

ELEMENTOS FINALES DE CONTROL

Los elementos finales de control son los dispositivos encargados de transformar una señal de control en un flujo de masa o energía (variable manipulada). Es esta variable manipulada la que incide en el proceso causando cambios de la variable controlada. Lo más común en procesos es que la manipulación sea un caudal. Para ajustar el flujo de fluidos en una línea existen primariamente dos mecanismos:

- Modificar la *energía entregada* al fluido (bombas y ventiladores de velocidad variable)
- Modificar la *resistencia* al paso del fluido (válvulas, registros en ductos de gases)

De los diversos elementos finales de control, el de más amplia difusión es la válvula automática con actuadores neumáticos o eléctricos.

LA VÁLVULA DE CONTROL

La válvula de control es básicamente un orificio variable por efecto de un actuador. Constituye el elemento final de control en más del 90 % de las aplicaciones industriales. En la figura siguiente se ve una válvula globo con un actuador neumático de diafragma en donde se indican las diversas piezas que la constituyen

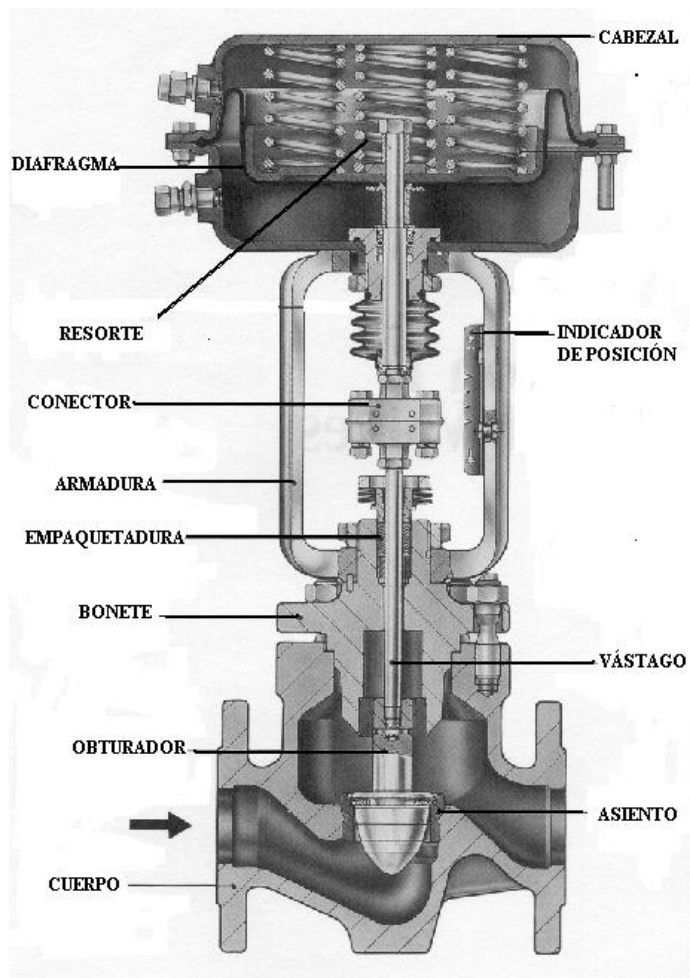


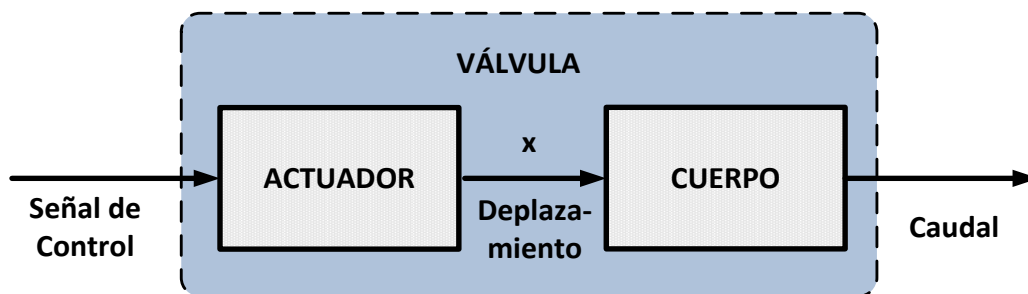
Figura 1: Corte de una válvula de control con sus partes

Esta válvula utiliza una señal externa que puede ser neumática o eléctrica y posteriormente transformada en una de tipo neumática que incide el cabezal.

Estos elementos los podemos considerar constituidos por dos partes:

- **Actuador:** recibe la señal de controlador y la transforma en un desplazamiento (lineal o rotacional) merced a un cambio en la presión ejercida sobre el diafragma.
- **Cuerpo:** el diafragma está ligado a un vástago o eje que hace que la sección de pasaje del fluido cambie y con ésta el caudal.

Con un diagrama en bloques se puede representar a la válvula como un sistema en serie.



Desde el punto de vista estático el actuador es moderadamente lineal y la dinámica más significativa es la de llenado del cabezal con una constante de tiempo del orden de los segundos. El cuerpo carece de retardo y la ganancia viene determinada por la característica de flujo como se verá.

ESPECIFICACIÓN DE VÁLVULAS

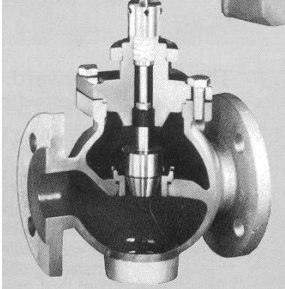

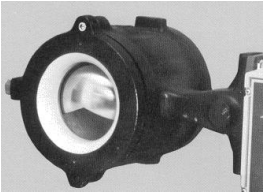
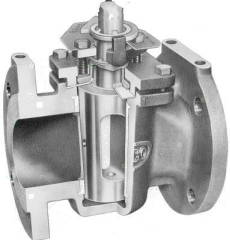
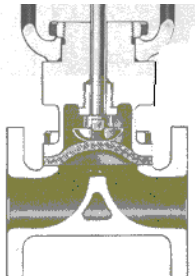
Especificar una válvula de control implica determinar las características de:

- **Cuerpo e internos:** indicando el tipo, material y serie que se fija de acuerdo al servicio que debe prestar. También hay que indicar el diámetro que está relacionado con la capacidad y a esto se lo denomina *dimensionamiento*. Por último, algunos tipos de válvula permiten elegir la Característica de Flujo.
- **Actuador:** una vez conocidos los detalles del cuerpo se debe elegir el tipo de motor (neumático de cabezal o pistón, eléctrico, etc.), la acción ante falla y el tamaño.
- **Accesorios:** corresponde a elementos adicionales como transductores I/P o V/P, volante para accionamiento manual, posicionador, etc.

TIPOS DE VÁLVULAS DE CONTROL

Existen diversos tipos de cuerpos, que se adaptan a la aplicación. Los que más se emplean en la práctica industrial se muestran en la tabla siguiente. Teóricamente el tipo debe adoptarse en función de las necesidades del proceso, aunque a veces hay razones, económicas por ejemplo, que obligan a usar un tipo aunque éste no sea el más adecuado.

Tabla 1: Características de los principales tipos de válvulas de control

TIPO	CARACTERÍSTICA
<p>Globo</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto costo en relación al Cv • Aplicación limitada para fluidos con partículas en suspensión • Diámetros hasta 24 pulgadas • Disponible en diversos modelos (simple y doble asiento, guiado en caja, etc.) • Existen tipos especiales para aplicaciones criogénicas, para vaporización, etc. • Rangeabilidad 35:1 a 50:1 • Amplia disponibilidad de características de flujo
<p>Mariposa</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Buena disponibilidad para grandes diámetros • Bajo costo en la versión estándar • Bajo costo en relación a Cv • Característica igual porcentaje salvo diseños especiales del plato • Susceptibles a cavitación y ruido • Baja pérdida de carga • Diámetros hasta 150 pulgadas • El cierre hermético requiere de recubrimientos especiales
<p>Esférica (ball)</p>  <p>Tapon (plug)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Característica igual porcentaje salvo que el obturador tenga una sección especial • Apta para el manejo de suspensiones muy viscosas o con fibras y sólidos • Requiere motores de gran tamaño • Precisan posicionadores • Deben ser extraídas de la línea para mantenimiento • Rangeabilidad típica de 50:1
<p>Sauers</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Ampliamente usadas para el manejo de fluidos corrosivos o erosivos • Construcción simple • Cierre hermético y las partes móviles no tienen contacto con el fluido • Limitado rango para presiones y temperaturas de trabajo • Rangeabilidad entre 3:1 a 15:1

DIMENSIONAMIENTO DE VÁLVULAS DE CONTROL

Por dimensionamiento se entiende la determinación del tamaño de la válvula, que viene dado por su diámetro. Es evidente que hay razones económicas que hacen que esta tarea sea importante, hay que tratar que este dispositivo tenga el menor tamaño (y por lo tanto el menor costo). Pero también hay razones técnicas, ya que válvulas sobre dimensionadas pueden llegar a tener un pobre desempeño cuando trabajan en un lazo de control.

El método más aceptado para el dimensionamiento es conocido como el *Procedimiento de Cv*. Cv es el *Coficiente de Flujo* de la válvula y depende del tipo, diámetro y grado de apertura de este dispositivo.

Las fórmulas básicas para el cálculo de Cv son:

$$\text{Líquidos} \quad F = C_v \sqrt{\frac{\Delta P_v}{\gamma}} = C_v \sqrt{\frac{P_1 - P_2}{\gamma}}$$

$$\begin{aligned} \text{Vapor de agua} \quad F &= \frac{2.1 C_v}{1 + 0.0007 T_{sh}} \sqrt{\Delta P_v (P_1 + P_2)} \\ &= \frac{2.1 C_v}{1 + 0.0007 T_{sh}} \sqrt{(P_1 - P_2) (P_1 + P_2)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Gases} \quad F &= 1360 C_v \sqrt{\frac{\Delta P_v (P_1 + P_2)}{G T_1}} \\ &= 1360 C_v \sqrt{\frac{(P_1 - P_2) (P_1 + P_2)}{G T_1}} \end{aligned}$$

Donde:

F: Caudal. Para *líquidos* en (gal/min), para *vapor* en (lb/h) y para *gases* en (ft³/seg) estándar (60 °F y 14.7 psia)

ΔP_v : Pérdida de carga en la válvula en (psig)

P₁: Presión aguas arriba (psia)

P₂: Presión aguas abajo (psia)

γ : Densidad relativa del líquido respecto del agua a 60 °F

Tsh: Recalentamiento del vapor respecto de las condiciones de saturación (°F). Vale cero para vapor saturado.

G: Densidad relativa del gas respecto al aire a 60 °F y 14.7 psia

T₁: Temperatura del gas a la entrada de la válvula

Esto sólo se aplica cuando el régimen de flujo es *subcrítico* y *turbulento*. Además, para líquidos hay que verificar que no se produzca *cavitación*. Si el régimen es viscoso o de transición se deben aplicar otras fórmulas. Cuando hay vaporización parcial del líquido, el régimen es crítico y se tiene

en cuenta con una ecuación de dimensionamiento distinta con un coeficiente adicional. Para gases, también se debe tener en cuenta si el régimen es crítico o de transición.

Para un tipo determinado de válvula, el coeficiente C_v es proporcionado por el fabricante y depende del diámetro (d) y de la apertura (x):

$$C_v = C_v(d,x)$$

Válvula cerrada	$x = 0$	$C_v = C_{v_{\min}}$	$F = F_{\min}$
Válvula totalmente abierta	$x = 1$	$C_v = C_{v_{\max}}$	$F = F_{\max}$

Los fabricantes proveen tablas (o gráficos) de C_v en función del diámetro y la apertura.

Los datos que se precisan para dimensionar una válvula son:

- **Presión aguas arriba y abajo de la válvula.** Si la válvula se va a instalar en una línea existente, esto se puede conocer, ya que existe el mecanismo de movimiento del fluido (bombas, altura gravimétrica, colector de alta y baja presión, etc.). Si se está proyectando la línea en la que se instala la válvula, se debe adoptar una pérdida de carga “razonable”. La experiencia sugiere que la pérdida de carga ΔP_v sea aproximadamente la tercera parte de la pérdida de carga total (incluida la válvula).
- **Rango de caudales de trabajo.** Se deben conocer entre que valores de flujos trabajará en estado estacionario la válvula. Esto implica fijar
 - $F_{N\min}$: caudal de estado estacionario mínimo
 - $F_{N\max}$: caudal de estado estacionario máximo
 Para estos dos caudales habrá que calcular los respectivos C_v ($C_{v_{N\min}}$, $C_{v_{N\max}}$). De tablas de C_v proporcionada por los fabricantes se puede calcular la apertura en el rango de operación. *Se debe escoger el diámetro de modo que la válvula trabaje en el término medio de su carrera (30 al 70 % de apertura), preferentemente lo más próximo al límite superior.* Una práctica recomendada es evaluar también el caudal máximo que pasará en condiciones de máxima apertura (F_{\max}). La experiencia práctica recomienda que F_{\max} sea 25 a 30 % mayor a $F_{N\max}$.
- **Temperatura y propiedades físicas del fluido.** Dependiendo del tipo de servicio se requiere conocer temperatura, densidad, viscosidad, presión de vapor, etc.

CARACTERÍSTICA DE FLUJO

La relación entre el flujo que pasa por una válvula y su apertura se denomina *Característica de Flujo*. Los fabricantes proveen lo que se denomina *Característica Inherente de Flujo*, que es la relación caudal apertura para pérdida de carga constante, que en definitiva es la relación de C_v con la apertura.

Esta es una propiedad intrínseca de la válvula. Existen Características Inherentes ampliamente difundidas entre los fabricantes, algunas de las cuales se presentan en la Tabla 2 y en la Figura 2. Estas son características ideales. Las reales son las que efectivamente el fabricante determina experimentalmente para sus productos y que en muchos casos se aproximan en alto grado a las características ideales.

Tabla 2: Principales tipos de Características Inherentes

TIPO	FORMULA TEORICA
Igual porcentaje	$Cv(x) = Cv_{Min} \exp(a x)$ Cv_{Min} : coeficiente para $x = 0$ a : parámetro que depende de la amplitud de caudales que puede manejar la válvula
Parabólica	$Cv(x) = x^2 Cv_{Max}$ Cv_{Max} : coeficiente para $x = 1$
Lineal	$Cv(x) = x Cv_{Max}$
Apertura rápida	No descripta por una fórmula de aceptación generalizada

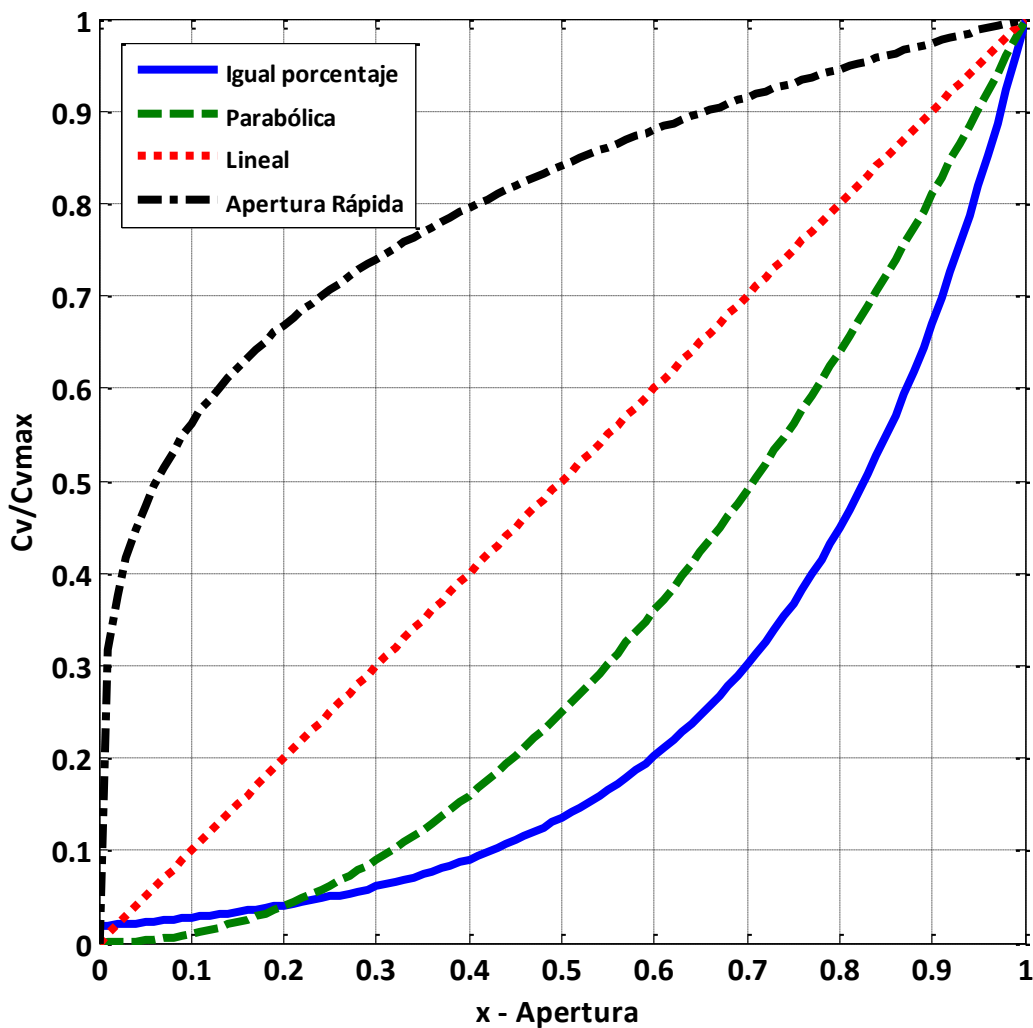


Figura 2: Características Inherentes de flujo más difundidas

La *Característica de Flujo Instalada* es la relación flujo apertura de la válvula en la línea en las condiciones de trabajo. Cuando una válvula de control se instala en una planta de proceso, **su característica de flujo depende de la Característica Inherente y del resto del sistema.**

El flujo a través de la válvula está sujeto a resistencia por fricción en la propia válvula y en el resto de la línea como se muestra esquemáticamente en la Figura 3.

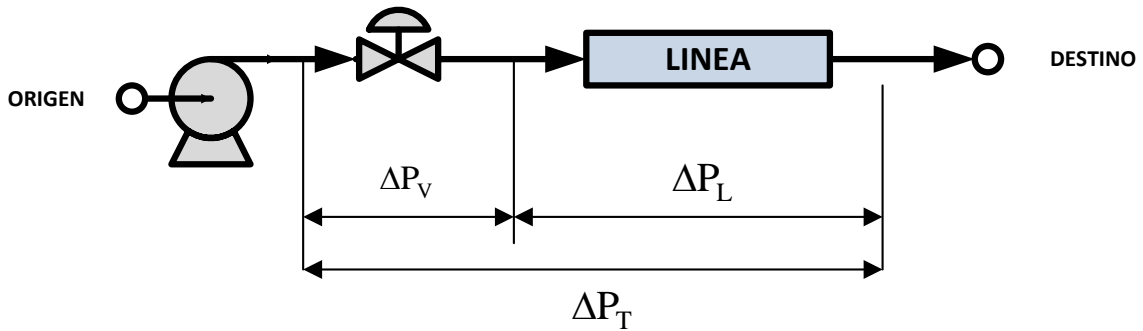


Figura 3: Esquema de una válvula instalada

En la Figura 4 se puede apreciar como cambia la pérdida de carga en la válvula (ΔP_V) y la de la línea (ΔP_L) según el caudal que circula.

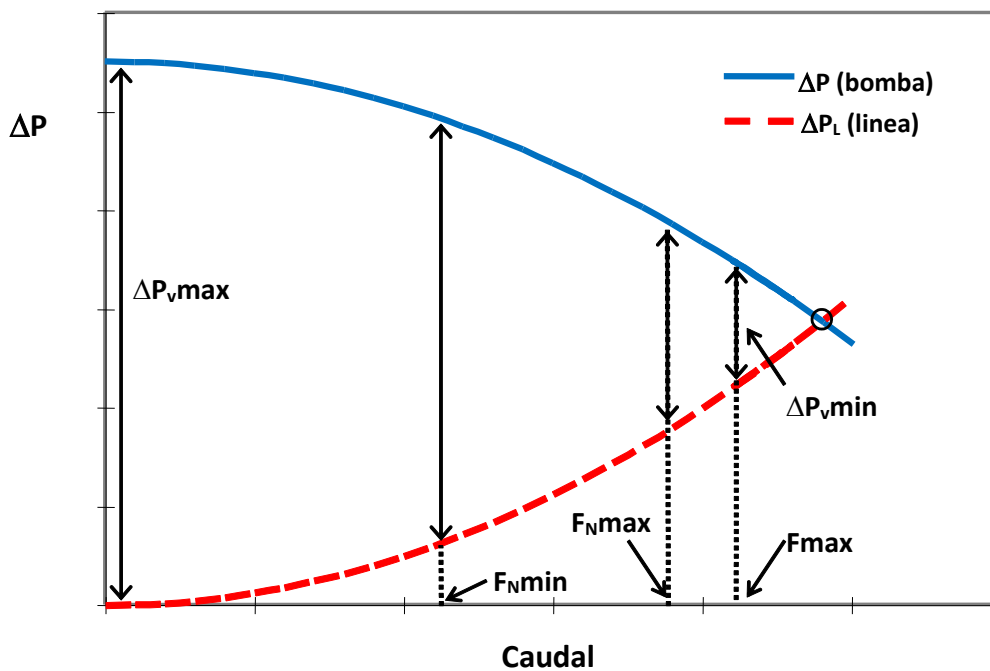


Figura 4: Relación entre diferencia de presiones y caudales en la línea

Para medir la influencia que ejerce la instalación en la característica de flujo de la válvula se define el coeficiente:

$$\alpha = \frac{\Delta P_V \text{ (válvula completamente abierta)}}{\Delta P_V \text{ (válvula en la menor apertura)}} = \frac{\Delta P_{V,min}}{\Delta P_{V,max}}$$

Como

$$\Delta P_T = \Delta P_V + \Delta P_L = \Delta P_{V,max}$$

entonces $\alpha=1$ significa que toda la pérdida de carga se concentra en la válvula independientemente del flujo que circule y por lo tanto la línea no tiene ninguna influencia en la característica de flujo. Valores decrecientes de α indicaran una creciente incidencia de la instalación.

En los gráficos de las Figuras 5 y 6 se pone en evidencia que la instalación puede tener una influencia sustancial la característica de flujo instalada produciendo en algunos casos importantes distorsiones respecto de la inherente.

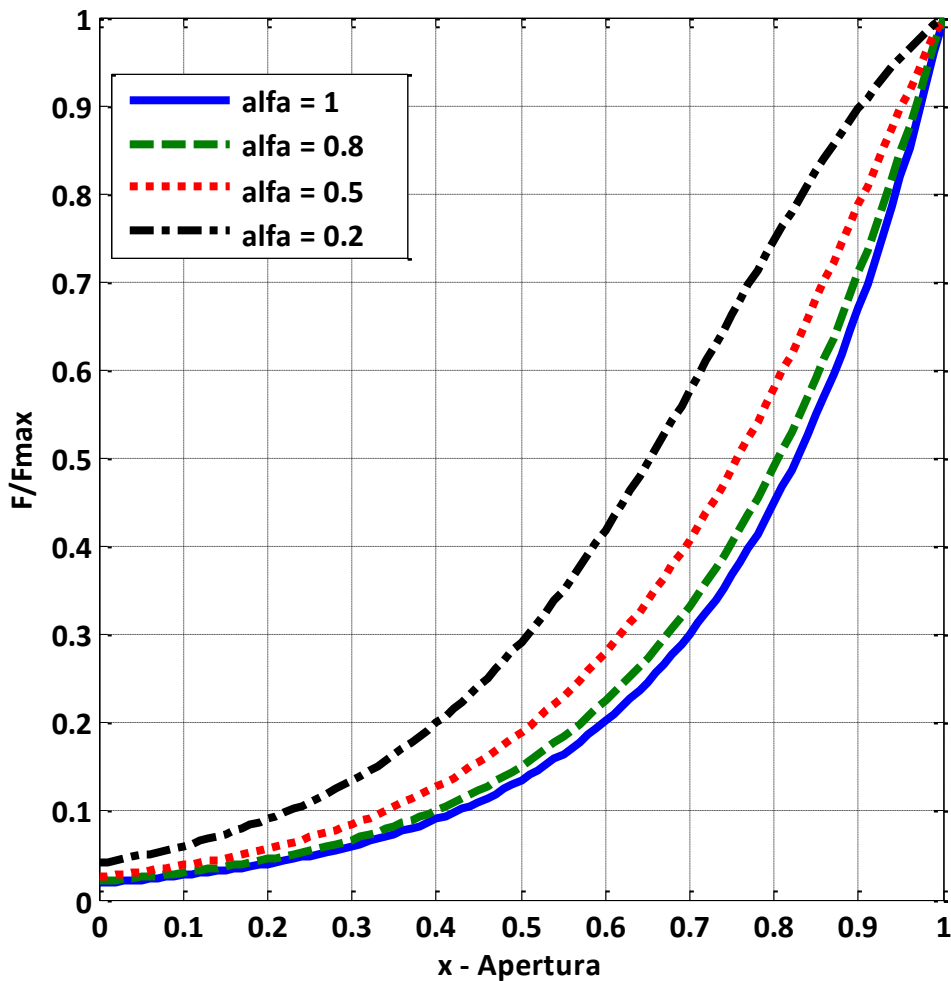


Figura 5: Distorsión de la característica de flujo por influencia de la instalación para una válvula de tipo igual porcentaje

Las válvulas de característica inherente igual porcentaje tienden a deformarse hacia a un comportamiento lineal (al menos en el tramo medio de aperturas) y tal distorsión es tanto mayor cuanto más influencia tiene la línea (alfa más pequeño).

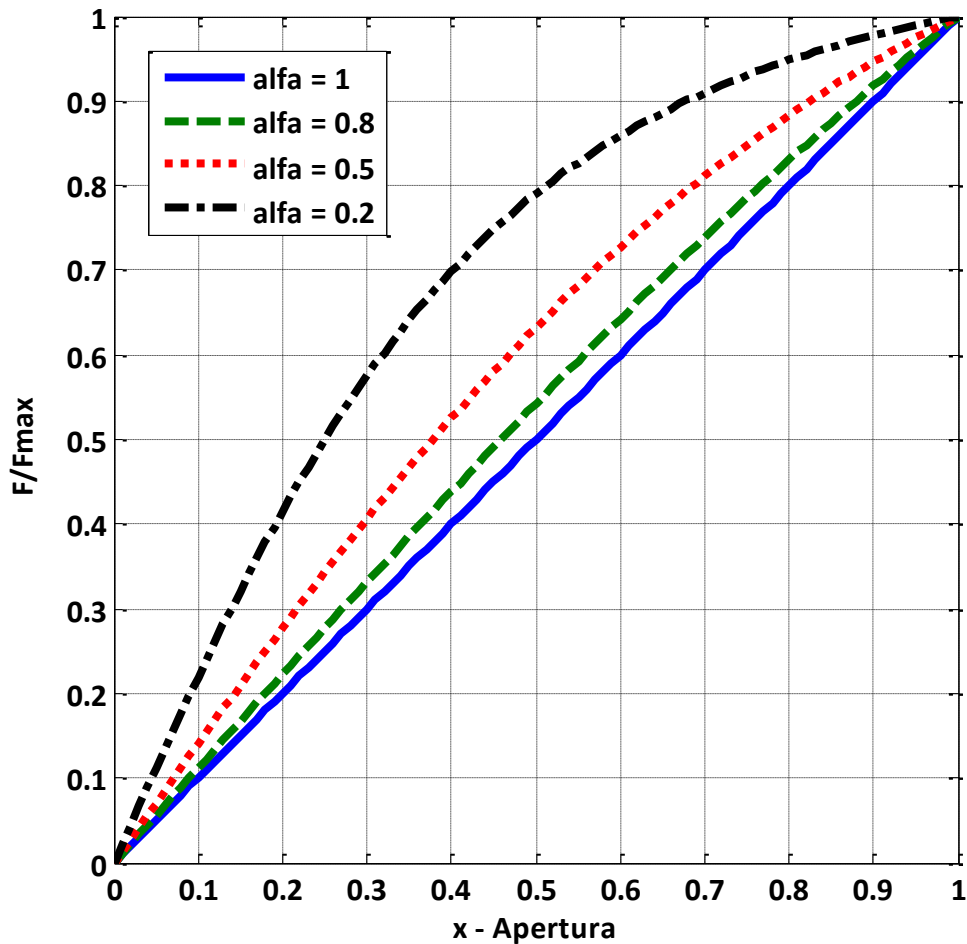


Figura 6: Distorsión de la característica de flujo por influencia de la instalación para una válvula de tipo lineal

Se observa que la característica inherente lineal de la válvula se deforma por influencia de la línea tendiendo a un comportamiento próximo a uno de apertura rápida. La tendencia se acentúa a medida que α decrece.