula con actuador arreglado de acción aire para abrir. El resorte en el actuador del diafragma cerrará la válvula si la presión del aire fallara. La acción de la válvula se especifica de acuerdo a las condiciones del proceso, esto es aire para abrir o aire para cerrar para salvaguardar el equipo, y prevenir una falla mayor del proceso en el caso de perdida de la presión de - aire de instrumentos. Las válvulas proporcionales Tipo Globo se obtienen en tamaño standard - de 12.5 a 150 mm. Los materiales estandares para las válvulas son hierro, bronce, acero, etc. El material de los asientos de la válvula normalmente se pide en acero inoxidable aunque puede ser del mismo material de la válvula.

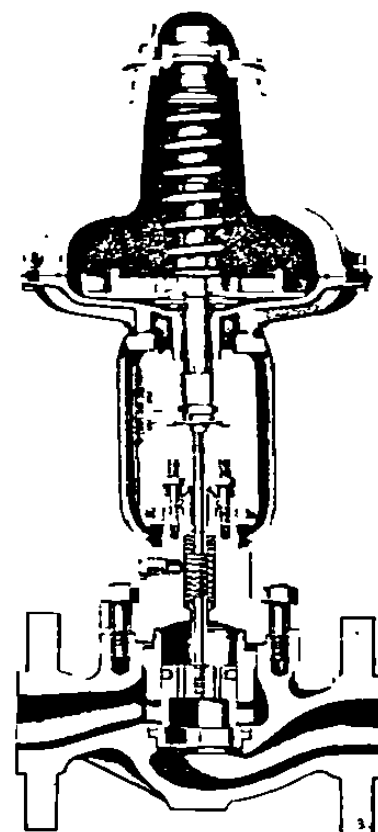


Fig. 5.5 Válvula Tipo Proporcional

VALVULA TIPO AGUJA.

La Fig. 5.6 muestra una válvula de aguja con actuador reversible. Las válvulas de este diseño son usadas ampliamente en aplicaciones de baja razón de flujo, y que se requiera mucha exactitud en el manejo de fluido, donde los tamaños efectivos requeridos son pequeños, como por ejemplo son de 12.5, 19, y 25 mm.

Esta válvula puede tener conexiones roscadas y manejar Cv desde .0026 hasta 6.25 a condiciones de operación de 0 a 230 °C y 20 MPa, su posicionador de diafragma puede operar con aire para abrir o aire para cerrar, el rango de la señal actuadora puede ser 3 a 15 o 75 a 300 mm, sus características de flujo son de igual porcentaje, el material del cuerpo de la válvula puede ser acero al carbón o acero inoxidable 316.

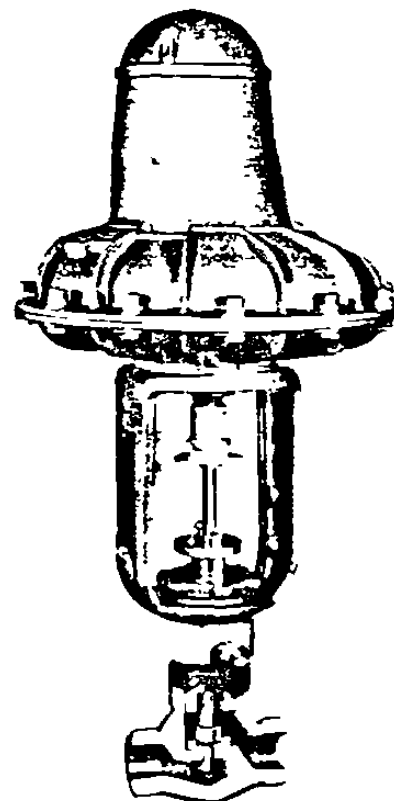


Fig. 5.6 Válvula Tipo Aguja

VALVULA SAUNDERS.

Este tipo de válvula es bastante adecuada para controlar substancias tales como, desechos químicos, tinturas y ácidos.

Se dispone de una amplia variedad de materiales para los cuerpos y diafragmas que resistan efectivamente la corrosión.

Estas válvulas se han usado en plantas químicas ya que reducen la necesidad de usar materiales de aleaciones caras. El cuerpo tiene baja resistencia al flujo, e inhibe el estancamiento de solidos en suspensión.

Su mayor deficiencia ha sido, su inhabilidad de ofrecer una buena característica regulatoria, especialmente en rangos altos y bajos de la curva de flujo.

Es deseable tener estas válvulas operando a cerca del 60% de su carrera de control. Si la válvula es muy grande el diafragma operará muy cercano al asiento con la posibilidad de estancar materiales suspendidos, estas -- válvulas proporcionan solo rangeabilidad limitada. Estan disponibles en tamaño de 12.5 a 300 mm generalmente las de 1/2 a 6" son operadas por actuadores de diafragma, mientras que las de 3 a 12" pueden utilizar cilindros posicionadores de aire. Son capaces de controlar flujos a temperaturas de de 100 °C y presiones de 10 Kg/cm².

La única parte de la válvula sujeta a reemplazo ocasional es el diafragma . Se fabrican en acero al carbon, bronce, acero inoxidable, etc. Sus conexiones pueden ser roscadas o de brida, y el material de sus diafragmas , usualmente es neopreno.

VALVULA MARIPOSA.

Las válvulas mariposa se usan en líneas de grandes diámetros a relativamente baja presión, para controlar flujos que contienen pulpa o materiales semisólidos, los cuales bloquearían otro tipo de válvulas. Otro uso comun de estas válvulas, es para controlar flujo de aire para combustión a baja presión, en el orden de 250 milímetros de agua de presión estatica.

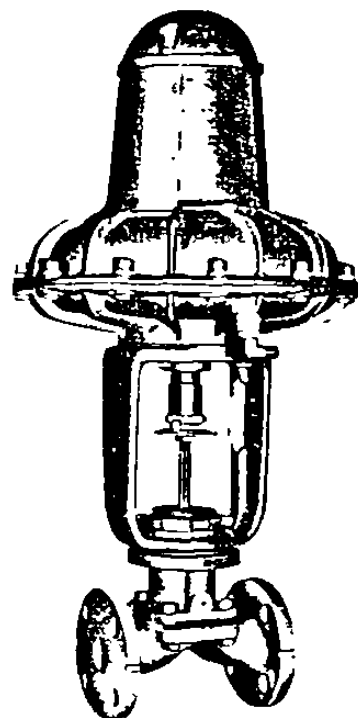


Fig.5.7 Válvula Tipo Saunders

Las válvulas de mariposa, se encuentran en tamaños estandares de 50 a 500 mm de diámetro, y se pueden fabricar sobre pedido especial en tamaños de hasta 1320 milímetros diámetro.

Su construcción es robusta, para uso rudo, son económicas y de larga vida. Su temperatura de operacion va de -18 a +120 °C. El diafragma posicionador puede tener acción de aire para abrir o de aire para cerrar, con rango nominal de .2 a 1 Kg/cm² o 20 a 100 KPa, tiene característica de flujo de aproximadamente igual porcentaje. El material típico utilizado en la construcción del cuerpo de la válvula es hierro fundido, el disco se fabrica en bronce o acero inoxidable, el vastago en acero al carbón o acero inoxidable y el asiento en buna n.

TIPOS ESPECIALES. VALVULA DE TRES VIAS.

Se tienen tres estilos en este tipo de válvula, que se han desarrollado para manejar aplicaciones de proceso comun: Control Proporcional de Flujo Dividido, Control Proporcional de Mezclado, y Control Dentro-Fuera (on-off) hacia dos destinos.

El modelo que se muestra en la Fig. 5.9 incorpora dos asientos de anillo y doble puerto en V. La finalidad de esta válvula es combinar dos corrientes de flujo. Cuando se usa el mezclado proporcional, el puerto de mano izquierda es el puerto de descarga comun, con dos corrientes de entrada para mezclarse, admitidas de los puertos de mano derecha y de la base.

Fig. 5.8 Válvula
Tipo Mariposa

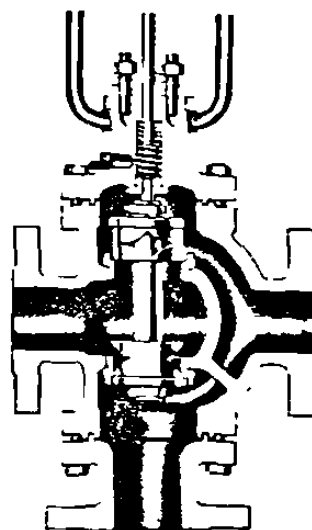
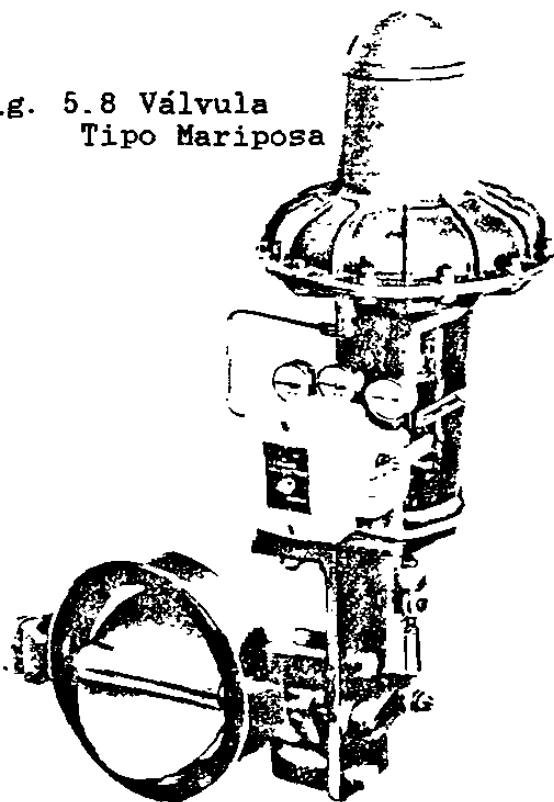


Fig. 5.9 Válvula
de Tres Vias.

5.2 CALCULO DEL TAMAÑO DE LAS VALVULAS.

El método actual aceptado por la ISA (Sociedad de Instrumentistas de America), es uno basado en la determinación del Cv el cual, es una expresión de la capacidad de la válvula, definido como el número de galones por minuto, de agua descargada a través de la válvula totalmente abierta, con una caída de presión de 1 lb/pulg² a través de ella.

El Cv nos permite comparar tamaños en varios estilos y escoger el adecuado para nuestro proceso, y de acuerdo a este seleccionar de las tablas la válvula adecuada.

Si se selecciona una válvula demasiado pequeña, no pasará el flujo requerido, si se selecciona demasiado grande, además de ser mucho más cara de lo necesario, la acción de control -- será deficiente y la válvula trabajará casi cerrada ocasionando altas velocidades de fluido, cavitación en los asientos por el uso de tuberías demasiado grandes para el flujo, las cuales producen zonas de vacío y poco rango de control.

Las fórmulas usuales básicas para cálculo de Cv son las siguientes:

1.- Líquido:
$$Cv = Q \sqrt{\frac{G}{\Delta P}}$$

2.- Gases:
$$Cv = \frac{Q}{1360} \sqrt{\frac{Tf \cdot G}{\Delta P (P2)}}$$

3.- Vapor:
$$Cv = \frac{W}{63.3} \sqrt{\frac{V}{\Delta P}}$$

Donde:

Q ó W = Razón de Flujo Líquidos (gpm) gases (scfh), vapor - (lb/h).

G = Peso Específico (ver tablas)

Tf = Temperatura de Flujo en Grado Rankine (°F + 460)

ΔP = Caída de Presión en psi (P1-P2)

P1 = Presión de entrada a la válvula psia

P2 = Presión de descarga de la válvula psia

V = Volumen específico de descarga ft³/lb

CAVITACION Y FLASHEO.

La válvula de control presenta una restricción al paso del flujo, y por lo tanto se tiene una caída de presión a través de ella, esta presión en su punto mas bajo se conoce como vena contracta, un poco más adelante la presión del fluido se recupera parcialmente y la presión en la línea se incrementa, como se muestra en la Fig. 5.10.

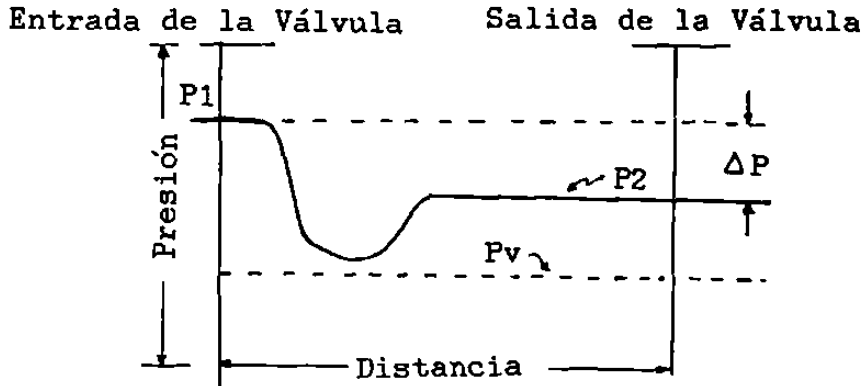


Fig. 5.10 Condiciones Normales.

En este caso el fluido es un líquido y permanece líquido - cuando pasa a través de la válvula y P_2 es la presión a la salida de la válvula.

Cuando un líquido entra a la válvula y la presión en la vena contracta cae a menos que la presión de vapor del fluido, se presenta la condición de Flasheo. Esta condición se muestra en Fig. 5.11.

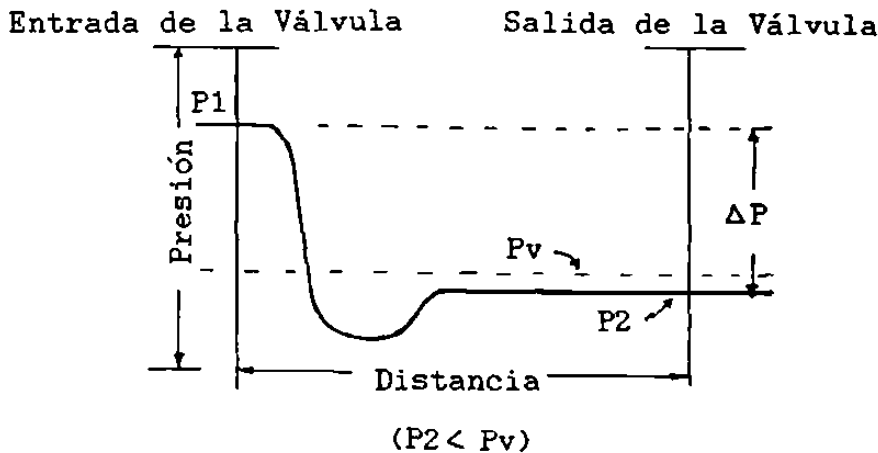


Fig. 5.11 Condición de Flasheo.

La Fig. 5.12 ilustra la tercera condición llamada Cavitación, la cual ocurre en una válvula cuando la caída de presión a través del orificio primero resulta abajo de la presión de vaporización y después se recobra arriba de la presión de vaporización. Este recobre de presión causa una implosión, o colapso de las burbujas de vapor formadas en la vena contracta.

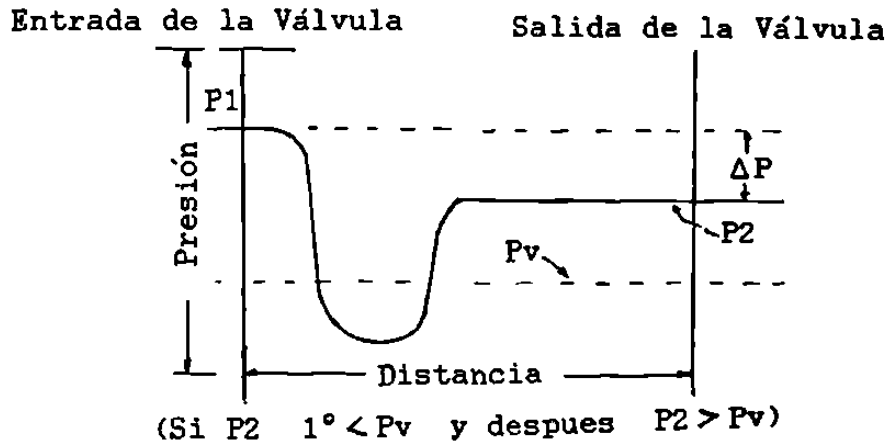


Fig. 5.12 Condición de Cavitación.

El Flasheo y la Cavitación deben tomarse en cuenta para asegurar una adecuada selección del tamaño de la válvula que le permita evitar sus efectos, ya que la presencia de estos dos fenómenos en válvulas con un Cv menor al que se requería, traerán consigo un rápido deterioro de la válvula y problemas para manejar ese fluido.

El siguiente cálculo se puede realizar para prevenir condiciones de flasheo o cavitación.

$$\Delta P \text{ (permitida)} = FL^2 (P_1 - P_v).$$

Donde:

FL = Coeficiente de Recobre de la Válvula.

P1 = Presión de Entrada a la Válvula psia.

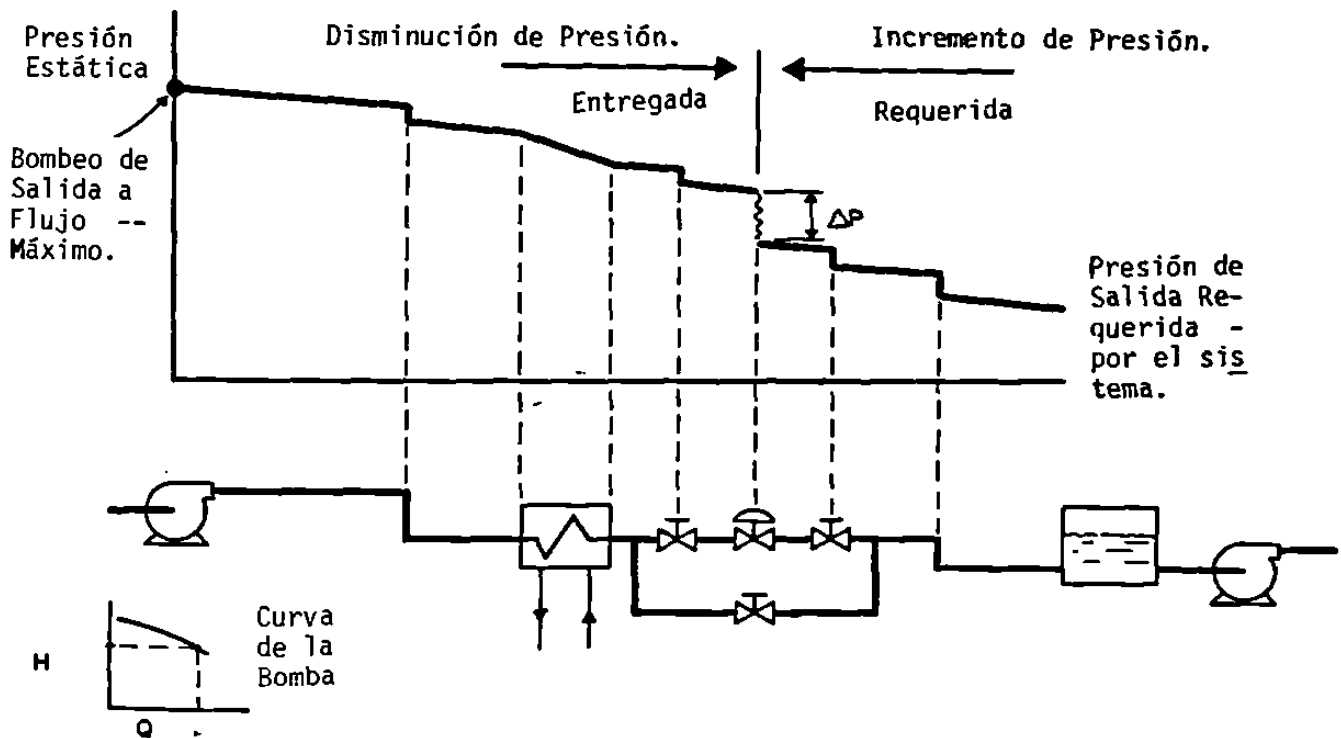
Pv = Presión de Vapor del Fluido a la Temperatura de Entrada psia.

Si la caída real de presión en la válvula sobrepasa la ΔP -- permitida según el cálculo anterior, se tendrán presentes estos fenómenos, por lo que debiera cambiarse a otra válvula con un Cv mayor que cuando menos fuera:

$$C_v = Q \sqrt{G / \Delta P \text{ (permitida)}}$$

5.3 CAIDA DE PRESION A TRAVES DE LAS VALVULAS.

La Fig. 5.13 muestra la caída de presión en un sistema neumático con válvula de control.

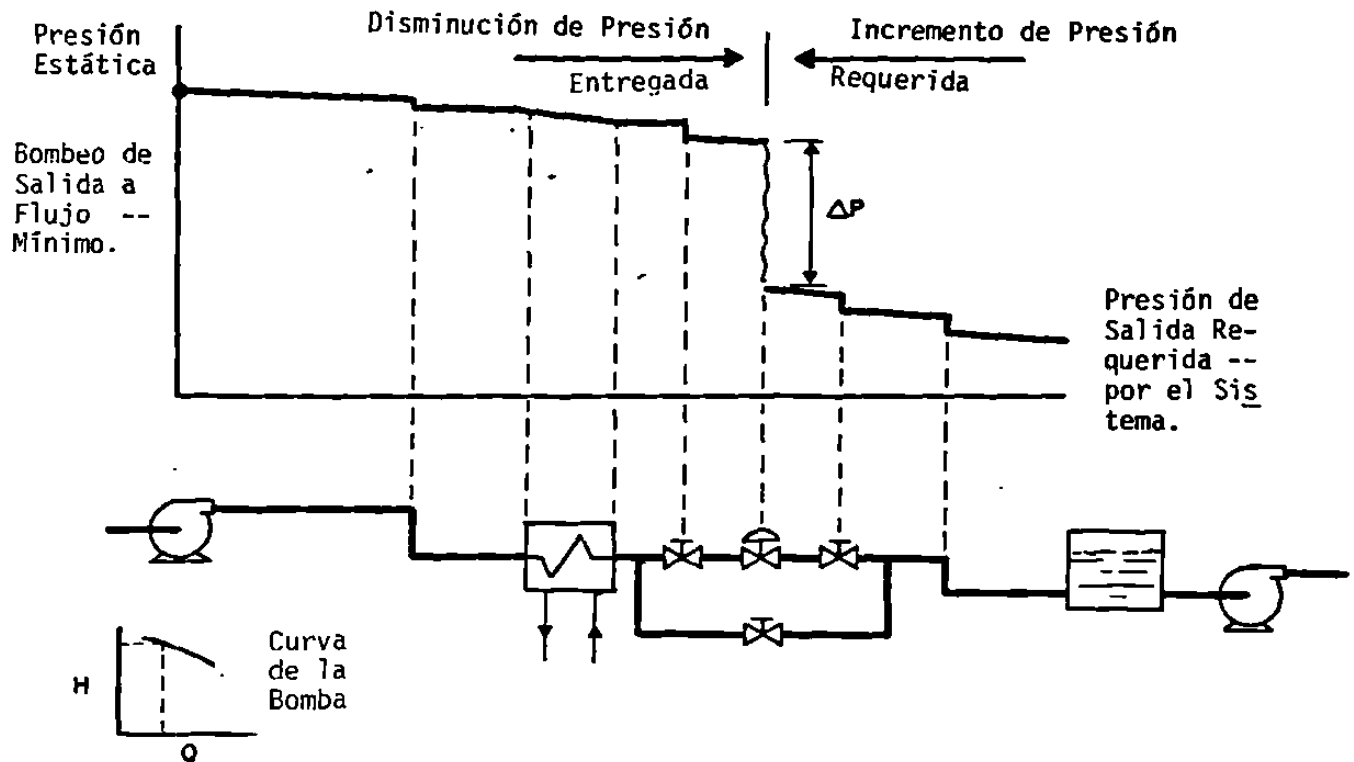


Caída de Presión a través de Válvulas de Control a Flujo Máximo.

Fig. 5.13 Bombeo a Flujo Máximo.

Para saber si una válvula es adecuada o no para el circuito se debe graficar la presión suministrada y remanente de izquierda a derecha y parar en la válvula y después graficar la presión requerida de derecha a izquierda y de nuevo parar en la válvula. La diferencia entre estos puntos finales es la caída de presión que la válvula no debe sobrepasar a flujo máximo.

Un análisis similar debe hacerse para flujo mínimo. Ver -
Fig. 5.14



Caída de Presión a través de Válvulas de Control a Flujo Mínimo.

Fig. 5.14 Bombeo a Flujo Mínimo.

Cuando las bombas trabajan a menor flujo, se producen menos caídas de presión en la tubería, debido a la menor velocidad de fluido. Como resultado la caída de presión la cual debe mantenerse a través de la válvula es mucho mayor que a flujo máximo. Las pérdidas totales de presión a través del sistema completo a flujos máximo y mínimo, excluyendo la válvula de control, puede sumarse a la presión que se requiere a la salida del sistema.

Estos totales, se restan de la presión de salida de la bomba a la razón de flujo máximo y mínimo y esto nos dará respectivamente los valores de caída de presión mínima y máxima respectivamente para seleccionar adecuadamente el tamaño de válvula de control.