

VALVULAS DE CONTROL

INSTRUMENTACIÓN Y COMUNICACIONES INDUSTRIALES

Ing. José Roberto Vignoni

Año 2005

Características de caudal de válvulas de control

La elección de una adecuada característica de caudal de una válvula de control, en función de su aplicación en un determinado proceso, continua siendo un asunto no solamente bastante complejo, sino principalmente controvertido. Numerosos trabajos publicados por destacados investigadores en el tema no fueron suficientes para ofrecer una solución teórica que merezca un crédito total.

Los problemas a resolver son realmente complejos, comenzando por el propio dilema de cuál debe ser la fracción de la caída de presión total del sistema que debe ser absorbida por la válvula de control. Y otro tanto en lo que hace a las interferencias instaladas en el sistema, como ser la propia turbina, desvíos, reducciones, equipos, lazo de control, etc.

El objetivo de este trabajo es definir diversos parámetros principales, explicar sus diferencias y dar algunas reglas prácticas que puedan ayudar en la selección de una correcta característica de caudal de una válvula de control.

Antes de entrar en el tema, sin embargo, se debe señalar que la selección de la característica de caudal de una válvula no es un problema solo relativo a la válvula sino también al sistema de control completo y la instalación.

Características de caudal

El obturador de una válvula, conforme se va desplazando, produce un área de pasaje que posee una determinada relación característica entre la fracción de carrera de la válvula y el correspondiente caudal que escurre a través de la misma. A esa relación se le da el nombre de característica de caudal de válvula.

Por otro lado, se sabe también que el caudal que escurre a través de una válvula varía con la presión diferencial a través de la misma, y, por lo tanto, tal variación de presión diferencial debe afectar la característica de caudal. En consecuencia, se definen dos tipos de características de caudal: inherente e instalada.

La característica de caudal inherente se define como la relación existente entre el caudal que escurre a través de la válvula y la variación porcentual de la carrera, cuando se mantiene constante la presión diferencial a través de la válvula. En otras palabras, se puede decir que se trata de la relación entre el caudal a través de la válvula y la correspondiente señal del controlador, bajo presión diferencial constante, a través de la válvula.

Por su parte, la característica de caudal instalada se define como la característica real de caudal, bajo condiciones reales de operación, donde la presión diferencial no se mantiene constante.

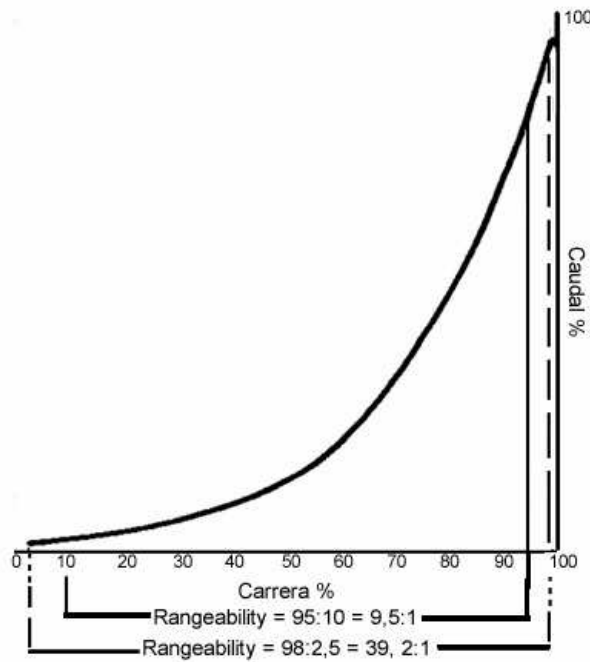
Si se tiene en cuenta que la presión diferencial a través de la válvula en un determinado sistema de control de proceso nunca se mantiene constante, al proceder a la selección de la característica de caudal se debe pensar en la característica de caudal instalada. Las características de caudal suministradas por los fabricantes de válvulas de control son inherentes, ya que es imposible simular todas y cada una de las aplicaciones de una válvula de control.

La característica de caudal inherente es la teórica, mientras que la instalada es la práctica.

Campo de medida (Rangeability) de una válvula

En realidad, el término "rangeability" podría definirse como *dinámica de medida*, que es el cociente entre los valores máximo y mínimo de utilización de un dispositivo.

La dinámica de medida de una válvula puede definirse como la relación entre los caudales máximo y mínimo controlables. Se la obtiene dividiendo el coeficiente de caudal (en porcentaje) mínimo efectivo o utilizable por el coeficiente de caudal (en porcentaje) máximo efectivo o utilizable. En la figura 1 se muestra como se obtiene la dinámica de medida de una válvula de control.



1. Dinámica de medida de una válvula de control.

De la misma forma que la característica de caudal, la dinámica de medida puede ser inherente e instalada. La dinámica de medida inherente se determina en condiciones de caída de presión constante a través de la válvula, mientras que la dinámica de medida instalada se obtiene con caída de presión variable.

La dinámica de medida inherente varía de válvula en válvula en función del tipo de cuerpo. En la válvula globo está en el orden de 50:1, en la esférica entre 50:1 y 100:1, en la mariposa 20:1, etc.

La dinámica de medida instalada también se puede definir como la relación entre la dinámica de medida inherente y la caída de presión, lo cual se puede expresar como:

$$R_0 = \left(\frac{Q_1}{Q_2} \right) \times \sqrt{\frac{\Delta P_2}{\Delta P_1}}$$

donde:

Q_1 = Caudal inicial;

Q_2 = Caudal final;

ΔP_1 = Caída de presión a caudal inicial

ΔP_2 = Caída de presión en la válvula a caudal final

Por ejemplo, debido a los requerimientos del proceso, el caudal puede disminuir de 100 a 25 % mientras la caída de presión aumenta de 16 a 100 %, con lo que la dinámica de medida instalada en este caso sería $R = (100/25), (100/16) = 10$.

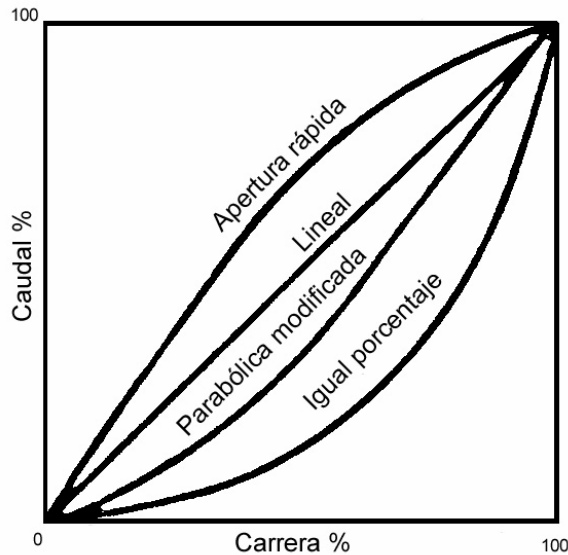
Características de caudal inherentes

La característica de caudal es proporcionada por la forma del obturador (en el caso de las válvulas globo convencionales), o por la forma de la ventana de la jaula (en el caso de las válvulas tipo jaula), o también por la posición del elemento de cierre en relación al asiento (en el caso de válvulas mariposa y esférica).

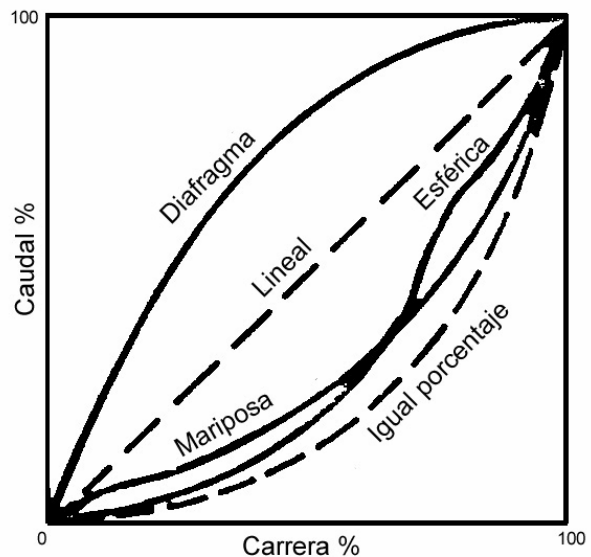
Básicamente, hay cuatro tipos de características de caudal inherentes:

- Lineal;
- Igual porcentaje (50:1);
- Parabólica modificada;
- Abertura rápida.

En un gráfico caudal vs. Carrera, estas características presentan las formas dadas en la figura 2, mientras que en la figura 3 se pueden ver las características de caudal inherentes de distintos tipos de válvulas que no poseen obturadores caracterizados.



2. Características de caudal inherentes



3. Características de caudal inherentes de válvulas de control no caracterizadas.

Características de caudal inherente tipo lineal

Es la característica en la cual iguales incrementos de carrera determinan iguales variaciones de caudal. Su expresión matemática es:

$$\left(\frac{Q}{Q_{\max}} \right) = \frac{\Delta S}{S_s} \quad \text{Con } \Delta P = \text{Constante}$$

Donde:

Q = Caudal correspondiente a una señal S cualquiera del instrumento;

Q_{\max} = Caudal correspondiente estando la válvula totalmente abierta;

$\Delta S = S_c - S$ = Variación de la señal en relación a la señal del instrumento, correspondiente a la posición de cierre de la válvula;

S_c = Señal del instrumento correspondiente a la posición de cierre de la válvula;

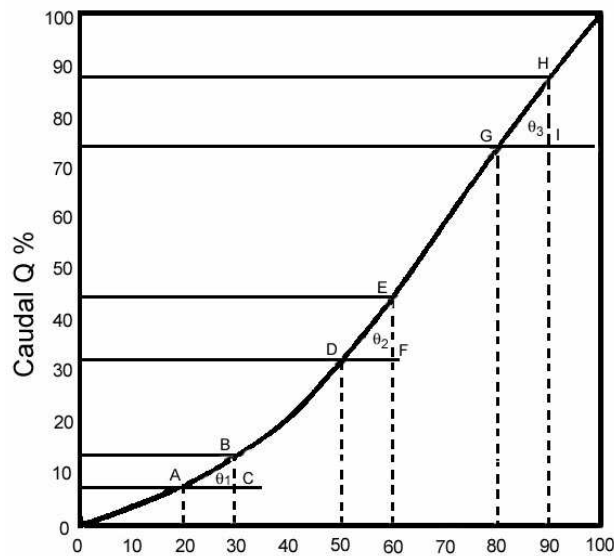
S = Señal del instrumento;

$S_s = S_0 - S_c$ = Amplitud de la señal del instrumento;

S_0 = Señal del instrumento correspondiente a la posición de abertura total de la válvula.

R = Dinámica de medida (Rangeability).

Su forma, tal como se puede apreciar en la figura 2, es la de una recta de pendiente unitaria y constante en cualquier tramo de su carrera. Cabe recordar que se define como pendiente de una curva a la tangente del ángulo que forma con el eje horizontal, según se puede observar en la figura 4.



4. Característica de caudal inherente tipo lineal.

De esta manera, si se eligen tres tramos en esa curva y se verifica su pendiente, se obtiene:

$$\begin{aligned}\text{Tramo 1. Pendiente} &= \text{tg } \theta_1 = \text{tg } \theta = AB/AC = \\ &= (Q_{30} - Q_{20}) / (X_{30} - X_{20}) = \\ &= 10/10 = 1\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Tramo 2. Pendiente} &= \text{tg } \theta_2 = \text{tg } \theta = \\ &= DE/DF = \\ &= (Q_{60} - Q_{50}) / (X_{60} - X_{50}) = \\ &= 10/10 = 1\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Tramo 3. Pendiente} &= \text{tg } \theta_3 = \text{tg } \theta = \\ &= GH/GI = \\ &= (Q_{90} - Q_{80}) / (X_{90} - X_{80}) = \\ &= 10/10 = 1\end{aligned}$$

Se comprueba, por lo tanto, que en cualquier tramo de esa característica de caudal, la pendiente es constante y unitaria.

Conviene introducir aquí un nuevo parámetro: la ganancia o sensibilidad de la válvula a la relación entre la variación del caudal y la correspondiente variación de carrera, o sea:

$$K_c = \frac{\text{variación de caudal}}{\text{variación de carrera}}$$

Se puede entonces constatar que la ganancia de la válvula es la propia pendiente de la curva correspondiente a su característica de caudal, y, por lo tanto, la ganancia producida por una válvula con características de caudal lineal, es constante y unitaria.

Características de caudal inherente tipo igual porcentaje

Es la característica en la cual iguales incrementos de carrera determinan variaciones de caudal que mantienen siempre el mismo porcentaje del caudal existente. Su expresión matemática es:

$$\left(\frac{Q}{Q_{\max}} \right) = R \times \left(\frac{\Delta S}{S_s} \right) - 1$$

donde:

Q = Caudal correspondiente a una señal S cualquiera del instrumento;

Q_{\max} = Caudal correspondiente estando la válvula totalmente abierta;

$\Delta S = S_c - S$ = Variación de la señal en relación a la señal del instrumento, correspondiente a la posición de cierre de la válvula;

S_c = Señal del instrumento correspondiente a la posición de cierre de la válvula;

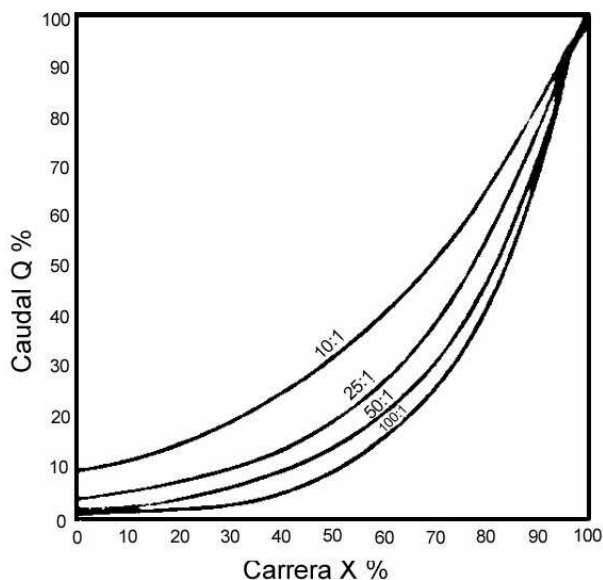
S = Señal del instrumento;

$S_s = S_0 - S_c$ = Amplitud de la señal del instrumento;

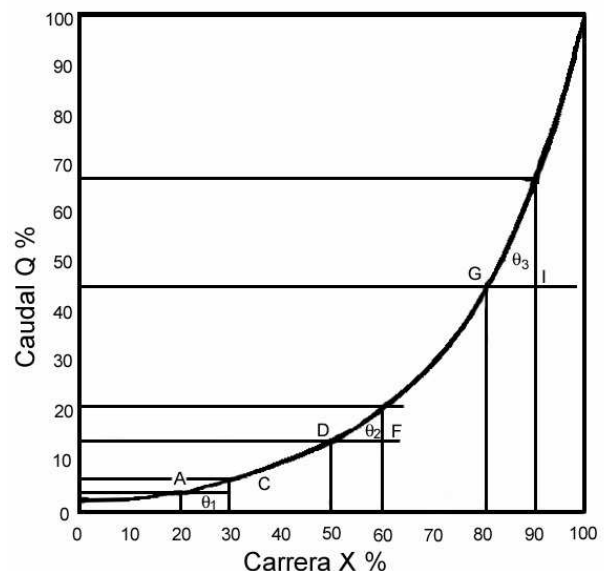
S_0 = Señal del instrumento correspondiente a la posición de abertura total de la válvula.

R = Dinámica de medida (Rangeability).

Esta característica de caudal se muestra en la figura 2, en la cual se puede desde ya constatar que la curva de la característica de igual porcentaje no comienza en el punto de caudal igual a cero. La explicación está en la propia definición de este tipo de característica, ya que el aumento del caudal es un porcentaje del caudal que se tiene en el momento, y éste nunca podrá ser nulo, pues, caso contrario, un aumento porcentual sobre un valor cero continuará siendo cero. De esta forma, se pueden tener infinitas curvas del tipo igual porcentaje en función de ese caudal inicial para carrera igual a cero, tal como se puede apreciar por la familia de curvas igual porcentaje dadas en la figura 5. Conviene aclarar desde ya que ese caudal teórico que se tiene para carrera igual a cero, nada tiene que ver con el escurrimiento a través del asiento cuando la válvula se encuentra totalmente cerrada.



5. Características de caudal inherente tipo igual porcentaje.



6. Características de caudal inherente tipo igual porcentaje 50:1.

Todas las curvas presentadas en la figura 5 satisfacen la definición dada para la característica igual porcentaje. La característica de caudal inherente tipo igual porcentaje de uso más común es 50:1, o sea representa una característica cuyo alcance va desde 100 % de caudal (en 100 % de carrera) hasta 2 % del caudal (en 0 % de carrera), esto es 100:2 o, como más comúnmente se conoce, 50:1. Este número representa el valor de la rangeability de la válvula. La dinámica de medidase define como la relación entre los valores máximo y mínimo donde el caudal de la válvula acompaña la característica de caudal inherente, dentro de la desviación máxima tolerable.

Asimismo, en la figura 6 se muestra en forma aislada la curva de la característica inherente tipo igual porcentaje 50:1.

Vamos a analizar ahora, de la misma forma que se hizo para la característica lineal, la pendiente o ganancia de la característica de caudal igual porcentaje, en tres tramos según se produzcan las correspondientes variaciones en la carrera de la válvula.

$$\begin{aligned}\text{Tramo 1. Pendiente} &= \text{tg } \theta_1 = AB/AC = \\ &= (Q_B - Q_A) / (X_{30} - X_{20}) = \\ &= (6,20 - 4,00) / (30 - 20) = \\ &= 0,22\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Tramo 2. Pendiente} &= \text{tg } \theta_2 = DE/DF = \\ &= (Q_E - Q_D) / (X_{60} - X_{50}) = \\ &= (21,00 - 14,00) / (60 - 50) = \\ &= 0,70\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Tramo 3. Pendiente} &= \text{tg } \theta_3 = GH/GI = \\ &= (Q_H - Q_G) / (X_{90} - X_{80}) = \\ &= (67,00 - 45,00) / (90 - 80) = \\ &= 2,20\end{aligned}$$

Se verifica, por lo tanto, que en la característica de caudal igual porcentaje, la pendiente o ganancia de la válvula es creciente, habiendo un aumento de 220 % entre los tramos 1 y 2, y de 900 % entre los tramos 1 y 3.

Características de caudal inherente tipo parabólica modificada.

Se trata de una característica de caudal intermedia entre la lineal y la igual porcentaje, según se puede observar en el gráfico de la figura 2.

No se puede tener una definición exacta como para las características anteriores por el hecho de ser una característica modificada. Matemáticamente, se la puede definir mediante:

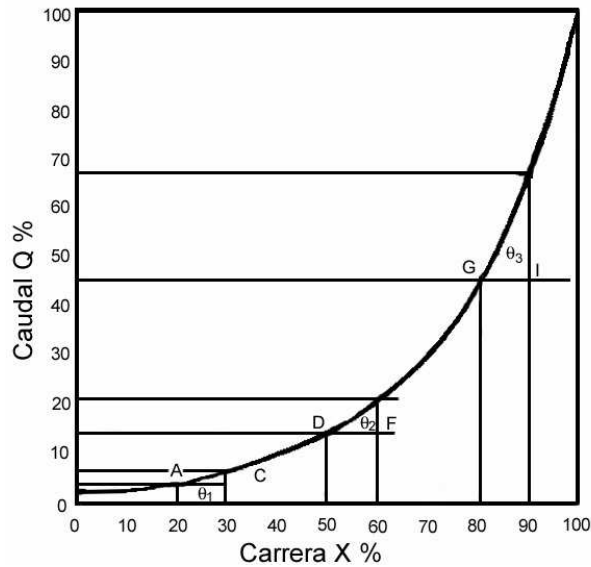
$$\left(\frac{Q}{Q_{\max}} \right) = \frac{\frac{\Delta S}{S_s}}{\sqrt{3 - 2 \left(\frac{\Delta S}{S_s^2} \right)}}$$

Una vez más, vamos a analizar la variación de la pendiente de este tipo de características en relación a los tres tramos, según se puede observar en la figura 7.

$$\begin{aligned}\text{Tramo 1. Pendiente} &= \text{tg } \theta_1 = AB/AC = \\ &= (Q_B - Q_A) / (X_{30} - X_{20}) = \\ &= (13 - 8) / (30 - 20) = \\ &= 0,5\end{aligned}$$

$$\text{Tramo 2. Pendiente} = \text{tg } \theta_2 = DE/DF =$$

$$\begin{aligned}
 &= (Q_E - Q_D) / (X_{60} - X_{50}) = \\
 &= (45 - 33) / (60 - 50) = \\
 &= 1,20
 \end{aligned}$$



7. Características de caudal inherente tipo parabólica modificada.

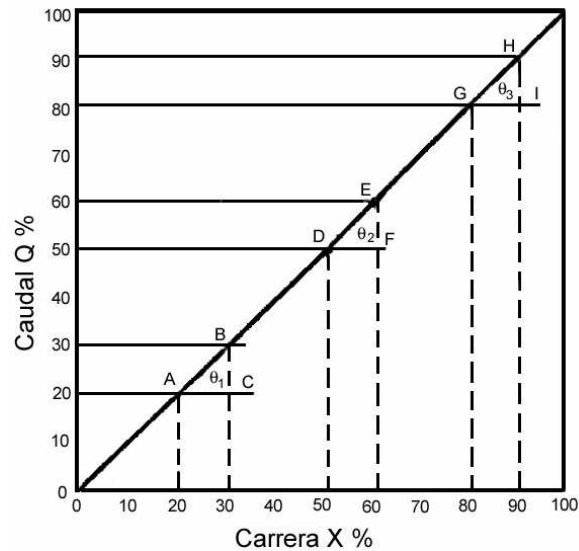
Tramo 3. Pendiente = $\text{tg } \theta_3 = GH/GI =$
 $= (Q_H - Q_G) / (X_{90} - X_{80}) =$
 $= (88 - 74) / (90 - 80) =$
 $= 1,40$

Se verifica que, en este tipo de característica, la pendiente o ganancia de la válvula es creciente. Entre los tramos 1 y 2, el aumento de la ganancia es de 140 % mientras que entre los tramos 1 y 3 es de 180 %. Se observa, por lo tanto, que el aumento de ganancia de una válvula de control con características de caudal parabólica modificada es menor que para la característica igual porcentaje.

Característica de caudal inherente tipo apertura rápida.

Se trata de una característica que produce una variación máxima del caudal a través de la válvula con la carrera mínima. Este tipo de válvula posibilita el pasaje de casi la totalidad del caudal nominal con apenas una abertura de 25 % de la carrera total.

No es definible matemáticamente y su curva se muestra en la figura 8, mediante la cual se analizarán en forma aproximada la variación de la pendiente o ganancia.



8. Características de caudal inherente tipo apertura rápida.

$$\begin{aligned}
 \text{Tramo 1. Pendiente} &= \operatorname{tg} \theta_1 = AB/AC = \\
 &= (Q_B - Q_A) / (X_{30} - X_{20}) = \\
 &= (43 - 28) / (30 - 20) = \\
 &= 1,5
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Tramo 2. Pendiente} &= \operatorname{tg} \theta_2 = DE/DF = \\
 &= (Q_E - Q_D) / (X_{60} - X_{50}) = \\
 &= (80 - 70) / (60 - 50) = \\
 &= 1,0
 \end{aligned}$$

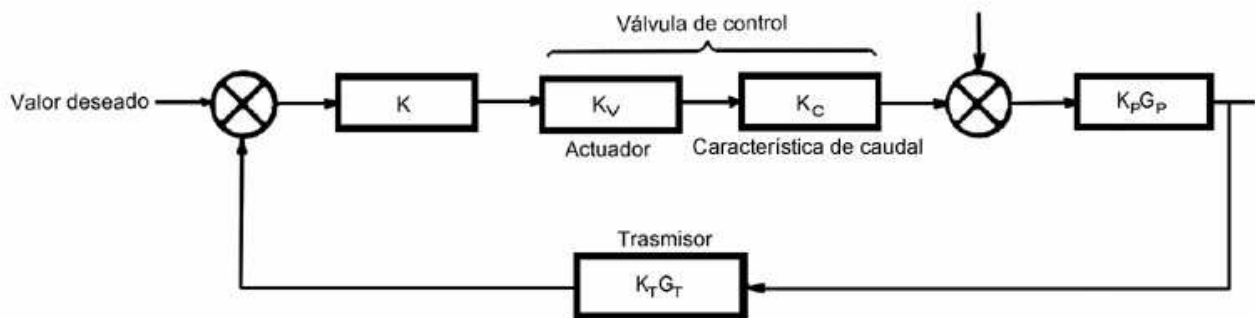
$$\begin{aligned}
 \text{Tramo 3. Pendiente} &= \operatorname{tg} \theta_3 = GH/GI = \\
 &= (Q_H - Q_G) / (X_{90} - X_{80}) = \\
 &= (98 - 94) / (90 - 80) = \\
 &= 0,4
 \end{aligned}$$

Se verifica de esta manera que la característica de caudal tipo apertura rápida posee una pendiente o ganancia decreciente.

Análisis comparativo de las características de caudal para aplicaciones de control.

En base a lo expuesto en el ítem anterior, se puede concluir que existen características de caudal inherente con ganancia constante (lineal), creciente (igual porcentaje y parabólica modificada) y decreciente (apertura rápida). Para poder realizar un análisis más detallado de las diferencias en las ganancias de esas características de caudal, se analizará el sistema de control genérico dado en la figura 9, donde:

K = Ganancia del controlador;
 K_G = Ganancia del actuador de la válvula;
 K_V = Ganancia de la característica de caudal, o ganancia de la válvula;
 K_P = Ganancia del proceso;
 G_P = Función de transferencia del proceso;
 K_T = Ganancia del transmisor;
 G_T = Función de transferencia del transmisor.



La característica de caudal adecuadamente seleccionada debe contribuir de forma que la ganancia de lazo abierto sea constante, con lo que se obtendrá un sistema de control dinámicamente estable a cualquier variación de carga. Se debe señalar que se define como ganancia de lazo abierto y se la determina por el producto de las ganancias individuales de cada elemento del sistema. De esta forma, la ganancia de lazo abierto del sistema de control dado en la figura 9, es:

$$K \cdot K_V \cdot K_C \cdot K_P \cdot K_T = K_L = \text{constante} \quad (6)$$

donde:

K_L = Ganancia de lazo abierto.

En la expresión (6), K (ganancia de controlador), K_V (ganancia del actuador de la válvula) y K_T (ganancia del transmisor) son esencialmente constantes en todo su alcance de aplicación. Por lo tanto, la ganancia de la válvula (K_C) o la ganancia del proceso (K_P) son variables significativas que deben compensarse entre sí si se quiere obtener un control estable. En el caso de que estas ganancias no fueran compensadas, se hace necesario el reajuste de la ganancia del controlador para obtener la compensación.

Esto es posible sólo teóricamente, pues en la práctica sería imposible reajustar todos los controladores simultáneamente siempre que ocurriesen variaciones de carga en el proceso. La única forma adecuada de realizar esa compensación, sin meterse en la instrumentación, es seleccionar una característica de caudal para la válvula de control tal que produzca una compensación en la ganancia del proceso de modo de hacer estable el control.

A continuación se hará un análisis de las cuatro características de caudal en función de sus respectivas ganancias o sensibilidades.

- **Características de caudal tipo apertura rápida.** Produce una ganancia muy alta a bajas aperturas de carrera y una ganancia muy baja en aperturas por encima de 60 % de carrera total. Tal particularidad de ganancia decreciente, según aumenta el caudal, es inadecuada para su utilización en aplicaciones en las cuales sea necesario un control del tipo modulado. Por lo tanto, la característica de caudal

tipo apertura rápida se destina sólo para aplicaciones en control de tipo biestable, donde la válvula sólo toma dos posiciones: toda abierta y toda cerrada.

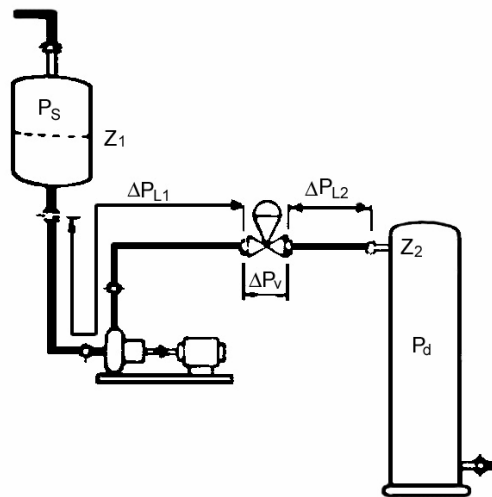
- **Característica de caudal tipo lineal.** Produce una ganancia constante en toda la carrera de la válvula. Es, por lo tanto, (desde el punto de vista teórico), la característica de caudal más aconsejable para aplicaciones en control modulado.
- **Características de caudal tipo igual porcentaje y parabólica modificada.** Producen ganancias crecientes, esto es su ganancia es baja al comienzo de la apertura de la válvula y va aumentando a medida que aumenta la apertura de la válvula. En la característica igual porcentaje, tal ganancia creciente es más pronunciada que en la característica parabólica modificada.

En principio, estas últimas características de caudal fueron introducidas para producir una mejor compensación en la ganancia del sistema, en el caso de que el proceso no fuese lineal. En ese caso, si se utilizara una válvula lineal, ésta no estaría en condiciones de compensar la ganancia variable del proceso. De esta forma, se deberá introducir una no linealidad a través de una válvula lineal (de característica igual porcentaje o parabólica modificada) para compensar las ganancias variables del proceso y tender a la linealización de todo el sistema.

Como se verá mas adelante, la utilización de estas características de caudal no lineales es ampliamente recomendada incluso en procesos lineales, ya que existen otros factores dinámicos que producen alteraciones sensibles en las características de caudal inherentes.

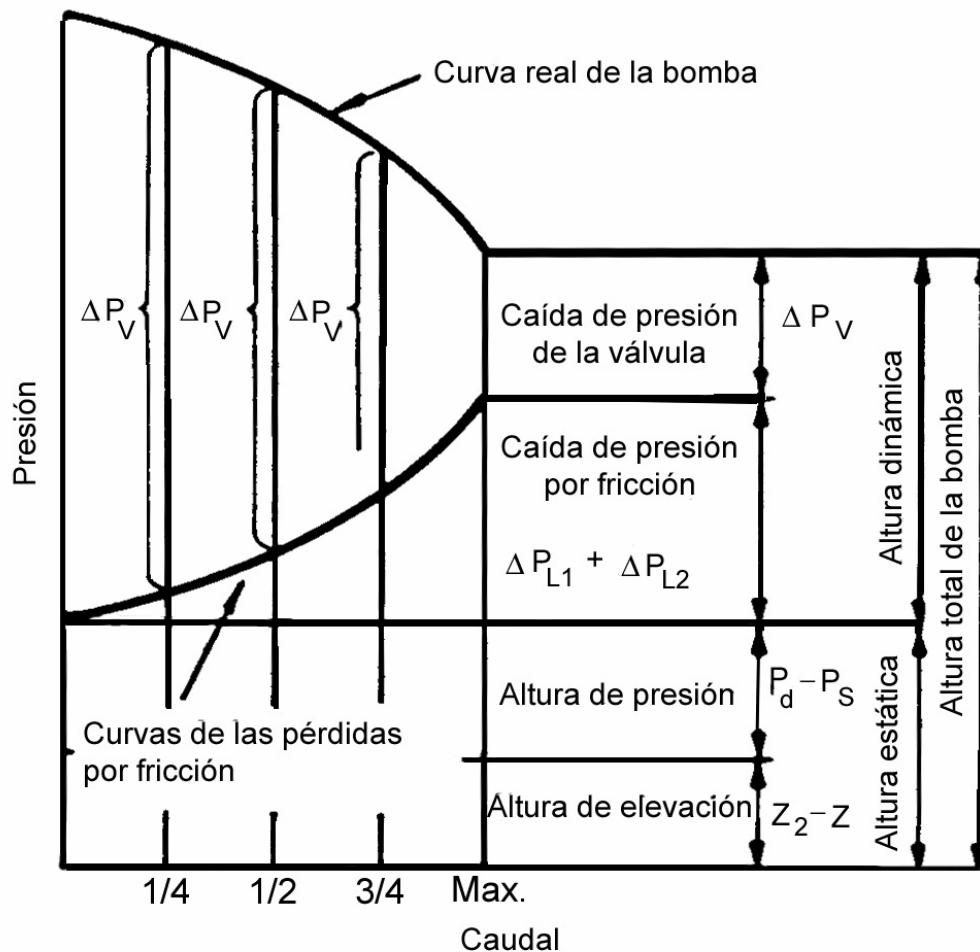
Característica de caudal instalada

Instalada la válvula de control de proceso, su característica de caudal inherente sufre profundas alteraciones. El grado de las alteraciones depende del proceso en función del tipo de instalación, resistencias relativas al fluido, etc. En esa situación, la característica de caudal inherente pasa a denominarse característica de caudal instalada.



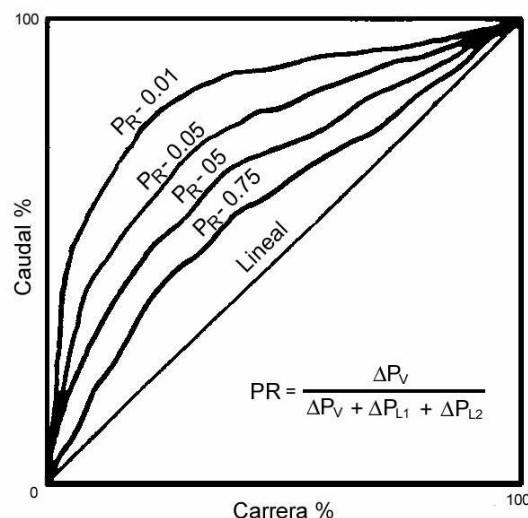
10. Sistema de bombeo utilizado para el estudio de la característica de caudal instalada

En base al sistema dado en la figura 10, se indican algunas de las alteraciones importantes que sufren las características de caudal inherentes. En el gráfico de la figura 11 se muestra la distribución de las pérdidas de presión del sistema y la correspondiente presión diferencial destinada a ser absorbida por la válvula.

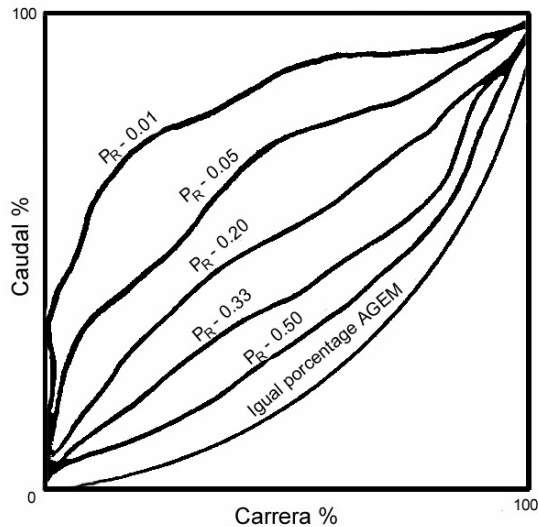


11. Distribución de las pérdidas de presión en el sistema de la figura 9

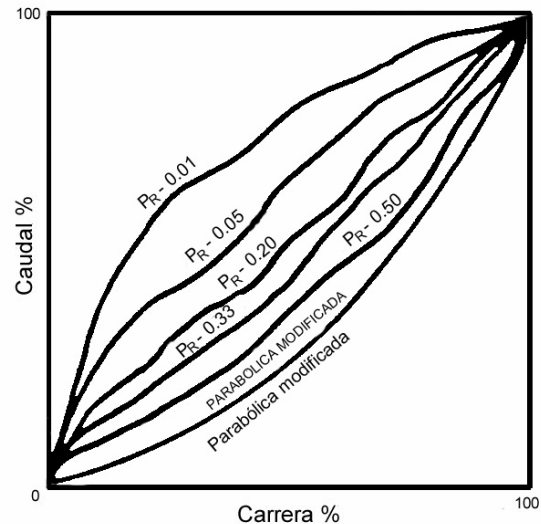
En función de la relación PR entre la caída de presión a través de la válvula y la caída de presión total del sistema, la característica de caudal instalada puede alterarse considerablemente y, lo que es más interesante, es que si la característica de caudal inherente fuera lineal, esta tiende a la apertura rápida conforme la relación PR disminuya, mientras que las características inherentes igual porcentaje y parabólica modificada tienden a lineal según se puede apreciar en las figuras 12, 13 y 14.



12. Característica de caudal instalada, utilizándose una característica de caudal inherente tipo lineal, en el sistema de control de la figura 10.



13. Característica de caudal instalada, utilizándose una característica de caudal inherente tipo igual porcentaje, en el sistema de control de la figura 10.



14. Característica de caudal instalada, utilizándose una característica de caudal inherente tipo parabólica modificada, en el sistema de control de la figura 10.

Sin embargo, para poder afirmar categóricamente cuál es la mejor característica de caudal instalada, se debe efectuar un relevamiento completo de las pérdidas de presión del sistema. Se puede concluir que, si se tiene en cuenta que la característica de caudal instalada tipo lineal es la mejor solución para la estabilidad del proceso, en la mayoría de los casos la mejor elección sería una característica de caudal inherente tipo igual porcentaje o la del tipo parabólica modificada, ya que presentan una tendencia, una vez instalada, hacia la linealización. Esto ocurre, conviene recordar, siempre que no sea la válvula de control la que absorba la mayor parte de la caída de presión del sistema. Por lo tanto, se puede ver que la parte de la caída de presión disponible para el sistema que es absorbida por la válvula, constituye un factor importantísimo en la característica de caudal instalada y, por lo tanto, para el éxito del control.

Caída de presión a través de la válvula de control

En el escurrimiento de un flujo a través de una válvula de control, hay algunas constantes físicas bien determinadas o de fácil determinación. Otras se obtienen mediante procedimientos de cálculo o supuestas, en caso extremo, sin que eso modifique apreciablemente los valores referentes al cálculo de la válvula.

Una consideración muy importante para la característica de caudal y para el dimensionamiento, es la caída de presión a través de la válvula. El procedimiento para su determinación, que depende del tipo de sistema, puede ser simple o complejo, prevaleciendo éste último en la mayoría de las aplicaciones industriales.

Existen básicamente dos tipos de sistemas a considerar:

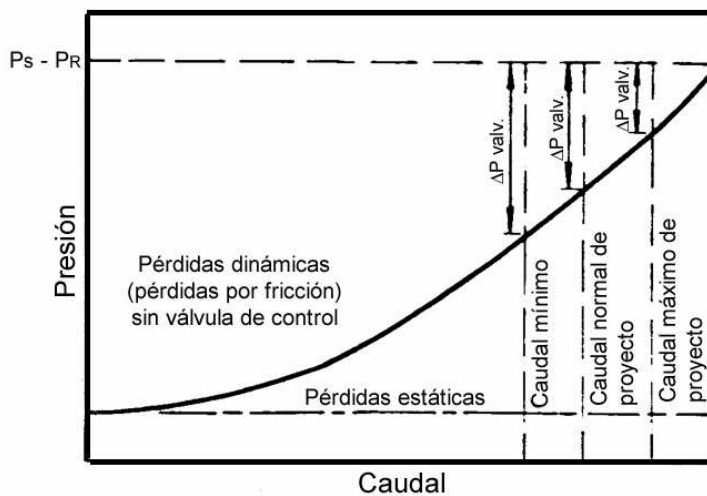
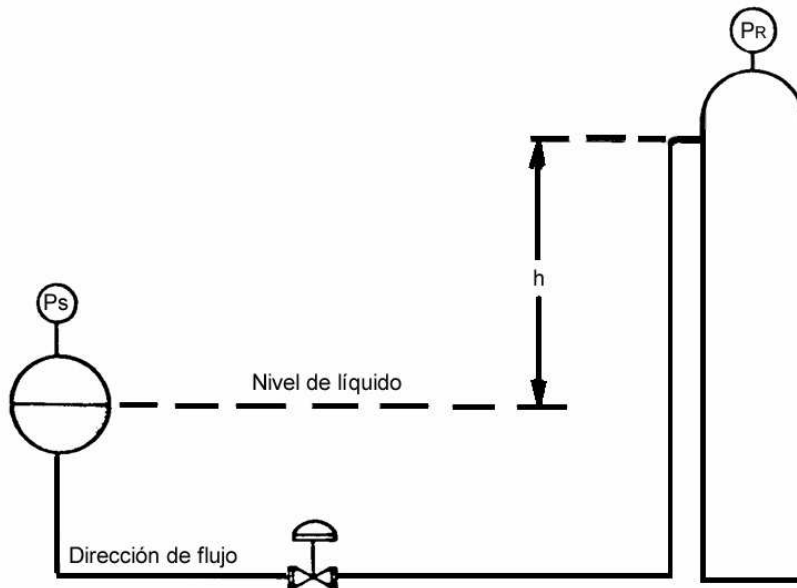
- Sistema de caída de presión constante;
- Sistema de caída de presión variable.

En cualquiera de estos, la caída de presión total es absorbida por las pérdidas estáticas y dinámicas en el sistema. La caída de presión a través de la válvula es una parte de las pérdidas dinámicas. El valor relativo de la caída de presión en la válvula respecto de la caída de presión total del sistema es un factor preponderante, como ya se vio anteriormente, en la selección de la característica de caudal de la válvula.

Sistema de presión constante

Un sistema de presión constante, como el que se muestra en la figura 15, es aquel en el cual el flujo escurre, por ejemplo, de un reservorio a otro sin que se utilice medio impulsor

alguno, como ser una bomba, que hace aumentar la presión entre los dos reservorios. Las presiones en los dos reservorios son impuestas por el proceso y permanecen relativamente constantes. Otro ejemplo sería un sistema con descarga de bomba controlada por una válvula reguladora de presión.



15. Sistema de presión constante.

La caída de presión disponible para ser absorbida por la válvula de control en un sistema de presión constante es fácil de determinar. Ella es simplemente la diferencia entre las dos presiones terminales en los reservorios más o menos la diferencia de elevación, menos las pérdidas dinámicas (pérdidas por rozamiento) en la línea. Numéricamente, esto se expresa como:

$$\Delta P = P_s - P_R = 0,433(h \times G) - F$$

donde:

ΔP = Caída de presión a través de la válvula;

P_s = Presión del recipiente de alimentación;

P_R = Presión del recipiente colector;

h = Diferencia de la cota de elevación, pies de fluido;

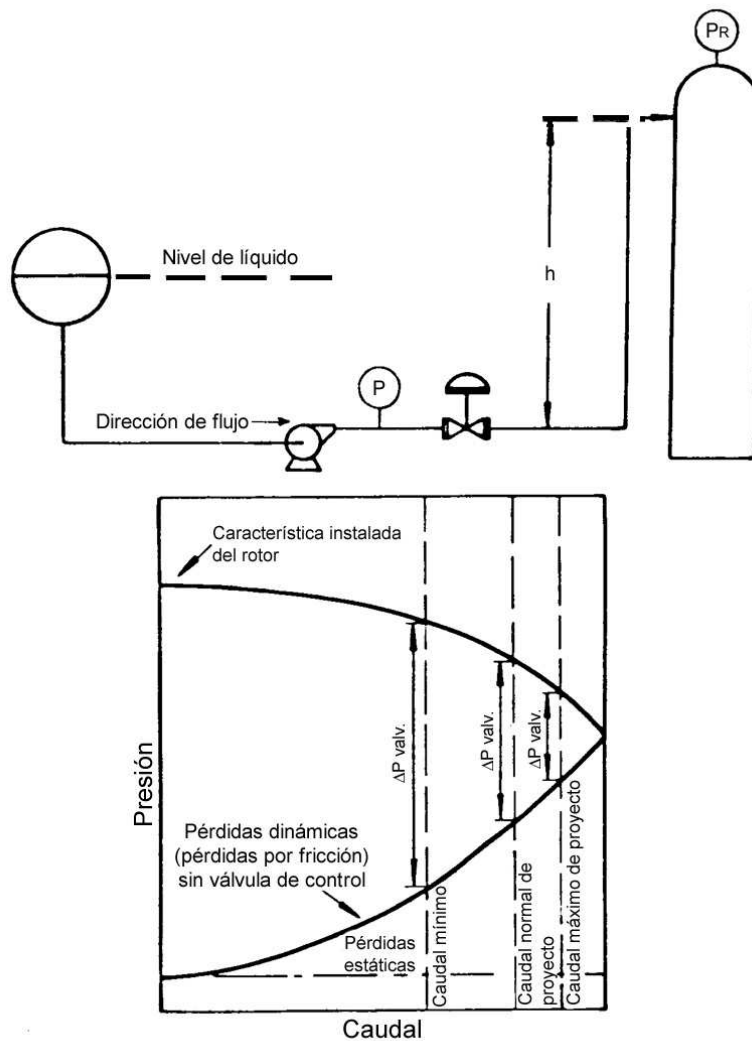
G = Peso específico relativo del fluido a la temperatura de flujo;
 F = Pérdidas dinámicas del sistema.

Sistema de presión variable

Un sistema de presión variable es, por ejemplo, similar al presentado en el ítem anterior, excepto que éste utiliza una bomba para aumentar la presión del sistema (fig. 16). La caída de presión disponible para la válvula de control se determina en forma similar a la anterior, mediante la siguiente expresión:

$$\Delta P = P - P_R = 0,433(h \times G) - F$$

donde: P es la presión de salida de la bomba y que, en este caso, sustituye a P_S del ejemplo anterior. El valor de P es función de la curva característica de la bomba y se determina por la intersección de esta curva con el valor del caudal máximo del proceso, según se puede ver en el gráfico de la figura 16. En esta figura se puede apreciar que la caída de presión disponible para ser absorbida por la válvula es mucho mayor a caudal mínimo que a caudal máximo. Esto era lógico de esperar, ya que las pérdidas por rozamiento en la línea son menores a caudales mínimos además de la mayor presión de descarga de la bomba para bajos regímenes de flujo.



16. Sistema de presión variable.

Como seleccionar la característica de caudal

En base a todo lo expuesto se puede tener una idea por lo menos de la complejidad del asunto y de la existencia de diversas experiencias de las cuales fueron obtenidos datos prácticos de mucha importancia.

Tabla 1. Guía práctica para la selección de la característica de caudal

Variable del proceso a controlar	Condiciones del proceso	Característica de caudal a utilizar
Nivel Líquido	Caída de presión constante.....	Lineal
	Disminuyendo la caída de presión con el aumento del caudal: si la caída de presión a caudal mínimo fuera mayor que 20 % de la caída de presión a caudal mínimo.....	Lineal
	Disminuyendo la caída de presión con el aumento del caudal: si la caída de presión a caudal máximo fuera menor que 20 % de la caída de presión a caudal mínimo.....	Igual porcentaje Parabólica modificada
	Aumentando la caída de presión con el aumento del caudal: si la caída de presión a caudal máximo fuera menor que 200 % de la caída de presión a caudal mínimo.....	Lineal
Presión	Aumentando la caída de presión con el aumento del caudal: si la caída de presión a caudal máximo fuera mayor que 200 % de la caída de presión a caudal mínimo.....	Apertura rápida
	Líquido.....	Igual porcentaje/ Parabólica modificada
	Gases. Sistemas rápidos: volumen pequeño, tramo de menos de 3 metros de tubería corriente debajo de la válvula de control.....	Igual porcentaje/ Parabólica modificada
	Gases. Sistemas lentos: volumen grande (el proceso posee un receptor, sistema de distribución o línea de transmisión superiores a 30 metros de tubería corriente abajo). Disminuyendo la caída de presión con el aumento del caudal: si la caída de presión a caudal máximo fuera mayor que 20 % de la caída de presión a caudal mínimo.....	Lineal
Caudal	Gases. Sistemas lentos: volumen grande. Disminuyendo la caída de presión con el aumento del caudal: si la caída de presión a caudal máximo fuera menor a 20 % de la caída de presión a caudal mínimo.....	Igual porcentaje Parabólica modificada
	Señal del elemento primario de medición proporcional al flujo.	
	Grandes variaciones del flujo	
	a. Elemento primario instalado en serie con la válvula de control.....	Lineal
	b. Elemento primario instalado en el contorno * de la válvula de control.....	Lineal
	Pequeñas variaciones de flujo, pero grandes variaciones de caída de presión con el aumento del caudal.	

a. Elemento primario instalado en serie con la válvula de control.....	Igual porcentaje/ Parabólica modificada
b. Elemento primario instalado en el contorno * de la válvula de control	Igual porcentaje/ Parabólica modificada
Señal del elemento primario de medición proporcional al cuadrado del flujo.	
Grandes variaciones de flujo	
a. Elemento primario instalado en serie con la válvula de control.....	Lineal
b. Elemento primario instalado en el contorno * de la válvula de control	Igual porcentaje/ Parabólica modificada
Pequeñas variaciones del flujo, pero grandes variaciones de presión con el aumento del caudal.	
a. Elemento primario instalado en serie con la válvula de control.....	Igual porcentaje/ Parabólica modificada
b. Elemento primario instalado en el contorno * de la válvula de control	Igual porcentaje/ Parabólica modificada

Para establecer correctamente la adecuada característica de caudal, en realidad hace falta un análisis dinámico del sistema, verificándose la caída de presión real a ser absorbida por la válvula, hecho este que sólo puede ser obtenido por medio del relevamiento de las curvas de la bomba y de las pérdidas localizadas. En la Tabla 1 se muestra, en forma resumida, algunas reglas prácticas que eventualmente pueden ayudar en la selección de la adecuada característica de caudal. Tales reglas deben ser utilizadas sólo con las debidas precauciones, ya que, tal como se dijo anteriormente, sólo un análisis dinámico del sistema puede indicar con forma correcta cual característica de caudal se recomienda para lograr un sistema de control estable.

La experiencia e innumerables análisis realizados muestran que lo mejor, en caso de duda, es elegir la característica igual porcentaje o parabólica modificada. Utilizando una característica de caudal lineal donde por ejemplo, una igual porcentaje sería mejor, por lo general conduce a un sistema inestable. No obstante, la recíproca raramente produce inestabilidad en el sistema.