



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

EL INGENIERO QUÍMICO COMO ASESOR ESPECIALISTA EN LA  
SELECCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE VÁLVULAS DE CONTROL EN LA  
INDUSTRIA DE PROCESOS QUÍMICOS

**TESINA**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Químico**

**PRESENTA**

Antonio Ismael Sánchez Alvarado

**DIRECTOR DE TESINA**

I.Q. Dominga Ortiz Bautista



Ciudad de México, Fes Zaragoza, 2017



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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



## Contenido

I.	RESUMEN	8
II.	SIMBOLOGÍA	9
III.	CASO DE ESTUDIO:	11
IV.	OBJETIVO GENERAL	11
V.	OBJETIVOS PARTICULARES:	11
VI.	INTRODUCCIÓN	12
CAPITULO 1. - FUNDAMENTOS DE CONTROL:		14
(i)	Proceso.	14
(ii)	Reduce variabilidad.	14
(iii)	Circuito de control	15
(iv)	Variable de Proceso.	15
(v)	Elemento final deseado (Punto de ajuste)	15
(vi)	Variable medible, variable de proceso y variable manipulable.	16
(vii)	Error.	16
(viii)	Control por retroalimentación:	16
(ix)	Fundamentos del circuito de control cerrado.	16
(x)	Ganancia; relación de cambios en la entrada	17
(xi)	Control manual y automático:	18
(xii)	Circuito de control cerrado.	19
CAPITULO 2.- VÁLVULAS DE CONTROL DE PROCESO		21
(i)	Selección de válvulas de control.	21
(ii)	Válvulas de Globo:	22
(iii)	Válvulas de Globo balanceadas.	24
(iv)	Característica de flujo	24
(v)	Característica de apertura rápida	25
(vi)	Característica lineal	25
(vii)	Característica de igual porcentaje	25
(viii)	Objetivo de la característica de flujo de la válvula	25
(ix)	Válvula de bola:	26
(x)	Válvula de mariposa	27
(xi)	Emisiones fugitivas	28
CAPITULO 3 SELECCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE VÁLVULAS DE CONTROL EN LA INDUSTRIA DE PROCESOS QUÍMICOS		29
(i)	Rating de una válvula	32

(ii)	Proceso sistemático de selección de válvulas de control _____	33
(iii)	Selección del material del cuerpo de la válvula _____	34
(iv)	Calculo del coeficiente de flujo Cv _____	34
(v)	Régimen de viscosidad _____	35
(vi)	Régimen Laminar y turbulento _____	36
(vii)	Determinación del valor máximo de flujo volumétrico _____	37
(viii)	Presión de vapor _____	38
(ix)	Presión crítica _____	39
(x)	Cálculo de Cv para un sistema de régimen laminar _____	41
(xi)	Cálculo del coeficiente de flujo para fluidos compresibles _____	47
<b>CAPITULO 4 NORMAS Y ESTÁNDARES DE VÁLVULAS _____</b>		<b>50</b>
(i)	Instituto de Petróleo Americano, API por sus siglas en inglés: _____	50
(ii)	Sociedad de estandarización de manufactura, MSS _____	51
(iii)	Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos, ASME _____	51
(iv)	Comité Europeo para Estandarización, CEN _____	53
(v)	Estándar de Brida Europeo _____	54
(vi)	Instituto de Control de Fluidos, FCI _____	54
(vii)	Sociedad Americana de instrumentación, ISA _____	54
(viii)	Comisión internacional de electrotécnica, IEC _____	55
(ix)	Asociación Nacional de ingeniería en corrosión, NACE _____	56
<b>CAPITULO 5.- SERVICIO A CONDICIONES SEVERAS _____</b>		<b>57</b>
(i)	Cavitación y Flashing en Válvulas de control _____	57
(ii)	Cavitación _____	57
(iii)	Daño en los internos de las válvulas por Cavitación _____	60
(iv)	Flashing _____	62
(v)	Daños por Flashing _____	63
(vi)	Prevención y eliminación de daños erosivos en los componentes internos de las válvulas _____	63
(vii)	Cajas anti Cavitación _____	63
(viii)	Reducir el desgaste ocasionado por Flashing _____	64
(ix)	Desgasificación: _____	66
(x)	Servicios y aplicaciones en donde comúnmente se presenta el fenómeno de desgasificación: _____	67
(xi)	Hidro craqueo catalítico: _____	67
(xii)	Amina: _____	68
<b>CAPITULO 6.- LA IMPORTANCIA DEL INGENIERO QUÍMICO EN LA SELECCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE VÁLVULAS DE CONTROL _____</b>		<b>70</b>
<b>VII.</b>	<b>CONCLUSIÓN _____</b>	<b>72</b>

FIGURAS

Fig. 1 Circuito de control.	15
Fig. 2 Control de retroalimentación	16
Fig. 3 Diagrama de flujo de transporte y almacenamiento de gas natural	17
Fig. 4 Control de presión de gas natural hacia un quemador	18
Fig. 5 Circuito de control cerrado	19
Fig. 6 Válvula de globo guiada en tapón	22
Fig. 7 Bonetes extendidos con fuelles	23
Fig. 8 Válvula de globo balanceada	24
Fig. 9 Cajas caracterizadas	24
Fig. 10 Curva caracterizada de flujo inherente	25
Fig. 11 Válvula de bola	26
Fig. 12 Válvula de mariposa	27
Fig. 13 Formato ISA 20.50 para válvulas de control	30
Fig. 17 Área anular entre el diámetro del asiento y el tapón	45
Fig. 18 Daños en los internos debido a cavitación	61
Fig. 20 Unidad de Craqueo Catalítico	67
Fig. 21 Unidad de Aminas	68

TABLAS

Tabla 1 Materiales típicos de construcción para válvulas de control	32
Tabla 2 Valores de presión crítica de algunos compuestos	39

GRÁFICAS

Gráfica 1 Comportamiento real del flujo estrangulado	37
Gráfica 2 Comportamiento de la presión de vapor del agua	38
Gráfica 3 Flujo estrangulado en la vena contracta	40
Gráfica 4 Comportamiento de Cv para fluidos compresibles	47
Gráfica 5 Comportamiento real del Cv para fluidos compresibles	49
Gráfica 6 Perfil de la caída de presión en la vena contracta	58
Gráfica 7 Perfil de velocidad en la vena contracta	59
Gráfica 8 Cavitación	60
Gráfica 9 Flashing	62
Gráfica 10 Cajas anti cavitación	63
Gráfica 11 Punto triple de cualquier sustancia	66

## I.RESUMEN

El presente trabajo aborda el tema general de válvulas de control en la industria de procesos químicos, nace gracias a los más de tres años de experiencia del autor como especialista de válvulas de control en EMERSON Automation Solutions. Como principal actividad; seleccionar y dimensionar válvulas para las principales industrias de procesos químicos en México, como por ejemplo refinería, industria química, producción y distribución de gas natural y energía.

Los objetivos del presente trabajo son dar a conocer la importancia de las válvulas de control en la industria de procesos químicos y la relación que existe con la carrera de ingeniería química, comenzando con la tecnología de control de procesos, la tarea principal de las válvulas dentro del circuito de control, su terminología básica, dimensionamiento, selección y las normas de manufactura que comúnmente encontramos en los fabricantes y diseñadores.

Además, se muestra el trabajo esencial del ingeniero químico en la selección y dimensionamiento de estos equipos, comenzando desde el ingeniero de procesos, una variante del ingeniero químico, el cual tiene la tarea de diseñar procesos eficientes utilizando como herramienta básica la tecnología de control, con los objetivos generales de especificar el producto final deseado, que el proceso sea económicamente rentable, eficiente y ambientalmente seguro. Las válvulas de control están ampliamente relacionadas con la carrera de ingeniería química, desde su diseño, especificación, venta, adquisición, y operación en el control de procesos para todo tipo de industria.

Cursos que se imparten dentro de la carrera de ingeniería química ya sea termodinámica, flujo de fluidos, mecánica de materiales, ingeniería de procesos, ingeniería económica, entre otros, están fuertemente relacionados con el dimensionamiento y especificación de equipos de control de procesos, especialmente válvulas de control de flujo de fluidos.

## II.SIMBOLOGÍA

A no ser que se indique lo contrario, todos los símbolos que se utilizan en esta tesina se definen de la manera siguiente:

$A$  = Área de la sección transversal de tubería u orificio en metros cuadrados (pies cuadrados)

$c_p$  = calor específico a presión a constante

$c_v$  = calor específico a volumen constante

$C_v$  = Coeficiente de flujo para válvulas en GPM

$C_{vL}$  = Coeficiente de flujo para válvulas de control en régimen laminar, GPM

$C_{vT}$  = Coeficiente de flujo para válvulas de control en régimen turbulento, GPM

$D$  = Diámetro interno de tubería en metros (pies)

$D_0$  = Diámetro interno de una válvula en metros (pies)

$D_H$  = Diámetro hidráulico en régimen laminar metros (pies)

$D_p$  = Diámetro interno de tubería en régimen laminar en metros (pies)

$e$  = error, en el algoritmo de control, adimensional

$f$  = Factor de fricción de la fórmula de Darcy,  $h_L = fLu^2/D2gn$

$F_D$  = Modificador del estilo de la válvula, se obtiene de las publicaciones de los fabricantes de válvulas, adimensional

$F_F$  = Factor de recuperación para líquidos, valor obtenido en las publicaciones de los fabricantes de válvulas, depende de la geometría y estilo de cada equipo.

$F_L$  = Factor de recuperación para líquidos en válvulas de control, adimensional

$F_R$  = Factor del número de Reynolds, definido por  $C_v/C_{vT}$ , valor adimensional

$gn$  o  $g$  = Aceleración de la gravedad = 9.81 metros por segundo al cuadrado (32.2 pies/seg<sup>2</sup>)

$H$  = Altura total expresada en metros de columna del fluido en metros (pies)

$K$  = Coeficiente de resistencia o pérdida de carga por velocidad en la formula  $h_L = Ku^2/2gn$

$K_T$  = Coeficiente de flujo tomada del Crane Handbook, se define de  $K_L = f(L/D_0)$  en relación a las fórmulas de Darcy

$L$  = Longitud de tubería en metros (pies)

$L/D$  = Longitud equivalente de resistencia al flujo, en diámetros de tubería

$M$  = Peso molecular

$P$  = Presión manométrica en kilogramo fuerza por centímetro al cuadrado (lbf/in<sup>2</sup>)

$P_c$  = Presión crítica en kilogramo fuerza por centímetro al cuadrado absoluto (lbf/in<sup>2</sup> absoluta)

$\Delta P_{choked}$  = Caída de presión que permite el máximo valor de flujo para válvulas de control, adimensional

$P_v$  = Presión de vapor para líquidos en kilogramo fuerza por centímetro al cuadrado absoluto (lbf/in<sup>2</sup> absoluta)

$Q$  = Caudal en metro cubico por minuto para líquidos, para gases SCFH, NCFH o ACFH

$R$  = Constante universal de los gases = 8314 J/kf-mol°K

$Re$  = Número de Reynolds, adimensional

$Sg$  = Gravedad específica de líquidos a la temperatura del trabajo respecto al agua en temperatura ambiente, 60 °F (15°C), adimensional

$t$  = Temperatura en grados Celsius (Fahrenheit)

$T$  = Temperatura absoluta, en Kelvin (273 + t) (Rankine = 460 + t)

$T_c$  = Temperatura critica en Kelvin (273 + t) (Rankine = 460 + t)

$u$  = Velocidad media de flujo en metro por segundo (ft/seg)

$V$  = Variable manipulable en el algoritmo de control

$W$  = Caudal en kilogramos por hora (libra/hora)

$X$  = Relación de la caída de presión en el sistema con la presión de entrada para gases, se define por  $\Delta P/P_1$ , adimensional

$Y$  = Factor neto de expansión para fluidos compresibles a través de orificios, toberas o tuberías

$Z$  = Factor de compresibilidad para gases, adimensional

### **Letras griegas**

#### **Gamma**

$\gamma$  = Cociente del calor específico a presión constante entre el calor específico a volumen constante =  $c_p/c_v$ , adimensional

#### **Delta**

$\Delta$  = Diferencia entre dos puntos

#### **tau**

$\tau$  = Tensor de densidad de flujo de cantidad de movimiento (viscoso), tensor de esfuerzo (viscoso).

#### **Mu**

$\mu$  = Viscosidad absoluta (dinámica) en kilogramo fuerza sobre segundo centímetro al cuadrado (lbf/seg-in<sup>2</sup>)

#### **Rho**

$\rho$  = Densidad del fluido en Kilogramo sobre centímetro al cubo (lb/in<sup>3</sup>)

#### **Sigma**

$\Sigma$  = Suma

### III.CASO DE ESTUDIO:

En base a la experiencia obtenida durante tres años laborando en Emerson Automation Solutions como ingeniero de proyectos en el dimensionamiento y selección de válvulas de control para la industria de la refinación de crudo de petróleo (principalmente), industria química, producción y distribución de gas natural, industria energética y en menor medida la industria alimenticia, se presenta este trabajo como un proyecto tesina para aborda el tema de la correcta selección y especificación de válvulas de control en la industria de procesos químicos.

### IV.OBJETIVO GENERAL

Presentar el tema general de válvulas de control, su importancia en la industria de procesos químicos y su relación con la carrera de ingeniería química.

### V.OBJETIVOS PARTICULARES:

- Exponer la importancia de las válvulas de control en la optimización de control de procesos
- Especificar el correcto dimensionamiento, terminología y selección de válvulas de control frente a la gran variedad de servicios presentes en la Industria de procesos químicos
- Identificar los fenómenos de servicio severo al transportar y manipular fluidos a través de válvulas de control.
- Enunciar la importancia del ingeniero químico como asesor técnico en el dimensionamiento y selección de válvulas de control.

## VI.INTRODUCCIÓN

El presente trabajo aborda el tema de las válvulas de control, dentro del control de procesos de flujo de fluidos y su importancia en la industria de procesos químicos, comenzando con el tema y definición de proceso, fundamentos de control y algunos ejemplos de procesos químicos en donde siempre se encuentran válvulas de control de flujo, como, por ejemplo; la industria química, producción y distribución de gas natural, industria alimenticia, industria del petróleo, refinación, energía, por mencionar algunos. continuando con la importancia de la tecnología del control de procesos y su relación en incrementar la eficacia, rentabilidad, la seguridad y lograr que el proceso sea ambientalmente seguro, esto se logra con la habilidad de identificar oportunamente en el proceso las variables medibles y controlables dentro del circuito de control.

Dentro de la ingeniería de procesos existen cientos de aplicaciones que requieren transportar flujo de fluidos, medir su presión, temperatura, nivel y cantidad de flujo, para todas estas aplicaciones es preciso especificar una válvula de control, la habilidad para identificar cuáles son aquellas aplicaciones o servicios en las que se requiere implementar un equipo de control es crucial en el desarrollo de la ingeniería de procesos de cualquier planta y es una tarea del ingeniero de procesos químicos.

Cuando se estudia el sistema de control de procesos en general, el proceso es simplemente considerado como uno de los elementos en el circuito de control, sin embargo, se requiere de una completa descripción del proceso, del conocimiento general de las propiedades del fluido y las condiciones de servicio o cualquier otra característica que represente cambios en los procesos, que afectan directamente a la medición y control de la variable de interés.

El primer capítulo explica el objetivo del control de procesos y la tarea principal de los equipos de control dentro del circuito de control. El capítulo dos trata el tema de fundamentos de válvulas, y su terminología básica, define a una válvula de control como un elemento final de control dentro del circuito, en orden de mantener la variable requerida de proceso dentro del valor deseado, siendo este el principal objetivo del circuito de control.

Se muestran los cuatro principales tipos de válvulas de control en la industria de procesos químicos, tipo globo, mariposa, bola, y tapón rotatorio, sus principales características y cuáles son las aplicaciones más comunes en las que podemos encontrar cada uno de estos equipos, además, se presentan los principales componentes de cada válvula y como el diseño de los internos de una válvula de globo afecta en la característica de flujo inherente y la correcta interpretación de la ganancia de flujo de fluido en el control de proceso.

El tercer capítulo es sobre la selección y especificación de una válvula de control, la correcta selección de materiales puede ser un trabajo arduo y es en base a la experimentación y la experiencia, existen numerosos documentos de compatibilidad de materiales que pueden ser de gran ayuda, además del conocimiento profundo de la compatibilidad del material con el fluido del proceso, con la finalidad de evitar daños en el material, ya sea por ataque químico erosión y/o corrosión.

Los días en que el diámetro de una válvula de control se especifica en base al mismo diámetro que la tubería sean han ido, el correcto dimensionamiento de una válvula de control es en base al coeficiente de flujo calculado, conocido como "Cv", en este capítulo se presentan las principales ecuaciones en el cálculo de Cv para fluidos, compresibles, incompresibles, en régimen laminar y turbulento. el ingeniero encargado del dimensionamiento de una válvula de control tiene que tener el conocimiento preciso de las propiedades físicas y químicas del fluido a controlar.

El capítulo cuatro describe las normas aplicadas no solo a válvulas de control sino a otro tipo de válvulas en general, ya que la importancia de las normas está creciendo y abarcando numerosas empresas que practican la producción globalizada de válvulas, este capítulo no pretende especificar únicamente las normas aplicables a válvulas de control, si no que abarcan otro tipo de válvulas con la finalidad del conocimiento en general de la

industria. Las normas son de gran importancia no solo para aquellas empresas manufactureras, sino también para el ingeniero de procesos que tiene la tarea de especificar una válvula.

El capítulo cinco es acerca de servicio a condiciones severas presentes en válvulas de control, es bien sabido por experiencia de los ingenieros de procesos, de proyectos y quienes dimensionan válvulas de control que existen ciertas aplicaciones que requieren especial atención al seleccionar una válvula de control, ya sea porque dadas las condiciones de proceso se presenta fenómenos hidrodinámicos como son; flashing, cavitación y desgasificación o la ubicación del equipo de control en la planta de procesos puede estar expuesta a daños en sus internos y en el cuerpo.

Este capítulo explica a detalle, los principales fenómenos que se pueden presentar al estrangular flujo de fluidos, las aplicaciones más comunes en la industria de procesos en donde se presentan estos casos, cuales son los efectos negativo sobre los internos de una válvula que está expuesta a este tipo de fenómenos y cómo es que una mala especificación puede ocasionar ya sea que el tiempo de vida de la válvula sea muy bajo dada la erosión, que el control de proceso sea muy pobre, paros innecesarios, gastos no previstos, y refaccionamiento de partes principales de válvulas. Además, trata de las principales tecnologías y diseños de válvulas de control para evitar o combatir los servicios a condiciones severas, aumentando la vida útil de una válvula de control.

Para finalizar el capítulo seis explica la importancia del ingeniero químico en la selección y dimensionamiento de válvulas de control, desde el ingeniero de procesos, una variante del ingeniero químico, el cual tiene la tarea de diseñar procesos eficientes utilizando como herramienta la tecnología de control de procesos con la finalidad de especificar el producto final deseado, que el proceso sea económicamente rentable, eficiente y ambientalmente seguro. Las válvulas de control están ampliamente relacionadas con la carrera de ingeniería química, desde su diseño, especificación, adquisición, y operación en el control de procesos.

## CAPITULO 1. - FUNDAMENTOS DE CONTROL:

Control en industria de procesos se refiere a la regulación de todos los aspectos del proceso. Control preciso de nivel, temperatura, presión y flujo son muy importantes en la mayoría de las aplicaciones de proceso.

### (i) Proceso.

Proceso es usado en el término de control de procesos e industria de proceso, es un método de cambios o refinación de materia prima para crear productos finales deseados. La materia prima que pasa a través del proceso puede estar en estado líquido o gaseoso, dos fases o líquidos con sólidos en suspensión, durante el proceso de producción esta materia es transportada, medida, mezclada, calentada, enfriada, refinada, filtrada, almacenada y transformada en otros estados de la materia para finalmente producir el producto final deseado.

El proceso de producción debe ser preciso, ya que pequeños cambios en él repercuten directamente en grandes impactos para el producto final deseado.

Las siguientes industrias son ejemplos de procesos industriales:

- Química
- Producción y distribución de Gas natural.
- Alimenticia
- Farmacéuticas
- Tratamiento de aguas.
- Energía.
- Refinación de petróleo.
- Procesos Industriales.

Control de procesos se refiere a la conservación del control de las variables cuando se produce el producto final. Por ejemplo, factores que afectan en la proporción de un ingrediente con relación a otro, la temperatura del proceso, qué tan bien son mezclados los ingredientes y la presión del proceso son ejemplos de la manipulación de variables que impactan en la calidad del producto deseado.

Por estas razones el control de procesos reduce la variabilidad, incrementa la eficacia/rentabilidad, la seguridad del proceso y ambientalmente confiable.

### (ii) Reduce variabilidad.

Control de procesos reduce la variabilidad en el producto final y asegura su calidad y consistencia, con esta tecnología la industria puede salvaguardar su inversión evitando alteración en el producto para el consumo del usuario final, alteraciones como sobre especificación o de baja calidad.

Por ejemplo, cuando existen variabilidades o inconsistencias en el producto final, significa que el control de proceso es pobre o nulo, el objetivo es cumplir con las especificaciones del usuario final, si se presenta una sobre especificación, se presentaría un sobre costo del producto, o en caso contrario, una pobre especificación invariablemente repercute en que la industria se verá forzada en asegurarse que el producto final cumpla con el mínimo de especificaciones deseadas, esto significa un gasto adicional. La tecnología de control de procesos se encarga de reducir las variabilidades en la producción acercándose al punto deseado o punto óptimo (punto de ajuste) de la correcta especificación, resguardando la inversión y desarrollando productos de calidad que cubren las expectativas del usuario final y son adecuados al proceso.

### (iii) Circuito de control

El circuito de control es un ciclo en donde una variable es medible y otra es manipulada para lograr el punto final deseado o punto de ajuste, el circuito de control en la industria de proceso tiene las siguientes tareas:

- Medir
- Comparar
- Ajustar

Por ejemplo, en figura 1 se muestra que cuando el nivel del líquido en el tanque excede el máximo valor permitido o deseado, el transmisor de nivel "LT" envía una señal asociada con la lectura del nivel del tanque al controlador indicador de nivel "LIC", enseguida el controlador envía una señal a la válvula de control para que abra y permita la salida del líquido hasta obtener el valor deseado, en este ejemplo el punto final deseado es el máximo nivel del líquido en el tanque y la variable de proceso a controlar es el nivel.

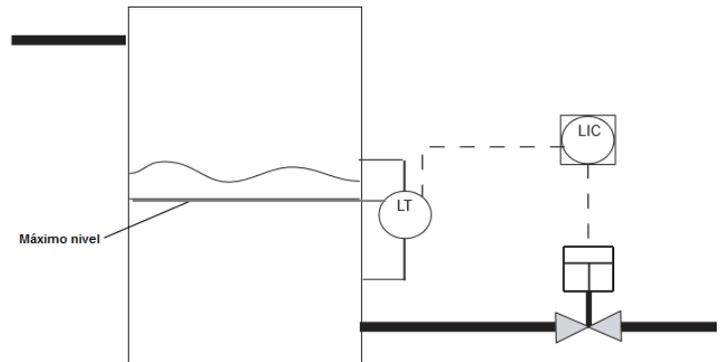


Fig. 1 Circuito de control.

Fuente: Floyd d. Jury, Fundamentals of Closed Loop Control, pg 8

Diferentes instrumentos de control y medición pueden ser utilizados en el circuito de control, instrumentos como transmisores, indicadores, sensores, controladores, válvulas y bombas, pero las tres tareas de medir, comparar y ajustar están siempre presentes en el circuito de control.

Estos términos tres términos son comunes cuando se describe acerca de la tecnología de control de proceso.

### (iv) Variable de Proceso.

Variables de proceso es una condición del fluido de proceso ya sea líquido o gas que puede cambiar la manufactura del proceso en diferentes maneras. Variables comunes de proceso incluyen:

- Presión
- Flujo
- Temperatura
- Nivel
- Densidad
- PH (medición de acidez o alcalinidad)
- Contenido de oxígeno
- Contenido de monóxido de carbono
- Interface de líquido
- Masa

### (v) Elemento final deseado (Punto de ajuste)

El valor final deseado, usualmente conocido en la literatura de control de proceso como punto de ajuste, es el valor deseado de la variable de proceso

(vi) Variable medible, variable de proceso y variable manipulable.

En la mayoría de los casos la variable medible es también la variable de proceso. La variable medible es la condición del proceso que debe mantener el valor deseado designado como punto de ajuste.

En algunos casos la variable medible no es la misma que la variable del proceso. Regresando al ejemplo de la figura 1 la variable medible es el flujo del líquido el cual entra y sale del tanque de almacenamiento para determinar el nivel del tanque. En este escenario la variable medible es el flujo y la variable de proceso es el nivel del tanque.

El factor que es modificado para mantener la variable medible dentro del valor deseado (punto de ajuste) es llamada la variable manipulable. En este ejemplo la variable manipulable deberá ser la posición de la válvula que controla el flujo.

(vii) Error.

Error es la diferencia entre el valor de la variable medible y el valor deseado (punto de ajuste) y el valor puede ser tanto positivo como negativo, algunas veces este valor es llamado la magnitud del error.

El objetivo de cualquier sistema de control es minimizar o eliminar el error, así que es imprescindible que el error se entienda correctamente.

El error tiene los siguientes componentes:

- Duración: se refiere a la duración de tiempo que el error existe.
- Carga de alteración o perturbación es un cambio no deseado en un factor que puede afectar a la variable de proceso.
- Perturbación de la demanda es un cambio en la variable de proceso causada por un cambio en la condición de la operación deseada.

(viii) Control por retroalimentación:

Control por retroalimentación es una expresión matemática de una función de control. En la ecuación 1.1  $\Delta V$  es la variable manipulable y  $e$  es el error, la relación en el Control por retroalimentación puede expresarse como sigue:

$$\Delta V = f(\pm e) \dots ec. 1.1$$

La variable manipulable está en función del cambio del error, ya sea positivo o negativo, como se muestra en el sistema de la Figura 2. Conocido como control por retroalimentación, en donde la variable de control de proceso es medida y enviada a un controlador para comparar el error y ajustar el valor final deseado mediante el equipo de control.

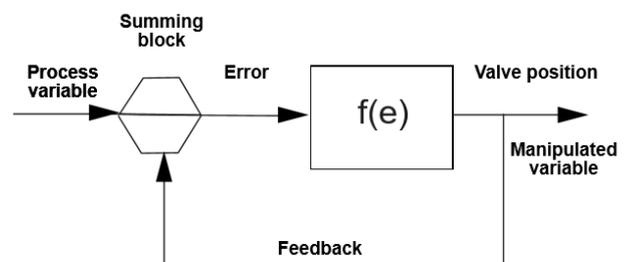


Fig. 2 Control de retroalimentación

Fuente: Floyd d. Jury, Fundamentals of Closed Loop Control, pg 20.

El algoritmo de control que se utiliza para calcular los requerimientos del circuito de control del sistema son mucho más complejos que los descritos en este sistema.

(ix) Fundamentos del circuito de control cerrado.

Circuito de control cerrado es primeramente un concepto o filosofía que es independiente de la tecnología requerida para implementarlo. El fundamento de circuito de control cerrado es relativamente fácil de entender y esencial en la construcción, operación o mantenimiento de cualquier sistema de control.

El proceso es el primer concepto del sistema. Es la única razón de la existencia del sistema, el proceso generalmente se define como el elemento del sistema o componentes que comienzan a controlarlo, es por ello que el proceso existe antes de que cualquier programa de computadora (software) es añadido al control de proceso. Algunos procesos tienen un buen desempeño sin la adición de un sistema de control. Cuando operan de esta manera, el sistema es conocido como circuito de control abierto.

En algunas otras situaciones prácticas, el circuito de control cerrado es requerido para lograr el deseado rendimiento desde el sistema. La siguiente es una lista parcial de algunos típicos procesos industriales que frecuentemente usan circuitos de control cerrados.

- Nivel de líquido en un tanque de almacenamiento.
- Control y medición de presión en la línea de tubería o tanque de almacenamiento.
- Control y medición de flujo a través de sistema de tuberías.

Cuando se estudia el sistema de control en general, el proceso es simplemente considerado como uno de los elementos en el circuito de control. Una completa descripción del proceso requiere del conocimiento general de las propiedades del fluido y las condiciones de servicio, dimensiones de tanques, geometría de la tubería, el funcionamiento de los equipos de control o cualquiera otra característica que representen cambios en los procesos que afecten directamente a la medición y control de la variable de interés.

Para el proceso, como cualquier otro elemento en un circuito de control, entradas y salidas deben de ser bien conocidas. Definición y especificación de la entrada y la salida depende sobre como el proceso es usado. Entrada es tal cual la influencia normal de la condición del proceso. Esta es frecuencia de perturbación de la carga para el proceso. Como resultado de esta influencia de entrada en el proceso, un parámetro de interés normalmente desearía ser esperado para cambiar de alguna manera predecible. El parámetro de cambio es conocido como la salida. En este caso la salida del proceso es normalmente la variable que va a ser controlada.

Un simple ejemplo ayudara a clarificar la relación entre las entradas y salidas del proceso. Suponiendo un flujo de gas natural a través de un tanque de almacenamiento en el proceso de transportación de dicho gas. En esta aplicación el almacenamiento del gas es nuestro objetivo de primordial interés. En este caso la entrada será el flujo de gas y la variable a controlar o la salida será la presión dentro del tanque. Esta relación es expresada sistemáticamente en la siguiente figura 3, conocido como diagrama de flujo. El proceso es representado mediante recuadros, las entradas y salidas son representados mediante flechas.

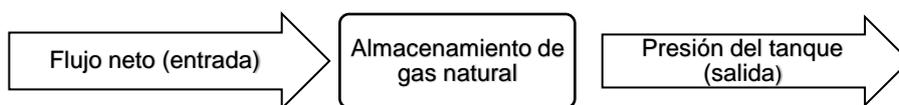


Fig. 3 Diagrama de flujo de transporte y almacenamiento de gas natural

Fuente: Elaborado por el autor

El conocimiento de las características del proceso, tales como las dimensiones del tanque y las propiedades del gas, son necesarias para relacionar cambios en el proceso de entrada con los cambios en el proceso de salida. Estos parámetros pueden utilizarse en el desarrollo de una función de transferencia matemática que define la relación entre entradas y salidas, relación conocida como la ganancia.

#### (x) Ganancia; relación de cambios en la entrada

El proceso, es como como cualquier otro elemento en el circuito de control, recibe algunos tipos de entradas y proporciona otros tipos de salida que son representadas a través de flechas en el diagrama de flujo de la figura 1.3, la relación de cambio entre la magnitud de la salida y la entrada se denomina como ganancia. Una alta

ganancia significa un alto valor de salida. La ganancia simplemente expresa la relación de cambio en la entrada, un dispositivo con alta ganancia significa que es muy sensible a cambios en la entrada.

La ganancia de un elemento no es una constante cuantitativa, pero puede cambiar sobre la influencia de ciertos factores. La medida de nivel de la señal de entrada para el proceso frecuentemente puede tener un significado que afecta directamente a la ganancia.

Por mencionar algún ejemplo; algunos procesos en donde la ganancia varía con la condición de carga. Imagine un proceso de transportación de gas natural a través de tuberías con un flujo volumétrico de alimentación o de entrada de 1,000 scfh e invariablemente incrementa el flujo volumétrico en 500 scfh este incremento representa un cambio significativo e invariablemente causa un cambio considerable en la presión del proceso. En este ejemplo la variable a controlar no es el flujo volumétrico del gas si no la presión del proceso que invariablemente es afectada con el incremento del flujo volumétrico. Ahora consideremos el mismo proceso de transportación de gas natural con un flujo volumétrico de 100,000 scfh e invariablemente incrementa el flujo volumétrico en 500 scfh, este incremento tiene un cambio menor en la presión del proceso. Como el sistema de flujo incrementa, la presión del sistema se vuelve menos sensible al mismo cambio, por ejemplo, la ganancia del proceso decrece con el incremento de la carga de flujo.

Sin la necesidad de recurrir a rigurosas pruebas matemáticas, este ejemplo expresa por que la ganancia puede variar con la carga en el sistema. Dependiendo sobre el tipo de proceso, la ganancia puede decrecer, incrementar, o mantenerse constante con respecto al punto de operación.

#### (xi) Control manual y automático:

Antes de la automatización de procesos, las personas tenían la tarea de mantener el control de proceso. Por ejemplo, un operador observaba la presión del sistema registrada en el manómetro y tenía la tarea de abrir o cerrar manualmente la válvula de control hasta lograr el valor final deseado (punto de ajuste), en este caso la variable deseada es la presión del sistema. El control de operación que envuelve directamente la acción humana es llamado sistema de control manual.

Inversamente al sistema de control manual, el sistema que mantiene el control por medio de máquinas, sin la intervención del hombre, es llamado sistema de control automático.

Un circuito de control abierto existe cuando la variable de proceso no es medible o comparada y ninguna acción correctiva es tomada para ninguna condición de la variable de proceso. Esto es ilustrado la siguiente figura 4:

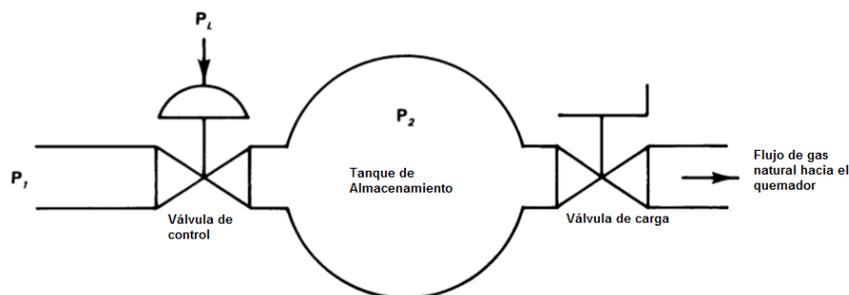


Fig. 4 Control de presión de gas natural hacia un quemador

Fuente: Floyd d. Jury, Fundamentals of Closed Loop Control, pg 3.

La figura 4 representa el servicio de control de presión de gas natural hacia un quemador. En este proceso la variable de interés es la presión del sistema, el flujo de gas natural es alimentado hacia el tanque de almacenamiento con una presión 1, la válvula de control funge la función del control de presión y es ajustada en relación con la presión 1. El propósito de este sistema es mantener la presión P2 relativamente constante.

El flujo volumétrico del sistema es conocido y es constante, la carga de presión a través de la válvula de control debe de ser la misma que la carga de presión a través de la válvula de carga. Si estos dos flujos son exactamente los mismos se dice que no hay cambio y el sistema se mantiene constante, sin embargo, si existe alguna variación en el flujo de alimentación invariablemente cambia la presión del sistema  $P_2$  y se presenta un desbalance en las cargas de presión en ambas válvulas, el control presión tendrá que ser más lento y deficiente con el tiempo.

En efecto, esta es una desventaja en el circuito de control abierto. Si la carga de flujo de alimentación presenta un repentino cambio, la carga de la presión 1 hacia el actuador invariablemente debe de cambiar de acuerdo a la compensación de la carga de flujo para mantener constante la presión 2. Impredecibles cambios en la carga de flujo tienen como consecuencia fluctuaciones impredecibles en la presión del sistema.

Fluctuaciones frecuentes en el sistema pueden ocurrir y como consecuencia requieren de constante atención del operador para ajustar la carga de presión hacia el actuador, PL. En el circuito de control abierto el operador interviene en el control manual, y la calidad del control varía en relación a la destreza de uno y otro operador. Referente a todos estos factores se desarrolló la técnica de automatización de procesos permitiendo el control de procesos seguro y eficiente.

(xii) Circuito de control cerrado.

Un Circuito de control cerrado existe cuando la variable de proceso es medible, comparada con el valor deseado (punto de ajuste) y una acción es tomada para la corrección de la desviación desde el valor deseado (punto de ajuste). Después de que la acción correctiva es tomada, la operación es medible, comparada y si es necesario una acción correctiva es tomada de nuevo.

Una de las simples formas de Circuito de control cerrado es la de una válvula auto reguladora o comúnmente conocido como regulador. Auto reguladora significa que la energía requerida para la operación de la válvula de control proviene del sistema. Para el sistema mostrado en la figura 4 la presión del proceso  $P_2$  puede ser usada para proveer de carga hacia el actuador PL como se muestra en la siguiente figura 5.

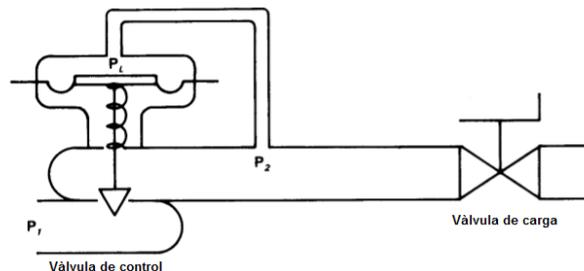


Fig. 5 Circuito de control cerrado

Fuente: Floyd d. Jury, Fundamentals of Closed Loop Control, pg 4

Recordemos que el servicio es control de presión hacia el quemador, y la variable de interés es la presión hacia el piloto, es decir la presión aguas debajo de la válvula de control  $P_2$ . Si la presión del gas natural hacia el quemador decrece la presión hacia el actuador PL es menor y el resorte del regulador se desplaza abriendo la válvula y permitiendo el incremento de flujo hacia el sistema hasta que se iguala la presión  $P_2$  y PL manteniendo el sistema estable. En el caso contrario, si la presión hacia el quemador aumenta la presión PL aumenta forzando al resorte a cerrar la válvula obstruye la cantidad de flujo hasta que las presiones  $P_2$  se iguala al valor final deseado (punto de ajuste) requerido por el quemador.

Esta acción se conoce como control de proceso Feedback, en donde la variable de proceso es medible comparada con un valor final deseado (punto de ajuste) determinado y ajustada al valor deseado mediante la

acción del resorte y la carrera de la válvula, permitiendo el incremento o el decremento en la alimentación de flujo hacia el sistema para medir nuevamente el valor final deseado (punto de ajuste).

Este equipo es conocido como regulador de presión y comúnmente se encuentra en la industria para mantener un valor de presión del sistema constante, ya sea corriente abajo o corriente arriba del equipo. Los reguladores pueden ser auto operados o piloteados, el presente documento no pretende entrar a detalle sobre estos equipos, pero su principio de operación funge como uno de los mejores ejemplos detallados acerca del circuito de control cerrado. Más adelante abordará el tema de válvulas de control y se explicara cada uno de los dispositivos que compone una válvula de control y cada una de sus funciones para mantener el circuito de control cerrado, medir, comparar y ajustar la variable de proceso en el deseado valor final deseado (punto de ajuste) requerido para mantener el proceso en operación constante.

## CAPITULO 2.- VÁLVULAS DE CONTROL DE PROCESO

Una planta de procesos consiste en cientos o miles de circuitos de control de procesos, todos ellos trabajando juntos para producir el producto final deseado. Cada uno de estos circuitos está diseñado para mantener importantes variables de proceso ya sea presión, temperatura, flujo, nivel, etc, dentro del rango de la operación requerido (punto de ajuste) para garantizar la calidad del producto. Cada uno de ellos reside e internamente crea disturbios que determinantemente afectan la variable de proceso e interactúan desde otros circuitos de control en el proceso y proporcionan disturbios que influyen la variable de proceso.

Para reducir el efecto de estas cargas de disturbio, sensores y transmisores recolectan información acerca de la variable de proceso y están relacionados con los valores finales deseados (punto de ajuste). Un controlador procesa esta información y decide qué hacer para mantener la variable de proceso de vuelta después de que la carga de disturbio ocurre. Cuando todos los medibles, comparables y cálculos están hechos, algunos tipos de elementos finales de control tendrán la estrategia seleccionada por el controlador.

El elemento final de control más común en la industria de procesos es la válvula. La cual manipula el flujo de fluido, ya sea gas, agua, vapor, o un componente químico para compensar la carga de disturbio y mantener regulada la variable de proceso tan cerca del set point deseado como sea posible.

Algunas personas no especializadas en el tema al hablar acerca de válvulas, realmente se refieren al ensamble del equipo. El ensamble de una válvula típicamente está compuesto por el cuerpo de esta, sus internos y el actuador, el cual ejerce la fuerza para abrir o cerrar, y además de una variedad de accesorios que incluyen posicionador, transductor, reguladores de suministro de presión (aire de instrumentos), volantes para la operación manual, indicadores de posición, booster, cada uno de ellos en conjunto complementan el ensamble de la válvula de control.

Una válvula es una parte crítica del circuito de control, no es correcto decir que la válvula de control es la parte más importante del circuito. Es conveniente pensar que un circuito de control es un conjunto de instrumentos que complementan un ciclo en el control de proceso, realizan la tarea de medir, comparar y ajustar la variable de proceso, dentro de esta cadena de instrumentos el elemento final de control es ciertamente la válvula de control, la cual es cerrada a través del elemento de fuerza que es el actuador, el cual a su vez es controlado por el posicionador.

Esta es la principal definición de una válvula de control, como un elemento final de control dentro de un sistema de circuito de control y su función es estrangular flujos de fluidos y controlar la variable de presión, nivel y flujo dentro del valor final deseado (punto de ajuste).

### (i) Selección de válvulas de control.

Una vez definida una válvula de control continuamos con la clasificación de estas, existen cuatro tipos principales de válvulas de control:

- válvulas de globo
- válvulas de ángulo
- válvulas de bola
- válvulas de mariposa.

El conocimiento a fondo y preciso de estos cuatro tipos de válvulas es crucial en la selección de la válvula que represente el mejor desempeño de control de flujo frente a los cientos de aplicaciones que existen en la industria de procesos químicos.

## (ii) Válvulas de Globo:

Las válvulas de globo han dominado el mercado durante los últimos años y están presentes en la mayoría de procesos adaptándose a los cientos de aplicaciones dentro de un gran rango considerable de condiciones de proceso, estas válvulas son de vástago deslizante y la posición del actuador es vertical. Pueden ser guiadas en caja o en tapón, con un solo puerto o dos, internos balanceados o desbalanceados.

Las válvulas de simple puerto son las más comunes y cuentan con una simple construcción de fácil acceso para mantenimiento de los internos. Generalmente estas válvulas son especificadas para estrictos requisitos de cierre.

Las válvulas guiadas en tapón son especiales para el control de flujo de líquidos o gases o mezcla de líquido con sólidos en suspensión, para el control de bajos valores de flujo, para fluidos con alto grado de viscosidad, fluidos altamente corrosivos en la industria de refinación de crudo de petróleo o en procesos químicos. El asiento metal-metal es estándar sobre ciertos rangos de presión y temperatura, pueden ser seleccionados asientos blandos.

Estas válvulas se encuentran hasta 6 pulgadas de diámetro estándar y un Rating de hasta 2500 CL, más adelante, en el capítulo 3, explicaremos que es el rating en una válvula de control. Estos equipos cuentan con una gran variedad de materiales de construcción en el cuerpo y en los internos y un fácil acceso al mantenimiento o remplazo de sus partes principales de la válvula, ver figura 6.

La terminología para los internos de la válvula es el “trim”, que se refiere al vástago, tapón, caja y al asiento metálico.

El bonete de una válvula de control es la parte del ensamble del cuerpo de la válvula y el actuador que resguarda el vástago y la empaquetadura, funge la función de restringir el movimiento del vástago verticalmente para que el tapón al cerrar la válvula cierre de manera uniforme con el anillo de asiento.

En una típica válvula de globo el material del bonete es el mismo que el del cuerpo de la válvula o equivalente, debido a que se encuentra expuesta en el mismo rango de presión, temperatura y corrosión que el resto del cuerpo de la válvula, y las conexiones con el cuerpo de la válvula es bridado con espárragos de tornillos.

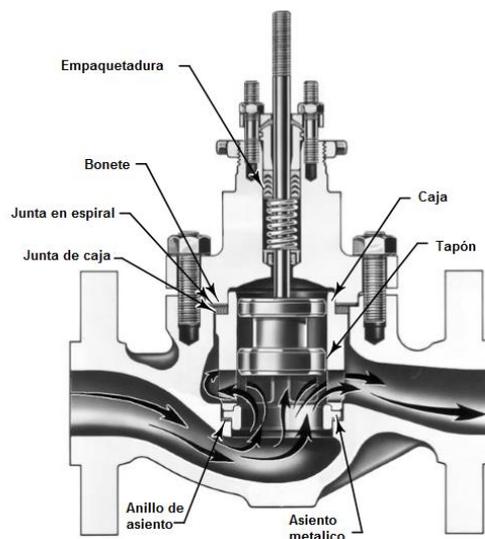


Fig. 6 Válvula de globo guiada en tapón

**Fuente:** Fisher ES and EAS Sliding-Stem Control Valves, product bulletin, 51.1:ES, pg 6

Bonetes extendidos son utilizados para servicios con altas o bajas temperaturas para proteger las empaquetaduras de temperaturas extremas de proceso, desde -198 hasta 593°C. En la industria de la energía comúnmente se encuentran servicios de estrangulamiento de flujo con altos valores de presión y es común que las conexiones finales de la válvula con la tubería sean soldadas, en este caso es necesario especificar bonete extendido para alejar y proteger las empaquetadoras de la actividad de soldar.

Fuelle de bonetes son otro diseño especial de bonetes, son utilizados para evitar fugas de fluidos peligrosos, tóxicos, altamente volátiles, radiactivos o especialmente costosos, ver figura 7, esta construcción especial de bonete protege tanto el vástago como la empaquetadura del contacto con el fluido de proceso. Empaquetadura estándar o especial sobre el asiento de la unidad de fuelles van a prevenir fallas catastróficas en caso de ruptura o falla de los fuelles.



Fig. 7 Bonetes extendidos con fuelles

**Fuente:** FISHER, Control Valve Handbook, Emerson Process Management, Four edition, pg 8

Este tipo de diseño de válvulas de globo se conocen como desbalanceadas, y esta es una desventaja en aplicaciones con altas caídas de presión ya que se requiere de gran cantidad de fuerza por parte del actuador para cerrar la válvula completamente. Se le conoce como desbalanceada por que la carga de fuerzas durante el control del fluido debajo del tapón y sobre el tapón no son las mismas, como consecuencia se requiere de gran cantidad de energía para cerrar estos equipos, y el dimensionamiento de los actuadores tipo resorte y diafragma puede no ser suficiente, y es necesario considerar un actuador de pistón de doble efecto para garantizar el cierre uniforme de la válvula, lo cual repercute invariablemente en el aumento del precio de este equipo.

### (iii) Válvulas de Globo balanceadas.

Los diseños de estas válvulas son para servicios generales, fluidos sucios, gases y altas caídas de presión, y aplicaciones donde se transportan grandes cantidades de flujo de fluido.

El tamaño puede ser hasta 20 pulgadas de diámetro nominal con rating de hasta 2500 CL

Se le conoce como balanceada ya que el tapón no es sólido y tiene unos orificios en la parte superior que permiten balancear las cargas del flujo de fluido debajo y sobre el tapón. Este diseño reduce considerablemente la fuerza necesaria para cerrar la válvula en el dimensionamiento del actuador, como resultado con un actuador de resorte y diafragma es posible vencer grandes caídas de presión del proceso, ver figura 8.

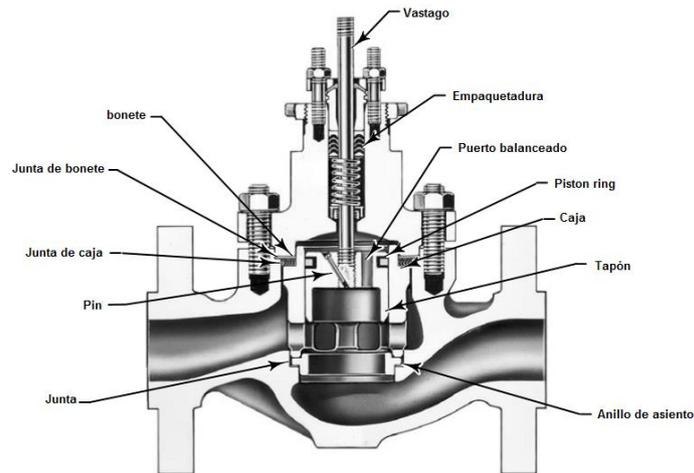


Fig. 8 Válvula de globo balanceada

**Fuente:** Fisher ET, EAT, and ETR Sliding-stem Control Valves, product bulletin, 51.1 ET D100022X012, pg 8

### (iv) Característica de flujo

En válvulas de globo guiadas en caja ya sean balanceadas o desbalanceadas, los diseños de las ventanas sobre las paredes de la caja determinan la característica de flujo inherente. En cuanto el tapón se mueve desde el anillo de asiento las ventanas de las cajas son abiertas permitiendo el paso del fluido través de la válvula.

Cajas estándar son diseñadas para producir una caracterización de flujo lineal, igual porcentaje o apertura rápida, como se muestra en la figura 10. Se le conoce a la característica de flujo inherente, es decir, determina la capacidad inherente de una válvula con una caída de presión constante en ella.



Fig. 9 Cajas caracterizadas

**Fuente:** FISHER, Control Valve Handbook, Emerson Process Management, Four edition, pg 10

La grafica de la curva característica de flujo inherente muestra el comportamiento de la ganancia de flujo en relación a la apertura o desplazamiento del vástago para las tres principales cajas caracterizadas, como se muestra en la fig. 9.

#### (v) Característica de apertura rápida

La característica de apertura rápida, ver figura 10, es lineal en la primera parte del recorrido y después hay muy poca ganancia de capacidad, esta caja caracterizada se especifica en aplicaciones de on-off, para aplicaciones en donde se requiere rápida respuesta al cierre o apertura de la válvula, poco interesa el control de flujo de fluido a través de esta válvula y el control es solo dentro de la zona de característica lineal.

#### (vi) Característica lineal

La característica lineal, ver figura 10, es la representación de un comportamiento con ganancia constante, la capacidad de la válvula varia en forma lineal conforme a la apertura de la válvula. Los cambios de flujo son constantes con respecto a los cambios de apertura o el recorrido del vástago. Frecuentemente las válvulas con característica lineal se especifican para aplicaciones de control de nivel o aplicaciones en donde se requiere una ganancia constante

#### (vii) Característica de igual porcentaje

La característica de igual porcentaje, ver figura 10, es tal que en iguales incrementos en los porcentajes de apertura de la válvula ocurre el mismo porcentaje en el incremento de la relación de flujo al mismo porcentaje de tiempo de apertura. El cambio en el incremento de la relación de flujo cuando el tapón está cerca del anillo de asiento, es decir hay muy poca apertura, es muy bajo y relativamente alto cuando la válvula está cerca de su apertura total. Por lo tanto, una válvula con característica de igual porcentaje proporciona preciso control de flujo en el estrangulamiento del fluido, la baja proporción en el recorrido de la apertura de la válvula proporciona un rápido incremento en el valor de la relación de flujo. Válvulas con característica de igual porcentaje son utilizadas en aplicaciones de control de presión o en aplicación con grandes caídas de presión. Esta característica de flujo es la utilizada con mayor frecuencia en el control de flujo de fluidos en la industria de procesos.

#### (viii) Objetivo de la característica de flujo de la válvula

La característica de flujo de la válvula tiene como objetivo principal indicar cómo varia la ganancia en la válvula para compensar los cambios en la ganancia del proceso cuando cambian los valores de flujo. La ganancia de la válvula indica la relación de flujo a la salida de la válvula a los cambios del recorrido del vástago en la dirección de cierre o apertura de la válvula.

Sin embargo, al comparar la válvula de globo con otros tipos de válvulas se aprecia que tiene ciertas limitaciones, por ejemplo, el tamaño es de hasta 20 pulgadas de diámetro nominal, menor capacidad de flujo y mayor costo en comparación con la válvula de bola o mariposa.

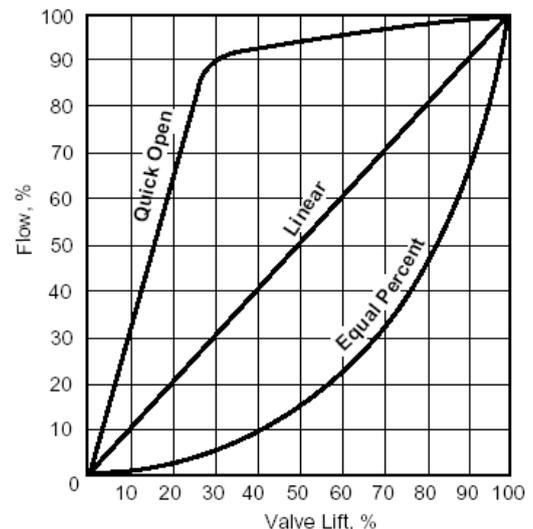


Fig. 10 Curva caracterizada de flujo inherente

Fuente: FISHER, Control Valve Handbook, Emerson Process Management, Four edition, pg 4

(ix) **Válvula de bola:**

Existen diversos tipos de válvulas de bola para control de flujo. Además de la válvula de bola de puerto completo estándar o con orificio reducido, hay algunas en las que se emplea una bola parcial configurada, originalmente estas válvulas fueron diseñadas para manejo de pastas de papel y ahora se emplean en todas las industrias, en el control de gas natural, en la industria de transportación de gas o gas de proceso en refinerías, en vapor y mezcla de líquidos con sólidos en suspensión, ver figura 11.

En el mercado se encuentran tamaños desde 1 hasta 20 pulgadas de diámetro nominal y clase 600CL. En la mayor parte de las válvulas de bola se emplean sellos de elastómeros y producen un buen cierre. Los sellos metálicos flexibles se utilizan cada vez más para altas temperaturas y también existen sellos metálicos rígidos.

Las válvulas de bola se denominan de alta recuperación, lo cual significa que la presión en la salida se recupera hasta un valor cercano al de la presión de entrada, mayor que la recuperación de presión en una válvula de globo; es decir, que requieren menor caída de presión para permitir un mayor volumen de flujo. Pero las válvulas de bola tienen límites de caída de presión y de temperatura más bajos que las válvulas de globo.

En aplicaciones en donde se puede utilizar una válvula de globo o una válvula de bola, una válvula de bola resulta ser considerablemente más económica.



Fig. 11 Válvula de bola

**Fuente:** Fisher Vee-Ball V150, V200 and V300  
Rotary Control Valves NPS 1 through 12,  
instruction manual, D101554X012, pg 1

#### (x) Válvula de mariposa

Otro tipo de válvula rotatoria que cada vez tienen más presencia en la industria es la válvula de mariposa de alto rendimiento, ver figura 12, que cuenta con un diseño de eje excéntrico que ofrece excelente control de flujo proporcionando una característica de flujo igual porcentaje de alta eficiencia comparable con la válvula de bola.

En el mercado se encuentran válvulas de hasta 36 pulgadas de diámetro nominal hasta 600 CL. El disco excéntrico es producto de la geometría de la ingeniería y significa que la flecha no está conectada directamente al centro del disco sino ligeramente sobre el centro del disco, es un diseño descentralizado de su eje, con ello se tiene un movimiento excéntrico cuando abre o cierra la válvula.

Una ventaja importante es que el disco solo hace contacto con el sello de la válvula con unos cuantos grados de rotación cuando cierra la válvula, esto reduce considerablemente el desgaste en el sello y evita la deformación de los elastómeros. Además, cuando la válvula está abierta, el sello no tiene rozamiento contra el disco, hay baja fricción y se requiere menor fuerza de torque dinámico para su accionamiento. La válvula de mariposa de disco excéntrico al igual que la válvula de bola cuenta con sellos de elastómeros o asientos metálicos.

El costo relativo de las válvulas de mariposa con disco excéntrico y de bola varían según el tamaño, pero el costo promedio la de disco excéntrico es menor.

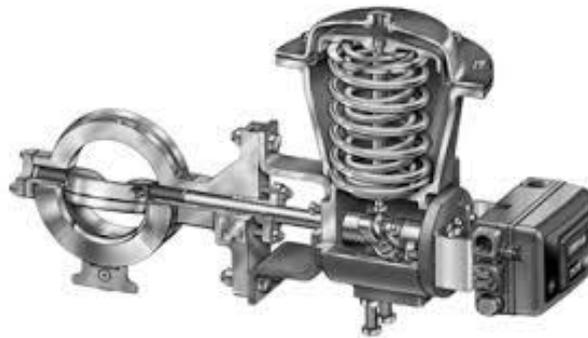


Fig. 12 Válvula de mariposa

**Fuente:** FisherrRotaryValveSelectionGuide, product bulletin, D102550X012, pg 2.

### (xi) Emisiones fugitivas

La industria del petróleo y la industria química desde los años 90s han puesto gran interés en la disminución de emisiones fugitivas al ambiente, ya que uno de los principales objetivos del control de procesos y cualquier equipo que se encuentra en la industria de procesos químicos es que su diseño sea ambientalmente seguro.

Emisiones fugitivas son emisiones de gases o vapor desde equipos de control de proceso debido a su diseño de sello o empaques con la finalidad de evitar el riesgo de contaminación del ambiente. Además, la emisión de compuestos orgánicos como benceno desde refinerías y plantas químicas puede repercutir en un potencial riesgo para los trabajadores de la refinería y en los habitantes en comunidades cercanas a esta.

Las empresas que manufacturan válvulas de control han puesto gran interés en el diseño de los empaques, desarrollando empaques especiales para evitar emisiones fugitivas a la atmosfera, compañías han evaluado equipos con empaques estándar y han desarrollado nuevas técnicas y tecnologías que en el transcurso de los años se han normalizado y como resultado se obtienen pruebas y certificados especiales.

La organización internacional de estandarización conocida por sus siglas en ingles ISO ha especificado los procedimientos de medición y pruebas en válvulas conocido como ISO-15848-1 y 2. Estos dos documentos contienen información desde una amplia gama de fuentes industriales, el cual incorpora el método de pruebas estándar para empaques de emisiones fugitivas dirigida a válvulas para la industria de la refinación de petróleo, para evaluación y medición de fugas en los empaques del vástago o flechas de las válvulas. Emisiones de conexiones finales, servicios a condición a vacío, efector de corrosión y radiación son excluidas de ISO-15848-1 y 2. La parte 1 esta direccionada a los sistemas de clasificación y procedimientos de calidad para pruebas del ensamble completo de válvulas usando vacío y la parte dos cubre aceptación de producción de pruebas en válvulas. Las pruebas estándar de emisiones fugitivas utilizan helio o metano como fluido de prueba y se mide las emisiones de estos gases en los empaques por cada ciclo de prueba

La industria americana del petróleo, API por sus siglas en ingles ha desarrollado un estándar conocido como API 622 en respuesta de la necesidad de emisiones fugitivas de la industria del petróleo y química, al igual que ISO fue diseñada para las pruebas de emisiones fugitivas de los empaques de las válvulas. La nueva edición de API 622, 2011, elimina el uso de válvulas estándar para la industria de refinación del petróleo y química. Esta prueba de emisiones fugitivas es más estricta en comparación con las pruebas ISO, ya que requiere de cinco ciclos térmicos desde la temperatura ambiente de 260 °C con 1.510 ciclos mecánicos de pruebas, usando metano como fluido de prueba. Cada conjunto de pruebas de ambiente y ciclo térmico es dividido entre 300 ciclos por día y un final de 10 ciclos en donde la emisión fugitiva de metano es medido y registrado.

Con la renovación de los distintos tipos de diseños de válvulas dirigidos a la industria química y refinación del petróleo API ha desarrollado una segunda edición de API 622 conocida como API 624. Esta nueva edición cubre las pruebas de emisiones fugitivas para válvulas rotatorias con empaques flexibles de grafito, para altas temperaturas de proceso. Este estándar usa el método de EPA 21, Agencia Americana de Protección Ambiental, por sus siglas en inglés, como un proceso de evaluación de emisiones fugitivas para la protección ambiental con un mínimo de fugas del empaque 100 ppm de metano. Requiere que la prueba del ensamble completo de las válvulas sea previamente conforme a lo especificado por API 622 y sea adecuado para temperaturas de proceso de 29 °C a 538 °C. El certificado de manufactura de acuerdo con API 24 debe de indicar que los empaques y el ensamble completo de la válvula no fue modificado de ninguna manera y es una representación típica de la manufactura de productos en almacén. El procedimiento de prueba requiere 300 ciclos mecánicos y 3 ciclos térmicos de 260°C.

Ambos estándares de emisiones fugitivas son utilizados en la industria de refinación de petróleo y la industria química, ISO 15848-1/2, API 622 y su nueva edición API 624 han desarrollado pruebas y certificados de empaques de válvulas. Cada estándar tiene un seguimiento significativo dependiendo de los requerimientos de prueba del usuario final y el tipo de industria.

## CAPITULO 3 SELECCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE VÁLVULAS DE CONTROL EN LA INDUSTRIA DE PROCESOS QUÍMICOS

La tarea de seleccionar un ensamble de válvula de control que represente el mejor desempeño de control de flujo cumpliendo con los requerimientos del proceso, es una tarea ardua y se requiere del conocimiento de los tipos de válvulas de control existentes, los manuales o boletines de las compañías fabricantes de válvulas de control son de gran ayuda y se recomienda considerar más de un fabricante al adquirir una válvula de control.

El trabajo de selección de válvulas de control puede ser un trabajo sistemático una vez conociendo la aplicación y los datos de operación, el trabajo de selección y dimensionamiento es una tarea que requiere estrecha colaboración con el ingeniero de procesos y el ingeniero de instrumentos.

Es importante conocer la siguiente información completa al seleccionar y dimensionar una válvula de control.

- Tipo de fluido a controlar
- Servicio o aplicación
- Temperatura del fluido
- Viscosidad del fluido
- Gravedad específica
- Propiedades físicas del fluido, peso molecular, presión crítica, presión de vapor, relación de calores específicos.
- Capacidad de flujo requerida (máxima y mínima)
- Presión de entrada (máxima y mínima)
- Presión de salida (máxima y mínima)
- Presión absoluta
- Caída de presión durante la operación normal de la válvula
- Máxima caída de presión de shutoff o de cierre
- Máximo niveles de decibeles permitidos y la distancia de medición
- Dimensiones nominales de la tubería de entrada y salida
- Cédula de la tubería
- Especial información requerida en la placa de identificación
- Material del cuerpo deseado
- Tipos y clases de conexiones finales
- Acción a falla de la válvula en caso de falla de suministro neumático
- Instrumentación requerida
- Suministro neumático, señal y tipo

Toda esta información es útil registrarla en un formato de requisición de válvulas de control, como el que se muestra a continuación, figura 13 y 14 que es el ISA 20.50, es un formato estándar y completo de requisición de válvulas de control.

		PROJECT _____				DATA SHEET _____ of _____																			
		UNIT _____				SPEC _____																			
		P.O. _____				TAG _____																			
		ITEM _____				DWG _____																			
		CONTRACT _____				SERVICE _____																			
		*MFR. SERIAL _____																							
1	Fluid					Crit Press P <sub>C</sub>																			
2	SERVICE CONDITIONS		Units	Max Flow	Norm Flow	Min Flow	Shut-Off																		
3		Flow Rate					—																		
4		Inlet Pressure																							
5		Outlet Pressure																							
6		Inlet Temperature																							
7		Spec Wt / Spec Grav / Mol Wt					—																		
8		Viscosity/Spec Heats Ratio					—																		
9		Vapor Pressure P <sub>v</sub>					—																		
10		*Required C <sub>v</sub>					—																		
11		*Travel	%				0																		
12		Allowable/**Predicted SPL	dBA	/	/	/	—																		
13	LINE	Pipe Line Size	In _____		53	ACTUATOR																			
14		& Schedule	Out _____		54																				
15	Pipe Line Insulation				55			POSITIONER																	
16	VALVE BODY / BONNET	*Type			56					SWITCHES															
17		*Size _____ ANSI Class _____			57																				
18		*Max Press/Temp _____			58																				
19		*Mfr. & Model _____			59																				
20		*Body/Bonnet Matl _____			60																				
21		*Liner Material/ID _____			61																				
22		End _____ In _____			62																				
23		Connection _____ Out _____			63																				
24		Flg Face Finish _____			64																				
25		End Ext/Matl _____			65																				
26		*Flow Direction _____			66																				
27	*Type of Bonnet _____			67	AIR SET																				
28	Lub & Iso Valve _____ Lube _____			68			TESTS																		
29	*Packing Material _____			69																					
30	*Packing Type _____			70																					
31				71																					
32	TRIM	*Type _____							72	REV															
33		*Size _____ Rated Travel _____							73																
34		*Characteristic _____							74																
35		*Balanced/Unbalanced _____							75																
36		*Rated C <sub>v</sub> _____ F <sub>L</sub> _____ X <sub>T</sub> _____							76																
37		*Plug/Ball/Disk Material _____							77																
38		*Seat Material _____			78																				
39		*Cage/Guide Material _____			79																				
40		*Stem Material _____			80																				
41					81																				
42					82																				
43	SPECIALS/ACCESSORIES	NEC Class _____ Group _____ Div _____			83	DATE																			
44					84			REVISION																	
45					85					ORIG															
46					86							APP													
47					87									DATE											
48					88											REVISION									
49					89													ORIG							
50					90															APP					
51					91																	DATE			
52					92																			REVISION	

\*Information supplied by Seller unless already specified.

Fig. 13 Formato ISA 20.50 para válvulas de control

Fuente: ISA Guideline Compliant Specification Control Valves, pg 19

### Control Valves Data Sheet

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO		PROJECT	Reconfiguración de calderas "Energía del vapor"		DATA SHEET	15 de 116		
		UNIT	Calderas 1 y 2		SPEC	12A		
		P.O.	305119818_AB		TAG	FV-00098		
		ITEM	5 de 20		DWG	DG-00098		
		CONTRACT	CR0058		SERVICE	Recirculación de agua de GA-126 A/B		
		MFR. SERIAL	6051990					
1	Fluid: Agua			Crit. Pres. PC: 224.990 kg/cm2a				
SERVICE CONDITIONS		Units:		@ Flujo Norm	@ Flujo Max			
2	Volumetric Flow Rate Liquid (Ql)	m3/h		10.400	11.500			
3	Inlet Pressure (P1)	kg/cm2g		25.970	24.870			
4	Pressure Change (dP)	kg/cm2		24.510	23.430			
5	Inlet Temperature (T1)	deg C		38.000	38.000			
6	SG			0.994	0.994			
7								
8	Vapor Pressure (Pv)	kg/cm2a		0.068	0.068			
9	Sizing Coefficient (Cv)			2.446	2.766			
10		% Open		69	74			
11	(Allowed / Calculated)	dB(A)		/59	/59			
12								
PIPE LINE				53	ACTUATOR Type: <b>Spring &amp; Diaphragm</b>			
13	Size, Schedule In:	<b>3 in, SCH STD</b>		54	Mfg/Model: <b>Fisher/657</b>			
14	Size, Schedule Out:	<b>3 in, SCH STD</b>		55	Size: <b>40i</b>	Eff Area: <b>69 in2</b>		
15	Insulation:			56	On/Off:	Modulating:		
16	VALVE BODY/BONNET	Type:	<b>Globe</b>	57	Spring Action:	<b>Up,Open</b>		
17	Size: <b>NPS 2</b>	ANSI	<b>CL300</b>	58	Max Allow Press:	<b>65 psig</b>		
18	Max Press/Temp:	<b>31.4 kg/cm2g/93 deg C</b>		59	Min Req'd Press:			
19	Mfg/Model:	<b>Fisher/ES</b>		60	Available Air Supply Pressure			
20	Body/Bonnet Matl:	<b>WCC Steel</b>		61	Max:	4.5 Kg/cm2 (g)	Min: 2.5 Kg/cm2 (g)	
21	Liner Matl/ID:			62	Bench Range:	<b>3-32 psi</b>		
22	End Connection In:	<b>CL300 RF Flg</b>		63	Act Orientation:			
23	End Connection Out:	<b>CL300 RF Flg</b>		64	Handwheel Type:	<b>None</b>		
24	Flg Face Finish:			65	Air Failure Valve:	<b>Open</b>	Set at: <b>3 Kg/cm2 (g)</b>	
25	End Ext/Matl:			66				
26	Flow Direction:	<b>Down</b>		67	Input Signal:	<b>FOUNDATION Fieldbus</b>		
27	BONNET Type:	<b>Plain</b>		68	POSITIONER Type:	<b>I/P</b>		
28	Lub-Iso Valve: <b>No</b>	Lube:	<b>No</b>	69	Mfg/Model:	<b>Fisher/DVC6200f/Advanced-AD</b>		
29	Packing Material:	<b>Enviro-Seal PTFE/Carbon for</b>		70	Incr Signal Output:			
30	Packing Type:			71	Gauges:	<b>0-60 psig/0-4 bar</b>	By-Pass:	
31				72	Cam Characteristic:			
32	TRIM Type:	<b>Metal 440C SST</b>		73				
33	Size: <b>1 Inch</b>	Travel:	<b>1 1/2 Inch</b>	74	SWITCHES			
34	Characteristic:	<b>Cav III, 2 Stage, Micro-Flat</b>		75	Type:	Qty:		
35	Balanced/Unbalanced:	<b>Unbalanced</b>		76	Mfg/Model:			
36	Rated Cv: <b>4.1</b>	Fl:	<b>0.97</b>	77	Contacts/Rating:			
37	Material:	<b>S44004 SST</b>		78	Actuation Points:			
38	Seat Material:	<b>S44004 SST</b>		79	AIRSET			
39	Cage Material:	<b>S17400 SST</b>		80	Mfg/Model:	<b>Fisher/67CFR Filter/Regulator w/ SST</b>		
40	Stem Material:	<b>S31600 SST</b>		81	Set Pressure:			
41				82	Filter:	si	Gauges: 0-60 psig/0-4 bar	
42				83	TESTS Hydro Press:			
43	SPECIAL ACCESS.	no requiere		84	ANSI/FCI Leak Class:	<b>ANSI CL V Water Test</b>		
44	NEC Class:	Group:	Div:	85				
45				86				
46								
47				Rev	Date	Revision	Orig	App
48				<b>A</b>	<b>10 de</b>	<b>1-ISA</b>		
49					<b>Octubre</b>			
50					<b>2017</b>			
51								
52								

Fig. 14 Formato ISA 20.50 para válvulas de control completo

Fuente: Elaborado por el autor

El cliente tiene la tarea de llenar este formato con la información correspondiente de su proyecto, unidad y servicio, ubicación y nomenclatura de identificación.

Las condiciones de operación a la cual la válvula de control va a estar expuesta pueden ser más de una e incluso el presente formato puede ser no suficiente para vaciar todas las condiciones de operación presentes en el proceso y es necesario agregar columnas extras en el formato estándar para complementar esta información.

Los datos de proceso ya sean tipo de fluido, presión de entrada, presión de salida, temperatura de operación, viscosidad, gravedad específica, etc. Son de suma importancia que el ingeniero llene completamente estos recuadros con ayuda del ingeniero de procesos y si alguna propiedad física del fluido no está considerada el ingeniero encargado de seleccionar y especificar la válvula de control tendrá la tarea de llenar los cuadros vacíos en base a sus hojas de datos, y una vez terminada la especificación de la válvula el cliente o usuario final tendrá la tarea de aprobar las especificaciones añadidas por el ingeniero especialista en la selección de válvulas.

En el presente trabajo se han mencionado los principales tipos de válvulas de control, ya sean de vástago deslizante o rotatorias, el primer paso en seleccionar una válvula de control es considerándola como un tanque de almacenamiento que está sometida a una presión y temperatura de diseño, esto es en base a la norma ASME B16.34 que especifica la máxima presión y temperatura que una válvula de control soporta en relación con el material de construcción. En la tabla 1 se pueden observar los materiales de construcción típicos para una válvula de control.

CATEGORY	ASME			
	Specification	Grade	Material Group	Nominal Designation
Carbon Steel	SA-216	WCC <sup>(1)</sup>	1.2	5-Mn-Si
	SA-352	LCC <sup>(2)</sup>	1.2	5-Mn-Si
	SA-350	LF2	1.1	C-Mn-Si
Alloy Steels	SA-217	WC6	1.9	1-1/4Cr-1/2 Mo
		WC9	1.10	2-1/4Cr-1 Mo
		C12A	1.15	9Cr-1 Mo-V
Stainless Steel	SA-351	CF8M	2.2	16Cr-12 Ni-2Mo
		CF8	2.1	18Cr-8 Ni
		CF8C	2.11	18Cr-10 Ni-Cb
		CF3M	2.2	16Cr-12 Ni-2Mo
		CG8M	2.2	19Cr-10 Ni-3Mo
		CK3MCuN	2.8	20Cr-18 Ni-6Mo
	SA-995	CD3MN <sup>(3)</sup> (Grade 4A)	2.8	22Cr-5 Ni-3Mo-N
		CD3MWCuN (Grade 6A)	2.8	25Cr-7 Ni-3.5Mo-Cb

1. WCC is a standard substitute for WCB material.  
2. LCC is a standard substitute for LCB material.  
3. Listed as A251-CD3MN in B16.34-2013.

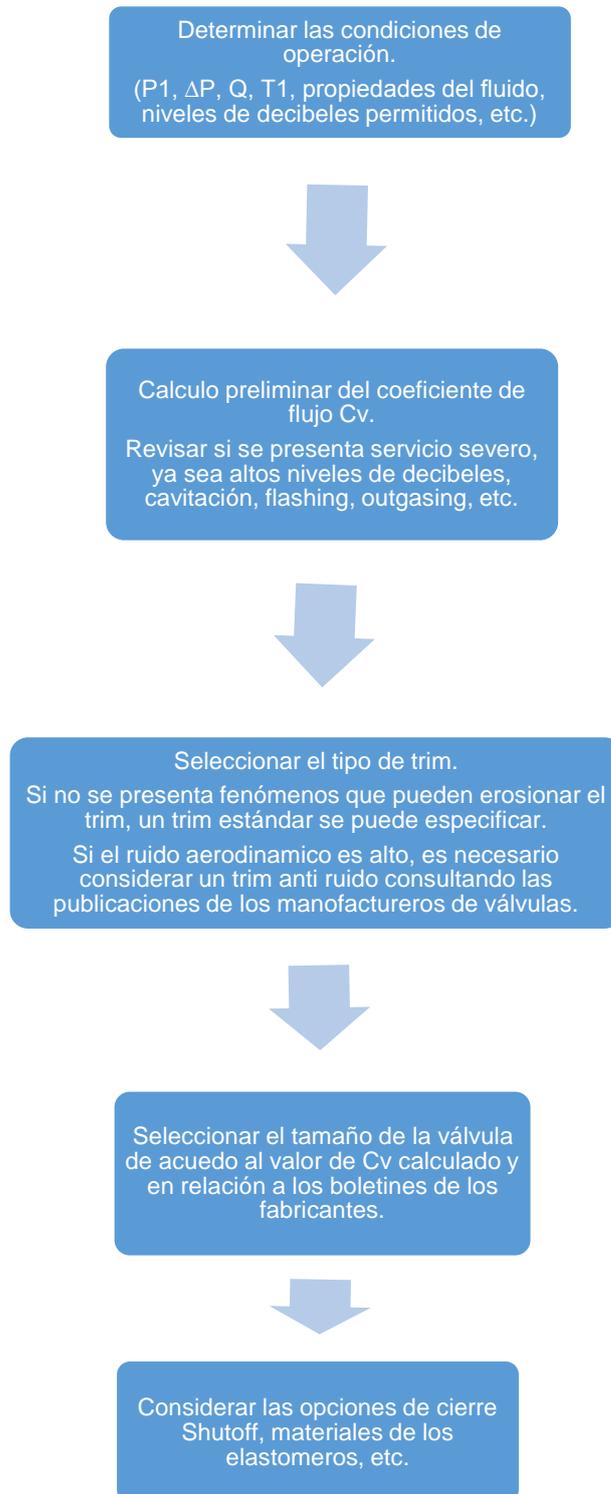
Tabla 1 Materiales típicos de construcción para válvulas de control

Fuente: Pressure/Temperature Ratings for FisherrValves (ASME B16.34-2013)-U.S.Traditional Units, pg 1

(i) Rating de una válvula

El rating estándar de la válvula puede ser CL150, 300, 600, 900, 1500 o 2500 y es la relación de la máxima presión y temperatura que soporta el material de construcción de la válvula de control. La presión y temperatura en determinado material nunca puede rebasar lo especificado en la norma ASME B16.34.

(ii) Proceso sistemático de selección de válvulas de control



### (iii) Selección del material del cuerpo de la válvula

La selección del material del cuerpo de la válvula es usualmente basada en la presión, temperatura, propiedades corrosivas y propiedades erosivas a las que está expuesta, el material que represente buen desempeño a la erosión del proceso puede no ser resistente a la corrosión y no ser compatible con el fluido a manejar.

La selección de materiales para válvulas de control y sus componentes puede ser bastante complejo de evaluarlas. Las válvulas de control deben funcionar con precisión en algunas aplicaciones extremadamente peligrosas, la correcta selección de materiales será en base a las publicaciones de "Instrument Society of American Materials for Controls Valves (ISA)", que es una gran ayuda en la selección de materiales no solo para el cuerpo de la válvula o los internos sino también para el material de los elastómeros

Algunas aplicaciones requieren de aleaciones no estándar del material del cuerpo, por mencionar un ejemplo Alloy 20 que es una aleación de níquel, cromo, molibdeno y cobre altamente resistente a la corrosión en general, fue creado específicamente para el manejo de ácido sulfúrico.

El material más común en el cuerpo de la válvula es acero al carbón WCC en servicios moderados como aire, vapor saturado, vapor sobresaturado, líquidos y gases no corrosivos. Para seleccionar el material de construcción de una válvula es necesario referirse a las publicaciones de los productores de válvulas y la compatibilidad con el material de la tubería.

### (iv) Calculo del coeficiente de flujo Cv

El dimensionamiento de una válvula de control es en base al valor de Cv calculado. Los días en que las válvulas de control se especificaban en base al diámetro de la tubería se han ido, la técnica correcta es recabar la mayor cantidad de datos posibles y calcular los valores de coeficiente de flujo Cv de operación.

La técnica de dimensionamiento de una válvula de control es un conjunto de teoría y experiencia, es preciso seleccionar el diámetro correcto de una válvula de control de acuerdo a la aplicación. Un error en el dimensionamiento puede tener consecuencias desastrosas en inversión y en el control de flujo, el diámetro de la válvula puede ser demasiado pequeño para el flujo volumétrico, y un tamaño demasiado grande puede ocasionar que la válvula de control este sobredimensionada, forzando el control de flujo a una apertura muy pequeña ocasionando un rápido desgaste de los internos.

Cv; Caudal de agua en galones de E.U.A, o imperiales por minuto, a 60°F (15.6°C) que produce una pérdida de presión de una libra por pulgada cuadrada en la válvula.

Usando el principio de la conservación de la energía, el teorema de Daniel Bernoulli aplicado a líquidos turbulentos a través de un orificio, el cuadrado de la velocidad es directamente proporcional a la diferencial de la presión a través del orificio e inversamente proporcional a la gravedad específica del fluido. A mayor diferencial de presión, mayor velocidad, a mayor densidad menor velocidad. Los flujos volumétricos del líquido se obtienen multiplicando por el área, para fluidos incompresibles, este principio no aplica para fluidos compresibles, el resultado es la siguiente ecuación:

$$Q = Cv \sqrt{\frac{\Delta P}{Sg}} \quad \text{ecuación 3.1}$$

En donde:

Q = Flujo volumétrico o caudal; sus unidades son unidades de Volumen entre unidades de tiempo, GPM.

Cv= Coeficiente de flujo determinado experimentalmente por cada estilo y tamaño de válvula, se utiliza agua en condiciones estándar como fluido de proceso para su determinación.

$\Delta P$ = Caída de presión en el sistema, en lbf/in<sup>2</sup>

$S_g$ = Gravedad específica del fluido, adimensional

Recordemos que la gravedad específica para líquidos es una medida relativa de la densidad. Como la presión tiene un efecto insignificante sobre la densidad de los líquidos, la temperatura es la única variable que se toma en cuenta de la gravedad específica. La gravedad específica de un líquido es la relación de su densidad a cierta temperatura, con respecto a la de agua a una temperatura de 60°F (15.6°C).

Si en la presente ecuación despejamos el valor de  $C_v$ , como sigue:

$$C_v = Q \sqrt{\frac{S_g}{\Delta P}} \quad \text{ecuación 3.2}$$

Suponemos una caída de presión de 1 psi y el fluido es agua a 60°F, por lo tanto, el valor de la gravedad específica será de 1.0. En este caso el valor de  $C_v$  tendrá unidades de flujo volumétrico y se consideran como caudal de agua en galones de E.U.A, el valor de  $C_v$  varia en relación al estilo y dimensiones de la válvula, pero proporciona una buena referencia de la capacidad de flujo a través de la válvula a condiciones estándar del líquido.

Las actividades de estandarización del cálculo del coeficiente de flujo se remontan a la década de 1960. El instituto de control de Fluidos (FCI por sus siglas en inglés), tiene publicadas ecuaciones de dimensionamiento para fluidos compresibles e incompresibles. El rango de las condiciones de servicio en donde esta ecuación puede ser aceptada es demasiado estrecha, y la ecuación estándar no logró conseguir gran aceptación. En 1967, la sociedad americana de instrumentación (ISA por sus siglas en inglés), estandarizo un comité para desarrollar y publicar la ecuación estándar. Los esfuerzos de este comité culminaron en un proceso o método de dimensionamiento de válvulas que están archivados en el Instituto Nacional americano de estandarización (ANSI por sus siglas en inglés). Años después el comité conocido como comisión electrotécnica internacional (IEC por sus siglas en inglés) utilizo el trabajo pionero de ISA como base para formular el dimensionamiento estándar para válvulas de control, conocida como ANSI/ISA S75.01.

El volumen de la IEC 60534 incluye ecuaciones estandarizadas para determinar el coeficiente de flujo a través de válvulas de control para fluidos compresibles e incompresibles, desafortunadamente el presente trabajo no cuenta con los permisos por parte de la IEC para presentar las ecuaciones y la terminología en el dimensionamiento de válvulas. Sin embargo, las ecuaciones para fluidos incompresibles están basadas en ecuaciones hidrodinámicas estándar para fluidos Newtonianos incompresibles.

#### (v) Régimen de viscosidad

Recordemos que los fluidos Newtonianos son aquellos que su viscosidad permanece constante a través del tiempo, su perfil de velocidad es la relación constante de la velocidad entre el diámetro de la tubería, ver ecuación 3.3. La mayoría de los líquidos dentro de un sistema con bajos valores de relación de presión, esto es:  $\Delta P/P_1$ ,  $P_1$  (presión de entrada al sistema) en unidades absolutas, se comportan como fluidos newtonianos, sin embargo, la viscosidad depende del estado del fluido caracterizada por la presión y temperatura. El simple cálculo de  $C_v$  no debe de utilizarse para sistemas de altos valores de  $\Delta P/P_1$ , fluidos compresibles, mezcla de gases líquidos, dos fases, vaporización, entre otros.

$$\tau_{xy} = -\mu \frac{du}{dy} \quad \text{ecuación 3.3}$$

#### (vi) Régimen Laminar y turbulento

En las instalaciones de tuberías, el flujo cambia de régimen laminar a turbulento dentro de los límites del número de Reynolds de 2000 a 4000, Las investigaciones de Reynolds demostraron que el régimen de flujo en tuberías depende del diámetro de la tubería, de la densidad y la viscosidad del fluido y la velocidad del flujo. El valor número de una combinación adimensional de estos cuatro variables es conocido con el número de Reynolds y se define como la relación de las fuerzas dinámicas de la masa del fluido respecto a los esfuerzos de deformación ocasionados por la viscosidad.

$$R_e = \frac{Du\rho}{\mu} \quad \text{ecuación 3.4}$$

En donde:

$R_e$  = número de Reynolds, adimensional.

$D$  = diámetro interno, en in

$u$  = velocidad del flujo, en ft/seg

$\rho$  = densidad del fluido, en lb/in<sup>3</sup>

$\mu$  = viscosidad, en ft·lb/seg·in<sup>2</sup>

Adicionalmente el régimen de flujo en tuberías entre los valores de 2000 y 4000 se denomina de transición, en donde el flujo puede ser entre turbulento o laminar, se denomina como una zona crítica, puede alterarse de un modo imprevisto.

La ecuación estándar del cálculo de coeficiente de flujo, ecuación 3.2, se ve afectada por la geometría interna de cada válvula, los factores de geometría se determinan experimentalmente para cada modelo de válvula dentro de la prueba de flujo, la cual está determinada por la resistencia al flujo debida a ensanchamientos bruscos, como sigue:

$$K_1 = \left(1 - \frac{d_1^2}{d_2^2}\right)^2 \quad \text{ecuación 3.5}$$

La resistencia debida a estrechamientos bruscos se define como sigue:

$$K_2 = 0.5 \left(1 - \frac{d_1^2}{d_2^2}\right)^2 \quad \text{ecuación 3.6}$$

Para válvulas instaladas entre reductores:

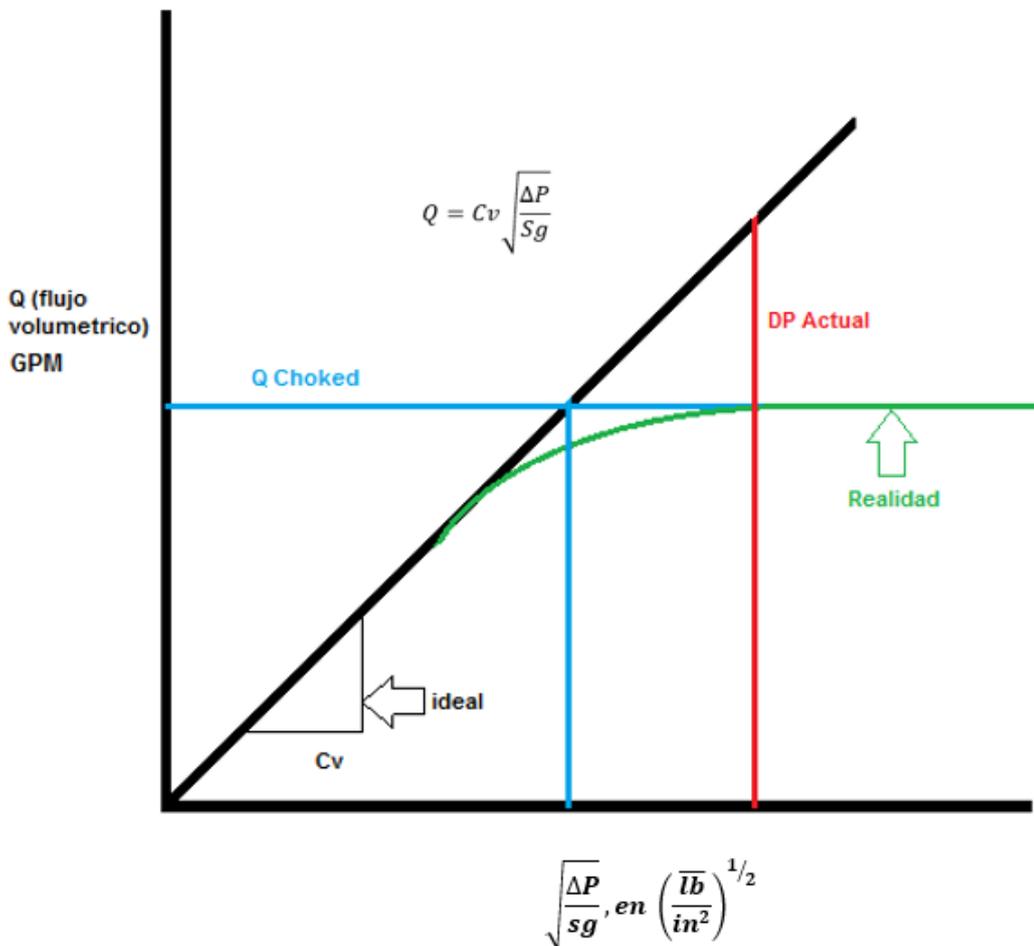
$$K_1 + K_2 = 1.5 \left(1 - \frac{d_1^2}{d_2^2}\right)^2 \quad \text{ecuación 3.7}$$

(vii) Determinación del valor máximo de flujo volumétrico

Para determinar el máximo valor de flujo volumétrico de una válvula es necesario hablar de un fenómeno hidrodinámico llamado flujo estrangulado o Choked Flow. Este tema es uno de los más complejos en el dimensionamiento de válvulas ya que está asociado con daños en los internos causados por cavitación o flashing, temas que se verán a detalle más adelante.

Flujo estrangulado, Choked flow, es definido como el punto en el que incrementa la caída de presión  $\Delta P$ , dentro del cual se mantiene constante la presión de entrada P1 y no hay incremento en el valor de flujo volumétrico.

En un mundo ideal, existe una relación lineal entre la caída de presión  $\Delta P$  y el flujo volumétrico Q, que se puede mostrar en la línea recta de color negro de la siguiente gráfica 1. En este caso el incremento de  $\Delta P$  es en función del incremento de P2.



Gráfica 1 Comportamiento real del flujo estrangulado

Fuente: Elaborado por el autor

Al incrementar la caída de presión, manteniendo la presión de entrada P1 constante, el comportamiento del valor de Cv se considera lineal hasta el punto en el cual el flujo volumétrico es estrangulado o Choked, es en el cual se mantiene constante el máximo valor de flujo, arriba de este límite (línea azul) cualquier incremento en la caída de presión (manteniendo P1 constante) no es posible obtener un valor de flujo mayor en el sistema.

es determinado por el factor de recuperación de la válvula  $F_L$  para líquidos y  $X_T$  para gases. En fluidos líquidos es determinado por la presión de vapor y en gases es dado por la velocidad sónica en la vena contracta.

La siguiente ecuación 3.8 muestra cómo se obtiene el factor de recuperación para líquidos.

$$F_L = 0.96 - 0.28 \sqrt{\frac{P_V}{P_C}} \quad \text{ecuación 3.8}$$

En donde  $P_V$  es la presión de vaporización del líquido, todos los fluidos arriba de su punto de congelación tienen presión de vapor. La presión de vapor es igual a la presión a la cual las moléculas del líquido comienzan a ponerse en contacto con la presión del sistema, significa que la presión de vapor es la presión de un líquido en donde comienza a vaporizar.

#### (viii) Presión de vapor

Se considera un hecho científico que el agua hierve a 100°C, es decir que presenta su primera burbuja de hervor al llegar a 100°C. Esto solo es cierto a la presión atmosférica a nivel del mar del agua a 760 mmHg (14.7 psia), pero comienza a evaporizar antes de llegar a este valor. La presión de vapor es la presión requerida para vencer la presión del sistema al que está contenido y el líquido evapora. El agua no necesariamente tiene que estar a 100°C para evaporar e incluso el agua puede evaporar a 0°C en un sistema a vacío.

La presión de vapor depende de la temperatura del fluido y puede calcularse para compuestos líquidos utilizando la ecuación de Antoine, y sus parámetros son como siguen:

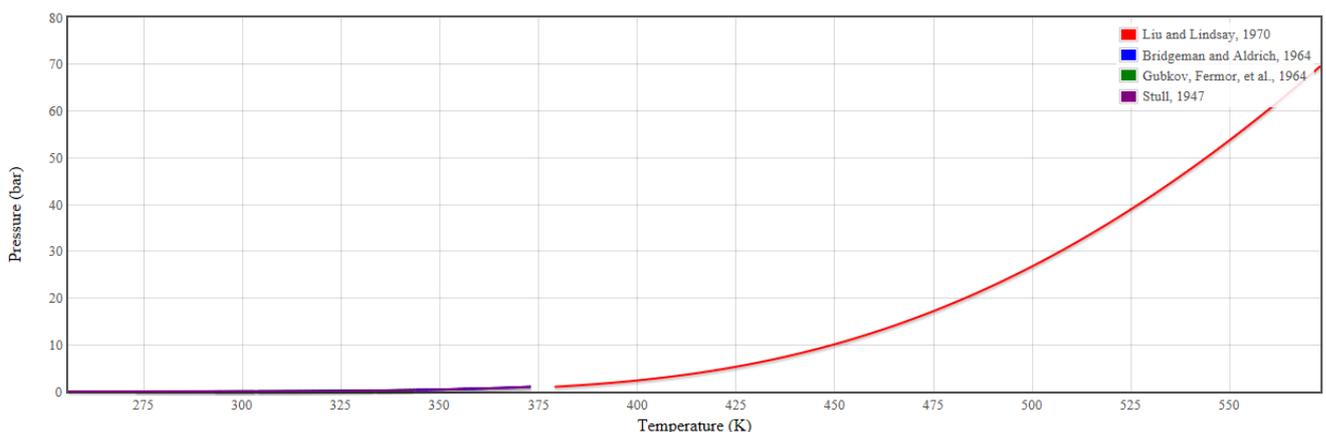
$$\log_{10}(P) = A - \frac{B}{T + C} \quad \text{ecuación 3.9}$$

En donde:

P = es la presión de vapor (bar)

T = Temperatura en K

Para hacer el cálculo se considera el fluido en estado estático, A, B y C son valores de las Tablas de Antoine. A continuación, se presenta el comportamiento de la presión de vapor de agua, observar gráfica 2:



Gráfica 2 Comportamiento de la presión de vapor del agua

Fuente: National Institute of Standards and Technology, Antoine Equation Parameters water, <http://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C7732185&Mask=4&Type=ANTOINE&Plot=on>

### (ix) Presión crítica

Los gases no se pueden licuar a temperaturas por encima de la temperatura crítica porque en este punto las características de los gases y de los líquidos son las mismas, y no hay base sobre la cual distinguir entre los gases y los líquidos. La presión del vapor de un líquido a la temperatura crítica se llama la presión crítica  $P_c$ . Termodinámicamente la presión del vapor de un líquido nunca es más grande que la presión crítica.

Las temperaturas críticas, las presiones críticas y los puntos de ebullición de varios gases se escriben en la siguiente tabla 2. Existe una correlación obvia entre la temperatura crítica y el punto de ebullición de estos gases. Estas propiedades están relacionadas porque ambas son medidas indirectas de la fuerza de atracción entre las partículas en la fase gaseosa.

Sustancia	$T_c$ (°C)	$P_c$ (atm)	P. de Ebullición (°C)
He	-267.96	2.261	-268.94
H <sub>2</sub>	-240.17	12.77	-252.22
Ne	-228.71	26.86	-246.1
N <sub>2</sub>	-146.89	33.54	-195.81
CO	-140.23	34.53	-191.49
Ar	-122.44	48.00	-185.87
O <sub>2</sub>	-118.38	50.14	-182.96
CH <sub>4</sub>	-82.6	45.44	-161.49
CO <sub>2</sub>	31.04	72.85	-78.44
NH <sub>3</sub>	132.4	111.3	-33.42
Cl <sub>2</sub>	144.0	78.1	-34.03

Tabla 2 Valores de presión crítica de algunos compuestos

**Fuente:** temperatura y presión crítica <http://www.cie.unam.mx/~ojs/pub/Liquid3/node9.html>

Los valores experimentales de la temperatura y de la presión críticas de una sustancia se pueden obtener al utilizar las constantes de “a” y de “b” en la ecuación de Vander Waals

$$\left(P + \frac{an^2}{V^2}\right)(V - nb) = nRT \quad \text{ecuación 3.10}$$

Donde las constantes “a” y “b” se pueden calcular a partir de sus puntos críticos de temperatura y presión:

$$a = \frac{27R^2T_c^2}{64P_c} \quad \text{ecuación 3.11}$$

$$b = \frac{RT_c}{8P_c} \quad \text{ecuación 3.12}$$

Una vez definida la presión crítica y la presión de vapor continuamos con el tema de Choked Flow, en el cual es crucial el entendimiento de los conceptos de presión de vapor y presión crítica para poder identificar este fenómeno; la  $\Delta P$  de Choked flow se calcula como sigue:

$$\Delta P_{choked} = F_L^2 [P_1 - (F_F)(P_V)] \quad \text{ecuación 3.13}$$

En donde:

\* $F_L$  = es el factor de recuperación

$F_F$  = Factor de recuperación para líquidos

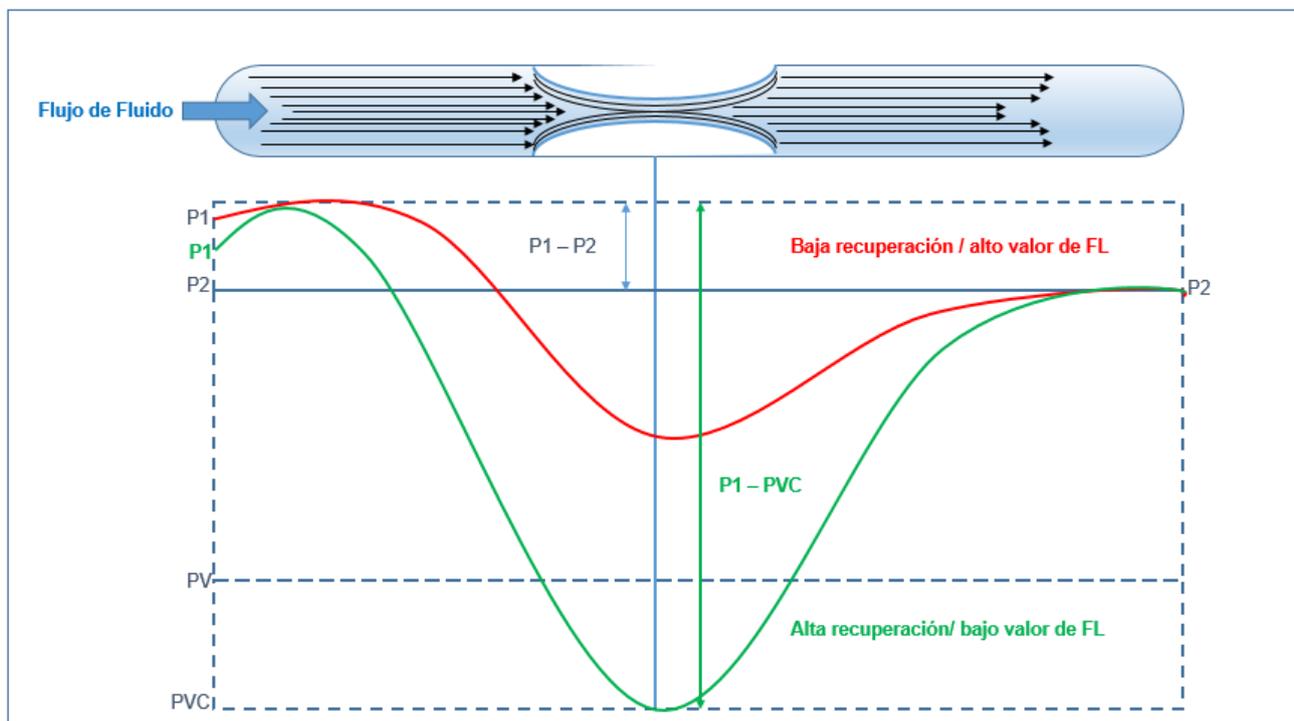
$P_V$  = Presión de vapor del fluido, en lb/in<sup>2</sup> (a)

$P_1$  = Presión de entrada al sistema

$\Delta P_{choked}$  = Caída de presión que permite el máximo valor de flujo en el sistema

\*El factor de recuperación es un factor que depende de la geometría y estilo de cada válvula.

Hasta ahora hemos explicado el comportamiento de  $C_v$  real, con el incremento de la caída de presión, manteniendo  $P_1$  constante, también explicamos cómo calcular  $\Delta P_{choked}$ , pero no hemos explicado en realidad que es Choked Flow y sus consecuencias en el control de flujo de fluidos. Para poder explicar este fenómeno es necesario ilustrar qué es lo que ocurre cuando la válvula de control restringe el paso del fluido, recordemos que una válvula de control es una restricción de flujo variable y se conoce como vena contracta el punto donde se presenta el máximo valor de caída de presión, y continuando con la ley de Bernoulli (la conservación de la energía), en la vena contracta se presenta la máxima velocidad, y es un postulado científico que se expone a continuación.



Gráfica 3 Flujo estrangulado en la vena contracta

Fuente: Elaborado por el autor

Durante el estrangulamiento del fluido; la presión de entrada P1 puede caer debajo de la presión de vaporización de líquido ocasionando que se forman burbujas en la vena contracta, burbujas que ocupan espacio y restringen el paso del fluido manteniendo constante el coeficiente de flujo Cv calculado. En otras palabras, si la caída de presión del sistema supera la  $\Delta P_{choked}$  el valor de Cv se mantiene constante.

Los diseños internos de las válvulas de globo son excelentes para altas caídas de presión ya que tienen altos valores de FL, caso contrario para las válvulas rotatorias que tienen bajos valores de FL, factor de recuperación. Una válvula rotatoria no es adecuada para estrangulamiento de fluido cercano a su presión de vapor, ya que se puede presentar daños en los internos por cavitación.

#### (x) Cálculo de Cv para un sistema de régimen laminar

Ecuaciones para calcular Cv en válvulas de control sistema de régimen laminar y transición tiende a ser derivadas por el mismo principio fundamental. Estas ecuaciones son más simples que las usadas en el estándar ISA 75.01.

El cálculo del número de Reynolds es como sigue:

$$R_e = \frac{Dup}{\mu} \quad \text{ecuación 3.4}$$

Esta ecuación demuestra que con altos valores de viscosidad y bajos valores de flujo volumétrico el número de Reynolds disminuye. Para entender cómo la viscosidad afecta a la capacidad de flujo de una válvula, supongamos una válvula de 1/2" de diámetro nominal con un Cv de 5 gpm, significa que permite un paso de flujo de 5 gpm de agua a una caída de presión de 1 psi a condiciones estándar. Condiciones estándar son a una temperatura de 60°F y 14.7 psia de presión.

Pero expliquemos el número de Reynolds utilizando como base el sistema métrico decimal, suponiendo un flujo volumétrico de 0.02 m<sup>3</sup>/min de agua a 25 °C en una tubería de 1/2" y una viscosidad dinámica de 1 cp. Además, simplificando términos sabemos que la velocidad se calcula como el flujo volumétrico sobre el área, tenemos:

$$R_e = \frac{Dup}{\mu} = \frac{DQp}{\mu A} \quad \text{ecuación 3.14}$$

En donde:

$$D=0.0127 \text{ m}$$

$$Q=0.02 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$p= 997.19 \text{ Kg/m}^3$$

$$A=0.0001266\text{m}^2$$

$$\mu=1\text{cp}=0.001 \text{ Kg/m}\cdot\text{seg}$$

$$R_e = \frac{(0.0127\text{m})(0.02\text{m}^3/\text{min}) \left(\frac{997.19\text{Kg}}{\text{m}^3}\right)}{\left(\frac{0.001\text{Kg}}{\text{m}\cdot\text{seg}}\right) \left(\frac{60\text{seg}}{\text{min}}\right) (0.0001266\text{m}^2)}$$

$$R_e = 33503.4736$$

Lo cual demuestra que nuestra válvula con un valor de Cv de 5 gpm, permite un paso de fluido de 0.02m<sup>3</sup>/min de agua con un número de Reynolds de 33503.4736, pero supongamos que deseamos utilizar la misma

válvula, pero con miel, a una temperatura de 25°C la viscosidad dinámica de la miel es aproximadamente de 10,000.00 cp y la densidad de 1440Kg/m<sup>3</sup>a a la misma temperatura.

$$R_e = \frac{(0.0127m)(0.02m^3/min) \left(\frac{1440Kg}{m^3}\right)}{\left(\frac{10Kg}{m.seg}\right) \left(\frac{60seg}{min}\right) (0.0001266m^2)}$$

$$R_e = 4.8151$$

Lo que significa que una válvula con un valor de Cv de 5gpm es insuficiente para el control de flujo de 0.02m<sup>3</sup>/min de miel a 25 °C se requiere aumentar el tamaño de la válvula, el radio de estos factores es definido como sigue:

$$F_R = \frac{C_V}{C_{VT}} \quad \text{ecuación 3.15}$$

En donde Cv es el coeficiente de flujo de la válvula de control, y Cv<sub>T</sub> es el coeficiente de flujo calculado en régimen turbulento (Referirse a este valor en las tablas de Cv catálogos de los fabricantes). F<sub>R</sub> es el factor del número de Reynolds.

Por lo tanto, el valor de Cv es definido por el múltiplo del factor del número de Reynolds y el Cv<sub>T</sub> en régimen turbulento:

$$C_V = C_{VT} * F_R \quad \text{ecuación 3.16}$$

Una ecuación para F<sub>R</sub> puede ser desarrollada en un sistema con dos válvulas en serie, como se muestra en la siguiente figura 14:

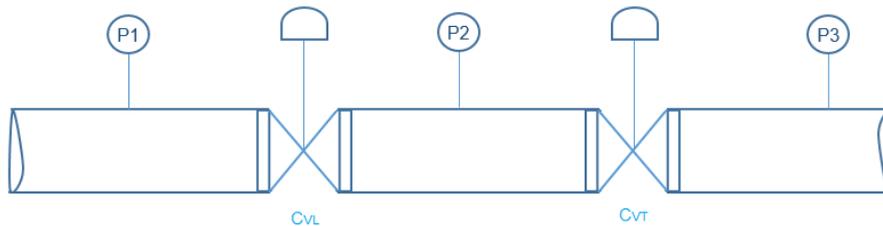


Figura 15 Sistema compuesto de dos válvulas en serie

Fuente: elaborada por el autor

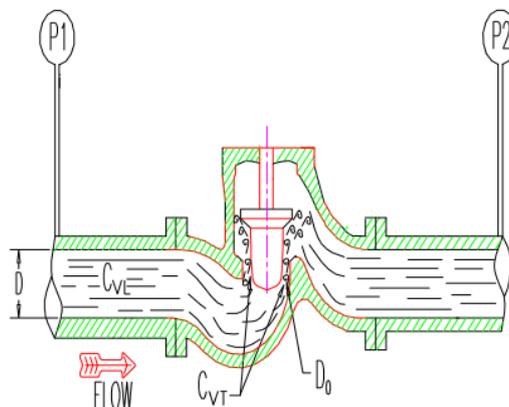


Figura 16 Comportamiento del flujo de fluido en los internos de la válvula

Fuente: Laminar Flow Valve Sizing Made Easy, Fluid Control Institute, pg 2

El régimen es laminar en la primera válvula de control y turbulento en la segunda válvula. El fluido se mueve lentamente dentro de la tubería y en el diámetro interno de la válvula, pero la posición del tapón casi cerrada la válvula ocasiona un paso tortuoso del fluido, como se observa en la figura 15.

La combinación del coeficiente de flujo en régimen laminar y turbulento para conseguir el Cv combinado, es como sigue:

$$C_v = Q \sqrt{\frac{Sg}{P_1 - P_3}} \quad \text{ecuación 3.17}$$

El coeficiente de flujo en el régimen laminar en términos de la presión de entrada al sistema  $P_1$  y salida  $P_2$  es como sigue:

$$C_{vL} = Q \sqrt{\frac{Sg}{P_1 - P_2}}$$

$$C_{vL} = \frac{Q\sqrt{Sg}}{\sqrt{P_1 - P_2}}$$

$$\sqrt{P_1 - P_2} = \frac{Q\sqrt{Sg}}{C_{vL}}$$

$$P_1 - P_2 = \left(\frac{Q\sqrt{Sg}}{C_{vL}}\right)^2$$

$$P_1 - P_2 = \frac{(Q\sqrt{Sg})^2}{C_{vL}^2} \quad \text{ecuación 3.18}$$

Ahora bien, el coeficiente de flujo en el régimen turbulento en términos de  $P_2$  es como sigue:

$$C_{vT} = Q \sqrt{\frac{Sg}{P_2 - P_3}}$$

$$C_{vT} = \frac{Q\sqrt{Sg}}{\sqrt{P_2 - P_3}}$$

$$\sqrt{P_2 - P_3} = \frac{Q\sqrt{Sg}}{C_{vT}}$$

$$P_2 - P_3 = \left(\frac{Q\sqrt{Sg}}{C_{vT}}\right)^2$$

$$P_2 = \frac{(Q\sqrt{Sg})^2}{C_{vT}^2} + P_3 \quad \text{ecuación 3.19}$$

Sustituyendo  $P_2$  de la ecuación 3.19 del coeficiente de flujo en régimen turbulento en combinación con el régimen laminar, ecuación 3.18, es como sigue:

$$P_1 - \left( \frac{(Q\sqrt{Sg})^2}{C_{VT}^2} + P_3 \right) = \frac{(Q\sqrt{Sg})^2}{C_{VL}^2}$$

$$P_1 - \frac{(Q\sqrt{Sg})^2}{C_{VT}^2} - P_3 = \frac{(Q\sqrt{Sg})^2}{C_{VL}^2}$$

$$P_1 - P_3 = \frac{(Q\sqrt{Sg})^2}{C_{VL}^2} + \frac{(Q\sqrt{Sg})^2}{C_{VT}^2}$$

$$P_1 - P_3 = \frac{(Q\sqrt{Sg})^2 C_{VT}^2 + (Q\sqrt{Sg})^2 C_{VL}^2}{C_{VL}^2 * C_{VT}^2}$$

$$P_1 - P_3 = \frac{(Q\sqrt{Sg})^2 * (C_{VL}^2 + C_{VT}^2)}{C_{VL}^2 * C_{VT}^2}$$

$$\sqrt{P_1 - P_3} = Q\sqrt{Sg} * \sqrt{\frac{C_{VL}^2 + C_{VT}^2}{C_{VL}^2 * C_{VT}^2}} \quad \text{ecuación 3.20}$$

Sustituyendo la ecuación 3.20 en la ecuación 3.17 tenemos:

$$C_V = \frac{Q\sqrt{Sg}}{\sqrt{P_1 - P_3}}$$

$$C_V = \frac{Q\sqrt{Sg}}{Q\sqrt{Sg} * \sqrt{\frac{C_{VL}^2 + C_{VT}^2}{C_{VL}^2 * C_{VT}^2}}}$$

Simplificando términos el cálculo de coeficiente de flujo para un sistema de dos válvulas en serie en régimen combinado, es como sigue:

$$C_V = \sqrt{\frac{C_{VL}^2 * C_{VT}^2}{C_{VL}^2 + C_{VT}^2}} \quad \text{ecuacion 3.21}$$

Para valores de coeficiente de flujo en régimen turbulento, el máximo Cv de la válvula es:

$$C_{VT} = \frac{29.9D_0^2}{\sqrt{K_T}} \quad \text{ecuación 3.22}$$

Esta es la fórmula de la equivalencia del coeficiente de Resistencia  $K_T$  y el coeficiente de flujo tomada del Crane Handbook, se define las pérdidas de fricción como,  $K_L=f(L/D_0)$  en relación a las fórmulas de Darcy en donde si el fluido es en régimen laminar  $f=64/ReL$

La relación  $L/D_0$ ; se define como la longitud equivalente

Crane Co. Ha realizado pruebas exhaustivas en sus laboratorios de ingeniería y recabar información sobre la resistencia al fluido en válvulas y accesorios, esta fórmula es resultado del análisis de datos de las pruebas de la resistencia de fluidos en régimen turbulento a través de válvulas de control.

Antes de continuar con la derivación del factor  $F_R$  del número de Reynolds, es necesario explicar la relación de  $D_0$  y  $D$ .

$D_0$ ; es generalmente el diámetro interno del orificio de la válvula, que típicamente es del mismo diámetro de la tubería (consultar figura 15), en este caso la relación  $C_{VT}/(D_0)^2$  es igual a 29.9 si y solo si  $K_T$  es igual a 1. Para válvulas de control el tapón se separa de asiento permitiendo pasar de flujo a través de la válvula, exactamente a través de un área anular entre el diámetro del asiento y el tapón, como se muestra en la siguiente figura 16:

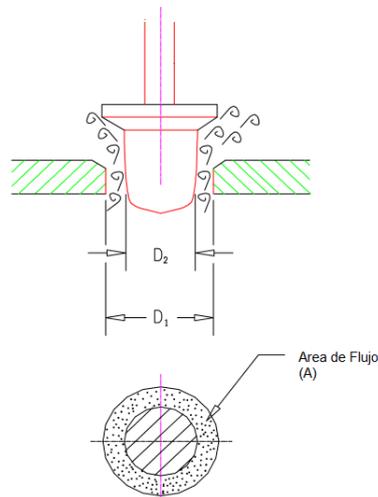


Fig. 147 Área anular entre el diámetro del asiento y el tapón

**Fuente:** Laminar Flow Valve Sizing Made Easy, Fluid Control Institute, pg 3

Si el diámetro del asiento es  $D_1$  y el diámetro del plug es  $D_2$  entonces el cálculo del área anular es como sigue:

$$A = \frac{\pi(D_1^2 - D_2^2)}{4} \quad \text{ecuación 3.23}$$

Por lo tanto, el diámetro del orificio para esta aplicación es

$$D_0 = \sqrt{D_1^2 - D_2^2} \quad \text{ecuación 3.24}$$

La ecuación del coeficiente de flujo considerando la resistencia de flujo en régimen laminar es, sin embargo, en el régimen laminar el diámetro hidráulico deberá sustituirse por el diámetro como sigue:

$$D_H = F_D * D_0 \quad \text{ecuación 3.25}$$

En donde  $F_D$  es el modificador del estilo de la válvula, en nuestro caso y para fines de ejemplo estamos hablando de tuberías circulares en el paso del fluido, así que  $F_D=1$ , por lo tanto,  $D_H=D_0$ .

$$C_{VL} = \frac{29.9D_P^2}{\sqrt{K_L}} \quad \text{ecuación 3.26}$$

En donde  $D_P$  es el diámetro interno de la tubería.

Sustituyendo ecuación 3.21 en 3.15 y para obtener el factor del número de Reynolds.

$$F_R = \frac{C_V}{C_{VT}}$$

$$F_R = \frac{\sqrt{\frac{C_{VL}^2 * C_{VT}^2}{C_{VL}^2 + C_{VT}^2}}}{C_{VT}}$$

$$F_R = \frac{C_{VT}}{C_{VT}} * \sqrt{\frac{C_{VL}^2}{C_{VL}^2 + C_{VT}^2}}$$

$$F_R = \sqrt{\frac{C_{VL}^2}{C_{VL}^2 + C_{VT}^2}}$$

$$F_R = \frac{1}{\sqrt{\frac{C_{VL}^2 + C_{VT}^2}{C_{VL}^2}}}$$

$$F_R = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{C_{VT}^2}{C_{VL}^2}}}$$

Sustituyendo ecuaciones 3.22 y 3.26

$$F_R = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{29.9D_P^2}{\sqrt{K_L}}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{29.9^2 D_P^4}{K_L}}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{K_T D_P^4}{K_L D_0^4}}}$$

Podemos expresar la ecuación  $F_R$  como sigue:

$$F_R = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{K_T D_P^4}{\frac{64L}{Re_L D_P} D_0^4}}} \quad \text{ecuaciòn 3.27}$$

Esta ecuación demuestra que el factor del número de Reynolds está en función del número de Reynolds para régimen laminar el cual está en función de la viscosidad, flujo, densidad y viscosidad además de la relación de diámetro anular para régimen turbulento y diámetro interior de la tubería para régimen laminar. La longitud L se expresa como la longitud entre bridas de la válvula.

Pero en la literatura del dimensionamiento de válvulas de control, es más común encontrar el factor del número de Reynolds como sigue, expresando todos los términos antes mencionados:

$$F_R = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{v * L * C_{VT}^2}{44142 * Q * D_0^4}}} \quad \text{ecuaciòn 3.28}$$

(xi) Cálculo del coeficiente de flujo para fluidos compresibles

La resolución de problemas dentro del transporte de fluidos compresibles se lleva a cabo bajo los mismos principios que fluidos incompresibles, pero el balance de materia no es el mismo ya que interviene una variable muy importante que es la densidad del fluido. Los fluidos compresibles ya sean vapores o gases toman el volumen del recipiente que los contiene y la densidad no será la misma en el punto 1 que en el punto 2 o mejor dicho corriente arriba y corriente abajo de la válvula de control, en este caso la tubería, por ello el balance de materia es como sigue:

$$A_1 v_1 \rho_1 = A_2 v_2 \rho_2 \quad \text{ecuación 3.29}$$

La ecuación básica que representa el comportamiento del flujo de fluido en relación con el coeficiente de Cv es como sigue y el comportamiento ideal es lineal:

$$Q = C_v P_1 \sqrt{X} \quad \text{ecuación 3.30}$$

En donde:

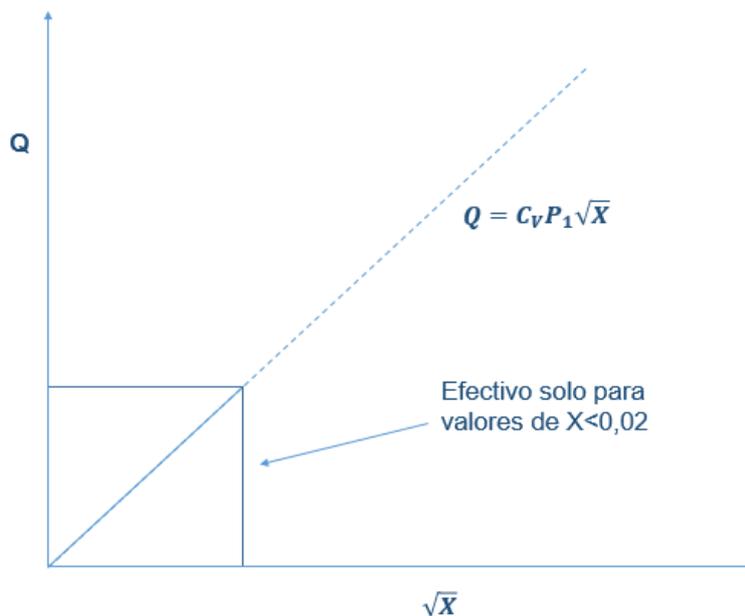
Q= es el flujo volumétrico del Gas, medido ya sea en condiciones estándar, normales o actuales de presión y temperatura, SCFH, NCFH o ACFH

Cv=Coeficiente de flujo del gas, es adimensional

P<sub>1</sub>=La presión de entrada, en lb/in<sup>2</sup> (g)

X= la relación de la caída de presión y la presión de entrada, y es como sigue; es adimensional

$$X = \frac{\Delta P}{P_1} \quad \text{ecuación 3.31}$$



Gráfica 4 Comportamiento de Cv para fluidos compresibles

Fuente: elaborada por el autor

Recordemos que una válvula de control es una restricción de flujo variable, cuando un fluido compresible pasa a través de una restricción la velocidad del fluido incrementa y la presión disminuye, la reducción de la presión ocasiona que las moléculas del fluido se expandan ocupando espacio, el fenómeno de expansión en el control de fluidos compresibles es considerable para valores de  $\Delta P/P_1$  arriba de 0.02, para valores de X mayores a 0.02 el comportamiento de flujo volumétrico no es un comportamiento lineal.

Para aproximarnos al comportamiento de flujo volumétrico en condiciones reales de control de fluidos es necesario mencionar el factor de expansión Y el cual determina la reducción en flujo medido que ocurre al incrementar el valor de X y se determina como sigue:

$$Y = 1 - \frac{0.41 + 0.33A^2}{\gamma} (X) \quad \text{ecuación 3.32}$$

Esta ecuación es uno más de los cientos de análisis de resultados experimentales del comportamiento de gases dirigidos por el Comité de Medición del Departamento de Gas Natural de la Asociación Americana de Gas, estos experimentos fueron llevados a cabo en 23 orificios de 1-8 inch de grosor en tuberías de diámetro nominal de 4, 8 y 16 pulgadas y material de acero al carbón comercial con gas natural, vapor y nitrógeno como flujo de fluido.

En donde:

Y= Factor de expansión, sin dimensiones.

$A^2$ =el radio del área, en in<sup>2</sup>

$\gamma$ =Relación de capacidades caloríficas específicas del gas, sin dimensiones

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} \quad \text{ecuación 3.33}$$

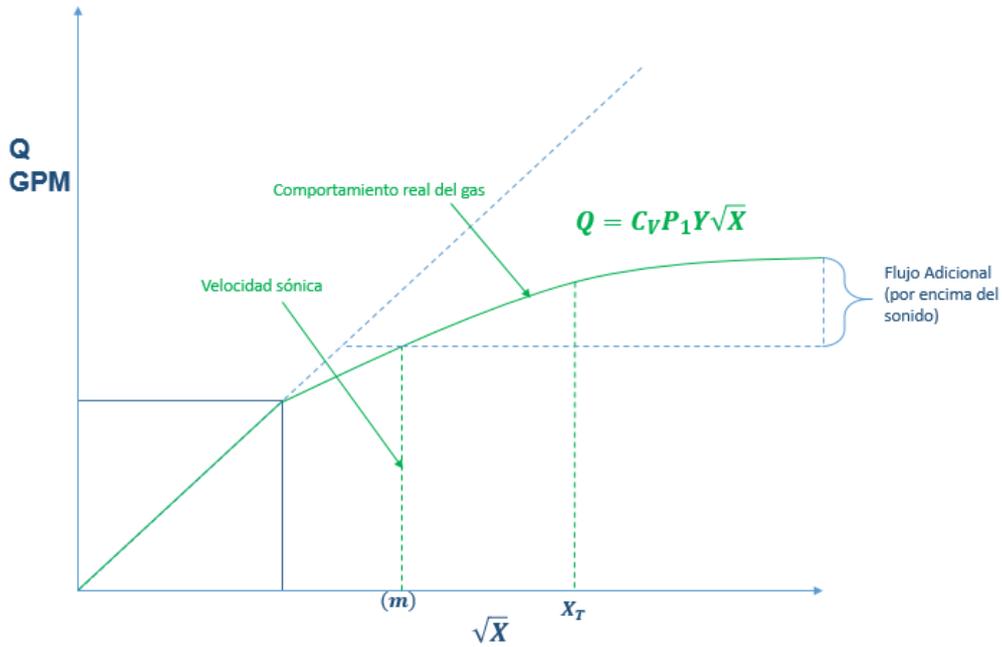
$c_p$ = calor específico a presión a constante

$c_v$ = calor específico a volumen constante

favor de referirse a la tabla A-7a Propiedades Físicas de algunos gases del Crane Handbook, para los valores de calor específico a presión y volumen constante de diferentes gases.

Agregando el factor de expansión a nuestra fórmula básica de flujo para fluidos compresibles, ecuación 3.30, queda como sigue:

$$Q = C_v P_1 Y \sqrt{X} \quad \text{ecuación 3.34}$$



Gráfica 5 Comportamiento real del Cv para fluidos compresibles

Fuente: elaborada por el autor

Algunos valores de  $X$ , punto  $(m)$ , el gas alcanza la velocidad sónica y se presenta el fenómeno de Choked flow en gases, lo que significa que las moléculas de gas no pueden moverse más rápido en este caso incrementos de  $\Delta P$  por reducción de  $P_2$  no incrementan el flujo volumétrico.

En otras palabras, una válvula de control no puede ser dimensionada cuando el valor de caída de presión supera el valor de máxima  $\Delta P$  de Choked Flow, debido al acercamiento a la velocidad sónica, observar gráfica 5.

El valor de  $X_T$  limita el valor de  $X^{1/2}$  y es un factor publicado por los fabricantes de válvula de control, si se dimensiona una válvula de control para gases es necesario revisar los valores de  $X_T$  publicados por el fabricante.

## CAPITULO 4 NORMAS Y ESTÁNDARES DE VÁLVULAS

Numerosas normas son aplicables a válvulas. La importancia de normas nacionales e internacionales están creciendo y abarcando numerosas empresas que practican la producción globalizada de válvulas. Las normas establecen un criterio objetivo que aplica a un producto, un proceso, una persona o un servicio. Se utiliza para definir la seguridad, durabilidad, habilidad, fiabilidad, mantenimiento e intercambiabilidad. A continuación, se presentan las principales normas aplicables a válvulas y su importancia en el diseño, pruebas y aplicación de estos equipos.

No necesariamente las normas que a continuación se mencionan aplican exclusivamente a válvulas de control, en este capítulo se mencionan algunas normas aplicables a otro tipo de válvulas, con la finalidad de especificar la gran variedad de normas internacionales aplicables en la industria de válvulas ya sean o no de control de proceso, las normas que se emplean en válvulas de control están identificadas por un (\*).

### (i) Instituto de Petróleo Americano, API por sus siglas en inglés:

Es el único instituto Nacional Americano que representa todos los aspectos de la industria del petróleo y gas natural de origen americano

API -A	Especificación para roscas de válvulas de control, accesorios y bridas.
API 6-C	Válvulas bridadas de acero, de compuerta y macho para servicios de perforación y producción.
API 6-D*	Especificación para válvulas en líneas de tuberías.
API-526	Válvulas de seguridad y relevo con bridas de acero
API-597	Válvulas de compuerta de acero tipo Venturi
API-598*	Inspección y pruebas de válvulas.
API-599	válvulas tipo macho de acero.
API-600	Válvulas de acero de compuerta bridadas y soldables para servicio en refinería.
API-602	Diseño compacto para válvulas de acero de compuerta para uso en refinerías.
API-603	Válvulas de compuerta resistentes a la corrosión para uso en refinerías.
API-604	Válvulas de hierro, de compuerta y macho ara servicios en refinerías.
API-607	Prueba de fuego para válvulas rotatorias de un cuarto de vuelta
API-609	Conexiones finales aplicables en válvulas tipo mariposa, orejada y wafer.
MWWA-C-500	Válvulas de compuerta en instalaciones de abastecimiento de agua para servicio ordinario.

## (ii) Sociedad de estandarización de manufactura, MSS

Sociedad de estandarización de manufactura, MSS por sus siglas en inglés, de la industria de válvulas de control y tuberías. Fundada oficialmente desde 1924, es una organización técnica sin fines de lucro para el desarrollo e implementación en la industria de códigos internacionales para válvulas, actuadores, válvulas modificadas, tuberías, conexiones finales, y asociaciones de ventas.

MSS-SP-6	Acabados en caras de bridas para conexiones y válvulas.
MSS-SP-25	Sistema de marcado para válvulas, conexiones, bridas y uniones.
MSS-SP-37	Válvulas de bronce de 125 lbs
MSS-SP-42	Válvulas bridadas resistentes a la corrosión de a 150 lbs.
MSS-SP-44	Se refiere a las bridas de las válvulas y a distancia entre birlos.
MSS-SP-52	Válvulas de hierro fundido.
MSS-SP-55	Calidad para fundiciones de acero, método visual.
MSS-SP-61*	Pruebas hidrostáticas para válvulas de acero
MSS-SP-66	Rangos de presión y temperatura para válvulas de acero soldables.
MSS-SP-67	Válvulas de mariposa.
MSS-SP-70	Válvulas de compuerta de hierro fundido en extremos bridados y roscados.
MSS-SP-71	Válvulas de retención de columpio, de hierro fundido con extremos bridados y roscados.
MSS-SP-72	Válvulas de bola para usos generales.
MSS-SP-78	Válvulas de macho de hierro fundido.

## (iii) Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos, ASME

Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos, ASME por sus siglas en inglés. Promotores del arte, ciencia y práctica de ingeniería multidisciplinario y ciencias aliadas al rededor del mundo. Es una organización sin fines de lucro de miembros que permiten la colaboración y el intercambio de conocimientos, el enriquecimiento de la carrera y el desarrollo de las habilidades en todas las disciplinas de la ingeniería, hacia el objetivo de coadyuvar en el progreso de la ingeniería en el desarrollo de soluciones para servicios en el beneficio del hombre.

ASME-A21.10	Accesorios de hierro fundido, 2 a 48 pulgadas para agua u otros líquidos.
ASME-A21.14	Accesorios de hierro dúctil para gas de 3 a 24 pulgas.
ASME-B16.1*	Bridas y conexiones bridadas de hierro fundido. Clase 25, 125, 250 y 800 libras.
ASME-B16.3*	Conexiones roscadas de hierro maleable de clase 150 y 300 libras.
ASME-B16.4*	Conexiones roscadas de hierro fundido de clase 125 y 250 libras.
ASME-B16.5*	Bridas y conexiones bridadas de acero.
ASME-B16.9	Conexiones de acero forjado para soldar a tope.

- ASME-B16.10\* Dimensiones cara a cara para conexiones finales de válvulas.
- ASME-B16.11 Conexiones forjados de acero, de embutir, soldar y roscar.
- ASME-B16.12 Conexiones de fierro fundido para drenajes.
- ASME-B16.15 Conexiones roscadas de bronce de clase 125 y 250 libras.
- ASME-B16.17 Conexiones roscadas de bronce de 250 libras.
- ASME-B16.18 Conexiones soldables de bronce fundido.
- ASME-B16.19 Conexiones roscadas de fierro maleable de 300 libras.
- ASME-B16.22 Conexione soldables forjadas de cobre y bronce.
- ASME-B16.23 Conexiones de bronce fundido para drenajes
- ASME-B16.24\* Bridas y conexiones bridadas de bronce de clase 150 y 300 libras.
- ASME-B16.25\* Extremos para soldar a tope para tubo, válvulas, bridas de cuello para soldar y accesorios para tubo.
- ASME-B16.26 Accesorios de bronce fundidos para tubos acampanados de cobre.
- ASME-B16.28 Codos radio corto y retornos de acero forjado, con extremos para soldar
- ASME-B16.34\* Bridas-válvulas, roscado y conexiones finales soldadas
- ASME-B16.42 hierro dúctil bridas de tuberías
- ASME-B16.47 Diámetros largos de bridas de acero 26 pulgadas de diámetro nominal hasta 60.
- ASME-B70.1 Accesorios tipo campana para refrigeración.
- ASTM-A-105\* Conexiones de acero al carbón forjados, para altas temperaturas.
- ASTM-A-126\* Hierro fundido gris ara válvulas, bridas y conexiones de tubería.
- ASTM-A-181\* Conexiones de acero al carbón forjado, para uso general.
- ASTM-A-182\* Conexiones formados de acero de aleación para servicios de altas temperaturas.
- ASTM-A-216\* Conexiones de acero al carbón fundido, adecuados para soldarse para servicios de altas temperaturas.
- ASTM-A-217\* Conexiones fundidas de acero de aleación para altas presiones y temperatura.
- ASTM-A-234\* Conexiones de acero al carbón forjado y acero de aleación férrica con extremos para soldarse.
- ASTM-A-350\* Conexiones de acero al carbón forjado y bridas de aleación para baja temperatura
- ASTM-A-403\* Conexiones soldables de acero austenítico.
- ASTM-A-445\* Hierro fundido para servicios de alta temperatura.
- ASTM-A-487\* Pieza de fundición de acero de baja aleación adecuadas para servicio a presión.

#### (iv) Comité Europeo para Estandarización, CEN

Comité Europeo para Estandarización, CEN por sus siglas en inglés. Es una asociación que brinda a través de cuerpos de naciones de estandarización de 33 países europeos, que es reconocida por la unión europea y la asociación del tratado de libre comercio europeo (EFTA) como comienzo responsable del desarrollo y definición voluntaria de estándares a nivel europeo, proporciona una plataforma del desarrollo de estándares europeos y otros documentos técnicos en relación con varias clases de productos, materiales, servicios y procesos.

Soporte de estandarización de actividades en relación con una amplia gama de rangos y sectores incluidos, aire, espacio, química, construcción, productos de consumo, defensa y seguridad, energía, ambientalmente seguros, comida y bebidas, cuidado de la salud, mecánica, materiales, equipos presurizados, servicios, transporte, tecnología y empaquetamiento.

#### EN-19 Mercadotecnia

EN-558-1 Dimensiones cara a cara y centro de la cara para válvulas en acero usadas sistema de tuberías. Parte 1, PN designación de válvulas.

EN-558-2 Dimensiones cara a cara y centro de la cara para válvulas en acero usadas sistema de tuberías. Parte 2, Clase y diseño de válvulas.

EN-593 Válvulas de mariposa.

EN-736-1 Terminología-Parte 1 Definición de tipos de válvulas.

EN-736-2 Terminología-Parte 2 Definición de componentes de válvulas.

EN-736-3 Terminología-Parte 3 Definición de términos (en preparación).

EN-1349 Válvulas de control de proceso en la industria (en preparación)

EN-12266-1 Pruebas para válvulas. Parte 1: procedimiento de pruebas y criterio de aceptación (en preparación).

EN-12266-2 Pruebas de diseño de carcasa. Parte 2: método de cálculo para válvulas de acero (en preparación).

EN-12266-3 Pruebas de diseño de carcasa. Parte 2: método experimental (en preparación).

EN-12627 Diseño de conexiones finales soldadas (en preparación).

EN-12760 Diseño de conexiones finales soldadas a tope (en preparación).

EN-12982 Dimensiones de conexiones finales tipo soldada (en preparación).

EN-10213-1 Desarrollo de condiciones técnicas de fundición de acero para propósitos de presión. Parte 1: General.

EN-10213-2 Desarrollo de condiciones técnicas de fundición de acero para propósitos de presión. Parte 2: Grados de acero para usar en altas temperaturas.

EN-10213-3 Desarrollo de condiciones técnicas de fundición de acero para propósitos de presión. Parte 3: Grados de acero para usar en bajas temperaturas.

EN-10213-4 Desarrollo de condiciones técnicas de fundición de acero para propósitos de presión. Parte 4: Grados de acero para acero austenítico y austenítico-ferrítico.

EN-10222-2 Desarrollo de condiciones técnicas de forja de acero para propósitos de presión. Parte 2: Férrico y acero martestico para usar en elevadas temperaturas.

EN-10222-3 Desarrollo de condiciones técnicas de forja de acero para propósitos de presión. Parte 3: acero níquel para bajas temperaturas.

EN-10222-4 Desarrollo de condiciones técnicas de forja de acero para propósitos de presión. Parte 4: acero de grano fino.

EN-10222-5 Desarrollo de condiciones técnicas de forja de acero para propósitos de presión. Parte 5: acero austentico y austentico-ferrico acero inoxidable.

#### (v) Estándar de Brida Europeo

EN-1092-1; Parte 1: Designación PN bridas de acero

EN-1092-2; Parte 2: Designación PN bridas de hierro

EN-1759-1; Parte 1: Diseño de clases de brida en acero (en preparación).

#### (vi) Instituto de Control de Fluidos, FCI

Instituto de Control de Fluidos, FCI por sus siglas en ingles. Es una asociación sin fines de lucro de manufactura de control de fluido y condiciones de equipo. FCI ha sido distinguido por sus avances técnicos en la industria de procesos químicos. Una de sus primeras contribuciones es el desarrollo de estándares que promueven mejores productos de alta calidad y utilidad. Además, FCI ha desarrollado algunos estándares y publicaciones educativas que se usan en el diseño de equipos de control de flujo.

70-2-1991, Fuga en el asiento para válvulas de control

#### (vii) Sociedad Americana de instrumentación, ISA

Sociedad Americana de instrumentación, ISA por sus siglas en Ingles: es una sociedad americana organizada por ingenieros, educadores, y otros quienes trabajan en los archivos de instrumentación, medición, y control de la industria de Procesos. ISA estableció un comité para el desarrollo y publicaciones de ecuaciones de dimensionamiento de válvulas de control para la industria de procesos químicos

S51.1 Terminología de procesos de instrumentación.

S75.02\* Procedimiento de pruebas de capacidad de válvulas de control.

S75.03 Dimensiones cara a cara de bridas en cuerpos de válvulas de control tipo globo, clases 125, 150, 250, 300 y 600.

S75.04 Dimensiones cara a cara de bridas en válvulas de control, clase 150, 300 y 600.

S75.05 Terminología

S75.07 Laboratorio de medición de ruido aerodinámico generado en válvulas de control.

S75.08 Instalación cara a cara de válvulas de control para bridas tipo Clamp o válvulas pich.

S75.11 Característica de flujo inherente y rangeabilidad de válvulas de control.

S75.12 Dimensiones cara a cara para conexiones finales soldables a tope en válvulas de control tipo globo, clases 150, 300, 600, 900, 1500 y 2500.

S75.13 Método de evaluación de performance de posicionadores con señal de entrada análoga.

S75.14 Dimensiones cara a cara para conexiones finales soldables en válvulas de control tipo globo, clase 4500.

S75.15 Dimensiones cara a cara para conexiones finales soldables en válvulas de control tipo globo, clase 150, 300, 600, 900, 1500 y 2500.

S75.16 Dimensiones cara a cara para bridas en cuerpos de válvulas estilo globo, clase 900, 1500 y 2500.

S75.17 Predicción de ruido aerodinámico en válvulas de control.

S75.19 Pruebas hidrostáticas para válvulas de control.

S75.20 Dimensiones cara a cara para bridas separables en válvulas de control estilo globo, clase 150, 300 y 600.

S75.22 Dimensionamiento de centralización de caras de bridas para cuerpos de válvulas de control estilo Angulo, clases 150, 300 y 600.

RP75.23 Consideraciones para la evaluación de cavitación en válvulas de control

#### (viii) Comisión internacional de electrotécnica, IEC

Comisión internacional de electrotécnica, IEC por sus siglas en inglés: es una organización líder mundial para la preparación y publicación de estándares internacionales para todo lo eléctrico, electrónica y tecnologías relacionadas. Proporciona una plataforma para compañías, industria y gubernamental para reuniones, discusiones y desarrollo de los estándares internacionales que ellos requieren.

Los estándares de IEC para válvulas de control han sido desarrollados en base a las publicaciones realizadas por ISA, sobre el dimensionamiento y capacidad de flujo en válvulas de control aplicadas a procesos de producción y dimensionamiento de válvulas.

60534-1 Parte 1: Terminología y consideraciones generales de válvulas de control.

60534-2-1 Parte 2; sección 1-Capacidad de flujo: Ecuaciones de dimensionamiento para fluidos incompresibles sobre condiciones instaladas, basado en publicaciones de ISA S75.01.

60534-2-3 Parte 2; sección 3-capacidad de flujo: Pruebas de procedimiento, basado en publicaciones de ISA S75.02

60534-2-4 Parte 2; sección 4-Capacidad de Flujo: Característica y rangeabilidad de flujo inherente, basado en publicaciones de ISA S75.11

60534-4 Parte 4: Inspección y pruebas de rutina.

60534-5 Parte 5: Mercadotecnia.

60534-6-1 Parte 6: Detalles de montaje para el acoplamiento de posicionadores en ensambles de válvulas de control. Sección uno: Montaje de posicionadores en actuadores lineales.

60534-6-2 Parte 6: Detalles de montaje para el acoplamiento de posicionadores en ensambles de válvulas de control. Sección dos: Montaje de posicionadores en actuadores rotatorios.

- 60534-7 Parte 7: hoja de datos de válvulas de control.
- 60534-8-1 Parte 8: Sección uno-Consideración de ruido: Laboratorio de medición de ruido aerodinámico en válvulas de control debido al estrangulamiento de flujo de fluido, basada en las publicaciones de ISA S75.07
- 60534-8-2 Parte 8: Sección 2-Consideración de ruido: Laboratorio de medición de ruido hidrodinámico en válvulas de control debido al estrangulamiento de flujo de fluido.
- 60534-8-3 Parte 8: Sección tres-Consideración de ruido: Método de predicción de ruido aerodinámico en válvulas de control debido al estrangulamiento de flujo de fluido, basada en las publicaciones de ISA S75.17
- 60534-8-4 Parte 8: Sección cuatro-Consideración de ruido: Método de predicción de ruido hidrodinámico en válvulas de control debido al estrangulamiento de flujo de fluido.

(ix) [Asociación Nacional de ingeniería en corrosión, NACE](#)

Asociación Nacional de ingeniería en corrosión, NACE por sus siglas en inglés. Es una organización mundial que ha estudiado varios aspectos de la corrosión y los daños ocasionados en refinerías, plantas químicas, sistemas de agua y otros tipos de industrias, esta organización ofrece entrenamientos técnicos y programas de certificado, publicaciones, actividades gubernamentalmente relacionadas, entre otras. En la industria de válvulas de control se manufactura el material en contacto con el fluido de acuerdo a las especificaciones de NACE quien ha publicado materiales resistentes a la corrosión en distintos tipos de industria.

NACE MR0175/ISO 15156 Industria del Petróleo y gas natural, materiales para usar en presencia de H<sub>2</sub>S ácido sulfhídrico en petróleo y producción de gas natural.

NACE MR0175-2002 Corrosión de sulfuro materiales resistentes a craqueo para equipo en la industria del petróleo.

NACE MR0103 Corrosión de sulfuro materiales resistentes a craqueo para equipo en la industria del Refinación del petróleo.

## CAPITULO 5.- SERVICIO A CONDICIONES SEVERAS

### (i) Cavitación y Flashing en Válvulas de control

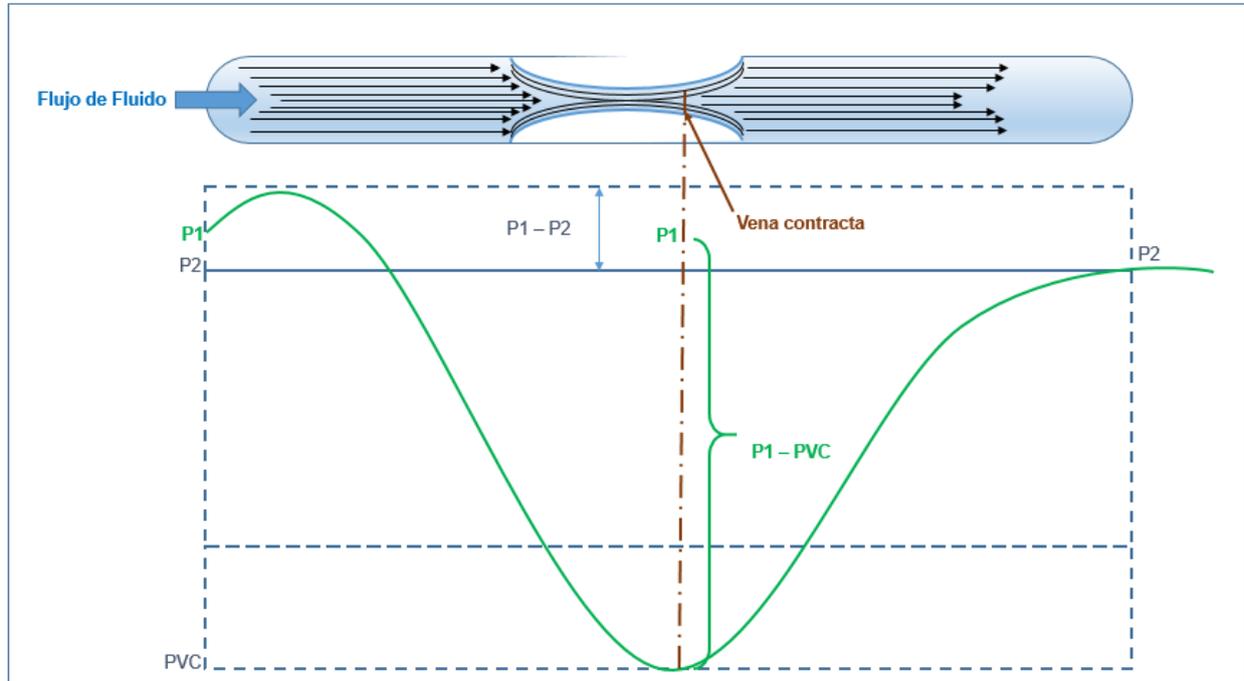
Cavitación y flashing son fenómenos hidrodinámicos que ocurren en el transporte de fluidos líquidos y están relacionados con servicio severo en el control de líquidos, debido a la gravedad, ocasionan decrecimiento en la capacidad de flujo, ruido, vibración, daños en los materiales por erosión y potenciales costos de mantenimiento y paros innecesarios. En el transcurso de las décadas, el diseño de las válvulas de control se ha enfocado en prevenir y disminuir los daños ocasionados por estos fenómenos, utilizando internos especializados o materiales endurecidos para alargar la vida de los equipos, para prevenir estos fenómenos es importante conocer los principios que ocasionan cavitación o Flashing.

Cavitación y Flashing son fenómenos que se presentan únicamente en líquidos, los gases y vapores no pueden cavitarse o presentar flashing. Estos fenómenos están relacionados entre sí, pero de ninguna manera son similares.

### (ii) Cavitación

Es útil identificar el fenómeno de cavitación a partir de dos etapas asociadas con fluidos líquidos. La primera etapa involucra la formación de vapor o burbujas del mismo líquido en el transporte de fluido líquido, es decir que coexiste burbujas de vapor del mismo compuesto líquido debido a la caída de presión estática del sistema debajo de la presión de vapor del compuesto a la temperatura del sistema. La segunda etapa del proceso de cavitación es el colapso de las burbujas de vapor o implosión de las burbujas cuando se recuperan a su estado líquido original (cuando en el sistema la caída de presión está por arriba de la presión del vapor del compuesto), la evaluación del correcto dimensionamiento de válvulas de control cuando se presenta el fenómeno de cavitación es ISA-RP75.23-1995 "Considerations for evaluating control Valve Cavitation" y es una referencia para quienes dimensionan válvulas de control.

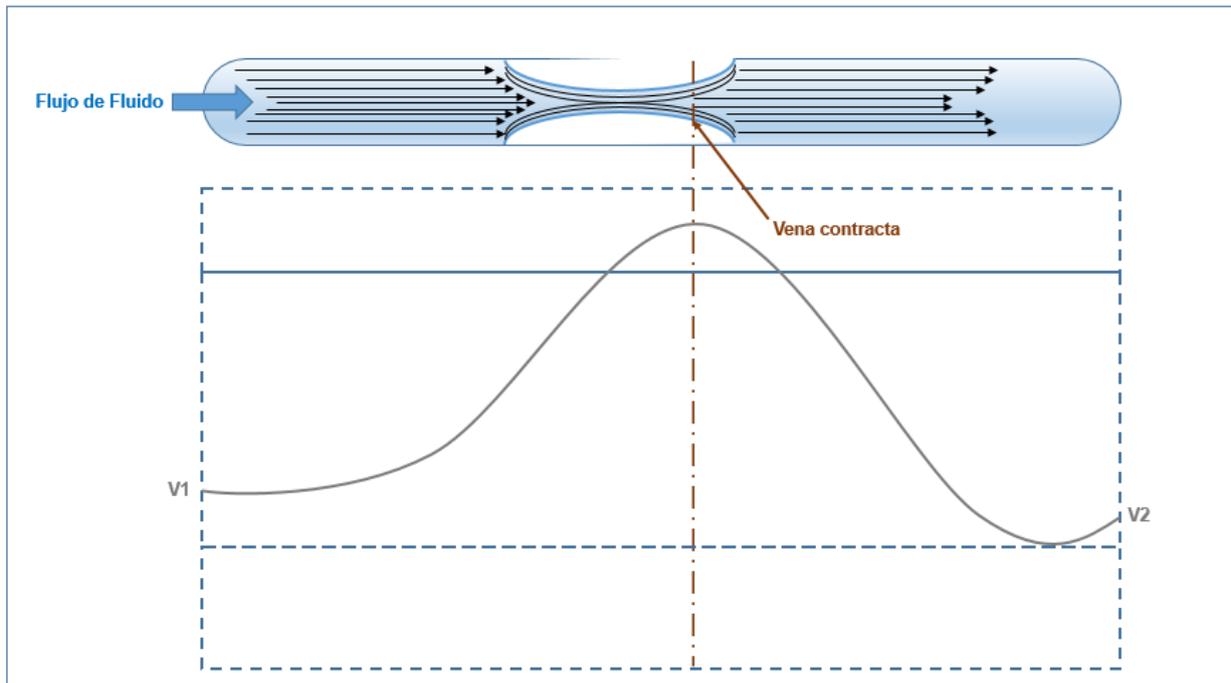
Para entender las condiciones que dentro de una válvula de control causan cavitación o flashing, tenemos que considerar la simple condición de una restricción en el transporte fluidos líquidos, este punto es llamado vena contracta y es definido como la mínima área de la corriente de flujo. Es tan pequeña el área que ocasiona estrangulamiento de flujo, debido a que la línea de corriente continua tiende a converger a una distancia corta, más allá de la restricción, como se muestra en la siguiente gráfica:



Gráfica 6 Perfil de la caída de presión en la vena contracta

Fuente: elaborado por el autor

En el punto de la vena contracta se presenta la máxima caída de presión estática como se muestra en la gráfica 6, en este punto también se presenta la máxima velocidad del fluido como se muestra en la siguiente gráfica 7.



Gráfica 7 Perfil de velocidad en la vena contracta

Fuente: elaborado por el autor

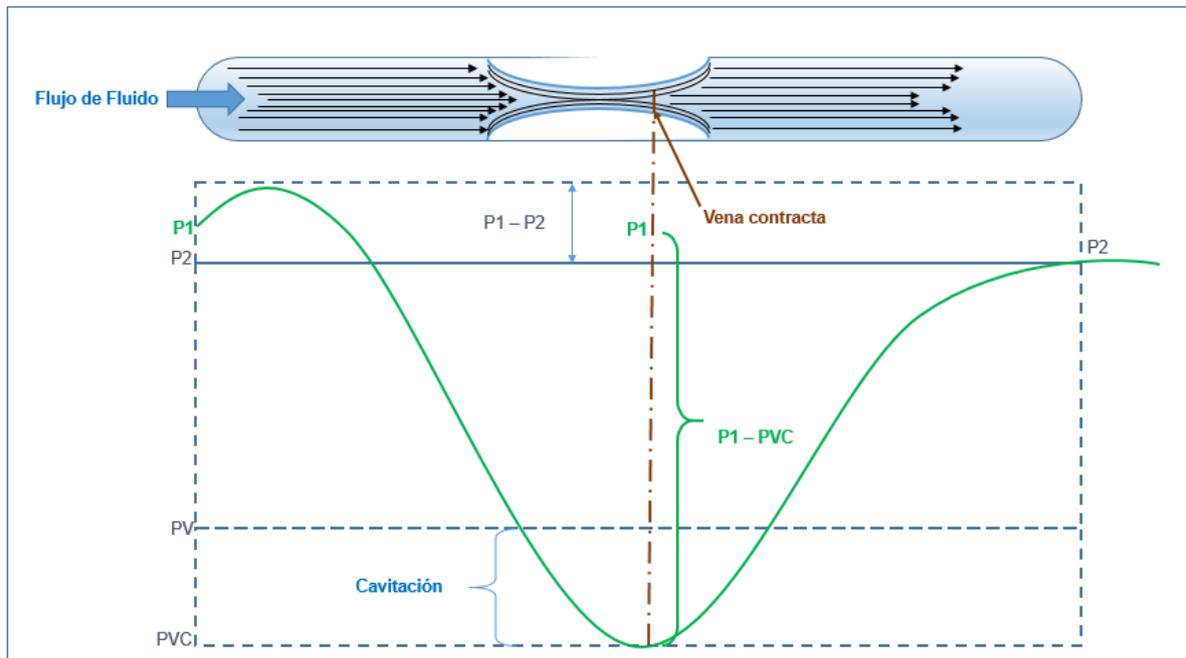
La relación de la máxima caída de presión y el incremento de la velocidad dentro de una restricción de flujo llamada la vena contracta se puede ser explicada utilizando el balance de energía con la ecuación de Bernoulli, como sigue:

$$\frac{\rho v_1^2}{2g_c} + P_1 = \frac{\rho v_{vc}^2}{2g_c} + P_{vc} \quad \text{ecuación 5.1}$$

En donde  $V_{vc}$  y  $P_{vc}$  es el valor de la velocidad y presión en la vena contracta, es decir los valores máximos de velocidad y presión respectivamente.

Esta ecuación demuestra que un incremento en la velocidad (energía cinética) deberá de producir un decremento en la presión estática para compensar el incremento de velocidad.

Para describir el fenómeno de flashing y cavitación y la diferencia entre estos dos, consideremos la gráfica 8 donde se muestra el valor de presión de vapor del líquido a la temperatura del sistema y se muestra el fenómeno de cavitación en flujo de fluidos.



Gráfica 8 Cavitación

Fuente: elaborada por el autor

Un líquido cavita cuando la caída de presión está por debajo de la presión de vapor en el estrangulamiento de flujo. Si la presión de fluido está por debajo de la presión de vapor, el líquido comienza a comportarse inestable y se generan burbujas de vapor del mismo líquido ya que el sistema lo permite, dichas burbujas ocupan espacio y restringen el paso de flujo. En la segunda etapa de cavitación es cuando la presión se recupera por encima de la presión ocasionando que no se generen más burbujas y que las burbujas existentes se colapsen e implosionen en el sistema cambiando inmediatamente a líquido, observar gráfica 8.

El ciclo de cavitación es líquido-líquido+vapor-líquido, vapor del mismo compuesto. El fenómeno de cavitación tiene efectos negativos debido a que la implosión de burbujas cuando se regeneran a líquido en el sistema es un fenómeno muy agresivo ya que colapsan en el material de los internos de la válvula, ocasionan daños por erosión, ruido en la tubería, excesiva vibración, deterioro del material a corto plazo, altos gastos de mantenimiento y refaccionamiento de piezas principales.

### (iii) Daño en los internos de las válvulas por Cavitación

Los daños por cavitación son usualmente los más dañinos en las de válvulas de control, el daño físico a los internos y cuerpo de una válvula de control, se refleja en altos costos de mantenimiento, debido a gastos al remplazo de refacciones dañadas y por supuesto paros imprevistos de operación.

Normalmente, el daño debido a la cavitación se caracteriza por una apariencia en la superficie expuesta bastante irregular, tosca y picada. Las piezas de las válvulas que han sufrido daños extensos pueden tener una gran cantidad de material faltante.

Los resultados ocasionados por daños por cavitación son bastante familiares y fáciles de distinguir por una persona especializada ya que no son similares a otro tipo de daño químico o mecánico. Los eventos del proceso de daños por cavitación son bastante conocidos y han sido estudiados durante varias décadas, pero aún no está claro el mecanismo del proceso de daños por cavitación, sin embargo, hay un acuerdo general en los aspectos del proceso de daño por cavitación en materiales por observación y experimentación.

Los daños por cavitación han sido estudiados y asociados al colapso de las burbujas dinámicas generadas en la vena contracta. Este daño consiste en dos eventos primarios (1) ataque a la superficie de los materiales

resultado de cavitación en el líquido y (2) la respuesta o reacción del material al ataque. El ataque a los materiales están asociados con dos factores, ataque mecánico y ataque químico.

La erosión sobre los materiales resulta del colapso de las micro burbujas a altas velocidades sobre la superficie de los materiales, recordemos que las burbujas se generan la vena contracta y este es el punto de mayor velocidad del fluido en el sistema de estrangulamiento de flujo.

También el efecto de la presión exhibe dos tendencias opuestas. Manteniendo una presión de entrada  $P_1$  fija dentro de nuestro sistema de válvula de control y aumentando la caída de presión en función de la presión  $P_2$  tiende a incrementar la magnitud de cavitación formada, con consecuencias desastrosas. Sin embargo, una baja caída de presión repercute en baja presión diferencial de colapso de micro burbujas ( $P_2 - P_v$ ), disminuyendo la intensidad de cavitación.

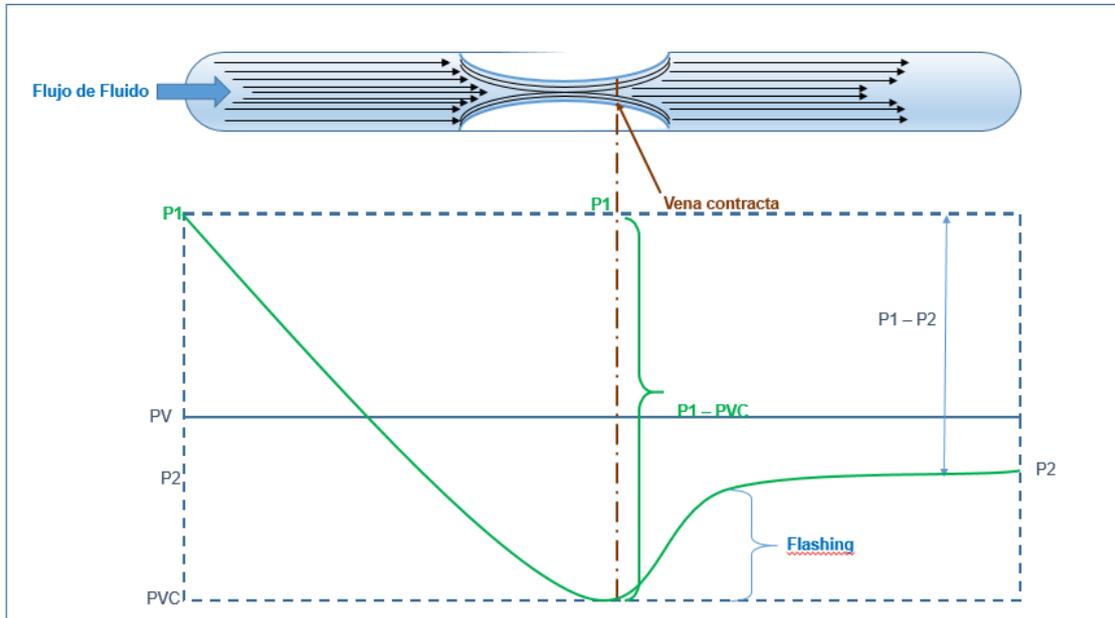


Fig. 158 Daños en los internos debido a cavitación

**Fuente:** Flashing and Cavitation, Valve Magazine, summer 2015.pg 2

#### (iv) Flashing

Si el valor de la presión a la salida de la válvula de control  $P_2$  está por debajo de la presión de vaporización del líquido  $P_v$  flashing ocurre, se dice que el sistema es flashing y la corriente de salida predomina en una fase de vapor, como se muestra en la siguiente gráfica 9.



Gráfica 9 Flashing

Fuente: elaborado por el autor

EL flashing ocurre cuando la caída de presión está por debajo de la presión de vapor en el sistema y es una condición de proceso. Cuando la presión de fluido está por debajo de la presión de vapor, el líquido comienza a vaporizar restringiendo el paso de flujo. En este fenómeno hidrodinámico la presión no se recupera en la vena contracta ya que es una condición de proceso.

El ciclo de Flashing es líquido-líquido+vapor-líquido+vapor, vapor del mismo compuesto. Al igual que cavitación el fenómeno de flashing tiene efectos negativos sobre los componentes internos de la válvula de control y el interno de la tubería, ocasionan daños por erosión, ruido en la tubería, excesiva vibración, deterioro del material a corto plazo, altos gastos de mantenimiento y refaccionamiento de piezas principales y paros innecesarios.

#### (v) Daños por Flashing

Cuando Flashing ocurre y afecta en los componentes internos de la válvula esto causa una clase de daños erosivos mostrados en la siguiente figura 18. Esta erosión puede ser severa y puede ocurrir incluso cuando sólidos no abrasivos se encuentran en el líquido.

Al igual que cavitación, cuando el sistema es Flashing la magnitud de los daños en los componentes internos es causado por:

- La intensidad y grados de flashing o cavitación.
- Materiales de construcción de los internos.
- Tiempo de exposición.



Fig. 19 Daños en los internos debidos a flashing

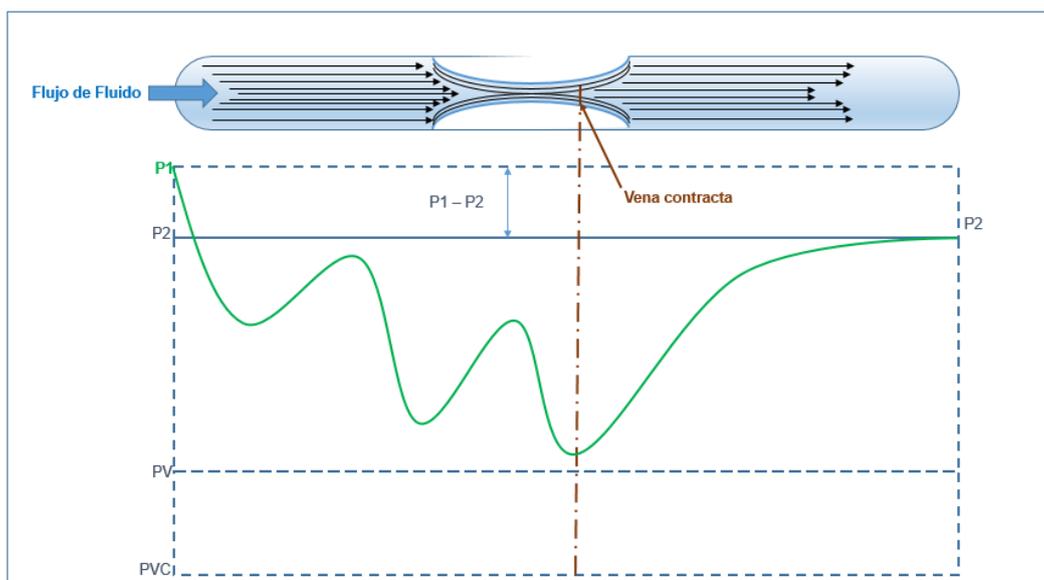
Fuente: Flashing and Cavitation, Valve Magazine, summer 2015.pg 2

#### (vi) Prevención y eliminación de daños erosivos en los componentes internos de las válvulas

Los principales efectos hidrodinámicos que causan daños severos por erosión en los componentes internos de las válvulas de control es Cavitación y Flashing, La experiencia en sistemas de cavitación ha demostrado que es posible eliminar el fenómeno de cavitación en el sistema con la correcta selección del diseño y materiales internos de una válvula de control, sin embargo, no es posible eliminar el fenómeno de flashing ya que es una condición de proceso, la correcta selección de materiales en los internos de la válvula puede reducir los daños erosivos por flashing aumentando la vida útil de la válvula de control, sin embargo el fenómeno hidrodinámico llamado flashing no se elimina.

#### (vii) Cajas anti Cavitación

el diseño de cajas en válvulas de control con sistemas cavitantes es justamente reducir la presión por etapas, alejándose de la presión de vaporización en la vena contracta como se muestra en la siguiente gráfica 10.



Gráfica 10 Cajas anti cavitación

Fuente: elaborada por el autor

El diseño de las cajas anti cavitación es tal que “adsorben” la caída de presión por etapas, para que la máxima caída de la presión dentro de la vena contracta se aleje de la presión de vaporización del líquido. Las válvulas que tienen este tipo de cajas especiales incluyen secciones cilíndricas concéntricas con orificios especialmente ubicados alrededor de la caja anti cavitación, observar figura 19. En el funcionamiento, cada sección escalona la caída de presión, y el número de etapas requerido depende de la presión de entrada y la caída total de presión en la válvula.

Este diseño de caja anti cavitación también se puede configurar para aplicaciones en que la caída de presión de la válvula disminuye conforme aumenta la carrera del vástago, la caja contiene una multitud de orificios especialmente conformados, la forma de los orificios reducen la turbulencia del flujo, además, los orificios están alineados radialmente, de manera que el fluido pasa de una restricción a la siguiente.



Fig. 20 Diseño de cajas anti cavitación

Fuente: Flashing and Cavitation, Valve Magazine, summer 2015.pg 5

Este diseño en particular permite que la caída de presión en la válvula sea por etapas, como se muestra en la figura 10, en orden de evitar que la caída de presión sea debajo de la presión de vapor del líquido y proteger el equipo contra el fenómeno de cavitación. El número de etapas es cada vez menor conforme disminuye la caída de presión a mayor apertura de la válvula. Existen otro tipo de diseños para eliminar la cavitación y la mayor parte de ellos funcionan bajo el mismo principio de reducción de presión por etapas.

Los materiales utilizados en las válvulas de control son generalmente blandos, la selección para resistir la cavitación debe basarse en factores distintos a la dureza. Por regla general, a medida que aumenta el contenido de cromo y molibdeno, aumenta también la resistencia a los daños causados por cavitación. Por lo tanto, los aceros consistentes de una aleación de cromo molibdeno poseen más resistencia que los aceros al carbón, y los aceros inoxidables poseen una resistencia aún mayor que los aceros de aleación de cromo-molibdeno.

#### (viii) Reducir el desgaste ocasionado por Flashing

Caso contrario para el fenómeno hidrodinámico llamado Flashing en comparación con cavitación en el control de flujo de fluidos ya que no existe una tecnología dentro del diseño de válvulas de control que elimine la generación de vapor en el sistema, precisamente porque Flashing es una condición de procesos. La experiencia ha demostrado que se puede reducir el desgaste en los componentes internos de las válvulas por erosión incrementando la dureza del material, precisamente es recomendable seleccionar materiales de los internos con altas concentraciones de cromo y molibdeno, aumentando la composición.

Si la duración de exposición es elevada y la caída de presión es muy alta el fenómeno de flashing será muy agresivo y la erosión deteriora rápidamente los componentes internos de las válvulas. Si esto ocurre es recomendable seleccionar válvulas tipo en Angulo con internos resistentes a la erosión, el diseño en ángulo del cuerpo de la válvula es para orientar la vaporización hacia la salida de la restricción en dirección descendente, alejándose del tapón, caja y anillo de asiento de la válvula, esto para aumentar la vida de operación de la válvula de control. Además, para proteger el cuerpo de la válvula es recomendable agregar una pieza de sacrificio conocido como liner, esta pieza es parte del cuerpo interno de la válvula y está ubicada alrededor del diámetro interno en la parte inferior de la válvula de control tipo Angulo y durante periodos de exposición prologados es recomendable remplazar el liner para continuar protegiendo el cuerpo de la válvula de control.

A menudo, las condiciones de proceso que producirán los dos principales fenómenos hidrodinámicos en sistemas de válvulas de control pueden ser evitadas en la fase de diseño si se toma en cuenta las condiciones de servicio y el diseño del circuito de proceso en conjunto con la ubicación de la válvula de control.

El diseño del circuito de control del proceso puede afectar la cavitación o flashing en una válvula de control. Si la ubicación de la válvula no es flexible se puede añadir resistencia al flujo de fluido, corriente abajo de la válvula de control, utilizando una placa de orificio o una válvula adicional. Esto aumentará las presiones del fluido dentro de la válvula y la caída de presión que sucederá en ella será menor. Sin embargo, es muy posible que esta técnica simplemente desplace la cavitación de la válvula hacia la restricción corriente abajo y pudiera no controlar de manera eficaz la cavitación en el sistema. Esto también pudiera aumentar el tamaño de la válvula ya que es menor la caída de presión disponible para procesar la misma cantidad de flujo de fluido.

### (ix) Desgasificación:

La desgasificación es uno de los fenómenos hidrodinámicos de aplicaciones de servicio severos presentes en válvulas de control, generalmente este fenómeno se encuentra en refinerías.

Con la finalidad de identificar el proceso de desgasificación es importante el conocimiento general de otras aplicaciones de servicio severo con los mismos efectos negativos en los internos de los equipos y en el deficiente control de proceso.

El fenómeno de desgasificación se presenta en el transporte de fluidos, cuando es una mezcla de líquido y gas, en cuanto se presente una mínima caída de presión en el sistema ambos componentes se separan. El mejor ejemplo para visualizar este fenómeno es cuando se abre una botella de refresco.

Esta botella esta presurizada y aparenta ser una mezcla homogénea pero cuando se produce una ligera reducción en la presión, por ejemplo (abrir la botella) el dióxido de carbono comienza a separarse de la solución líquida. El producto final son dos compuestos; uno es el refresco líquido y el otro el dióxido de carbono en fase gas.

Por lo tanto, hay una cierta similitud entre desgasificación y flashing, en ambos fenómenos hidrodinámicos el fluido corriente arriba de la válvula de control es líquido y corriente abajo es una mezcla líquido-vapor, para flashing, y líquido-gas para desgasificación, por ende, tienen procesos similares y en algunos casos el fenómeno de desgasificación es identificado a flashing. Estos dos procesos pueden repercutir en los mismos daños a los componentes internos de las válvulas de control.

Sin embargo, el fenómeno de desgasificación en comparación con flashing puede ocurrir en cualquier punto del proceso, no necesariamente en la restricción de la válvula de control llamada vena contracta. Únicamente se requiere una mínima caída de presión para que el gas y el líquido comience separarse. Si este fenómeno ocurre es probable que se presente daños en los componentes internos de las válvulas, además de que el gas desprendido del líquido a la salida de la válvula ocupa espacio restringiendo el paso del fluido ocasionando una restricción de fluido en el control, y posiblemente una válvula de mayor tamaño será requerida.

Es importante identificar el fenómeno de desgasificación en el proceso ya que desgasificación se maneja de manera muy diferente en comparación con otra aplicación, a continuación, existen algunos indicadores en donde es posible que ocurra el fenómeno de desgasificación:

- Si el valor de la presión de vapor del proceso es similar a la presión de entrada  $P_1$ . La suposición es que en la práctica se presenta gas aguas debajo de la válvula y dicho compuesto no es el mismo que el líquido.
- Si el valor de presión de vapor escrita en hoja de datos es más grande que la presión crítica. Desde el punto de vista termodinámico esto es imposible. Cuando se considera el diagrama de presión-temperatura, ver gráfico 11, de cualquier sustancia, la línea de vaporización (línea azul) representa la fase de vapor de la



Gráfica 11 Punto triple de cualquier sustancia

sustancia a diferentes valores de presión contra temperatura, y la presión crítica es la presión de vapor de un líquido a la temperatura crítica. La presión de saturación termina en la línea de vapor, por encima de la cual el fluido se convierte en súper-crítico.

El punto triple de cualquier sustancia es la temperatura y presión de cualquiera de las tres fases (gas, líquido y sólido) que la sustancia coexiste en equilibrio termodinámico.

En fisicoquímica, termodinámica y química; el punto crítico es conocido como un estado crítico de la sustancia, el cual ocurre debajo de ciertas condiciones (tales como valores específicos de temperatura, presión o composición) en las que no existen límites de fases. Existen múltiples tipos de puntos críticos, incluyendo:

- vapor-punto crítico del líquido
- líquido-punto crítico del líquido

Después del crítico no existe transición de fases entre gases y fase líquida (fluido en fase supercrítica).

Los gases no se pueden licuar a temperaturas por encima de la temperatura crítica porque en este punto las características de los gases y de los líquidos son las mismas, y no hay base sobre la cual distinguir entre los gases y los líquidos. La presión de vapor nunca puede ser más grande que la presión crítica.

(x) **Servicios y aplicaciones en donde comúnmente se presenta el fenómeno de desgasificación:**

A continuación, se presentan dos aplicaciones típicas en donde posiblemente se presenten los fenómenos de desgasificación en refinerías:

(xi) **Hidrocraqueo catalítico:**

El hidrocraqueo es el proceso por excelencia para la producción de queroseno y gasóleo en gran calidad.

La alimentación al proceso de hidrocraqueo procede de la torre de destilación a vacío ligeros y/o pesados procedentes a su vez de la torre de destilación primaria, o destilados a vacío pasados procedentes de procesos de conversión: viscorreductora, coquización, hidroconversión de residuos atmosféricos y de vacío, así como aceites desasfaltados.

El residuo parafínico se utiliza para la producción de bases de aceites de alto índice de viscosidad, ya sea como carga del craqueo con vapor logrando rendimientos en etileno y propileno equivalentes a los de naftas parafínicas, o como carga adicional al craqueo catalítico, como se observa en la siguiente figura 20.

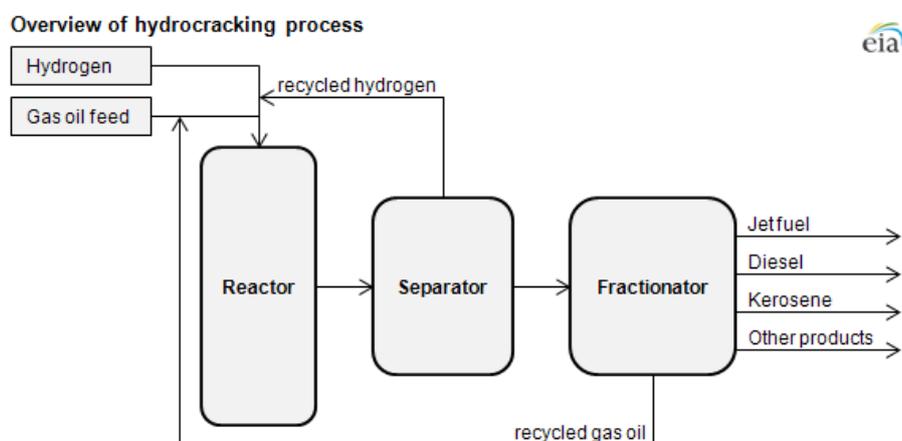


Fig. 16 Unidad de Craqueo Catalítico

Fuente: Hydrocracking is an important source of diesel and jet fuel, January 18, 2013.

La nafta pasada se dirige al reformador catalítico, el craqueo con hidrogeno tiene por finalidad transformar moléculas hidrocarbonadas de alto punto de ebullición y bajo costo, en fracciones más ligeras de mayor valor, utilizando hidrógeno para aumentar la actividad catalítica, con la finalidad de obtener gasolina, nafta y destilados intermedios.

En el craqueo catalítico existen algunas aplicaciones en donde pueden experimentar el fenómeno de desgasificación, precisamente se presenta en altas caídas de presión, por ejemplo, después del reactor están los separadores a presión, primero uno a altas temperaturas y otro a bajas temperaturas. Aguas debajo de estos separadores se requieren válvulas de control que mantienen el nivel del separador del producto líquido y gas, estas válvulas están expuestas a numerosos cambios de presión, desgasificación, vibración ocasionada por la entrada de gases, erosión, flashing, corrosión interna debido a la entrada de gases altamente corrosivos.

(xii) **Amina:**

La unidad de aminas son usadas para remover gases ácidos ( $H_2S$ ,  $CO_2$ ) de la corriente de flujo de gas natural para preparar una composición de gas aceptable para los requerimientos de venta, distribución y ser usados en otras partes de la planta.

El proceso contiene una etapa de absorción de gas y una etapa de regeneración de carbonatos, carbonato de potasio ( $K_2CO_3$ ), en el disolvente de absorción.  $K_2CO_3$  reacciona con  $CO_2$  y  $H_2S$  en la formación torre bicarbonato absorbedor ( $HCO_3^-$ ) y bisulfuro ( $HS^-$ ). Esta reacción permite disolver significativamente más  $CO_2$  y  $H_2S$  en presencia de agua. El vapor del  $CO_2$  y  $H_2S$  absorbido en la torre de regeneración es separado del disolvente.

El disolvente regenerado se recicla de nuevo al absorbedor después de la recuperación de energía mediante intercambiadores de calor, como se muestra en la siguiente figura 21:

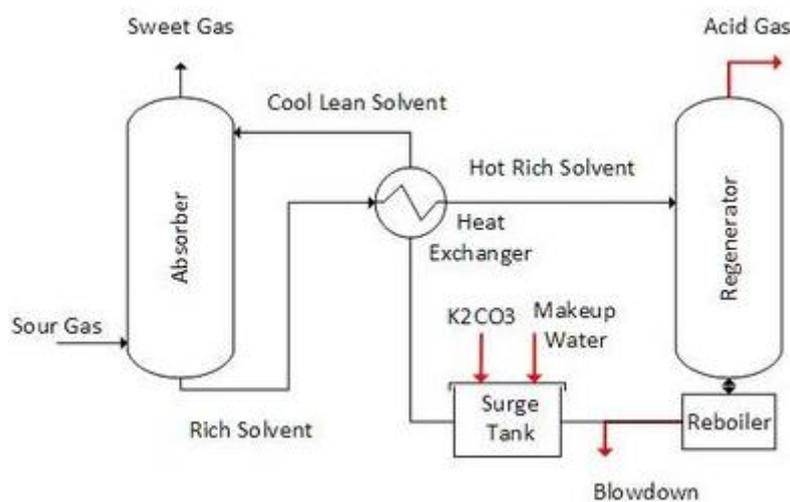


Fig. 17 Unidad de Aminas

Fuente: Sour Gas Treating-Amine Units, <http://www.pall.com/pdfs/Fuels-and-Chemicals/HCP25b.pdf>

Entonces la amina rica se dirige al tanque que opera a presiones reducidas, donde existe una gran porción de gas entrampado que dados los cambios de presión se separan de la mezcla líquida ocasionando el fenómeno de desgasificación. Entonces la amina se dirige a varios procesos de regeneración y se envía de nuevo al proceso principal.

El fenómeno de desgasificación comúnmente se presenta después del absorbedor, en la válvula de control de nivel, como resultado corriente abajo de la válvula de control se presentan dos fases, el fluido amina líquida y la otra es  $CO_2$  y/o  $H_2S$  que sale como una solución, estas dos fases presentan serios problemas en la válvula

de control, excesiva vibración y severos problemas de erosión en las partes internas de la válvula dada la alta velocidad del fluido.

La desgasificación por aminas y carbonato de potasio requiere especial consideración en el proceso de selección y dimensionamiento de una válvula de control, etilo y material de los componentes de la válvula de control.

## CAPITULO 6.- LA IMPORTANCIA DEL INGENIERO QUÍMICO EN LA SELECCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE VÁLVULAS DE CONTROL

El ingeniero químico es el profesional que se encarga del diseño, manejo, la optimización, el control y la administración de procesos y proyectos para la transformación física y/o química de materias primas a fin de obtener el producto final deseado y el servicio útil para el hombre.

La relación que existe entre las válvulas de control y el ingeniero químico es el proceso, el cual existe gracias al trabajo realizado por el ingeniero de procesos, perfil de desarrollo del ingeniero químico, el cual tiene la tarea de diseñar procesos eficientes. Durante el desarrollo de proceso existen cientos de variables a medir y manipular, la habilidad para identificar las variables medibles y manipulables es crucial para la optimización del proceso, existen cientos de eventos que deben de ser controlados para especificar el valor final deseado, este es el objetivo de la optimización de procesos, y una válvula de control existe en el circuito de control para controlar y manipular el flujo de fluido dentro del valor del rango deseado para obtener el producto final deseado y la rentabilidad del proceso.

La industria está constituida en su mayor parte por tuberías y válvulas, la ubicación dentro del proceso de una válvula de control es una tarea que se realiza en el desarrollo del proceso con ayuda del diagrama de flujo y el ingeniero encargado de especificar la ubicación de una válvula de control es el ingeniero de proceso, el cual tiene la habilidad de identificar el objetivo de control, las variables manipulables, medibles y las características de la automatización del proceso para posicionar una válvula de control dentro del circuito de control de procesos a fin de hacer el proceso eficiente y ambientalmente seguro. Esto se conoce como la optimización de procesos, un campo de estudio de la ingeniería química. La ingeniería de procesos siempre es responsable del desarrollo y operación de procesos químicos y la tarea automatización de procesos comienza a ser más y más importante en la industria de producción.

La especificación de una válvula de control es siempre una tarea compleja y es en base a la máxima presión de diseño y temperatura que soporta el cuerpo de la válvula es la forma de especificar el material de construcción, el objetivo es evitar daños químicos al material, esto se logra en base a la experiencia en selección de materiales y los diferentes tipos y características de flujo de fluidos existentes en la industria de procesos químicos, ya sea una válvula de control dentro de una refinería que modula el flujo de crudo, naftas, gasóleos, o dentro una industria de producción de gas natural que controla la presión del gas o dentro de la industria de energía una válvula de control puede tener la tarea de controlar el flujo de vapor, entre muchos otros ejemplos el ingeniero tiene que tener el conocimiento preciso de la compatibilidad de materiales para evitar daños por erosión y/o corrosión en el material de la válvula de control a seleccionar.

El diseño y dimensionamiento de una válvula de control no necesariamente es tarea exclusiva de un ingeniero mecánico o de otra índole, ya que una de las especialidades en los cursos de ingeniería química es la mecánica de fluidos. El comportamiento y los fenómenos hidrodinámicos debido al transporte y manipulación de fluidos es crucial en el dimensionamiento y diseño de una válvula de control, el ingeniero químico está familiarizado con los balances de materia y energía en el transporte de fluidos, el coeficiente de flujo de válvulas de control, comportamiento de flujo de fluidos, principales fenómenos hidrodinámicos en el transporte y estrangulación de fluidos así como las propiedades físicas y químicas de los fluidos, extrapolación de resultados en base a los experimentales en pruebas de laboratorios con válvulas de control y/o tuberías y por supuesto operaciones unitarias de los procesos químicos. Los ingenieros químicos tienen la habilidad de identificar los principales equipos dentro de las operaciones unitarias, los servicios y aplicaciones de válvulas de control en la industria de procesos.

El Ingeniero químico encargado de la administración del proyecto cuenta con las bases necesarias para evaluar los análisis de costos en la tarea de adquirir válvulas nuevas para un proyecto o el remplazo de las válvulas

existentes, el ingeniero puede realizar una evaluación de costos e identificar el precio de la válvula que mejor se ajuste al presupuesto y cumpla técnicamente. Dentro de los cursos de ingeniería se evalúan los principios económicos y administrativos de un proyecto y un Ingeniero químico que tiene la tarea de adquirir equipo nuevo tiene la capacidad de realizar una evaluación técnico-económica que represente el mejor desempeño, ya que no necesariamente la válvula de control de mayor precio es la que cumpla con los objetivos del proceso, el ingeniero puede adquirir una válvula de menor costo cumpliendo técnicamente las necesidades del proceso sin necesidad de sobre especificar una válvula de control dentro de una aplicación.

Las válvulas de control están ampliamente relacionadas con la ingeniería química, desde el punto de vista de su diseño, especificación, adquisición y operación en el control de procesos, dentro de la carrera de ingeniería química se preparan a los estudiantes con la base necesarias para cumplir con cualquiera de estas tareas. El estudio preciso del comportamiento del fluido en el transporte del flujo de fluido es un tema que se abarca en mecánica de fluidos, además el estudiante de Ingeniería química durante toda su carrera estudia las operaciones unitarias en la industria de procesos químicos, válvulas de control existen en el proceso con la finalidad de controlar el flujo dentro de la variable de control de proceso requerida, el ingeniero químico tienen la capacidad de interpretar la ganancia de flujo en una válvula de control y como esta afecta al proceso.

Para finalizar el ingeniero químico que dimensiona una válvula de control tiene la tarea de especificar una válvula que represente el mejor desempeño en el control de proceso, para lograr esto tiene que tener el conocimiento preciso de las propiedades físicas y químicas del fluido, su comportamiento en el control de flujo y además los principales fenómenos hidrodinámicos presentes en la manipulación y estrangulamiento del fluido, como estos fenómenos pueden afectar en el dimensionamiento de una válvula de control, las principales aplicaciones en donde comúnmente se encuentran una válvula de control y las normas que aplican a válvulas. El conocimiento preciso de estos temas es crucial en la especificación, dimensionamiento y recomendación de una válvula de control para que trabaje dentro de las condiciones de proceso requeridas dentro de la industria química.

## VII.CONCLUSIÓN

El presente trabajo cumple el objetivo de transmitir el conocimiento adquirido durante más de dos años de experiencia por parte del autor desarrollando el trabajo de ingeniero de proyectos en la selección y dimensionamiento de válvulas de control en EMERSON AUTOMATION SOLUTION, para la industria química, principalmente refinerías, distribución y producción de gas natural, energía e industria alimenticia.

Se explica a detalle las principales características de las válvulas de control y como existen en el control de procesos, la tecnología de control de procesos es de suma importancia en la industria de procesos químicos y las válvulas de control están presentes en el circuito de control cumpliendo con la tarea de mantener la variable de interés dentro del valor de proceso requerido, aumentando la rentabilidad del proceso aprovechando en mayor medida la materia prima alimentada al proceso, logrando que el proceso sea eficiente y ambientalmente seguro. No es correcto decir que una válvula de control es el único elemento final de control en la industria, ya que existen otros tipos como las bombas, sin embargo, las válvulas de control son de las más importantes y se encuentran en todas las Industria químicas.

Se presenta además, los principales tipos de válvulas de control existentes en la industria, sus características principales y en que aplicaciones comúnmente se encuentran cada una de estas. El presente trabajo no pretende estar dirigido a especialistas en válvulas de control sino también a estudiantes que cursan algún nivel de la carrera de ingeniería química para consultar los principales tipos de válvulas de control y la terminología de estas en la industria de procesos químicos y como es que los diseños internos afectan en el control de flujo de fluidos.

El trabajo de selección del tamaño y especificar un modelo de una válvula de control para determinado proceso puede ser una labor ardua, se requiere del conocimiento preciso de las propiedades físicas y químicas del fluido a controlar, de la compatibilidad de material, para evitar algún ataque químico al material de la válvula de control, de las principales ecuaciones y comportamiento en el transporte de flujo de fluidos a través de tuberías, de los principales fenómenos hidrodinámicos de servicio severos presentes en el sistema dadas las condiciones de proceso, las principales aplicaciones y servicios en la industria, las variables a controlar y sobre todo el conocimiento de las normas que aplican a válvulas de control así como el desarrollo de la tecnología en la optimización de procesos, se requieren de todos estos conocimientos para especificar una válvula que represente el mejor desempeño en la industria de control de procesos químicos.

Existen cientos de aplicaciones en la industria que requieren de control de proceso, para manipular la variable deseada dentro del rango de proceso, para todas estas aplicaciones se pueden especificar equipos de control de flujo de fluidos, y el equipo de control más común en la industria son las válvulas de control.

Caso práctico:

Para finalizar este trabajo es deseo del autor explicar un caso práctico real de análisis y especificación de una válvula de control, el proyecto es llenaderas Guaymas, el usuario final es PEMEX. Se requiere de una válvula de control de presión de amoníaco en estado gaseoso. Pero de acuerdo a la hoja de datos el amoníaco 100% puro a una condición de proceso se encuentra en estado líquido e incluso dadas las altas caídas de presión se presenta el fenómeno hidrodinámico llamado flashing, esto se confirmó revisado los datos de proceso (presión y temperatura de operación) en comparación con la presión de vapor a condiciones de proceso de la ecuación de antoine para amoníaco.

Una vez identificado el fenómeno hidrodinámico de flashing se prosigue con informar a los ingenieros de procesos de PEMEX las consecuencias de los efectos negativos sobre el trim de la válvula de control si trabaja bajo las condiciones de proceso especificadas en la hoja de datos.

Como resultado se dimensiona una válvula de control con los internos endurecidos Alloy 6, para aumentar la vida del equipo disminuyendo el desgaste ocasionado por la erosión del amoniaco al presentarse el fenómeno de flashing.

El resto de las condiciones de proceso no tienen problemas de flashing ya que de acuerdo a las condiciones de proceso de la hoja de datos en realidad es amoniaco en estado gaseoso, sin embargo, dadas las altas caídas de presión, se presenta ruido aerodinámico mayor a 85 dB(A), lo cual no es aceptable por parte de los ingenieros de proceso de PEMEX. Para combatir el ruido aerodinámico el autor especifico un diseño especial de trim que reduce el ruido, menor a lo establecido por parte del cliente de 85 dB(A). Actualmente esta válvula se encuentra en las instalaciones del cliente y muy pronto será instalada para trabajar en el control de presión de amoniaco.

## VIII.BIBLIOGRAFÍA

1. FISHER. (2005). Control Valve Handbook. U.S.A: Fisher Controls International.
2. George W, Page Jr, & Spence Engineering Co, Laminar Flow Valve Sizing Made Easy, Inc. Thermal Fluid Controls Division of Circor, Fluid Control Institute, 8 pp
3. Richard W. Greene & Cuerpo de redactores de Chemical Engineering Magazine. (1987). Válvulas de control en plantas de proceso. En Válvulas selección, uso y mantenimiento (149-158). Edo. de México: Libros McGraw-Hill de México, S.A. de C.V.
4. Orval P, Lovett Jr, E. I. du Pont de Nemours & Co. (1987). Válvulas de control. En Válvulas selección, uso y mantenimiento (159-163). Edo. de México: Libros McGraw-Hill de México, S.A. de C.V..
5. James A. Carey & Hammit Donn, Fisher Controls Co. (1987). Selección de válvulas de control de flujo de líquidos. En Válvulas selección, uso y mantenimiento (164-176). Edo. de México: Libros McGraw-Hill de México, S.A. de C.V.
6. Cullen G. Langford, E. I. du Pont de Nemours & Co. (1987). Instalación, mantenimiento y detección de fallas en válvulas de control. En Válvulas selección, uso y mantenimiento (177-180). Edo. de México: Libros McGraw-Hill de México, S.A. de C.V.
7. Bèla G. Liptàk, Consultor & Cuerpo de redactores de Chemical Engineering Magazine. (1987). Válvulas de control en sistemas optimizados. En Válvulas selección, uso y mantenimiento (181-188). Edo. de México: Libros McGraw-Hill de México, S.A. de C.V.
8. Forman E. Ross, Unit Enginners & Constructors Inc, Cuerpo de redactores de Chemical Engineering Magazine. (1987). Mejoramiento del funcionamiento de las válvulas de control en la tubería. En Válvulas selección, uso y mantenimiento (194-199). Edo. de México: Libros McGraw-Hill de México, S.A. de C.V
9. Floyd D. Jury. (1975). Fundamentals of Closed Loop Control . Fisher Controls Company: 12.
10. Sheldon G. Looyd. (1974). Generalized Control Theory. Fisher Controls Company: 16.
11. Guy Borden, Jr. & Paul G. Friedmann. (1998). Control valves-Practical Guides for Measurement and Control. U.S.A.: Instrument Society of America.
12. Fisher Controls International. 2013. Pressure/Temperature Ratings for Fisher Valves (ASME B16.34-2013)-U.S. Traditional Units. En Product Bulletin (September 2013, 59.1.:021) U.S.A.: Fisher Controls Company.
13. Don Bush, Jim Gosse & Ted Grabau. (1998). Materials for Control Valves. Marshalltown , Iowa: ISA´s Book Control Valves.
14. Robert L. Mott. (2006). Mecánica de fluidos. México: Pearson Educación de México, S.A. de C.V..
15. Warren L. Mc Cabe, & Julian C. Smith. (2003). Operaciones básicas de Ingeniería Química. México: REVERTÉ, S.A..
16. Fox R.W. "Introducción a la Mecánica de los Fluidos" McGraw-Hill
17. Streeter V.C. "Mecanica de Fluidos", McGraw-Hill.
18. Perrt J.H. "Chemical Engineering Handbook", McGraw-Hill.
19. CRANE, Flujo de Fluidos en válvulas, accesorios y tuberías, McGraw-Hill/LITERAMERICANA DE MÈXICO, S.A. de C.V.,
20. Joseph H. Keenan and Frederick G. Keyes, Thermodynamic Properties of Steam, New York Jhon Wiley & Sons, Inc. 1936, 83pp.
21. Stephanopoulos George, Chemical Process Control: An Introduction to Theory and Practice, Prentice-Hall, 1984-696 pp.

Páginas de Internet:

- Energy (API)// <http://www.api.org>.
- American Society of Mechanical Engineers(ASME)//<https://www.asme.org>.
- European Committee for Standardization(CEN)//<https://www.cen.eu>
- European Material Standards//<http://www.erm-crm.org/>
- Instrument Society of American (ISA)// <https://www.isa.org/templates/home.aspx?pageid=80244>.
- International Electrotechnical Commission (IEC)// <http://www.iec.ch/>.
- International Standards Organization (ISO)// International Standards Organization.
- Manufacturers Standardization Society// <http://msshq.org/Store/index.cfm>.
- NACE International// <http://www.nace.org/home.aspx>.