

CAPITULO 5. ELEMENTOS FINALES DE CONTROL

5.1. INTRODUCCIÓN.

Un elemento final de control es un mecanismo que altera el valor de la variable manipulada en respuesta a una señal de salida desde el dispositivo de control automático; típicamente recibe una señal del controlador y manipula un flujo de material o energía para el proceso. El elemento final de control puede ser una *válvula de control*, *variadores de frecuencia* y *motores eléctricos*, una *servoválvula*, un *relé*, *elementos calefactores de carácter eléctrico* o un *amortiguador*.

El elemento final de control consta generalmente de dos partes:

- Un actuador que convierte la señal del controlador en un comando para el dispositivo manipulador.
- Un mecanismo para ajustar la variable manipulada

En este capítulo se hará mención del elemento final de control más utilizado en el ámbito industrial, la válvula de control, dejando como casos de estudio para el alumno las características de los demás tipos de elementos.

5.2. VÁLVULAS DE CONTROL.

5.2.1. GENERALIDADES.

En los procesos industriales la válvula de control juega un papel muy importante en el bucle de regulación. Realiza la función de variar el caudal del fluido de control que modifica a su vez el valor de la variable de medida comportándose como un orificio de área continuamente variable. Dentro del bucle de control tiene tanta importancia como el elemento primario, el transmisor y el controlador. En la figura 5.1 puede verse una válvula de control típica.

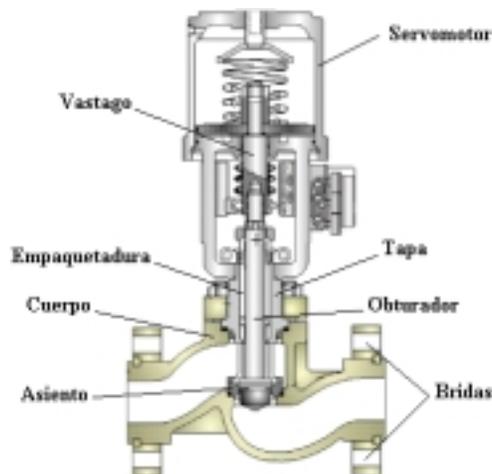


Figura 5.1. Válvula de control representativa.

La válvula de control se compone básicamente de los siguientes elementos:

5.2.1.1. Servomotor.

Acciona el movimiento del vástago y con ello del obturador. Puede ser neumático, eléctrico, hidráulico o digital (siendo los dos primeros los más utilizados).

- **Servomotor neumático:**

Consiste en un diafragma o pistón con resorte que trabaja (con algunas excepciones) entre 3 y 15 psi, es decir, que las posiciones extremas de la válvula ocurren a 3 y 15 psi.

Al aplicar una cierta presión sobre el diafragma, el resorte se comprime de tal modo que el mecanismo empieza a moverse y sigue moviéndose hasta que llega a un equilibrio entre la fuerza ejercida por la presión del aire sobre el diafragma y a la fuerza ejercida por el resorte.

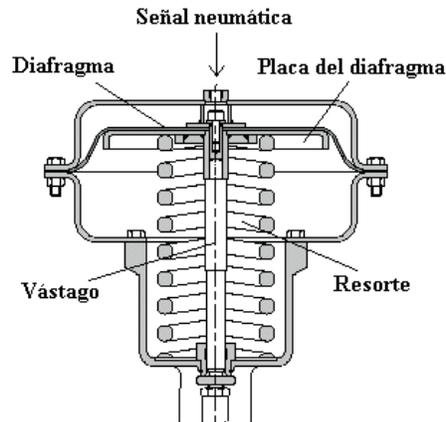


Figura 5.2. Servomotor neumático.

- **Servomotor eléctrico.**

Se trata de un motor eléctrico acoplado al vástago de la válvula a través de un tren de engranajes. El motor se caracteriza fundamentalmente por su par y por el tiempo requerido (usualmente 1 minuto) para hacer pasar la válvula de la posición abierta a la cerrada o viceversa.

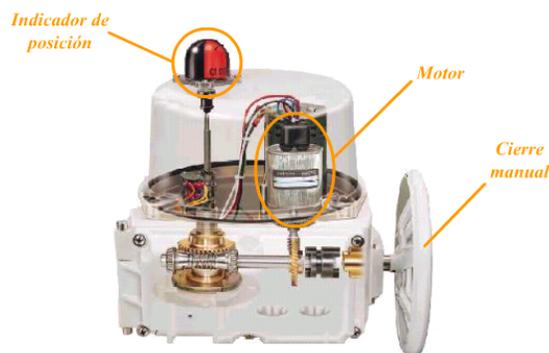


Figura 5.3. Servomotor eléctrico.

5.2.1.2. Vástago.

Su función es unir al obturador con el servomotor. Dispone generalmente de un índice que señala en una escala la posición de apertura o cierre de la válvula.

5.2.1.3. Tapa.

La tapa de la válvula de control tiene por objeto unir el cuerpo al servomotor. A su vez desliza el vástago del obturador accionado por el motor.

Según las temperaturas de trabajo de los fluidos y el grado de estanquidad deseada existen los siguientes tipos de tapas:

- Tapa normal (fig. 5.4a) adecuada para trabajar a temperaturas del fluido variables entre 0° y 220° C.
- Tapa con columnas de extensión (fig. 5.4b). Las columnas son adecuadas cuando el flujo está a temperaturas muy bajas.
- Tapa con fuelle de estanquidad (fig. 5.4c) para temperaturas de servicio entre 20 y 450° C.
- Tapa con aletas de radiación (fig. 5.4d) circulares o verticales que pueden trabajar entre 20° a 450° C, recomendándose por encima de los 350° C, la válvula se monte invertida para facilitar el enfriamiento de la empaquetadura.

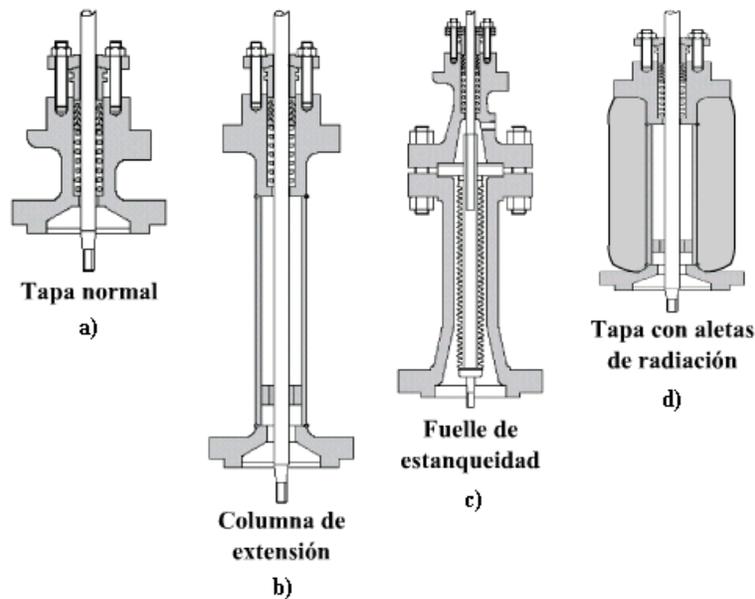


Figura 5.4. Tipos de tapas.

5.2.1.4. Empaquetadura.

Caja de protección entre la tapa y el vástago que tiene por función impedir que el fluido se escape a través de la tapa.

La caja de empaquetadura de la válvula consiste en unos anillos de estopada comprimidos por medio de una tuerca (fig. 5.5 a) o bien mediante una brida de presión regulable con dos tuercas (fig. 5.5 b). La empaquetadura puede ser apretada manualmente de modo periódico o bien puede ser presionada elásticamente por un muelle apoyado interiormente en la tapa (fig. 5.5).

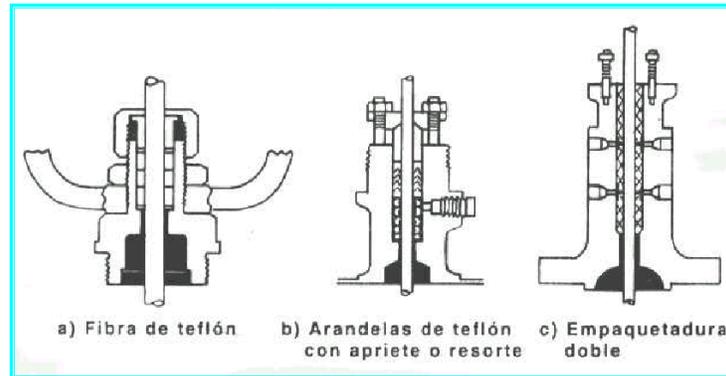


Figura 5.5. Tipos de empaquetaduras.

La empaquetadura normal puede ser de aros de teflón, de sección en V, comprimidos con un resorte con la ventaja de que el teflón es autolubricante y no necesita engrase. Cuando el fluido y las condiciones de servicio no permiten el empleo aislado del teflón se utiliza grafito en forma de filamento, laminado y cinta. El grafito sustituyó al amianto que fue dejado de utilizar por razones de salud humana. El grafito tiene un coeficiente de dilatación semejante al metal de vástago, de modo que el choque térmico no es un problema. Su coeficiente de rozamiento es del orden de 7 a 10 veces mayor que el del teflón, por lo que siempre que sea posible debe emplearse éste. No debe permitirse que se inicie una fuga porque es difícil solucionarla después. El grafito en presencia de humedad puede dar lugar a una severa corrosión galvánica del vástago, con lo que pueden presentarse fugas cuando el vástago empieza a moverse. En los casos en que el fluido es tan tóxico que debe impedirse su fuga a través de la estopada y por alguna razón no deben emplearse los fuelles de estanqueidad, se utilizan empaquetaduras dobles (fig. 5.5 c) con dos collarines de lubricación. Esta disposición permite la inyección de gas inerte. Incluso, si partes pequeñas del fluido se fugan, pueden recuperarse por succión a través de dichos collarines.

Existen diversos tipos de empaquetaduras según sean las presiones y temperaturas de trabajo y el tipo de fluido. En la tabla 5.1 puede verse una guía de selección.

Descripción	Presión máx. (bar)	Campo de T° (° C)	Observaciones
Teflón en V (anticorrosión).	40	-180 a 200	Adecuado en general para todo tipo de productos. Inadecuado para aceite y para productos que precipitan cristales o que contienen fangos.

Perfluorelastómero Con anillos de teflón reellenos con fibras de grafito.	--	0-250	Bajo nivel de fugas, bajo rozamiento, bajo mantenimiento.
Grafito en filamento o laminado o en cinta.	--	650-1650	Fluidos no oxidantes 650-1650 °C.

Tabla 5.1. Tipos de empaquetaduras.

Las fugas de las empaquetaduras más usuales (aros de teflón en V, etc.) se deben a la pérdida de la carga axial debida al desgaste, y al choque térmico por los diferentes coeficientes de dilatación del acero del vástago y del material de la empaquetadura (el teflón 10 veces más que el acero). En las válvulas normales, la carga axial se mantiene apretando periódicamente la empaquetadura, lo que aparte de un mantenimiento más caro, comporta un mayor rozamiento de la estopada, con el correspondiente aumento de la histéresis y la zona muerta de la válvula y un empeoramiento del control. Los nuevos sistemas de estopadas contienen aros de perfluorelastómero (PFE) alternado con aros de teflón reellenos con fibra de grafito. Mientras que la estopada clásica de aros de teflón muestra fugas mayores de 500 ppm después de ser sometida a 10.000 – 40.000 ciclos, la nueva estopada después de 250.000 ciclos (3 años de funcionamiento) se mantiene todavía muy por debajo de las 500 ppm.

El mantenimiento normal de las válvulas con empaquetadura estándar consiste en inspecciones cuatrimestrales y en un programa activo de mantenimiento de las válvulas que manejan fluidos orgánicos volátiles. Con las nuevas empaquetaduras, si se llega como máximo a fugas mayores de 500 ppm en sólo el 0.5 % de las válvulas de la planta, la norma de aire limpio permite efectuar únicamente inspecciones anuales.

5.2.1.5. Cuerpo.

El cuerpo de la válvula debe resistir la temperatura y la presión del fluido sin pérdidas, tener un tamaño adecuado para el caudal que debe controlar y ser resistente a la erosión o corrosión producidas por el fluido.

5.2.1.6. Bridas.

Aquí se realiza la conexión del cuerpo de la válvula con la tubería. Las bridas están normalizadas de acuerdo con las presiones y temperaturas de trabajo en las normas DIN y ANSI.

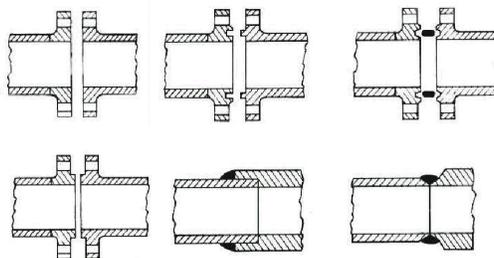


Figura 5.6. Tipos de conexiones del cuerpo a la tubería.

5.2.1.7. Obturador.

Es quien realiza la función de control de paso del fluido y puede actuar en su propio eje o bien tener un movimiento rotativo.

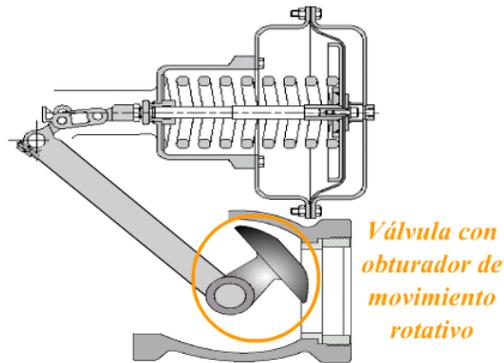


Figura 5.7.

5.2.1.8. Asiento.

Junto con el obturador forman el “corazón de la válvula” al controlar el caudal gracias al orificio de paso variable que forman al variar su posición relativa, y que además tienen la misión de cerrar el paso del fluido.

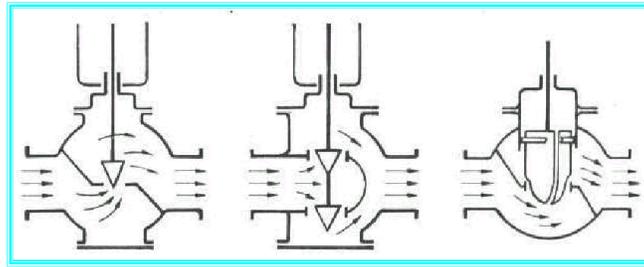
5.3. TIPOS DE VÁLVULAS.

Las válvulas pueden ser de varios tipos según sea el diseño del cuerpo y el movimiento del obturador.

Las válvulas de movimiento lineal, en las que el obturador se mueve en la dirección de su propio eje se clasifican como se especifica a continuación.

5.3.1. Válvula de globo.

Puede verse en las figuras 5.8 a, b y c siendo de *simple asiento*, de *doble asiento* y de *obturador equilibrado* respectivamente. Las válvulas de *simple asiento* precisan de un actuador de mayor tamaño para que el obturador cierre en contra de la presión diferencial del proceso. Por lo tanto, se emplean cuando la presión del fluido es baja y se precisa que las fugas en posición de cierre sean mínimas. El cierre estanco se logra con obturadores provistos de una arandela de teflón. En la válvula de *doble asiento* o de *obturador equilibrado* la fuerza de desequilibrio desarrollada por la presión diferencial a través del obturador es menor que en la válvula de simple asiento. Por este motivo se emplea en válvulas de gran tamaño o bien cuando deba trabajarse con una alta presión diferencial. En posición de cierre las fugas son mayores que en una válvula de simple asiento.

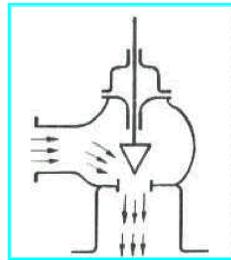


(a) (b) (c)

Figura 5.8. Válvulas de globo.

5.3.2. Válvula en ángulo.

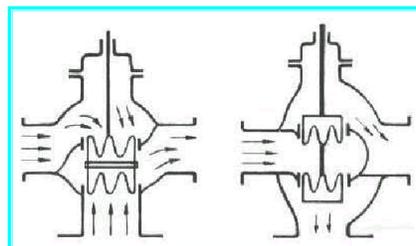
Esta válvula presentada en la figura 5.9, permite obtener un flujo de caudal regular sin excesivas turbulencias y es adecuada para disminuir la erosión cuando ésta es considerable por las características del fluido o por la excesiva presión diferencial. El diseño de la válvula es idóneo para el control de fluidos que vaporizan (*flashing*), para trabajar con grandes presiones diferenciales y para los fluidos que contienen sólidos en suspensión.



Figuro 5.9. Válvula en ángulo.

5.3.3. Válvula de tres vías.

Este tipo de válvula se emplea generalmente para mezclar fluidos –válvulas mezcladoras (fig. 5.10 a)—o bien para derivar de un flujo de entrada de dos de salida –válvulas divisoras (fig. 5.10 b). Las válvulas de tres vías intervienen típicamente en el control de temperatura de intercambiadores de calor.



(a) (b)

Figura 5.10. Válvulas de tres vías.

5.3.4. Válvula de jaula.

Consiste en un obturador cilíndrico que desliza en una jaula con orificios adecuados en las características de caudal deseadas en la válvula (fig. 5.11). Se caracterizan por el fácil desmontaje del obturador y porque éste puede incorporar orificios que permiten eliminar prácticamente el desequilibrio de fuerzas producido por la presión diferencial favoreciendo la estabilidad del funcionamiento. Por este motivo, este tipo de obturador equilibrado se emplea en válvulas de gran tamaño o bien cuando deba trabajarse con una alta presión diferencial. Como el obturador esta contenido dentro de la jaula, la válvula es muy resistente a las vibraciones y al desgaste. Por otro lado, el obturador puede disponer de aros de teflón que, con la válvula en posición cerrada, asientan contra la jaula y permiten lograr así un cierre hermético.

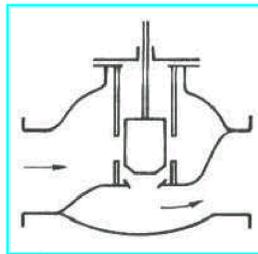


Figura 5.11. Válvula de jaula.

5.3.5. Válvula de compuerta.

Esta válvula efectúa su cierre con un disco vertical plano, o de forma especial, y que se mueve verticalmente al flujo del fluido. Por su disposición es adecuada generalmente para control todo-nada, ya que en posiciones intermedias tiende a bloquearse. Tiene la ventaja de presentar muy poca resistencia al flujo de fluido cuando está en posición de apertura total (fig. 5.12).

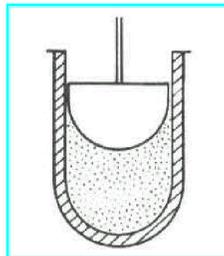


Figura 5.12. Válvula de compuerta.

5.3.6. Válvula en Y.

En la fig. 5.13 puede verse su forma. Es adecuada como válvula de cierre y de control. Como válvula todo-nada se caracteriza por su baja pérdida de carga y como válvula de control presenta una gran capacidad de caudal. Posee una característica de autodrenaje cuando está instalada con un cierto ángulo. Se emplea usualmente en instalaciones criogénicas.

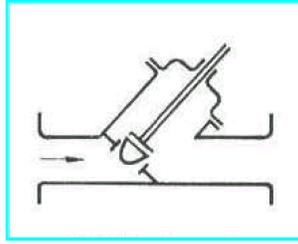


Figura 5.13. Válvula en Y.

5.3.7. Válvula de cuerpo partido.

Esta válvula (fig. 5.14) es una modificación de la válvula de globo de simple asiento teniendo el cuerpo partido en dos partes entre las cuales está presionado el asiento. Esta disposición permite una fácil sustitución del asiento y facilita un flujo suave del fluido sin espacios muertos en el cuerpo. Se emplea principalmente para fluidos viscosos y en la industria alimentaria.

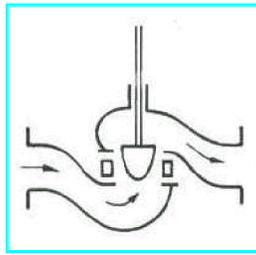


Figura 5.14. Válvula de cuerpo de partido.

5.3.8. Válvula Saunders.

En la válvula Saunders (fig. 5.15), el obturador es una membrana flexible que a través de un vástago unido a un servomotor, es forzada contra un resalte del cuerpo cerrando así el paso del fluido.

La válvula se caracteriza porque el cuerpo puede revestirse fácilmente de la goma o de plástico para trabajar con fluidos agresivos.

Tiene la desventaja de que el servomotor de accionamiento debe ser muy potente. Se utiliza principalmente en procesos químicos difíciles, en particular en el manejo de fluidos negros o bien en el control de fluidos conteniendo sólidos en suspensión.

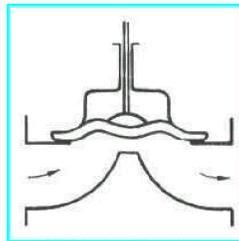


Figura 5.15. Válvula Saunders.

5.3.9. Válvula de compresión.

Esta válvula funciona mediante el pinzamiento de dos o más elementos flexibles, por ejemplo, un tubo de goma. Igual que las válvulas de diafragma se caracterizan porque proporcionan un óptimo control en posición de cierre parcial y se aplican fundamentalmente en el manejo de fluidos negros corrosivos, viscosos o conteniendo partículas sólidas en suspensión (ver figura 5.16).

Las válvulas en las que el obturador tiene un movimiento circular se clasifican como se detalla a continuación.

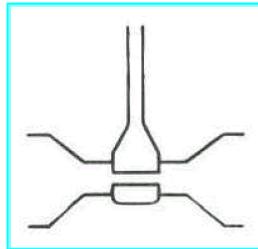


Figura 5.16. Válvula de compresión.

Las válvulas de movimiento circular se clasifican de la siguiente forma:

5.3.10. Válvula de obturador excéntrico rotativo.

Consiste en un obturador de superficie esférica que tiene un movimiento rotativo excéntrico y que está unido al eje de giro por uno de los dos brazos flexibles (fig. 5.17).

El eje de giro sale al exterior del cuerpo y es accionado por el vástago de un servomotor. El par de éste es reducido gracias al movimiento excéntrico de la cara esférica del obturador.

La válvula puede tener un cierre estanco mediante aros de teflón dispuestos en el asiento y se caracteriza por su gran cantidad de caudal, comparable a las válvulas mariposa y a las de bola y por su elevada pérdida de carga admisible.

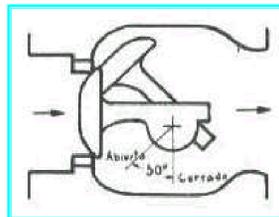


Figura 5.17. Válvula de obturador excéntrico rotativo.

5.3.11. Válvula de obturador cilíndrico excéntrico.

Esta válvula (fig. 5.18) tiene un obturador cilíndrico excéntrico que asienta contra un cuerpo cilíndrico. El cierre hermético se consigue con un revestimiento de goma o teflón

en la cara del cuerpo donde asienta el obturador. Es adecuada para fluidos corrosivos y líquidos viscosos o conteniendo sólidos en suspensión.

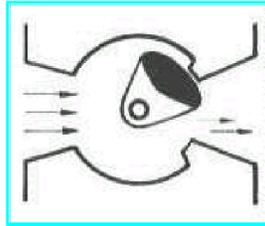


Figura 5.18. Válvula de obturador cilíndrico excéntrico.

5.3.12. Válvula de mariposa.

El cuerpo está formado por un anillo cilíndrico dentro del cual gira transversalmente un disco circular (fig. 5.19). La válvula puede cerrar herméticamente mediante un anillo de goma encastrado en el cuerpo. Un servomotor exterior acciona el eje de giro del disco y ejerce su par máximo cuando la válvula está totalmente abierta (en control todo-nada se consideran 90° y en control continuo 60° , a partir de la posición de cierre ya que la última parte del giro es bastante inestable), siempre que la presión diferencial permanezca constante. En la selección de la válvula es importante considerar las presiones diferenciales correspondientes a las posiciones de completa apertura y cierre; se necesita una fuerza grande del actuador para accionar la válvula en caso de una caída de presión elevada.

Las válvulas de mariposa se emplean para el control de grandes caudales de fluidos a baja presión.

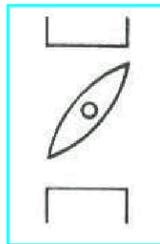


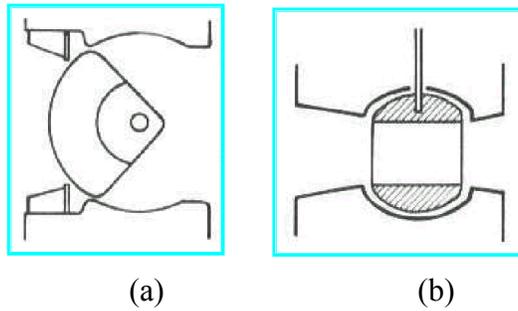
Figura 5.19. Válvula de mariposa.

5.3.13. Válvula de bola.

El cuerpo de la válvula tiene una cavidad interna esférica que alberga un obturador en forma de esfera o de bola (de ahí su nombre) (fig. 5.20a). La bola tiene un corte adecuado (usualmente en V) que fija la cueva característica de la válvula, y gira transversalmente accionada por un servomotor exterior. El cierre estanco se logra con un aro de teflón incorporado al cuerpo contra el cual asienta la bola cuando la válvula está cerrada. En posición de apertura total, la válvula equivale aproximadamente en tamaño a 75 % del tamaño de la tubería. La válvula de bola se emplea principalmente en el control de caudal de fluidos negro, o bien en fluidos con gran porcentaje de sólidos en suspensión.

Una válvula de bola típica es la *válvula de macho* (fig. 5.20b) que consiste en un macho de forma cilíndrica o troncocónica con un orificio transversal igual al diámetro

interior de la tubería. El macho ajusta en el cuerpo de la válvula y tiene un movimiento de giro de 90°. Se utiliza generalmente en el control manual todo-nada de líquidos o gases y en regulación de caudal.



(a) (b)
Figura 5.20. Válvula de bola.

5.3.14. Válvulas de flujo axial.

Las válvulas de flujo axial consisten en un diafragma accionado neumáticamente que mueve un pistón, el cual a su vez comprime un fluido hidráulico contra el obturador formado por un material elastómero. De este modo, el obturador se expande para cerrar el flujo anular del fluido. Este tipo de válvulas se emplea para gases y es especialmente silencioso. Otra variedad de la válvula de flujo axial es la válvula de manguito, que es accionada por compresión exterior del manguito a través del un fluido auxiliar a una presión superior a la del propio fluido. Se utiliza también para gases (ver fig. 5.21).

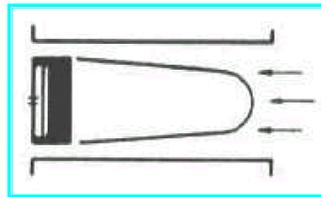


Figura 5.21. Válvulas de flujo axial.

5.4. CARACTERÍSTICA DE CAUDAL INHERENTE.

El obturador determina la característica de caudal de la válvula; es decir, la relación que existe entre la posición del obturador y el caudal de paso del fluido.

La característica de un fluido incompresible fluyendo en condiciones de presión diferencial constante a través de la válvula se denomina *característica de caudal inherente* y se representa usualmente considerando como abscisas la carrera del obturador de la válvula y como ordenadas el porcentaje de caudal máximo bajo una presión diferencial constante.

Las curvas características más significativas son la de apertura rápida, la lineal y la isoporcentual, siendo las más importantes éstas dos últimas. Otras curvas son las parabólicas y las correspondientes a las válvulas de tajaderas, mariposa, Saunders, y con el obturador excéntrico rotativo.

Las curvas características se obtienen mecanizando el obturador para que al variar la carrera el orificio de paso variable existente entre el contorno del obturador y el asiento configure la característica de la válvula. En la figura 5.22 pueden verse varios tipos de obturadores cuya forma y mecanización determina esta característica.

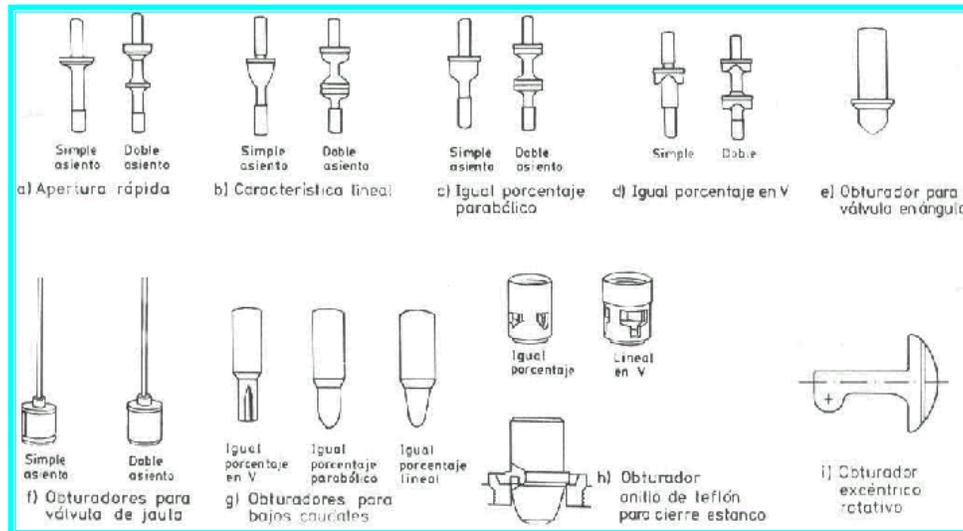


Figura 5.22. Tipos de obturadores.

El obturador con *característica de apertura rápida* tiene la forma de un disco plano. En la figura 5.23(a) puede verse que el caudal aumenta mucho al principio de la carrera llegando rápidamente al máximo.

El obturador con *característica lineal*, el caudal es directamente proporcional a la carrera según la ecuación: $q=Kl$, en la que

- q = caudal a pérdida de carga constante
- K = constante
- l = carrera de la válvula.

Gráficamente se representa por la línea recta de la figura 5.23(b). La “*rangeability*” o campo de control de caudales que la válvula es capaz de regular manteniendo la curva característica inherente es en la válvula lineal de 15 a 1 o de 30 a 1. Si bien teóricamente podría ser infinita, las dificultades de fabricación la limitan a este valor.

En el obturador con *característica isoporcentual* cada incremento de carrera del obturador produce un cambio en el caudal que es proporcional al caudal que fluía antes de la variación. La ecuación correspondiente es:

$$\frac{dq}{dl} = aq$$

en la que

q = caudal a pérdida de carga constante
 l = carrera
 a = constante

de aquí : $\frac{dq}{q} = a dl$ e integrando $\int \frac{dq}{q} = a \int dl$ luego

$q = b e^{al}$ en la que a y b son constantes; e = base de logaritmos neperianos.

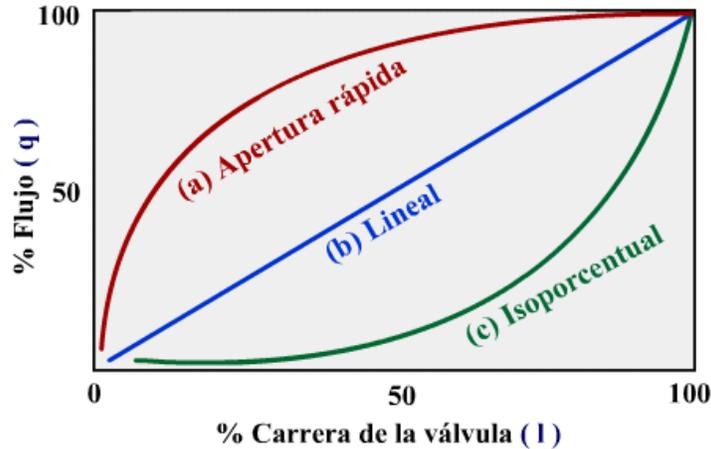


Figura 5.23. Tipos de características inherentes de la válvula.

5.5. CARACTERÍSTICAS DE CAUDAL EFECTIVAS.

Por lo general, en la mayor parte de las válvulas que trabajan en condiciones reales, la presión diferencial cambia cuando varía la apertura de la válvula, por lo cual la curva real que relaciona la carrera de la válvula con el caudal, se aparta de la característica de caudal inherente. Esta nueva curva recibe el nombre de *característica de caudal efectiva*.

Como la variación de presión diferencial señalada depende de las combinaciones entre la resistencia de la tubería, y las características de las bombas y tanques del proceso, es evidente que una misma válvula instalada en procesos diferentes presentará inevitablemente curvas características efectivas distintas.

Una forma adecuada para representar la característica de caudal efectiva es a través del coeficiente r , que expresa la relación entre la caída de presión en la válvula respecto de la caída de presión total del sistema, tal como se muestra en el ejemplo de la figura 5.24, en donde la pérdida total del sistema es constante (caso de un depósito que descarga a un nivel más bajo a través de una válvula de control).

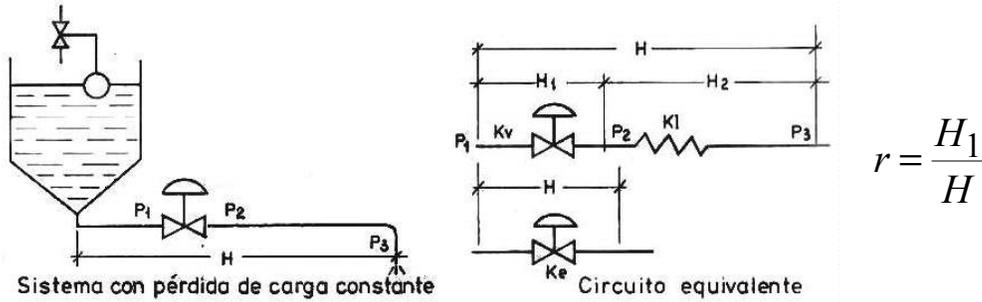


Figura 5.24. Ejemplo sencillo de estudio para la variación de r

De modo general, el caudal que pasa por la válvula corresponde a la ecuación

$$Q_v = K A \sqrt{p_2 - p_1} = K_v \sqrt{\Delta p}$$

en la que:

Q_v = caudal a través de la válvula

K = constante

A = área del paso

Δp = presión diferencial a través de la válvula

Si consideramos una pérdida de carga de 1 bar y llamamos K_v al caudal que circula en estas condiciones, tenemos

$$K_v = K \cdot A \cdot 1$$

luego

$$Q_v = K_v \sqrt{\Delta p}$$

y por la analogía, el caudal que pasa por la tubería es: $Q_t = K_t \sqrt{\Delta p}$, expresión en la que K_t es el caudal que pasa por la tubería con una pérdida de carga de 1 kg/cm²; es decir, es una constante.

Por otro lado, del circuito equivalente de la figura 5.24, el coeficiente efectivo de la válvula que sustituye al conjunto anterior válvula (K_v) + tubería (K_t) sería K_e . Luego:

$$i) \quad Q = K_v \sqrt{H_1} = K_t \sqrt{H_2} = K_e \sqrt{H}$$

$$ii) \quad H = H_1 + H_2 = Q^2 \left(\frac{1}{K_v^2} + \frac{1}{K_t^2} \right)$$

luego de i) y ii) tenemos
$$K_e = \frac{K_v}{\sqrt{1 + \left(\frac{K_v}{K_t} \right)^2}} \quad \text{y como} \quad \frac{K_v}{K_{v_max}} = q_i$$

siendo q_i la característica de caudal inherente resulta:

$$K_e = \frac{K_{v_max}}{\sqrt{\left(\frac{K_{v_max}}{Kl}\right)^2 + \frac{1}{q_i^2}}} \quad \text{cuyo valor máximo es} \quad K_{e_max} = \frac{K_{v_max}}{\sqrt{\left(\frac{K_{v_max}}{K_l}\right)^2 + 1}}$$

luego:

$$\frac{K_e}{K_{e_max}} = \frac{\sqrt{\left(\frac{K_{v_max}}{K_l}\right)^2 + 1}}{\sqrt{\left(\frac{K_{v_max}}{K_l}\right)^2 + \frac{1}{q_i^2}}}$$

y como

$$r = \frac{H_1}{H} = \frac{\frac{Q_{max}^2}{K_{v_max}^2}}{\frac{Q_{max}^2}{K_{v_max}^2} + \frac{Q_{max}^2}{K_l^2}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{K_{v_max}}{K_l}\right)^2}$$

y sustituyendo en la ecuación anterior se obtiene la expresión final

$$q_e = \frac{1}{\sqrt{1 - r + \frac{r}{q_i^2}}}$$

que es una familia de curvas efectivas en función de r y de la característica inherente q_i .

Si $r = 1$ la característica inherente se confunde con la efectiva. Si la característica es lineal $q_i = Kl$, resulta:

$$q_e = \frac{1}{\sqrt{1 - r + \frac{r}{K^2 l^2}}}$$

Si la característica es isoporcentual con “rangeability” $R=50$, $q_i=0.02 \times 50^l$ resulta

$$q_e = \frac{1}{\sqrt{1 - r + \frac{r}{0.04 \times 50^{2l}}}}$$

Estas familias de curvas están representadas en las figuras 5.25 (a) y (b) respectivamente.

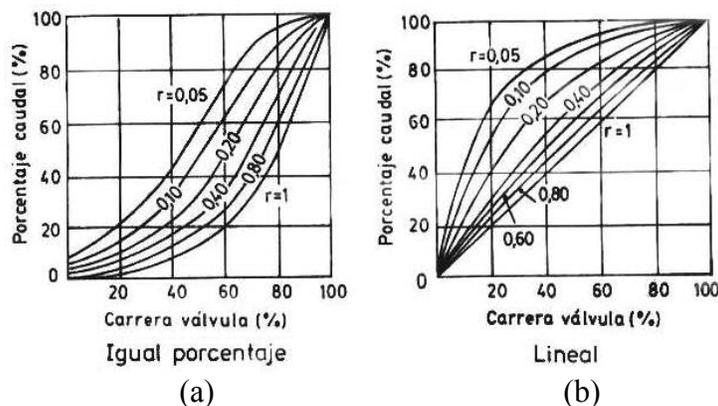


Figura 5.25. Curvas características efectivas de una válvula de control.

En la figura 5.25 (a) puede verse que, la característica isoporcentual se desplaza gradualmente hacia una curva característica lineal al ir disminuyendo r , es decir al bajar la pérdida de carga disponible para la válvula y al aumentar simultáneamente el porcentaje de pérdida de presión en la línea.

Asimismo, en la figura 5.25 (b) la curva característica inherente lineal se va aproximando a una curva rápida al ir disminuyendo el valor de r .

El valor de éste coeficiente dependerá del tamaño relativo de la válvula con relación al de la tubería (menor ϕ de la válvula mayor valor de r) y de la resistencia de la tubería con relación al conjunto (menor resistencia mayor r). Para cada valor de r puede construirse una curva característica efectiva que se apartará de la curva inherente y que coincidirá con ella cuando $r = 1$, es decir, cuando la línea no absorbe presión y queda toda disponible para la válvula. Si el valor de r fuera muy pequeño la válvula de control absorbería muy poca presión y quedaría muy distorsionada la característica inherente.

5.6. DIMENSIONAMIENTO DE LA VÁLVULA. CALCULO DE K_V Y C_V .

5.6.1. Definiciones.

La necesidad universal de normalizar el cálculo de dimensiones de las válvulas, no sólo en cuanto a tamaño sino también en cuanto a capacidad de paso del fluido ha llevado a los fabricantes y a los usuarios a adoptar un coeficiente que refleja y representa la capacidad de las válvulas de control.

El primer coeficiente de dimensionamiento de válvula que se utilizó fue el denominado C_v , cuya definición es la siguiente: “caudal en galones USA por minuto que pasa a través de la válvula en posición completamente abierta y con una pérdida de carga de una libra por pulgada cuadrada (psi)”.

En los países que se emplean unidades métricas se suele utilizar además el coeficiente K_v , que la norma internacional IEC-534-1987 sobre Válvulas de Control de Procesos industriales define del siguiente modo: “caudal de agua (de 5 a 40° C) en m^3/h

que pasa a través de la válvula a una apertura dada y con una pérdida de carga de 1 bar (10^5 Pa) (1.02 bar).

El coeficiente K_v para la válvula totalmente abierta se denomina K_{vs} mientras que el mínimo valor recibe el nombre de K_{v0} . Por lo tanto la relación $\frac{K_{vs}}{K_{v0}}$ es la denominada “rangeability” o “campo de control” que expresa la relación de caudales que la válvula puede controlar. En las válvulas de control isoporcentuales, esta relación suele ser 30 a 1 y en las lineales de 15 a 1 ó 30 a 1. La equivalencia entre los coeficientes K_v y C_v para la válvula completamente abierta es:

$$K_v = 0.86 C_v \text{ (m}^3\text{/h)}$$

$$C_v = 1.16 K_v \text{ (galones por minuto)}$$

5.6.2. Fórmula general.

La válvula se comporta esencialmente como un orificio de paso variable que permite la circulación de un cierto caudal con una determinada pérdida de carga.

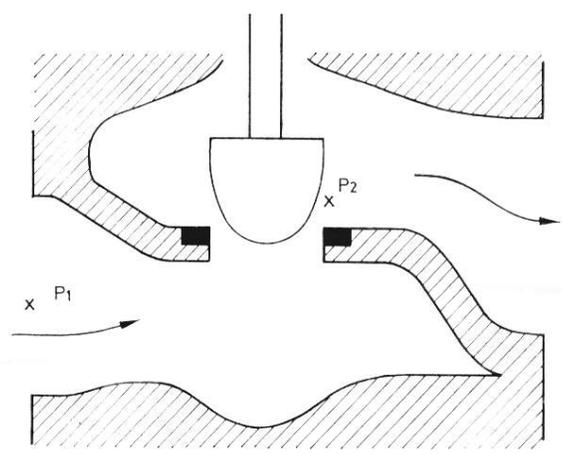


Figura 5.26. Válvula de control.

Aplicando el teorema de Bernoulli en los puntos 1 y 2 de la figura 5.26 resulta:

$$\frac{P_1}{\delta_1} + \frac{V_1^2}{2} = \frac{P_2}{\delta_2} + \frac{V_2^2}{2} \text{ suponiendo que los fluidos son incompresibles } Q_1=Q_2=q \text{ luego:}$$

$$V_2^2 - V_1^2 = 2 \frac{P_1 - P_2}{\delta}$$

y como V_2 es mucho mayor que V_1 queda:

$$V_2 = \sqrt{2 \frac{\Delta P}{\delta}} = \sqrt{2h}$$

Por otro lado, la forma de la válvula da lugar a una resistencia que disminuye la velocidad. Luego ésta es:

$$V = \beta \sqrt{2h}$$

en la que: β = coeficiente de resistencia (sin dimensiones)
 V = velocidad del fluido, en m/s
 h = altura de presión entre la entrada y la salida de la válvula, en m

y como $q = FV$ siendo q = caudal a través de la válvula, en m³/h
 F = sección del orificio de paso, en m²

Resulta

$$q = F\beta\sqrt{2h} = F\beta\sqrt{2 \frac{\Delta P}{\delta}} 10^2 \text{ m}^3/\text{s} \quad (1)$$

en la que ΔP = pérdida de carga en bar a través de la válvula (1 bar = 10⁵ Pascal)
 δ = densidad del fluido, en kg/dm³

Como por definición K_v corresponde al caudal en m³/h para una pérdida de carga $\Delta P=1$ bar y la densidad del agua entre 5 y 40° C es de 1000 kg/dm³, resulta:

$$K_v = 3600F\beta\sqrt{200} \text{ m}^3/\text{h} = 50.911 F\beta \text{ m}^3/\text{h} \quad (2)$$

Esta fórmula permite determinar el contorno del obturador ya que relaciona el caudal en función del área de paso.

Sustituyendo la fórmula anterior en (1) resulta:

$$q = \frac{K_v}{3600} \sqrt{\frac{\Delta P}{\delta}} \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q = K_v \sqrt{\frac{\Delta P}{\delta}} \text{ m}^3/\text{h}$$

y de aquí

$$K_v = Q \sqrt{\frac{\delta}{\Delta P}} \text{ m}^3/\text{h}$$

expresiones en las que:

Q = caudal máximo, en m³/h
 δ = densidad, en kg/dm³ o g/cm³
 ΔP = pérdida de carga, en bar para el caudal máximo

De la fórmula (2) se desprende que el coeficiente de la válvula depende del área de paso y de la resistencia del paso al fluido, es decir, de la configuración hidráulica, del estado de las superficies interiores, del tipo de válvula, etc. Son tantas estas variables y tan compleja su variación que es prácticamente imposible fijar los valores de K_v sin recurrir a la experimentación.

5.6.3. Vaporización (*flashing*) y Cavitación.

En algunas aplicaciones de las válvulas de control, el fluido existe en estado líquido antes de la válvula y en estado de vapor aguas abajo por existir en la salida una presión igual o inferior a la tensión del líquido en estado de vapor a la temperatura de derrame. Este fenómeno se denomina *vaporización*.

En la zona de estrangulación de la vena del líquido (vena contraída) puede ocurrir que la tensión del vapor del líquido llegue a ser inferior a la presión de su vapor saturado, formándose burbujas de vapor que colapsan si a la salida de la válvula de presión vuelve a ser superior a dicha presión de saturación del líquido. Este fenómeno se denomina “*Cavitación*” y se debe evitar porque origina una rápida destrucción del material de las partes internas y excesivo ruido.

El intercambio continuo entre la presión y la velocidad del líquido a lo largo de su recorrido a través de la válvula se denomina “*recuperación de presión*” y juega un papel importante en la determinación precisa del tamaño de la válvula de control.

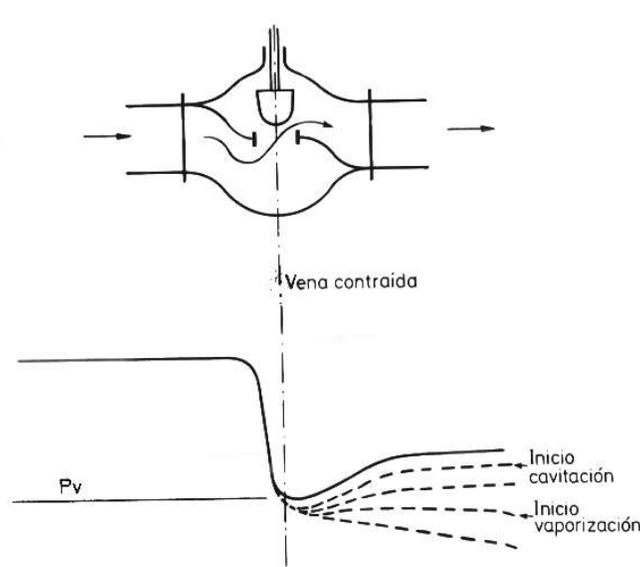


Figura 5.27. Vaporización, cavitación y recuperación de presión.

En el caso de un gas o vapor, la disminución gradual de la presión de salida, manteniéndose constante la presión de entrada, hace que aumente la velocidad del fluido en la vena contraída hasta alcanzar la velocidad del sonido, y a partir de este punto, el caudal de gas no aumenta aunque baje más la presión de salida (caudal estrangulado).

El factor que tiene en cuenta la recuperación de presión de la válvula con relación al caudal crítico (estrangulado) es el C_t que equivale a:

$$C_t^2 = \frac{\Delta P_s}{P_1 - P_{vc}}$$

en la que:

- ΔP_s = Perdida de carga a través de la válvula necesaria para producir caudal estrangulado.
- P_1 = Presión a la entrada de la válvula.
- P_{vc} = Presión de la vena contraída.

La perdida de carga debe limitarse para que no se presenten estas condiciones de caudal crítico e incluso conviene prevenir el fenómeno de la cavitación de acuerdo a la fórmula:

$$\Delta P \leq K_c \cdot (P_1 - P_v)$$

en la que:

- K_c = índice de cavitación.
- P_v = Presión del vapor de líquido en la entrada.

En las tablas provistas por fabricantes de válvulas de control pueden verse valores representativos, como los mostrados por ejemplo en la tabla 5.2.

Tipo de válvula	Fluido tiende a	$C_t(F_L)$	F_s	K_c (índice de cavitación)	Conos reductores			
					$d/D = 1,5$		$d/D = 2$	
					F_p	F_{Lp}	F_p	F_{Lp}
Globo, simple asiento	abrir	0,9	1,05	0,65	0,96	0,85	0,94	0,85
	cerrar	0,85	1,09	0,58	0,96	0,80	0,94	0,80
Globo, doble asiento	obt. parabólico	0,9	0,85	0,7	0,96	0,85	0,94	0,76
	obt. en V	0,98	0,84	0,8	0,96	0,89	0,94	0,89
Cuerpo partido	abrir	0,75		0,46	0,96	0,72	0,94	0,72
	cerrar	0,8		0,51	0,96	0,77	0,94	0,76
Ángulo	abrir	0,9	1,08	0,65	0,96	0,84	0,94	0,84
	cerrar	0,8	1,12	0,52	0,96	0,78	0,94	0,77
Mariposa		0,65	0,92	0,32	0,81	0,60	0,72	0,59
Bola		0,6	1,25	0,24	0,87	0,55	0,80	0,54

Tabla 5.2.

5.7. BIBLIOGRAFÍA.

- [1].Creus Solé Antonio; Instrumentación Industrial, 6ª edición; Marcombo S.A.; 1997.
- [2].Creus Solé Antonio; Instrumentos Industriales. Su ajuste y calibración; 2ª edición; Marcombo S.A.
- [3].<http://www.flowserve.com>
- [4].<http://www.abb.com>