



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**SELECCIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA VÁLVULA REGULADORA PARA  
UN DESEMPEÑO ADECUADO EN LOS LAZOS DE CONTROL DE LAS  
CALDERAS**

**Fredy Leonel Ramos Sanic**

Asesorado por el Ing. Jorge Gilberto González Padilla

Guatemala, octubre de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**SELECCIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA VÁLVULA REGULADORA PARA  
UN DESEMPEÑO ADECUADO EN LOS LAZOS DE CONTROL DE LAS  
CALDERAS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**FREDY LEONEL RAMOS SANIC**

ASESORADO POR EL ING. JORGE GILBERTO GONZÁLEZ PADILLA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

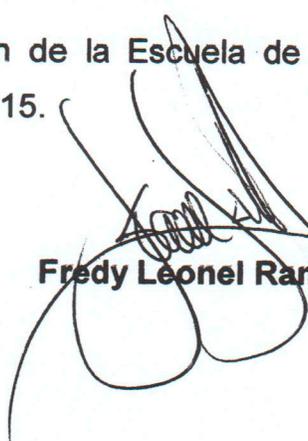
DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
EXAMINADOR	Ing. Fernando Alfredo Moscoso Lira
EXAMINADOR	Ing. Julio Rolando Barrios Archila
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **SELECCIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA VÁLVULA REGULADORA PARA UN DESEMPEÑO ADECUADO EN LOS LAZOS DE CONTROL DE LAS CALDERAS**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 13 de enero de 2015.

  
**Fredy Leonel Ramos Sanic**

Guatemala, noviembre de 2016.

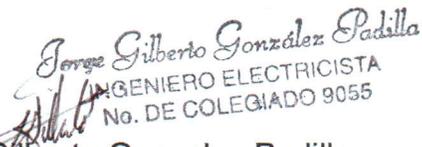
Ing. Gustavo Benigno Orozco  
Coordinador de Área de Potencia  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería, USAC.

Ingeniero Orozco:

Por este medio me permito informarle mi decisión de aprobar el trabajo de Graduación titulado: **SELECCIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA VÁLVULA REGULADORA PARA UN DESEMPEÑO ADECUADO EN LOS LAZOS DE CONTROL DE LAS CALDERAS**, desarrollado por el estudiante Fredy Leonel Ramos Sanic, ya que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente.

  
INGENIERO ELECTRICISTA  
No. DE COLEGIADO 9055  
Ing. Jorge Gilberto Gonzalez Padilla  
ASESOR



Ref. EIME 25. 2017  
Guatemala, 23 de ENERO 2017.

Señor Director  
Ing. Francisco Javier González López  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

**Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:  
SELECCIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA VÁLVULA  
REGULADORA PARA UN DESEMPEÑO ADECUADO EN  
LOS LAZOS DE CONTROL DE LAS CALDERAS, del  
estudiante Fredy Leonel Ramos Sanic, que cumple con los  
requisitos establecidos para tal fin.**

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,  
**ID Y ENSEÑAD A TODOS**

Ing. Gustavo Benigno Orozco Godínez  
Coordinador de Potencia



S/O



REF. EIME 25. 2017.

**El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; FREDY LEONEL RAMOS SANIC titulado: SELECCIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA VÁLVULA REGULADORA PARA UN DESEMPEÑO ADECUADO EN LOS LAZOS DE CONTROL DE LAS CALDERAS, procede a la autorización del mismo.**

  
Ing. Francisco Javier González López



GUATEMALA, 5 DE JUNIO 2,017.

Universidad de San Carlos  
de Guatemala

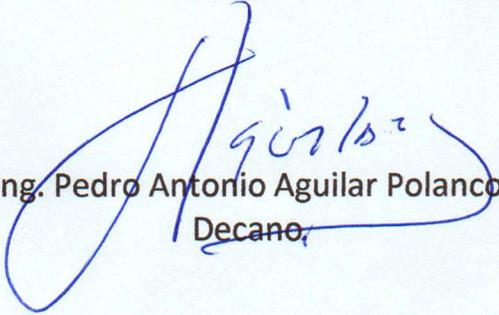


Facultad de Ingeniería  
Decanato

DTG. 528.2017

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **SELECCIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA VÁLVULA REGULADORA PARA UN DESEMPEÑO ADECUADO EN LOS LAZOS DE CONTROL DE LAS CALDERAS**, presentado por el estudiante universitario: **Fredy Leonel Ramos Sanic**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano

Guatemala, octubre de 2017

/gdech



## **AGRADECIMIENTOS A:**

### **Mis padres**

Porque todo lo que soy es debido a ustedes, su ejemplo, su sacrificio, su forma tan peculiar de inspirar en los demás la grandeza que hay en ustedes, por dedicar su vida y su tiempo a sus hijos, que aunque no merecemos el regalo que nos han dado, aun así lo tenemos. Porque cada paso desde que era un niño hasta el día de hoy he podido darlo gracias a ustedes: papá y mamá.

### **Mis hermanos**

Porque a pesar que podemos llegar a pensar que es posible hacer las cosas por uno mismo, sé que la vida es bastante difícil, seguramente imposible de abordar sin el apoyo incondicional que siempre he tenido de todos ustedes, ustedes sin lugar a duda representan el legado de nuestros padres, siéntanse orgullosos.

### **Maffer Pinilla**

Porque aunque el mundo suele ser un lugar complicado, el saber que podré verla, que podré deleitarme en su belleza, hace que el más gris de los días valga la pena vivirlo. Y aun cuando solo somos un destello en el océano de tiempo, su sonrisa plasmada en lo más profundo de mi ser extiende mi percepción de este instante hasta regiones inimaginables del universo...

# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XI
GLOSARIO .....	XV
RESUMEN.....	XXI
OBJETIVOS.....	XXIII
INTRODUCCIÓN.....	XXV
1. GENERALIDADES DE LAS CALDERAS Y CIRCUITOS DE VAPOR .....	1
1.1. Principios básicos de termodinámica .....	1
1.1.1. ¿Qué es la termodinámica?.....	1
1.1.2. Primera ley de la termodinámica .....	2
1.1.3. Segunda ley de la termodinámica.....	2
1.2. Ciclo termodinámico .....	4
1.2.1. Ciclo de Carnot.....	5
1.2.2. Ciclo de Rankine ideal .....	7
1.2.3. Ciclo de Rankine sobrecalentado .....	11
1.2.4. Ciclo de Rankine recalentado .....	12
1.2.5. Ciclo de Rankine regenerativo.....	15
1.3. Tipos de calderas y sistemas auxiliares .....	18
1.3.1. Calderas pirotubulares.....	19
1.3.2. Calderas acuotubulares.....	20
1.3.3. Colector de vapor .....	21
1.3.4. Trampas de vapor.....	21
1.3.5. Torres de enfriamiento.....	22
1.3.6. Tratamiento de aguas.....	23

1.4.	Partes principales de una caldera acuotubular .....	24
1.4.1.	Hogar.....	24
1.4.2.	Domo.....	25
1.4.3.	Economizador .....	26
1.4.4.	Pre calentador .....	27
1.4.5.	Sobrecalentador .....	28
1.4.6.	Deareador .....	29
1.4.7.	Parrilla .....	30
1.4.8.	Ventiladores forzados e inducidos.....	31
1.4.9.	Sistemas de limpieza de gases de combustión .....	32
1.4.10.	Chimenea .....	32
2.	EL CONTROL AUTOMÁTICO DE CALDERAS ACUOTUBULARES .....	35
2.1.	Variables de proceso e instrumentación .....	35
2.1.1.	Presión .....	35
2.1.2.	Nivel .....	37
2.1.3.	Caudal.....	39
2.1.4.	Análisis de líquidos y gases .....	41
2.2.	Elementos finales de control .....	42
2.2.1.	Válvulas.....	42
2.2.2.	Motores y variadores de frecuencia .....	44
2.2.3.	Dámper.....	44
2.3.	Estrategias de control.....	45
2.3.1.	Control <i>on-off</i> .....	46
2.3.2.	Control PID.....	47
2.3.3.	Control feedforward.....	49
2.3.4.	Control de gama partida .....	50
2.3.5.	Control a dos y a tres elementos.....	51
2.4.	Lazos de control utilizados en calderas.....	52

2.4.1.	Control de nivel del domo .....	52
2.4.2.	Control de la presión del hogar .....	53
2.4.3.	Control del combustible (bagazo y bunker).....	54
2.4.4.	Control de temperatura del cabezal de vapor .....	56
3.	VÁLVULAS, ACTUADORES Y ACCESORIOS.....	59
3.1.	Propiedades de las válvulas .....	59
3.1.1.	Característica de la válvula.....	59
3.1.2.	Coeficiente de flujo .....	61
3.1.3.	Rangeabilidad.....	62
3.2.	Tipos de válvulas .....	63
3.2.1.	Válvula de bola .....	63
3.2.2.	Válvula de mariposa .....	67
3.2.3.	Válvulas de globo .....	69
3.2.4.	Válvula de compuerta .....	75
3.3.	Tipos de actuadores y posicionadores .....	78
3.3.1.	Actuadores eléctricos .....	79
3.3.2.	Actuadores hidráulicos .....	80
3.3.3.	Actuadores neumáticos .....	82
3.3.4.	Posicionadores mecánicos .....	87
3.3.5.	Posicionadores electro-neumáticos .....	89
3.4.	Deterioro de las válvulas .....	90
3.4.1.	Corrosión .....	91
3.4.2.	Erosión .....	92
3.4.3.	Cavitación.....	94
3.4.4.	Vaporización o <i>flashing</i> .....	96
4.	DIMENSIONAMIENTO DE LA VÁLVULA DE CONTROL.....	99
4.1.	Dimensionamiento de una válvula para líquidos .....	100

4.1.1.	Coeficiente de capacidad relativa ( $C_d$ ) .....	102
4.1.2.	Factores $F_L$ , $F_F$ , $F_P$ y $F_{LP}$ .....	102
4.1.3.	Factor de número de Reynolds .....	108
4.1.4.	Ilustración del dimensionamiento de válvulas para líquidos.....	110
4.2.	Dimensionamiento de una válvula para gases y vapor .....	117
4.2.1.	Ecuaciones y unidades para dimensionamiento en vapor. ....	117
4.2.2.	Factor de expansión ( $Y$ ) .....	118
4.2.3.	Factor de relación de la caída de presión crítica ( $\chi_T$ ) .....	121
4.2.4.	Factor de relación del calor específico ( $F_k$ ) .....	122
4.2.5.	Factor de compresibilidad ( $Z$ ).....	123
4.2.6.	Ilustración del procedimiento para dimensionar válvulas para vapor .....	125
4.3.	Consideraciones importantes para la elección de la válvula ..	129
4.3.1.	Selección de la característica de la válvula .....	130
4.3.2.	Selección de los sellos .....	131
4.4.	Mantenimiento de la válvula de control .....	133
4.4.1.	Diagnóstico de las válvulas de control .....	134
4.4.2.	Descripción del mantenimiento típico de una válvula .....	136
CONCLUSIONES.....		151
RECOMENDACIONES .....		153
BIBLIOGRAFÍA.....		155

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Transferencia de calor entre dos objetos .....	3
2.	Ciclo de Carnot de un gas ideal .....	5
3.	Diagrama de máquinas de un ciclo de vapor .....	8
4.	Ciclo de Rankine ideal.....	8
5.	Ciclo de Rankine sobrecalentado.....	12
6.	Ciclo de Rankine recalentado .....	13
7.	Diagrama de máquinas del ciclo de Rankine con recalentamiento .....	14
8.	Diagrama de máquinas de un ciclo regenerativo con calentador abierto .....	16
9.	Diagrama T-S de un ciclo Rankine regenerativo .....	17
10.	Representacion de una caldera en un SCADA .....	18
11.	Caldera pirotubular y detalle de su configuración interna.....	19
12.	Torres de enfriamiento .....	23
13.	Vista del interior del hogar de una caldera de biomasa.....	25
14.	Detalle del hogar de una caldera acuotubular.....	26
15.	Economizador .....	27
16.	Pre calentador.....	28
17.	Deaerador .....	29
18.	Limpieza de la parrilla de una caldera.....	31
19.	Chimeneas .....	33
20.	Transmisor de presión diferencial .....	36
21.	Transmisor de nivel tipo radar.....	38
22.	Caudalímetro másico de efecto Coriolis.....	40

23.	Transmisor de pH .....	41
24.	Válvula de mariposa con actuador neumático .....	43
25.	<i>Dámper</i> , sus persianas y palanca.....	45
26.	Diagrama en bloques de un controlador PID .....	48
27.	Control a tres elementos del nivel de una caldera .....	51
28.	Diagrama de alimentación y combustión de biomasa.....	55
29.	Control automático de la atemperación .....	56
30.	Características de flujo .....	60
31.	Corte de una válvula de bola convencional .....	64
32.	Características de flujo de la válvula V-Ball y sus perfiles .....	65
33.	Corte de una válvula tipo V-ball .....	66
34.	Curva característica de la válvula de mariposa .....	67
35.	Válvula de mariposa .....	68
36.	Corte transversal de una válvula de globo.....	69
37.	Tipos de tapones para distintas características de flujo.....	70
38.	Válvula de puerto simple.....	71
39.	Válvula de caja.....	72
40.	Válvula para alta presión .....	73
41.	Válvula con reducción de ruido.....	74
42.	Características de flujo de la válvula de compuerta.....	75
43.	Válvula de compuerta .....	76
44.	Actuador eléctrico manejado por servomotor .....	79
45.	Sistema hidráulico básico .....	81
46.	Diagrama de cuerpo libre de una válvula y su actuador .....	83
47.	Área efectiva del diafragma <i>versus</i> de la carrera del vástago .....	84
48.	Carrera del vástago en función de la presión sobre el diafragma .....	85
49.	Corte de un actuador de piñón y cremallera .....	86
50.	Diagrama de un posicionador mecánico.....	88
51.	Convertidor de corriente a presión.....	89

52.	Corrosión por ácido nítrico .....	91
53.	Daños típicos producidos por erosión .....	93
54.	Línea piezométrica de un fluido que presenta cavitación.....	94
55.	Daños producidos por cavitación .....	95
56.	Caja especializada para reducir la cavitación .....	96
57.	Daños típicos producidos por vaporización.....	97
58.	Válvula multipasos .....	98
59.	Línea piezométrica de la válvula .....	100
60.	Factor de relación de presión de vapor .....	105
61.	Factor geométrico de la tubería .....	107
62.	Factor y Número de Reynolds.....	108
63.	Gráfica del factor de expansión Y .....	120
64.	Diagrama del factor de compresibilidad Z .....	124
65.	Firma de una válvula .....	135
66.	Empaque espiro-metálico y sello de grafito.....	136
67.	Bonete y cuerpo de la válvula. ....	137
68.	Bonete y tapón de la válvula .....	138
69.	Cuerpo y caja de la válvula .....	138
70.	Detalle de los internos de la válvula .....	139
71.	Tapón de la válvula y sus sellos.....	140
72.	Partes principales del actuador .....	141
73.	Preparación del cuerpo de la válvula .....	142
74.	Armado de los internos de la válvula.....	143
75.	Preparación del tapón .....	144
76.	Armado final de los internos de la válvula .....	145
77.	Ensamblado del bonete y el cuerpo .....	146
78.	Apriete del bonete y ensamblado del estopero .....	147
79.	Ensamblaje del diafragma y resorte del actuador .....	148
80.	Ensamblado final del actuador .....	149

81.	Montaje completo de la válvula y su actuador .....	150
-----	--	-----

## TABLAS

I.	Eficiencia del ciclo de Carnot .....	6
II.	Teorema de conservación de la energía.....	9
III.	Trabajo de turbina y de bomba .....	10
IV.	Calor de entrada y de salida .....	10
V.	Eficiencia del ciclo de Rankine ideal .....	11
VI.	Calor de entrada y de salida del ciclo Rankine recalentado .....	14
VII.	Eficiencia del ciclo Rankine recalentado.....	15
VIII.	Características de flujo y su modelo matemático.....	61
IX.	Resumen de características de las válvulas .....	77
X.	Constantes ISA para ecuaciones de dimensionamiento .....	101
XI.	Coeficiente de capacidad relativa .....	102
XII.	Factor de recuperación de presión .....	103
XIII.	Factor de la relación de la presión de vapor .....	103
XIV.	Propiedades físicas del agua .....	104
XV.	Presión en la vena contracta .....	105
XVI.	Factor geométrico de la tubería .....	106
XVII.	Pérdidas de presión por cambio de diámetro en tuberías.....	106
XVIII.	Factores de diseño para válvulas .....	109
XIX.	Diferencial de presión .....	111
XX.	Caída de presión crítica .....	111
XXI.	Gravedad específica .....	113
XXII.	Coeficiente de capacidad.....	113
XXIII.	Coeficientes de caudal típicos para válvulas de globo.....	114
XXIV.	Cálculo de pérdidas por cambio de diámetro en tuberías.....	115
XXV.	Ecuaciones para dimensionamiento en vapor .....	117

XXVI.	Constantes utilizadas en las ecuaciones de flujo de gases y vapor ...	119
XXVII.	Factor de expansión.....	121
XXVIII.	Caída de presión crítica del arreglo .....	122
XXIX.	Factor de relación del calor específico .....	123
XXX.	Temperatura y presión reducidas.....	123
XXXI.	Propiedades físicas de gases y vapores comunes .....	126
XXXII.	Guía de selección de la característica de la válvula.....	130



## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
$\Delta P$	Caída de presión
$\Delta P_{ch}$	Caída de presión crítica
$\Delta p_a$	Caída de presión permisible
$q$	Calor
$w$	Caudal másico
$cs$	Centi stoke
$C_v$	Coficiente de capacidad (sistema inglés)
$K_v$	Coficiente de capacidad (sistema internacional)
$C_d$	Coficiente de capacidad relativa
$K_{b1}$	Coficiente de pérdidas por efecto Bernoulli a la entrada
$K_{b2}$	Coficiente de pérdidas por efecto Bernoulli a la salida
$K_1$	Coficiente de pérdidas por reductor en la entrada
$K_2$	Coficiente de pérdidas por reductor a la salida
$pH$	Concentración de iones de hidrógeno
$\eta$	Eficiencia
$e_c$	Energía cinética
$e_p$	Energía potencial
$h$	Entalpía
$\chi_T$	Factor crítico de la caída de presión
$F_k$	Factor del calor específico
$Z$	Factor de compresibilidad

<b>Y</b>	Factor de expansión
<b>F<sub>L</sub></b>	Factor de recuperación de presión
<b>F<sub>F</sub></b>	Factor de la relación de la presión de vapor
<b>F<sub>R</sub></b>	Factor del número de Reynolds
<b>F<sub>P</sub></b>	Factor geométrico de la tubería
<b>gpm</b>	Galones por minuto
<b>°C</b>	Grados Centígrados
<b>°F</b>	Grados Fahrenheit
<b>G<sub>g</sub></b>	Gravedad específica para gases
<b>G<sub>f</sub></b>	Gravedad específica para líquidos
<b>Lb/ft<sup>3</sup></b>	Libra por pie cúbico
<b>Lb/h</b>	Libra por hora
<b>psi</b>	Libra por pulgada cuadrada
<b>psia</b>	Libra por pulgada cuadrada absoluto
<b>psig</b>	Libra por pulgada cuadrada manométrico
<b>MW</b>	Megavatio
<b>mA</b>	Miliamperio
<b>R<sub>ev</sub></b>	Número de Reynolds
<b>NO<sub>x</sub></b>	Óxidos de nitrógeno
<b>M</b>	Peso molecular
<b>ft<sup>3</sup>/Lb</b>	Pie cúbico por libra
<b>P<sub>1</sub></b>	Presión a la entrada
<b>P<sub>2</sub></b>	Presión a la salida
<b>P<sub>vc</sub></b>	Presión crítica de vapor
<b>P<sub>v</sub></b>	Presión de vapor
<b>P<sub>r</sub></b>	Presión reducida
<b>inch</b>	Pulgada
<b>R</b>	<i>Rankine</i>
<b>k</b>	Relación de calor específico (minúscula)

$\chi$	Relación de la caída de presión
$\Sigma K$	Sumatoria de pérdidas
$T_r$	Temperatura reducida
$W$	Trabajo
$\nu$	Viscosidad



## GLOSARIO

<b>Acuotubular</b>	Se refiere al tipo de calderas que operan con las tuberías llenas de agua.
<b>Adiabático</b>	Que no produce intercambio de calor.
<b>Analógico</b>	Tipo de señal continua, compuesta por un número infinito de estados.
<b>ANSI</b>	Instituto Nacional Estadounidense de Estándares.
<b>Atemperación</b>	Proceso en el cual se agrega agua atomizada a una línea de vapor para reducir su temperatura.
<b>Bagazo</b>	Residuo fibroso de la caña de azúcar, luego de que a esta se le ha extraído el jugo.
<b>Biocidas</b>	Productos químicos especializados en la eliminación de bacterias y otros agentes patógenos.
<b>Biomasa</b>	Cualquier residuo vegetal que se pueda utilizar como combustible.
<b>Bunker</b>	Combustible derivado del petróleo, es el más denso de los componentes del petróleo destilados a presión atmosférica.

<b>Cavitación</b>	Fenómeno que se produce en fluidos al implosionar las burbujas de vapor mientras se mueven de una región de baja presión hacia una región de alta presión.
<b>Cogeneración</b>	Nombre que recibe cualquier tipo de generación de energía eléctrica en plantas térmicas que utiliza combustible derivado de la biomasa que resulta de otros procesos.
<b>Digital</b>	Tipo de señal eléctrica formada por estados finitos y discretos.
<b>Efecto Coriolis</b>	Movimiento aparente de un objeto debido a que su sistema de referencia se encuentra en rotación con respecto a otro sistema de referencia fijo.
<b>Efecto Venturi</b>	Consiste en la variación de presión inversamente proporcional a la variación de velocidad de un fluido al sufrir cambios de sección en el conducto.
<b>Entalpía</b>	Es una magnitud termodinámica, cuya variación expresa una medida de la cantidad de energía absorbida o cedida por un sistema.

<b>Entropía</b>	Es una magnitud física que permite determinar la parte de energía que no puede utilizarse para realizar trabajo. Es un indicador de la dirección en la cual se llevan a cabo los procesos en la naturaleza.
<b>Espiro-metálico</b>	Tipo de empaque para tuberías y otras juntas, fabricado con distintos aleaciones de metales y dispuesto en espiral hasta formar un disco.
<b>Estopero</b>	Consiste en un anillo metálico que ejerce presión sobre la empaquetadura de teflón en forma de anillos que se utiliza para evitar que la válvula fugue hacia el exterior.
<b>Floculante</b>	Es una sustancia química que aglutina sólidos en suspensión, lo que provoca su precipitación.
<b>Fuelle</b>	Consiste en una estructura formada de paredes plegables o flexibles que se expande al llenarse de aire y se contrae al expulsarlo.
<b>Gasket</b>	Es un tipo de empaquetadura mecánica que se utiliza para llenar el espacio entre dos o más superficies que encajan, se utiliza para evitar fugas mientras se encuentre en compresión.
<b>Hart</b>	Protocolo de comunicación industrial que envía información modulada utilizando como portadora la señal de 4 a 20 miliamperios.

<b>Hidrocarburo</b>	Compuestos orgánicos formados únicamente por átomos de carbono e hidrogeno.
<b>I/P</b>	Convertidor de corriente a presión.
<b>ISA</b>	Sociedad Internacional de Automatización.
<b>Isobárico</b>	Proceso que se lleva a cabo a presión constante.
<b>Isoentrópico</b>	Proceso que se lleva a cabo a entropía constante.
<b>Isotérmico</b>	Proceso que se lleva a cabo a temperatura constante
<b>Manómetro</b>	Instrumento que se utiliza para medir presión.
<b>ModBus</b>	Protocolo de comunicación industrial basado en la arquitectura maestro/esclavo, desarrollado por Modicon para comunicar sus controladores lógicos programables.
<b>Omar Vega</b>	Marca de equipo de medición e instrumentación.
<b>pH</b>	Es una medida de la acidez o alcalinidad de una disolución. El pH indica la concentración de los iones hidronio $H_3O^+$ presentes en determinadas soluciones.
<b>PID</b>	Algoritmo de control proporcional, integral y derivativo.

<b>Piezométrico</b>	Relativo a la presión, que cambia alguna de sus cualidades físicas en función de la presión.
<b>Pirotubular</b>	Tipo de caldera que en el interior de sus tuberías conduce gases de combustión.
<b>PLC</b>	Controlador Lógico Programable.
<b>ProfiBus</b>	Estándar de comunicación para bus de campo. Deriva de las palabras <i>PRO</i> cess <i>Field</i> <i>BUS</i> .
<b>PTFE</b>	Politetrafluoroetileno, más conocido como teflón. Es un polímero similar al polietileno en el que los átomos de hidrogeno se sustituyen por átomos de flúor
<b>Rangeabilidad</b>	Relación entre el valor máximo y el valor mínimo de flujo controlable en una válvula.
<b>Setpoint</b>	Punto de consigna de un lazo de control. Valor que debe de mantener el controlador en un proceso.
<b>Siemens</b>	Empresa multinacional de origen alemán que opera en los sectores industrial, energético, salud e infraestructuras.
<b>Span</b>	Diferencia entre el valor máximo y mínimo de una medición.

<b><i>Superheater</i></b>	Equipo utilizado en una caldera para elevar la temperatura del vapor saturado hasta llevarlo al estado de vapor sobrecalentado.
<b><i>Trim</i></b>	Se refiere a los internos de la válvula, lo que incluye principalmente, el asiento, la caja y el tapón de la misma.
<b>Vena contracta</b>	Es la sección de menor diámetro del fluido que circula por una tubería con restricciones, la vena contracta se forma en el elemento de estrangulación u otro tipo de obstrucción donde el fluido transforma su energía de presión en energía de velocidad, cumpliendo así con la conservación de la energía.

## RESUMEN

El presente trabajo de graduación está orientado al estudio de las válvulas como un elemento final de control de suma importancia para el funcionamiento global de los diferentes lazos y sistemas de control instalados en las calderas acuotubulares. Estos dispositivos, además de influir en la eficiencia del lazo de control, representan algunos de los costos más elevados en la línea de proceso y, por lo tanto, es importante evitar el sobredimensionamiento o la elección inadecuada de la válvula, asegurando que su acción en el lazo de control sea la esperada.

En el capítulo uno, se describen las leyes fundamentales de la termodinámica que rigen el comportamiento de los ciclos de vapor, se estudian las variaciones del ciclo de Rankine y se compara con el funcionamiento de una planta térmica real. Asimismo, se hace un estudio detallado de las calderas, sus componentes y la función que tiene cada uno de los mismos en el proceso de producción de vapor.

En el capítulo dos se hace hincapié en la importancia de la medición y la adquisición de datos para su posterior procesamiento o para el estudio del comportamiento de las variables en función del tiempo. Se detallan las mediciones más importantes en las calderas y se describen los métodos comunes utilizados en la industria para realizar cada una de las mismas. La necesidad de la medición radica en su importancia para lograr un control adecuado del proceso y asegurar que los sistemas de control funcionen tal como han sido diseñados.

El capítulo tres está dedicado a la descripción de los tipos de válvulas, se estudian sus diseños, características y aplicaciones, de tal forma que se pueda elegir la válvula adecuada para cada etapa del proceso. Se estudia la importancia de la válvula en el lazo de control. Además, se presentan los accesorios y otros componentes necesarios para que la válvula de control opere de forma automática, asegurando su respuesta adecuada a los cambios solicitados por los controladores.

El capítulo cuatro está orientado al proceso analítico que se debe llevar a cabo para dimensionar adecuadamente la válvula de control para cada proceso específico. Esto es importante debido a que una mínima diferencia en tamaños de las válvulas puede conllevar una diferencia muy elevada en el costo de las mismas. Es importante tomar en consideración las recomendaciones de los fabricantes, la experiencia adquirida en procesos similares y las condiciones que prevalecen en el proceso en cuestión para así realizar la elección más acertada de la válvula de control.

# OBJETIVOS

## General

Establecer los lineamientos y criterios necesarios para llevar a cabo la selección y dimensionamiento de las válvulas de control, buscando asegurar un desempeño adecuado en los lazos de control que operan en las calderas utilizadas en plantas termoeléctricas.

## Específicos

1. Estudiar los fundamentos de operación y conocer las partes que componen las calderas acuotubulares.
2. Conocer las variables de proceso importantes y los elementos finales de control necesarios para la operación automática de las calderas acuotubulares.
3. Profundizar en el estudio de las válvulas, sus características, variedades, aplicaciones y las variables que impactan en su desempeño.
4. Conocer las consideraciones necesarias para la elección y dimensionamiento de una válvula de control, así como describir las herramientas para el diagnóstico y mantenimiento preventivo de las válvulas de control.



## INTRODUCCIÓN

El desempeño adecuado de las calderas depende de los sistemas de medición, los controladores y los elementos finales de control. Es común que, en la práctica, la mayor parte de la atención se preste a los instrumentos de medición y a los controladores, dejando por un lado la importancia de las válvulas de control para la operatividad de los procesos. Sin embargo, desde el punto de vista operativo, las válvulas inciden directamente y en un gran porcentaje en el funcionamiento adecuado de los lazos de control.

La válvula es un elemento de proceso de diseño relativamente sencillo, ya que su función consiste únicamente en detener, permitir o regular el paso de un fluido. No obstante, a pesar de su simplicidad, requieren de mayor atención en el proceso, ya que al tratarse de un elemento dinámico, se encuentra sometida a esfuerzos hidrodinámicos y de corrosión originados por los fluidos que circulan a través de ella, además de las fuerzas de compresión del actuador sobre los internos, estas fuerzas en conjunto hacen que este elemento sea vulnerable.

Para satisfacer el gran número de requerimientos específicos que resultan de la variedad de procesos que se controlan en una planta de cogeneración, y en la industria en general, los fabricantes de válvulas han puesto a la disposición de los ingenieros de proceso varias opciones para cada situación. Además de los diseños, existen distintos tipos de materiales para soportar altas y bajas temperaturas, corrosión, cavitación, etcétera. Asimismo, se cuenta con distintas tecnologías para empaquetaduras y sellos mecánicos.

Las válvulas de globo, generalmente, se fabrican para la aplicación específica en la cual se van a utilizar. Por eso es importante conocer el proceso para hacer el dimensionamiento correcto, dado que los tiempos de entrega para cada pedido de válvulas son aproximadamente entre 8 y 12 semanas, dependiendo de la disponibilidad de la fábrica. Esta exclusividad de diseño y fabricación es, en parte, responsable de los costos elevados de estos dispositivos. Asimismo, la utilización de materiales especializados incide en sus costos; sin embargo, de la elección adecuada de la válvula y de sus materiales dependerá la fiabilidad y la continuidad del proceso de producción.

A pesar de que la válvula de globo en sus distintas presentaciones se considera como la válvula de control por excelencia, la tecnología actual de actuadores y posicionadores inteligentes, así como la tecnología en el maquinado del elemento de estrangulación, permite el uso de casi cualquier tipo de válvula para efectuar control. Sin embargo debe quedar claro que dependiendo de lo crítico del proceso y la fineza que se requiera en el control, se debe considerar en qué situaciones es posible utilizar una válvula de mariposa, una de bola o una de globo entre otras, dependiendo de su rangeabilidad y de su coeficiente de capacidad.

# **1. GENERALIDADES DE LAS CALDERAS Y CIRCUITOS DE VAPOR**

Las calderas son máquinas térmicas ampliamente utilizadas en la industria para la generación de vapor, es posible encontrarlas en la industria alimenticia, textil y hospitalaria, principalmente. Conforman la piedra angular en los sistemas de generación de energía eléctrica en plantas térmicas y de cogeneración.

## **1.1. Principios básicos de termodinámica**

La forma en que los objetos interactúan entre sí o con su entorno, ocurre debido a los campos energéticos y las distintas formas de transporte y transformación de energía. Todo proceso se encuentra asociado de forma inherente a una emisión o absorción de energía.

### **1.1.1. ¿Qué es la termodinámica?**

Es la rama de la física que estudia los cambios y procesos que ocurren en la materia y su entorno, debido a la absorción, emisión y transformación de todas las formas de energía a nivel macroscópico, describiendo los estados de equilibrio de la materia, auxiliándose, para ello, de magnitudes extensivas, como la energía interna, la entropía, el volumen, asimismo, se auxilia de magnitudes no extensivas, entre las que se encuentran la temperatura, la presión, la densidad.

### **1.1.2. Primera ley de la termodinámica**

Establece que teniendo un sistema perfectamente aislado, independientemente de las interacciones y/o transformaciones de energía que puedan darse dentro del sistema, la cantidad total de energía contenida en el sistema se mantiene constante, es decir la energía no puede crearse ni destruirse.

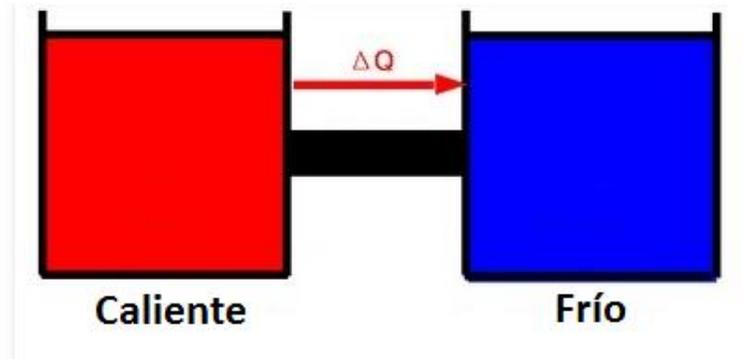
Si el sistema interactúa con su entorno, la cantidad de energía contenida en el sistema es igual a la diferencia entre la energía que ingresa al sistema y la energía que sale del sistema, es decir:

$$\text{Energía del sistema} = \text{energía de entrada} - \text{energía de salida}$$

### **1.1.3. Segunda ley de la termodinámica**

Los procesos que ocurren en la naturaleza, ocurren en una dirección específica. Intuitivamente y utilizando el sentido común se observa que existen procesos que no pueden ocurrir en dirección contraria a lo que la experiencia diaria predice. Para ilustrar esto, se analiza el caso de dos objetos a distinta temperatura colocados uno junto al otro (figura 1), uno de ellos con una temperatura alta y el otro a temperatura ambiente, es de esperar que el objeto caliente disminuya su temperatura y que el objeto frío aumente proporcionalmente su temperatura (existe transferencia de energía de un objeto a otro). Sin embargo, sería imposible observar que el objeto más frío se vuelva más frío mientras el objeto de mayor temperatura se vuelva más caliente, aun cuando eso no contradice la ley de conservación de la energía.

Figura 1. **Transferencia de calor entre dos objetos**



Fuente: [www.grc.nasa.gov](http://www.grc.nasa.gov). Consulta: noviembre de 2015

La primera ley de la termodinámica establece que la energía se conserva; sin embargo, nunca limita la dirección en la cual se dan los intercambios de energía. La segunda ley de la termodinámica, por otro lado, ayuda a establecer la dirección en la cual se produce el intercambio de energía. Para ello, utiliza el concepto de entropía, la cual es una medida del grado de desorden molecular de un sistema. Se utiliza para describir la dirección en la cual se llevan a cabo los procesos de intercambio de energía, asimismo, para establecer si el proceso es reversible o irreversible.

En todo proceso natural, la entropía del sistema va en aumento y, por consiguiente, el proceso es inherentemente irreversible, para su análisis. Sin embargo, se idealizan los procesos y se desprecian todas las pérdidas, esto hace posible considerar ciertos procesos como reversibles. En este caso, la entropía inicial del sistema es exactamente igual a la entropía final, es decir:

$$\Delta S = 0$$

Todas las máquinas térmicas se idealizan para considerar sus procesos asociados como reversibles, en situaciones reales es necesario agregar energía extra al sistema para compensar las pérdidas de trabajo y energía por fricción, transferencia de calor y en todo caso el aumento de la entropía.

## **1.2. Ciclo termodinámico**

Es un sistema que ejecuta de forma ordenada y consistente una serie de procesos termodinámicos, de tal forma que al ejecutar todos estos procesos vuelve a su estado inicial. Es decir que la variación neta de las magnitudes termodinámicas propias del sistema es nula, incluyendo a la entropía.

La importancia de los ciclos termodinámicos radica en su uso para aportar trabajo, ya sea en forma de energía o en forma de calor. En el caso de un motor de combustión interna, por ejemplo, se extrae energía mecánica de una fuente de calor. De forma complementaria, se utiliza una bomba de calor para extraer energía de un sistema y expulsarlo al ambiente, como en el caso de un refrigerador.

En un ciclo termodinámico debe existir un fluido de trabajo, el cual puede ser un gas o un líquido. El fluido de trabajo es el medio por el cual se realiza el transporte de la energía térmica.

Los ciclos termodinámicos importantes para el análisis de la operación de una caldera son los siguientes:

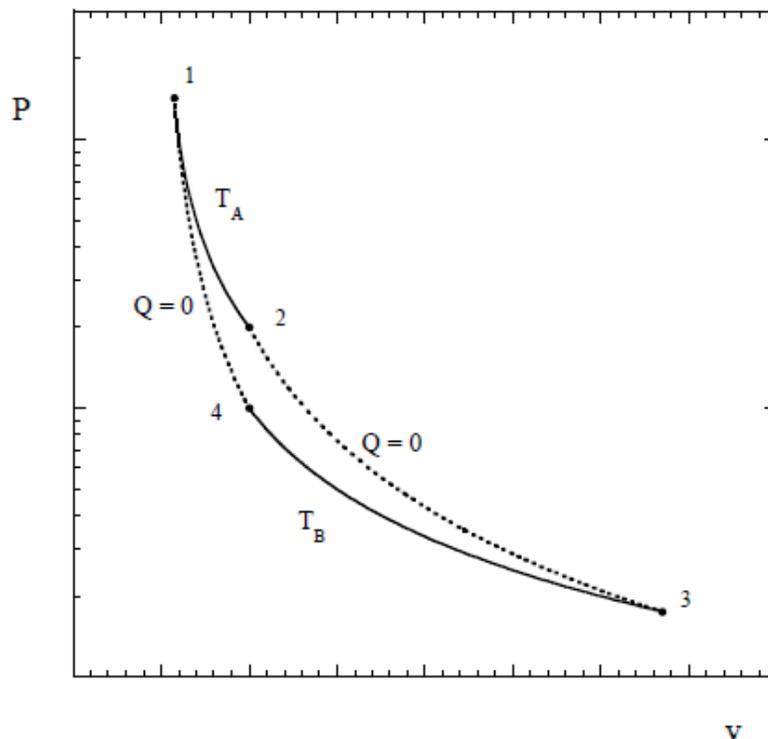
- Ciclo de Carnot
- Ciclo de Rankine

El ciclo de Carnot es fundamental para el estudio de las máquinas térmicas y el ciclo de Rankine es un ciclo térmico que utiliza agua como fluido de trabajo, por lo que resulta de interés para el análisis de los sistemas de generación de vapor.

### 1.2.1. Ciclo de Carnot

Es el ciclo termodinámico más sencillo posible (figura 2) que, en teoría, es capaz de accionar una máquina térmica. Este ciclo tiene la particularidad de que cada uno de sus procesos es reversible.

Figura 2. **Ciclo de Carnot de un gas ideal**



Fuente: MÜLLER, Erich A. *Termodinámica Básica*. p. 233.

En la figura 2 se observa el diagrama presión-volumen del ciclo de Carnot, el cual se encuentra formado por los siguientes cuatro procesos:

- 1 – 2      Expansión isotérmica a alta temperatura.
- 2 – 3      Expansión adiabática
- 3 – 4      Compresión isotérmica a baja temperatura
- 4 – 1      Compresión adiabática

Cada uno de los puntos en la figura 2 representan un estado termodinámico y cada estado se pueden describir por sus propiedades extensivas y no extensivas. Se denomina proceso al cambio de las propiedades del fluido de trabajo entre un estado y otro. La eficiencia del ciclo de Carnot para un gas ideal está dada de la siguiente forma:

Tabla I.      **Eficiencia del ciclo de Carnot**

Ecuación	Variable	Descripción
$\eta = 1 - \frac{T_B}{T_A}$	$T_A$	Temperatura del foco caliente
	$T_B$	Temperatura del foco frío
	$\eta$	Eficiencia del ciclo

Fuente: elaboración propia.

En donde  $T_A$  es la temperatura de la fuente de alta temperatura (foco caliente) y  $T_B$  es la temperatura de la fuente de baja temperatura (foco frío), que son las dos fuentes de calor necesarias entre las cuales debe operar una máquina térmica.

Así como en el ciclo de Carnot, en todos los ciclos termodinámicos la eficiencia de los mismos se encuentra limitado por las fuentes de calor entre las cuales opera la maquina térmica y estas se encuentran asociadas a las limitaciones de los materiales y los procesos involucrados

### 1.2.2. Ciclo de Rankine ideal

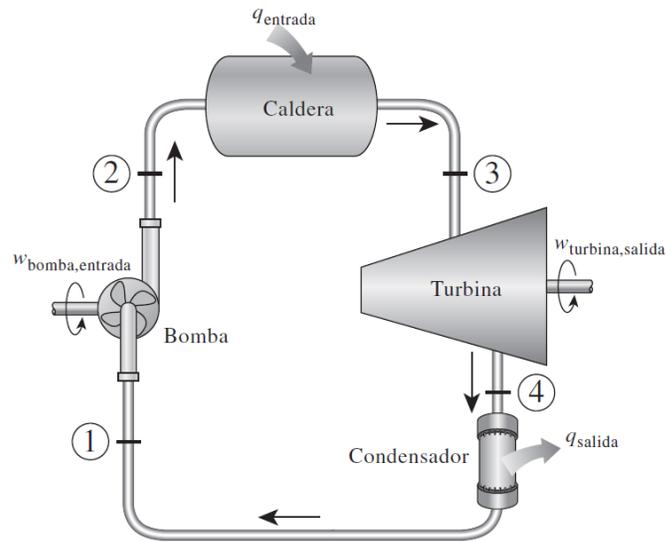
Es un ciclo termodinámico que utiliza agua como fluido de trabajo. Su objetivo principal es la conversión de calor en trabajo mecánico. Este ciclo está compuesto por los cuatro procesos siguientes:

- 1 – 2 Compresión isoentrópica en una bomba
- 2 – 3 Adición de calor isobárica en una caldera
- 3 – 4 Expansión isoentrópica en una turbina
- 4 – 1 Rechazo de calor isobárico en un condensador

La figura 3 ilustra un diagrama de máquinas dentro de las cuales ocurre cada uno de los procesos descritos en el párrafo anterior. En la figura 4 se presenta el diagrama entropía *versus* temperatura del ciclo de Rankine ideal, donde se observan las líneas de presión constante  $P_1$  y  $P_2$  en color azul, siendo  $P_1$  la presión de trabajo de la caldera (presión en el domo) y  $P_2$  la presión en el condensador.

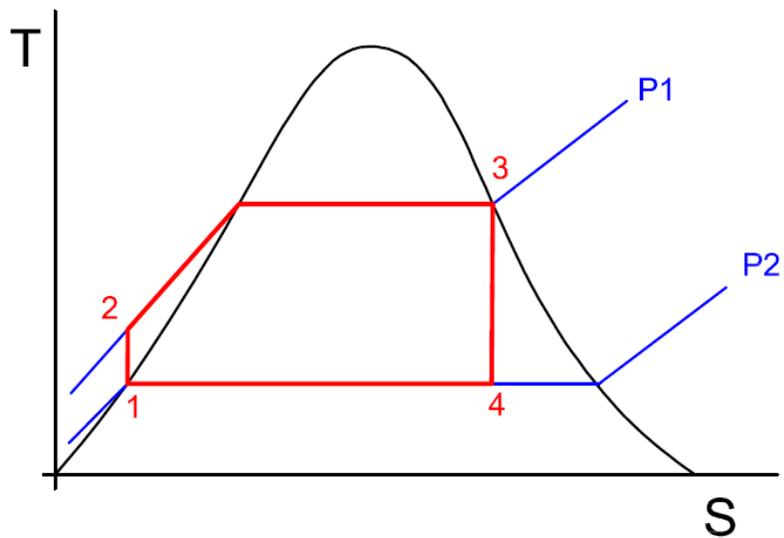
La trayectoria del ciclo sobre la cual ocurren los cambios de fase entre cada uno de los estados se muestra en color rojo en el diagrama temperatura-entropía de la figura 4. Estos cambios son unidireccionales y en el sentido de las agujas del reloj, evolucionan desde el estado 1, pasan por los estados del 2 al 4 y regresando al estado 1.

Figura 3. Diagrama de máquinas de un ciclo de vapor



Fuente: CENGEL, Yunus A. *Termodinámica*. p. 564.

Figura 4. Ciclo de Rankine ideal



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2014.

En el diagrama de la figura 4, entre el estado 1 y 2, la bomba eleva la presión del agua desde la presión del condensador P2 hasta llegar a la presión de trabajo de la caldera P1. Este proceso se lleva a cabo con suficiente rapidez como para considerar que el valor de la entropía es constante. Del estado 2 al 3, la caldera adiciona energía al agua en forma de calor, este proceso se realiza a la presión constante P1 hasta que el agua se convierte en vapor saturado. Esto ocurre debido a que al alcanzar la temperatura de saturación (a la presión de trabajo de la caldera), toda la energía que se adiciona al agua se utiliza para generar el cambio de fase de líquido a vapor.

Entre los estados 3 y 4, el vapor se expande en la turbina, transformando su energía cinética en energía mecánica. Este proceso sucede lo suficientemente rápido como para considerarse un proceso de entropía constante. Y entre los estados 4 y 1, se rechaza el calor en un condensador para llevar el agua hasta el estado de líquido saturado. Este proceso se lleva a cabo a una presión constante. Para determinar la energía asociada a cada uno de los procesos, se usa la siguiente ecuación, la cual se deriva del teorema de la conservación de la energía.

Tabla II. **Teorema de conservación de la energía**

Ecuación	Variable	Descripción
$q + W = \Delta h + \Delta e_c + \Delta e_p$	<b>q</b>	Calor
	<b>W</b>	Trabajo
	<b><math>\Delta h</math></b>	Cambio de entalpía
	<b><math>\Delta e_c</math></b>	Cambio de energía cinética
	<b><math>\Delta e_p</math></b>	Cambio de energía potencial

Fuente: elaboración propia.

Se define el trabajo de la bomba y el trabajo de la turbina en función de las entalpías de la siguiente forma:

Tabla III. Trabajo de turbina y de bomba

Ecuación	Variable	Descripción
$W_B = h_2 - h_1$ $W_T = h_3 - h_4$	$W_B$	Trabajo de la bomba
	$W_T$	Trabajo de la turbina
	$h_1$	Entalpía del estado 1
	$h_2$	Entalpía del estado 2
	$h_3$	Entalpía del estado 3
	$h_4$	Entalpía del estado 4

Fuente: elaboración propia.

De igual manera, el calor de entrada y el calor de salida del ciclo también se pueden definir en función de las entalpías:

Tabla IV. Calor de entrada y de salida

Ecuación	Variable	Descripción
$q_{in} = h_3 - h_2$ $q_{out} = h_4 - h_1$	$q_{in}$	Calor de entrada
	$q_{out}$	Calor de salida
	$h_1$	Entalpía del estado 1
	$h_2$	Entalpía del estado 2
	$h_3$	Entalpía del estado 3
	$h_4$	Entalpía del estado 4

Fuente: elaboración propia.

Despreciando la energía cinética y la energía potencial dado que sus magnitudes son mucho menores a las entalpías. La eficiencia o rendimiento térmico del ciclo de Rankine ideal se da de la siguiente forma:

Tabla V. **Eficiencia del ciclo de Rankine ideal**

Ecuación	Variable	Descripción
$\eta = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2}$	$\eta$	Eficiencia
	$q_{in}$	Calor de entrada
	$q_{out}$	Calor de salida
	$h_1$	Entalpía del estado 1
	$h_2$	Entalpía del estado 2
	$h_3$	Entalpía del estado 3
	$h_4$	Entalpía del estado 4

Fuente: elaboración propia.

Se observa que, igual que en el ciclo de Carnot, la eficiencia de la máquina térmica siempre depende de las fuentes de calor o sumideros de calor dentro de los cuales opera la máquina. Esto permite que pueda elevarse la eficiencia de la máquina aumentando la diferencia entre las temperaturas del foco frío y el foco caliente hasta los límites físicos y químicos permitidos por el proceso y los materiales.

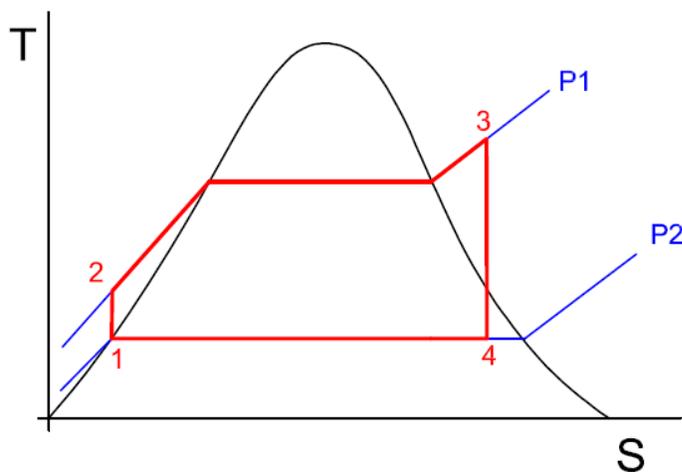
### 1.2.3. Ciclo de Rankine sobrecalentado

El ciclo de Rankine simple, ilustrado en la figura 4, solamente es capaz de llevar el vapor de agua hasta la fase de vapor saturado. Para elevar la eficiencia del ciclo es necesario utilizar un sobrecalentador para aumentar la temperatura del vapor y, por consiguiente, la entalpía del mismo.

En las calderas acuatubulares, el sobrecalentador está conformado por un arreglo de tubos de proceso en forma de serpentín que se coloca en la salida de los gases de combustión del hogar de la caldera. Su función es aumentar la temperatura del vapor aprovechando el calor de los gases de combustión.

La figura 5 ilustra el diagrama temperatura-entropía del ciclo de Rankine sobrecalentado. Se observa, que el aumento de temperatura, en comparación con el ciclo de Rankine ideal, logra aumentar la eficiencia del ciclo ya que se aumenta la diferencia entre las entropías de los estados 3 y 4.

Figura 5. **Ciclo de Rankine sobrecalentado**

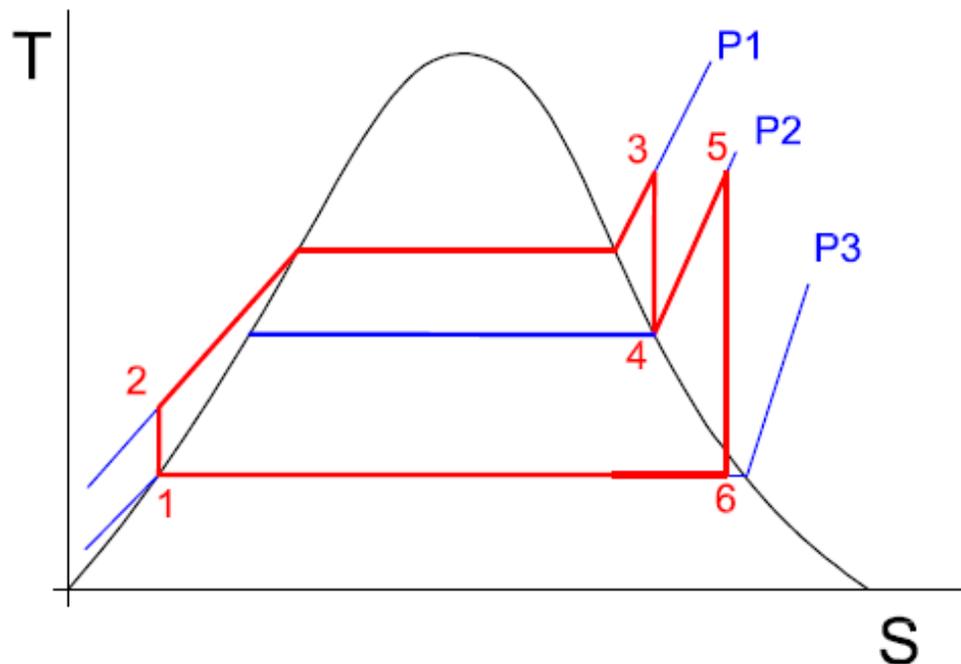


Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2014.

#### 1.2.4. **Ciclo de Rankine recalentado**

Este ciclo, representado en la figura 6 por su diagrama temperatura-entropía, requiere de una extracción de vapor de la turbina para aumentar el rendimiento. El vapor se extrae a una presión intermedia (P2). La extracción se recalienta para aumentar la entalpía y por consiguiente la eficiencia del ciclo.

Figura 6. **Ciclo de Rankine recalentado**

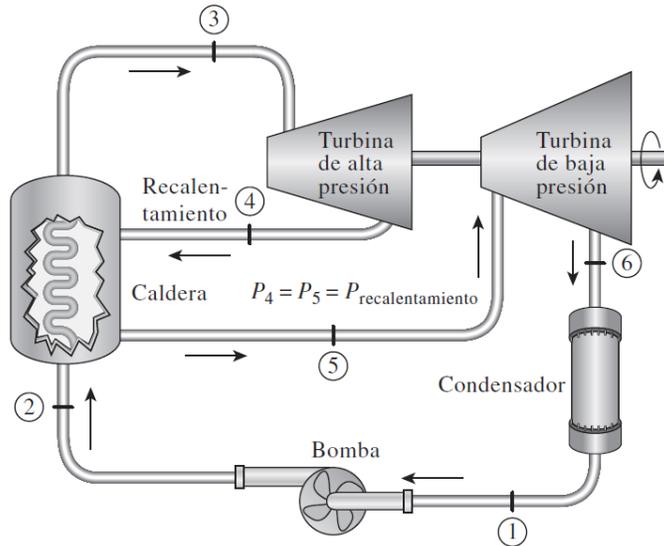


Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2014.

En la figura 7 se aprecia el diagrama de máquinas del ciclo de Rankine recalentado. Se muestra la turbina seccionada, una parte de la turbina aprovecha el vapor de alta presión y la otra parte el vapor recalentado de la extracción. En este ciclo, ocurren los siguientes procesos:

- 1 – 2      Compresión isentrópica en la bomba
- 2 – 3      Adición de calor isobárica en una caldera
- 3 – 4      Primera etapa de expansión en la turbina
- 4 – 5      Adición de energía al vapor por recalentamiento
- 5 – 6      Segunda etapa de expansión en la turbina
- 6 – 1      Rechazo isobárico de calor en el condensador

Figura 7. **Diagrama de máquinas del ciclo de Rankine con recalentamiento**



Fuente: CENGEL, Yunus A. *Termodinámica*. p. 573.

Para calcular la eficiencia del ciclo Rankine recalentado se debe obtener primero el calor de entrada y el de salida de la siguiente forma:

Tabla VI. **Calor de entrada y de salida del ciclo Rankine recalentado**

Ecuación	Variable	Descripción
$q_{in} = q_{primario} + q_{recalentamiento}$ $q_{in} = (h_3 - h_2) + (h_5 - h_4)$ $q_{out} = (h_6 - h_1)$	<b>q</b>	Calor
	<b>q<sub>in</sub></b>	Calor de entrada
	<b>q<sub>out</sub></b>	Calor de salida
	<b>h<sub>1</sub></b>	Entalpía del estado 1
	<b>h<sub>2</sub></b>	Entalpía del estado 2
	<b>h<sub>3</sub></b>	Entalpía del estado 3
	<b>h<sub>4</sub></b>	Entalpía del estado 4
	<b>h<sub>5</sub></b>	Entalpía del estado 5
<b>h<sub>6</sub></b>	Entalpía del estado 6	

Fuente: elaboración propia.

En donde el calor primario representa el calor transformado en trabajo en la primera etapa del turbogenerador y el calor de recalentamiento se refiere al calor obtenido del vapor recalentado.

El vapor que se obtiene de la extracción es vapor que ya ha realizado trabajo mecánico en la turbina y se ha expandido hasta una presión  $P_2$ . Este vapor se recalienta isobáricamente hasta alcanzar de nuevo el estado de vapor sobrecalentado. En estas condiciones se regresa a la turbina para generar más trabajo y mejorar la eficiencia del ciclo. La eficiencia térmica del ciclo en función de las entalpías se encuentra dada por la expresión:

Tabla VII. **Eficiencia del ciclo Rankine recalentado**

Ecuación	Variable	Descripción
$\eta = 1 - \frac{(h_6 - h_1)}{(h_3 - h_2) + (h_5 - h_4)}$	$\eta$	Eficiencia
	$h_1$	Entalpía del estado 1
	$h_2$	Entalpía del estado 2
	$h_3$	Entalpía del estado 3
	$h_4$	Entalpía del estado 4
	$h_5$	Entalpía del estado 5
	$h_6$	Entalpía del estado 6

Fuente: elaboración propia.

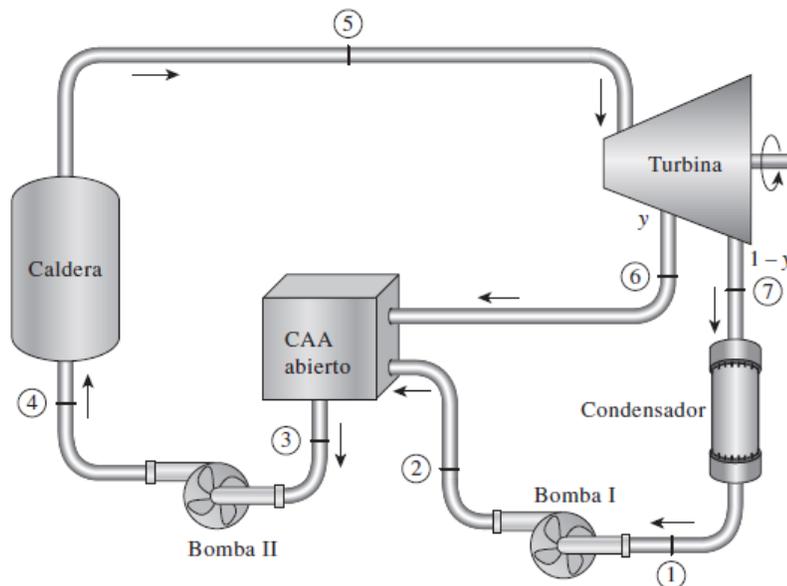
### 1.2.5. Ciclo de Rankine regenerativo

Es posible mejorar la eficiencia del ciclo de Rankine sobrecalentado, elevando la temperatura del agua de alimentación de la caldera, de tal forma que, al ingresar el agua al domo, requiere de menos energía para elevar su temperatura hasta la temperatura de saturación

La regeneración es el proceso en el cual se utiliza vapor de escape de la turbina para calentar el agua de alimentación de la caldera, antes de que esta alcance el domo.

El proceso de regeneración se lleva a cabo en los calentadores. Existen dos tipos de calentadores, a) los calentadores abiertos y b) los calentadores cerrados. En la figura 8 se aprecia el diagrama de máquinas del ciclo regenerativo con calentador abierto.

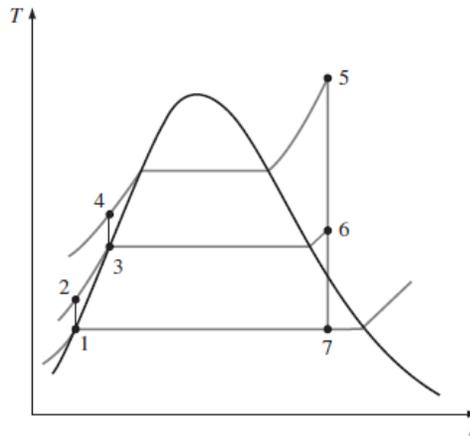
Figura 8. **Diagrama de máquinas de un ciclo regenerativo con calentador abierto**



Fuente: CENGEL, Yunus A. *Termodinámica*. p. 577.

En la figura 9 se observa el diagrama temperatura *versus* entropía del ciclo Rankine regenerativo con calentador abierto.

Figura 9. **Diagrama T-S de un ciclo Rankine regenerativo**



Fuente: CENGEL, Yunus A. *Termodinámica*. p. 577.

- El calentador abierto consiste en una cámara de mezcla, dentro de la cual el vapor de baja energía extraído de la turbina se mezcla con el agua de alimentación que sale de la bomba. Idealmente, la mezcla sale del calentador como líquido saturado a la presión del calentador.

Es necesario que ambos fluidos se encuentren a la misma presión al entrar a la cámara de mezcla. Esto implica utilizar una bomba para elevar la presión del agua de alimentación hasta la presión del vapor de escape y otra bomba para que eleve la presión de salida del calentador abierto hasta la presión de trabajo de la caldera.

- Calentadores cerrados: a diferencia de un calentador abierto, en este tipo de calentadores, los fluidos no tienen contacto directo, es decir la transferencia de calor se hace a través de la pared de la tubería o las placas que contienen al líquido. Es necesario que exista una superficie de transferencia lo suficientemente grande para hacer eficiente la transferencia de calor.

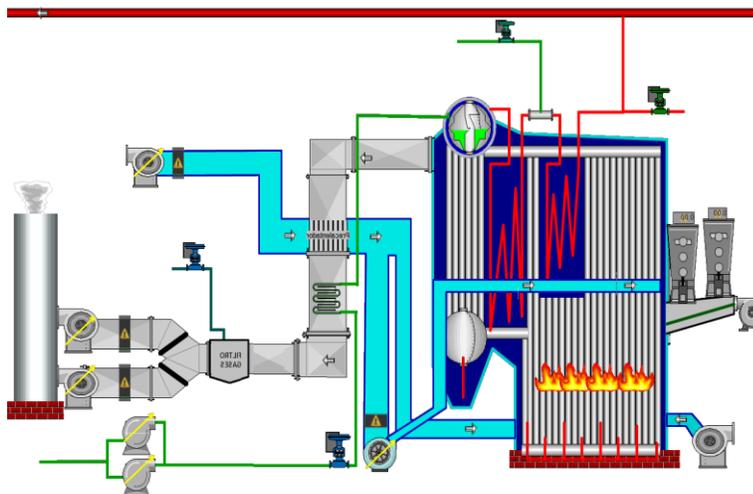
La ventaja de los calentadores cerrados radica en que no es necesario que ambos fluidos se encuentren a la misma presión, por lo que se puede utilizar una sola bomba para elevar la presión del agua de alimentación hasta la presión de trabajo de la caldera.

### 1.3. Tipos de calderas y sistemas auxiliares

Las calderas son máquinas térmicas que transforman agua en vapor saturado o sobrecalentado, dependiendo de las necesidades de la aplicación. Para ello, se utiliza la energía calorífica que proporciona la biomasa y los hidrocarburos y otras fuentes de energía.

En la figura 10 se observa la representación de una caldera en un SCADA, desde donde se monitorea y opera. Las calderas se dividen principalmente en pirotubulares y acuotubulares. La diferencia principal entre ambos tipos de caldera es el lugar donde se lleva a cabo la combustión.

Figura 10. Representación de una caldera en un SCADA



Fuente: elaboración propia, empleando Siemens WinCC.

### 1.3.1. Calderas pirotubulares

Se trata de calderas que trabajan a bajas presiones. Generalmente, se utilizan en la industria textil, de alimentos y hospitales. Se caracterizan principalmente porque la combustión se lleva a cabo en el interior de tuberías dispuestas para este fin en quemadores especiales.

Un arreglo de tuberías se sumerge completamente en agua, que hace la función de fluido de trabajo. La alta temperatura de los gases de combustión se transfiere al agua para producir vapor de baja presión. En la figura 11 se muestra el detalle de una caldera pirotubular.

Figura 11. **Caldera pirotubular y detalle de su configuración interna**



Fuente: <http://moblog.whmsoft.net/>. Consulta: abril de 2015.

### **1.3.2. Calderas acuotubulares**

Estas calderas trabajan a altas presiones y altas temperaturas, su uso se limita a la producción de vapor para la generación de energía eléctrica en plantas térmicas, debido a que, para su operación, necesitan grandes estructuras y consumen cantidades importantes de combustible.

En las calderas acuotubulares el combustible se quema en una parte de la estructura denominada hogar y el agua se evapora en tuberías que se encuentran distribuidas alrededor del hogar de la caldera.

Este tipo de calderas son populares en las plantas térmicas y de cogeneración. Son capaces de quemar una variedad de combustibles (dependiendo de su diseño). En las plantas de cogeneración las calderas se encuentran optimizadas para trabajar con biomásas, como el bagazo de caña, rastrojo o chip de madera. En las plantas térmicas en general, se utiliza carbón mineral y búnker para alimentar las calderas. Sin embargo, también es común el uso de diésel y gas licuado de petróleo o biogás.

En la industria azucarera y minera guatemalteca, las calderas acuotubulares trabajan con presiones superiores a las 400 libras por pulgada cuadrada, llegan hasta las 1500 libras por pulgada cuadrada, dependiendo de la potencia de los turbogeneradores asociados al sistema.

Según datos observados en calderas de manufactura hindú instaladas en distintos ingenios azucareros. Con una caldera de 1500 libras por pulgada cuadrada de presión y 220 toneladas/hora de producción de vapor se opera un turbogenerador capaz de producir 60 megavatios hora.

### **1.3.3. Colector de vapor**

Es el equipo en el cual convergen dos o más entradas de vapor o de donde se extraen dos o más líneas de vapor. Lo común es encontrarse con colectores donde convergen varias calderas de baja capacidad de producción, que en conjunto son capaces de alimentar un turbogenerador de alta capacidad.

En plantas de cogeneración donde se requiere del uso de vapor para los procesos propios de la fábrica. En general donde se encuentren asociados dos o más calderas y/o dos o más turbogeneradores, es necesario usar cabezales de vapor para la distribución del mismo en toda la planta.

En algunos casos, es necesario contar con cabezales de diferentes presiones cuando lo requieren los procesos de la fábrica o si la turbina está diseñada para trabajar con extracciones de vapor. El nexo entre un cabezal de vapor de alta presión con un cabezal de baja presión se realiza a través de una válvula reguladora, en esta aplicación a la válvula se le denomina válvula de relleno de vapor.

### **1.3.4. Trampas de vapor**

En los circuitos de vapor asociados a turbogeneradores es importante que el fluido de trabajo sea vapor seco sobrecalentado, ya que cualquier cantidad de condensado presente en el cabezal, por mínimo que sea, es capaz de dañar los componentes de la turbina. Sin embargo, es inevitable que el vapor, mientras fluye a través de las tuberías, pierda energía y condense, generando un peligro potencial de arrastre de condensado hacia la turbina.

Las trampas de vapor son un tipo de válvula automática que filtra el condensado y los gases no condensables de los cabezales de vapor. Estas válvulas deben ser capaces de realizar esta función de tal forma que se pierda la menor cantidad de vapor posible. Si las válvulas son solamente mecánicas, trabajarán en función de la temperatura (el agua condensada disminuye su temperatura al permanecer estancada) o en función de la presión del agua acumulada realizan la apertura del escape de condensado.

En plantas automatizadas, las válvulas se configuran para abrir en intervalos de tiempo predefinidos y así liberar el condensado acumulado en sus reservorios o pueden asociarse a algún lazo de control, monitoreando el fluido de trabajo para eliminar de forma eficiente el condensado.

### **1.3.5. Torres de enfriamiento**

Son equipos que se utilizan en plantas térmicas para refrigerar agua y rechazar el calor a la atmosfera. Este rechazo de calor incide directamente en la eficiencia del ciclo termodinámico de las plantas y su estructura esta diseñadas para producir un flujo de aire de abajo hacia arriba, el cual se mueve en oposición con la caída de agua caliente, retirando el calor del agua y rechazándolo hacia la atmosfera

El tamaño de las torres de enfriamiento depende de la cantidad de agua que se desea procesar y de la temperatura inicial y final del mismo. La torre de enfriamiento en conjunto con el condensador forma el foco frío o sumidero de calor, necesario para el funcionamiento del ciclo. En la figura 12 se observa una torre de enfriamiento en servicio.

Figura 12. **Torres de enfriamiento**



Fuente: ingenio azucarero.

### **1.3.6. Tratamiento de aguas**

Para maximizar el tiempo de vida de las calderas y evitar problemas de corrosión o incrustaciones, es necesaria que el agua de alimentación sea tratada de manera adecuada.

El agua con alto contenido de carbonato de calcio produce incrustaciones en las tuberías de las calderas. Esto forma paredes gruesas de sedimento en el interior de las tuberías, lo que produce caídas de presión, reducción de la eficiencia de la transferencia de calor y, en algunos casos extremos, la tubería puede quemarse al elevar demasiado su temperatura debido a la ineficiencia del contacto con el agua.

Asimismo, altos contenidos de oxígeno disuelto en el agua producen corrosión y oxidación en la tubería. La mayor cantidad de oxígeno disuelto en el agua de alimentación se elimina por medio de los deaeradores. El tratamiento químico también se utiliza para mejorar la calidad del agua, los biocidas evitan el crecimiento de algas y otras bacterias y los floculantes se utilizan para decantar los sólidos en suspensión.

Para eliminar el exceso de calcio en el agua, generalmente, se utiliza la osmosis inversa. En este proceso, se presuriza el agua dura y, a través de una membrana, se obliga a pasar las moléculas de agua, dejando atrás los sólidos presentes en el agua y obteniendo como resultado final agua suave.

#### **1.4. Partes principales de una caldera acuotubular**

Las calderas están conformadas por estructuras de grandes dimensiones y complejidad, dependiendo de su capacidad y presión de trabajo pueden alcanzar la talla de un edificio de 8 niveles aproximadamente. Aun cuando su diseño depende generalmente del tipo de combustible por utilizar, se puede distinguir en su estructura secciones que son comunes para todas las calderas acuotubulares, independientemente, del combustible que utilicen.

##### **1.4.1. Hogar**

Es la parte de la caldera donde se lleva a cabo la combustión. Está formado por un gran espacio vacío en la base de la caldera, construida generalmente con ladrillo refractario apoyado en una estructura de vigas de acero. El interior del hogar se encuentra forrado por tuberías en las cuales circula el agua de alimentación, en la figura 13 se observa el lecho del hogar de una caldera

Figura 13. **Vista del interior del hogar de una caldera de biomasa**



Fuente: ingenio azucarero.

Las altas temperaturas que se alcanzan al quemar el combustible en el hogar convierten el agua contenida en las tuberías de acero en vapor saturado, el cual sube hasta alcanzar el domo de la caldera, donde se acumula para luego ser conducido hacia la turbina.

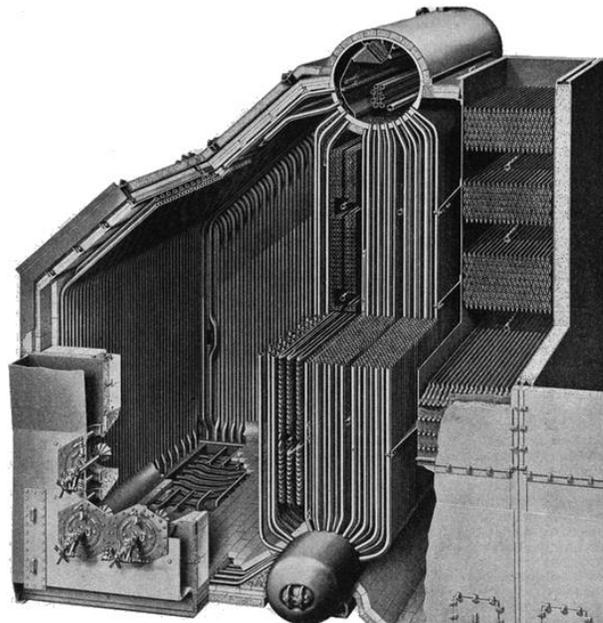
#### **1.4.2. Domo**

Es un tanque de forma cilíndrica, colocado de forma horizontal en la parte superior de la caldera. Su función es almacenar agua y vapor a la misma presión. En la figura 14 se observa una caldera que posee un domo superior y un domo inferior. Además, se aprecia cómo las tuberías salen del domo y se distribuyen alrededor del hogar de la caldera.

El agua de alimentación de la caldera luego de pasar por los deareadores es bombeada hasta el domo de la caldera donde, posteriormente, es distribuida por las ramificaciones que bajan hacia el hogar de la caldera.

Al alcanzar la temperatura de saturación, el vapor de agua regresa por las mismas ramificaciones hasta alcanzar nuevamente el domo, de tal forma que la parte inferior del domo se encuentra ocupada por agua y la parte superior es ocupada por vapor saturado. El vapor es extraído del domo y se envía a los sobrecalentadores para luego dirigirlo hacia el turbogenerador.

Figura 14. **Detalle del hogar de una caldera acuotubular**

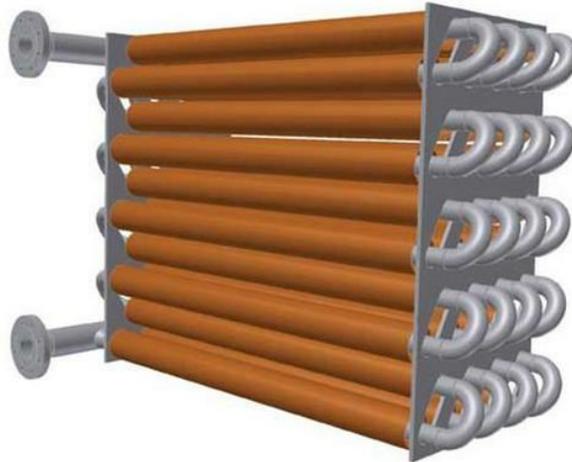


Fuente: [www.archive.hnsa.org](http://www.archive.hnsa.org). Consulta: abril de 2015.

### **1.4.3. Economizador**

Es un intercambiador de calor formado por un arreglo de tuberías en forma de serpentín, como se observa en la figura 15. Se coloca a la salida de los gases de combustión de la caldera y se utiliza para elevar la temperatura del agua de alimentación.

Figura 15. **Economizador**



Fuente: <http://spanish.alibaba.com>. Consulta: mayo de 2015

La justificación del uso del economizador se encuentra en el aprovechamiento de la energía que contienen los gases de combustión que, de otra forma, se desecharía hacia la atmosfera, el economizador es un calentador cerrado agua/gases de combustión, que posee la ventaja de no utilizar vapor para el proceso de precalentamiento del agua.

#### **1.4.4. Precalentador**

Es un equipo que aprovecha el calor de los gases de combustión para calentar aire. Este equipo se encuentra después del economizador en la línea de gases de combustión, por lo que aprovecha la temperatura de los gases que ya han cedido parte de su energía en el economizador. Está constituido por un intercambiador de calor aire/gases de combustión. El objetivo de este equipo es precalentar el aire que se ingresa a la caldera para realizar la combustión. En la figura 16 se ilustra este equipo.

Figura 16. **Precalentador**



Fuente: [www.by-cast.com](http://www.by-cast.com). Consulta: mayo de 2015.

El precalentamiento se utiliza para favorecer la combustión, evitando que las llamas sean alcanzadas por aire frío y así evitar el uso de combustible extra para calentar el aire antes de sea posible utilizarlo para la combustión.

#### **1.4.5. Sobrecalentador**

Este equipo está conformado por un intercambiador de calor. Se utiliza para elevar la temperatura del vapor saturado. Este incremento de temperatura genera vapor sobrecalentado, el cual por sus características, es óptimo para utilizarse en las turbinas.

El aumento de temperatura se lleva a cabo a una presión constante, como lo establece la teoría del ciclo de Rankine sobrecalentado. Esta etapa, además de elevar la entalpía del vapor, elimina restos de agua en fase líquida que puedan encontrarse en la tubería, ya sea por condensación o por arrastre desde el domo.

El uso del sobrecalentador genera dos beneficios: aumenta la entalpía del vapor y se protege la integridad de la turbina, ya que los alabes pueden dañarse fácilmente al ser impactados por gotas de agua a alta velocidad.

#### **1.4.6. Deareador**

Es un equipo que se utiliza para remover oxígeno y gases no condensables del agua de alimentación de las calderas. Básicamente es un tanque en el que se ingresa agua suave y vapor, de tal manera que el vapor arrastre consigo el oxígeno disuelto en el agua.

**Figura 17. Deareador**



Fuente: ingenio azucarero.

El deareador es necesario porque, al eliminar el oxígeno disuelto en el agua, se evita la corrosión en las tuberías de agua y en los circuitos de vapor. En la figura 17 se observa un deareador instalado en una caldera de combustible mixto, carbón y biomasa.

#### **1.4.7. Parrilla**

Se ubica en la parte inferior del hogar de la caldera. Se trata de una estructura construida con ladrillo refractario, encima de la cual se lleva a cabo parte del proceso de combustión, ya que la biomasa o el carbón que alimenta la caldera, generalmente, no termina de quemarse mientras cae por el hogar, así que se acumula por encima de la parrilla y continua su combustión.

Por debajo de la parrilla se ingresa el aire precalentado al hogar, donde se obtiene el oxígeno necesario para la combustión. En los modelos más antiguos de calderas, las cenizas y otros residuos de la combustión quedan acumulados por encima de la parrilla haciendo necesario que el operador tenga que retirar estos restos utilizando azadones o palas, como se observa en la figura 18. En las calderas modernas se usa una parrilla móvil o parrilla viajera. En este caso, toda la parrilla se encuentra acoplada a un mecanismo que la hace moverse hacia adelante a una velocidad adecuada para retirar las cenizas y otros residuos de la combustión de las calderas.

En el caso de calderas con tecnología de lecho fluidificado, se omite el uso de la parrilla y se sustituye por una capa de arena, la cual se mantiene en un proceso de mezclado constante con carbón pulverizado. En este caso, los residuos de la combustión son retirados por medio de purgas constantes de arena, por lo cual también debe existir un suministro constante de este material al lecho de la caldera.

Figura 18. Limpieza de la parrilla de una caldera



Fuente: ingenio azucarero.

#### 1.4.8. Ventiladores forzados e inducidos

Los ventiladores forzados son equipos que ingresan el aire hacia la caldera, hacia los alimentadores de bagazo o carbón, para la dispersión del combustible y a la parrilla o lecho de la caldera para proporcionar el oxígeno necesario para la combustión.

Los ventiladores inducidos se utilizan para generar la succión de la chimenea para un flujo adecuado de los gases de combustión, a través de todos los intercambiadores de calor instalados, así como a través de los equipos limpiadores de gases y decantadores de cenizas.

#### **1.4.9. Sistemas de limpieza de gases de combustión**

Para disminuir el impacto ambiental y problemas a la salud de las personas que viven en los poblados cercanos a las plantas termoeléctricas, es necesario limpiar los gases de combustión para retener la mayor cantidad de contaminantes y evitar que estos se dispersen en la atmosfera. La forma más simple de limpieza de gases se hace a través del sistema de lavado de gases con agua. Se dispersa agua en contra flujo del gas, de tal forma que la ceniza húmeda se precipita al fondo del lavador de gases.

En las calderas de última generación se utiliza un equipo denominado precipitador electrostático. Básicamente se trata de un arreglo de placas en las que se induce un campo eléctrico que atrae las partículas suspendidas en los gases de combustión. Cuando las placas se encuentran totalmente cubiertas por las cenizas precipitadas, se utiliza un martillo que golpea varias veces las placas para que estas liberen el material precipitado.

#### **1.4.10. Chimenea**

Es el conducto por el cual se desalojan los gases de combustión de la caldera. En general, son estructuras verticales de gran altura que funcionan debido a la convección térmica de los gases y a las diferencias de presión existentes en la parte inferior y superior de la misma. Sin embargo, en la mayoría de los casos las chimeneas son apoyadas por los ventiladores inducidos quienes generan el vacío necesario para que los gases de combustión fluyan sin problemas hacia la atmósfera.

En la figura 19 se observa un conjunto de chimeneas. Al frente, se tienen chimeneas equipadas con lavadores de gases. Las emisiones de gases de combustión se ven claramente en este tipo de calderas, al fondo se muestran chimeneas de calderas equipadas con precipitador electrostático, en este caso, la emisión de gases es mínima.

Figura 19. **Chimeneas**



Fuente: ingenio azucarero.



## **2. EL CONTROL AUTOMÁTICO DE CALDERAS ACUOTUBULARES**

Las calderas son estructuras complejas que requieren de una operación cuidadosa para su funcionamiento correcto. Por consiguiente, debe contar con un sistema de medición y control eficiente para que el operador tenga una idea clara del comportamiento de la caldera en todo momento. La medición es un medio crítico para el control de las calderas. Por ello, se debe tener especial cuidado en la elección del principio de medición adecuado para cada proceso.

### **2.1. Variables de proceso e instrumentación**

Para un control adecuado es necesario que se identifiquen las variables más importantes y se realicen las mediciones adecuadas. Esto, combinado con un sistema apropiado de supervisión y adquisición de datos, dará la información necesaria por la correcta operación de la caldera. Entre las variables más importantes que se deben tomar en cuenta para su medición están la presión, el nivel, la temperatura y el caudal, las cuales son críticas para la operación del equipo y tienen impacto en diferentes partes del proceso.

#### **2.1.1. Presión**

Se encuentra entre las variables de proceso más críticas para la operación de las calderas. Debe monitorearse para asegurar la continuidad del proceso y la integridad física del personal de operación, ya que esta variable puede cambiar rápidamente y aumentar de forma peligrosa.

Para medir esta variable se utilizan manómetros y transmisores de presión. Los manómetros se utilizan para presentar las mediciones en campo y para tener redundancia de medición independiente del suministro de energía eléctrica. Son instrumentos de construcción mecánica.

Los transmisores de presión son capaces de proporcionar medición local y principalmente, transmitir información hacia el PLC para la centralización de datos y para su uso en los lazos de control. En la figura 20 se ilustra un transmisor de este tipo. La presión en la caldera se monitorea en varios puntos para verificar su funcionamiento óptimo y seguro. Los principales puntos de monitoreo son el domo, el hogar y los circuitos de vapor.

Figura 20. **Transmisor de presión diferencial**



Fuente: [www.siemens.com](http://www.siemens.com). Consulta: mayo de 2015.

- **Domo:** se trata de la presión de diseño de la caldera. Generalmente, son altas presiones. En calderas de los ingenios de Guatemala, las presiones típicas se encuentran entre 400 libras por pulgada cuadrada hasta 1500 libras por pulgada cuadrada.
- **Hogar:** en esta sección de la caldera se mide la presión absoluta para asegurar que se tiene un ligero vacío, producido por acción de los inducidos y generar un flujo constante de gases de combustión hacia la atmosfera.
- **Cabezales de vapor:** en la línea de vapor se monitorea la presión antes del sobrecalentador y después de él. Asimismo, se utiliza un transmisor de presión para monitorear la entrada de vapor a la turbina.

### **2.1.2. Nivel**

Es una variable importante para asegurar la continuidad del funcionamiento de la caldera y para evitar daños en los equipos. La medición de esta variable permite informar al operador acerca de la cantidad de agua y de combustible disponibles.

Existen varios principios de medición que se pueden utilizar para medir el nivel. La forma más común es hacerlo por medio de presión diferencial. Sin embargo, también es posible realizar esta medición utilizando transmisores de tipo onda guiada, ultrasónico o de radar, como el que se ilustra en la figura 21.

Figura 21. **Transmisor de nivel tipo radar**



Fuente: [www.omarvega.com](http://www.omarvega.com). Consulta: mayo de 2015.

El nivel se mide en los tanques de almacenamiento de líquidos para evitar que las bombas trabajen en vacío. Asimismo, es importante la medición de nivel en el domo para evitar que se quede sin agua, esto provocaría graves daños al sistema de tuberías que rodea el hogar de la caldera, ya que estas pueden quemarse debido a las altas temperaturas en el hogar.

En tanques abiertos o tanques presurizados se recomienda utilizar medidores basados en presión diferencial. Los instrumentos de onda guiada utilizan una varilla por donde se conduce una onda electromagnética estacionaria, la cual rebota al contacto con el líquido en cuestión y envía un eco a la fuente. Se recomienda utilizar este tipo de transmisores en tanques al vacío y líquidos no viscosos. Los transmisores de nivel de radar se utilizan para medir el nivel de sólidos granulados y líquidos.

### **2.1.3. Caudal**

La medición de esta variable se utiliza para el control automático de las calderas y para determinar la producción y gastos energéticos involucrados en el proceso de transformación del agua en vapor sobrecalentado.

Entre las mediciones de este tipo, necesarias para el control automático, se encuentran: la alimentación de agua, la producción de vapor, el flujo de aire de los ventiladores forzados, el caudal de agua de atemperación. Además, para determinar los gastos energéticos se realiza la medición del caudal de biomasa o carbón y el caudal de bunker si la caldera utiliza este tipo de quemadores.

La medición de caudal se realiza de forma indirecta, por medio de la presión diferencial, ya que es uno de los métodos más baratos. En este caso, es posible utilizar varios elementos primarios para generar el diferencial de presión que, debido al efecto Bernoulli, es directamente proporcional a la velocidad del fluido, y conociendo el diámetro de la tubería, es posible calcular el caudal. Los elementos primarios más utilizados son la placa de orificio, el tubo de Pitot y el tubo Venturi.

Otro método de medición de caudal, también indirecto, es la medición por medio de caudalímetros magnéticos. Este tipo de medidor también calcula la velocidad del fluido para calcular el flujo. Estos instrumentos se basan en el principio de inducción de Faraday y luego, conociendo el diámetro de la tubería, es posible calcular el caudal.

En algunos casos es requerida la medición del flujo másico. Para ello, se utiliza un caudalímetro que opera basado en el efecto Coriolis, como el que se observa en la figura 22. Este instrumento es capaz de medir la velocidad y la densidad del fluido. Esta información es suficiente para calcular el flujo o caudal másico.

Figura 22. **Caudalímetro másico de efecto Coriolis**



Fuente: [www.siemens.com](http://www.siemens.com). Consulta: mayo de 2015.

#### 2.1.4. Análisis de líquidos y gases

Es importante el monitoreo de variables secundarias para asegurar la continua operación de los equipos y prevenir daños a largo plazo. Entre ellas, se encuentran la medición del pH y el oxígeno disuelto en el agua de alimentación. Asimismo, en los gases de combustión, se monitorea el porcentaje de oxígeno y el contenido de óxidos de nitrógeno  $\text{NO}_x$  y de dióxido de carbono  $\text{CO}_2$ .

El monitoreo del pH del agua suave se realiza para asegurar que su dureza es la adecuada y así evitar incrustaciones en la tubería. También, asegurar el mínimo posible de oxígeno disuelto en el agua de alimentación reduce el riesgo de corrosión. En la figura 23 se muestra un transmisor de pH. El análisis de gases se utiliza, principalmente, para verificar que se está agregando la cantidad correcta de oxígeno para la combustión. Habitualmente, el oxígeno en gases de combustión se utiliza para el control de la entrada de aire forzado.

Figura 23. Transmisor de pH



Fuente: [www.yokogawa.com](http://www.yokogawa.com). Consulta: mayo de 2015.

## **2.2. Elementos finales de control**

La medición proporciona información acerca del comportamiento de las variables de proceso. Sin embargo, para controlar estas variables, se debe contar con los mecanismos adecuados, capaces de modificar las propiedades del proceso, estos mecanismos son los elementos finales de control.

En la industria y en general los elementos finales de control más importantes son la válvula de control, los motores y las resistencias eléctricas, entre otras. Estos elementos pueden trabajar solos o combinados según las características de control requeridas por el proceso.

### **2.2.1. Válvulas**

Este dispositivo está conformado por un mecanismo capaz de regular el flujo realizando una variación del área efectiva de paso del fluido. Esta variación de área es inversamente proporcional a la pérdida de carga, es decir a menor área de paso, mayor pérdida de carga y viceversa.

Existe variedad de diseños y tamaños de válvulas. La elección de una u otra depende, específicamente, de la aplicación en la cual se utilizará. Es posible clasificarlas según su función en dos grandes grupos: válvulas reguladoras y válvulas de paso (*on-off*).

En la figura 24 se ilustra una válvula de mariposa con actuador neumático de piñón y cremallera.

Figura 24. **Válvula de mariposa con actuador neumático**



Fuente: [www.bray.com](http://www.bray.com). Consulta: junio de 2015.

Para el control automático de procesos son útiles tanto las válvulas *on-off* como las válvulas reguladoras, todo depende de la estrategia de control que se utilice y de la fineza del control requerido. La válvula puede utilizarse prácticamente para todo tipo de control, se puede encontrar en lazos para control de nivel, control de flujo, control de presión y control de temperatura.

### **2.2.2. Motores y variadores de frecuencia**

El motor es un elemento final de control que se utiliza en la mayoría, si no es que en todos los procesos. En la industria se utilizan, principalmente, los motores de inducción en casi todas las aplicaciones y en algunos casos especiales se utilizan servomotores.

Estos dispositivos se emplean en bandas transportadoras, bombas, agitadores y molinos, principalmente. Para hacer más eficiente su uso en un lazo de control es necesario que se encuentre acoplado eléctricamente a un variador de frecuencia. El variador de frecuencia es un dispositivo electrónico que aprovecha la relación directa que existe entre la velocidad y la frecuencia en los motores de inducción para tener control sobre el mismo.

El variador de frecuencia le proporciona al motor mejores características de control y de eficiencia energética. Logra que la variación de la velocidad sea continua. En lazos de control simples como el llenado de tanques entre un nivel máximo y mínimo es posible utilizar el motor con un arranque directo, sin necesidad de la intervención de un variador de frecuencia. En procesos como la dosificación de materia prima, el uso del variador de frecuencia es imperativo.

### **2.2.3. Dámper**

Es un equipo que se utilizan para regular el flujo de aire o gases dentro de un conducto. Se trata únicamente de paletas o persianas que se hacen girar para bloquear o permitir el paso del fluido. Cuando las persianas se encuentran perpendiculares al flujo, le bloquean el paso por completo y cuando se encuentran paralelas al mismo, permiten el flujo máximo, de tal forma que giran dentro de  $0^\circ$  y  $90^\circ$  para el respectivo control del flujo.

En las calderas se utilizan *damper* en los conductos de aire forzado y aire inducido. Para incluirlo en el lazo de control es necesario que se encuentren acoplados a un posicionador, el cual enviará la información hacia el PLC. En la figura 25 se ilustra este equipo.

Figura 25. ***Dámper, sus persianas y palanca***



Fuente: <http://image.frompo.com>. Consulta: junio de 2015.

### **2.3. Estrategias de control**

Contar con una buena medición y un elemento final de control adecuado para la aplicación no es suficiente, para que el sistema de control sea eficiente y asegure la continuidad y confiabilidad del proceso, es necesario que la estrategia de control elegida sea la adecuada.

La estrategia de control es el algoritmo que se utiliza para gobernar al elemento final de control en función de las mediciones obtenidas del proceso. La elección del algoritmo implica costos de equipos, costos de programación e integración. Esto significa que, al elegir la estrategia de control se debe encontrar el balance adecuado entre eficiencia del control y los costos de su implementación. Aun cuando pueden existir algoritmos de control, muy avanzados y complejos, es necesario analizar adecuadamente el proceso por gobernar y determinar si se utilizará una estrategia de control compleja o si es posible realizar el control utilizando una estrategia más reservada.

A continuación se mencionan algunas estrategias de control comunes en la mayoría de las industrias. Sin embargo, los primeros dos tipos de control que se mencionan intervienen en casi todos los procesos.

### **2.3.1. Control *on-off***

La forma de control más simple que existe es el control *on-off*, también llamado control todo/nada, posiblemente es la forma de control más antigua. Como su nombre lo indica, es un tipo de control que trabaja de forma binaria, cambiando entre los estados de valor máximo y valor mínimo del fenómeno. Este tipo de control funciona satisfactoriamente si el proceso tiene una velocidad de reacción lenta y posee un tiempo de retardo mínimo.

Esta estrategia de control no tiene capacidad de regulación y es incapaz de mantener constante el *setpoint*. El proceso siempre oscila alrededor del punto de consigna. El control todo/nada se emplea usualmente en una banda diferencial o zona muerta, dentro de la cual el elemento final de control permanece en su última posición.

Es común encontrar este tipo de control en bombas para llenado de tanques, donde una señal de nivel bajo envía la orden de marcha de la bomba y una señal de nivel alto envía la orden de paro de la misma. Muchas válvulas, donde solo se requiere paso de aire o vapor para limpieza utilizan control todo/nada, a pesar de ser un control sin muchas ventajas. El control todo/nada es bastante común en la industria, debido a su facilidad de implementación y bajo costo.

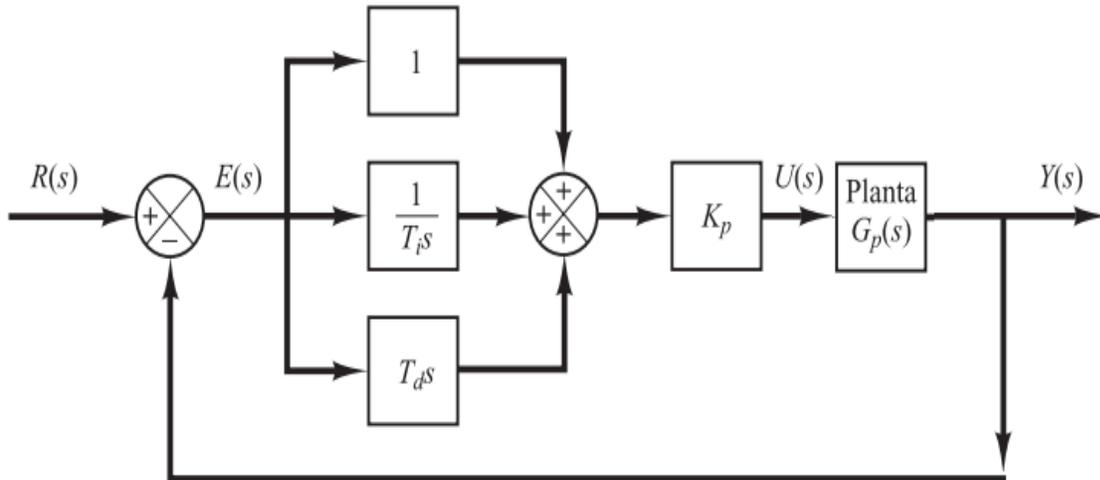
### **2.3.2. Control PID**

Este es uno de los algoritmos de control más versátiles con los que cuenta la industria, ya que es de fácil implementación y su sintonización puede hacerse utilizando solo la experiencia del operador del proceso. La mayor parte de lazos de control utilizan este algoritmo sin modificación alguna y en casos particulares se utiliza el algoritmo con ligeras variaciones. Es posible implementarlo de muchas formas, ya sea como un controlador único o como parte de un sistema de control distribuido. Es común que los PLC de gama alta cuenten con controladores PID integrados.

El algoritmo del controlador PID realiza tres cálculos sobre el error que existe entre el valor medido en el proceso y el punto de consigna; y con base en sus resultados, determina el cambio que debe realizarse sobre la variable manipulada. Para ello, el controlador requiere que exista retroalimentación de la medición de la variable de proceso.

En la figura 26 se aprecia el diagrama en bloques de un controlador PID, donde  $R(s)$  es el *setpoint*.  $E(s)$  es la señal del error,  $U(s)$  es la salida del controlador y  $Y(s)$  es la variable de proceso.

Figura 26. Diagrama en bloques de un controlador PID



Fuente: OGATA, Katsuhiko. *Ingeniería de control*. p 590.

La parte proporcional del controlador consiste en el producto de la señal de error con una constante. Su función es actuar de manera proporcional al error sobre el proceso; es decir, si el error es pequeño, los cambios que se realicen sobre la variable manipulable serán pequeños, pero si el error es grande, también lo serán los cambios sobre la variable manipulable.

La parte integral tiene como objetivo disminuir el error, hasta eliminar el error en estado estacionario, que se trata de un error provocado por el control proporcional cuando la variable de proceso se estabiliza sin haber alcanzado el punto de consigna (esto se conoce como *offset*). El control integral únicamente toma el error y lo integra en un intervalo definido de tiempo y luego de escalarlo, se suma a la parte proporcional para dar la salida total que se utilizara para modificar la variable manipulable.

La parte derivativa del controlador se manifiesta cuando se tiene un cambio en el valor absoluto del error. El objetivo de esta parte del controlador es mantener al mínimo el error. Para ello, lo corrige proporcionalmente a la velocidad con la que este se produce, se anticipa y evita que se incremente. Es importante tomar precauciones cuando se usa el control derivativo, ya que posee la desventaja de amplificar el ruido y, si el tiempo de la acción derivativa es muy pequeño, la variable oscila demasiado y puede saturar el elemento final de control.

### **2.3.3. Control feedforward**

Se trata de un control predictivo. Esta estrategia de control tiene la capacidad de pronosticar un cambio en la variable de salida antes de que esta suceda y realizar la acción correctiva para evitar que se desvíe el proceso. Este tipo de control se apoya en experiencias previas y predefinidas del comportamiento observado del proceso en sus entradas, salidas y otras perturbaciones que afecten al sistema de control.

Esta estrategia de control es altamente efectiva para controlar todas aquellas alteraciones ya conocidas. Sin embargo, en el caso de perturbaciones que no han sido observadas con anterioridad, no hay forma alguna para que este control pueda corregir la salida. Por eso, generalmente este tipo de control se utiliza en combinación con un control retroalimentado (control PID en general), lo que le da la capacidad de responder ante perturbaciones no conocidas y corregir de manera más eficiente la salida. A diferencia de los controles tradicionales retroalimentados, el control *feedforward* (sin modificar) es totalmente predictivo, es decir, determina el error antes de que este ocurra y realiza la corrección respectiva para evitarlo.

En la industria, el control *feedforward* se utilizaría para mejorar algún control PID o un control de otro tipo que se encuentre ya implementado, siempre con el objetivo de mejorar su eficiencia o su tiempo de respuesta. Este control es poderoso si se cuenta con las herramientas computacionales adecuadas y se tenga la capacidad de realizar grandes cantidades de cálculos iterativos.

#### **2.3.4. Control de gama partida**

Es una estrategia de control que se caracteriza, principalmente, porque divide su rango en dos o más partes y actúa sobre diferentes elementos finales de control en cada uno de sus intervalos.

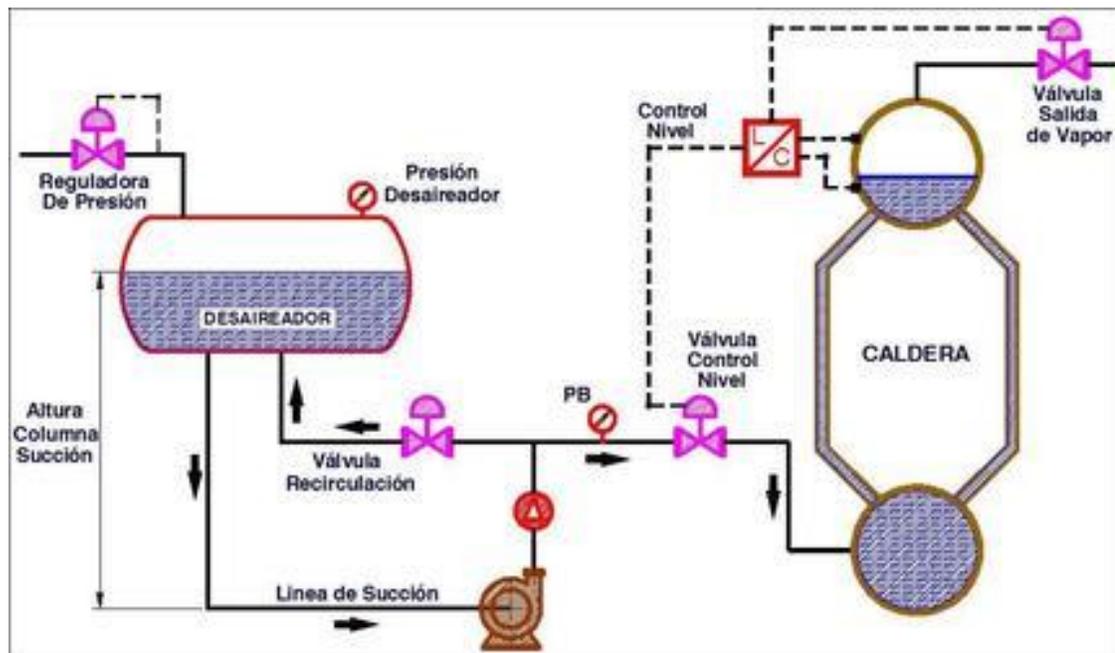
Significa que, para una misma variable de control, existen varias variables manipulables, las cuales actúan para modificar la variable de control, y dado que se tienen varias variables manipulables, es necesario que se establezca un orden prioritario para actuar sobre las variables manipulables. La estrategia es utilizar, mientras sea posible, las variables prioritarias y cuando sea necesario se utilizan adicionalmente las variables secundarias.

Esta estrategia de control, simplemente, establece que para una misma variable controlada existen varias variables manipulables. Sin embargo, en ningún momento se restringe el tipo de control que se tendrá sobre la variable controlable. Esto también es parte importante por considerar en el lazo de control global; generalmente se tiene un PID para cada elemento final de control.

### 2.3.5. Control a dos y a tres elementos

El control a dos o más elementos, en contraste con el control de gama partida, posee más variables controlables para una misma variable manipulable. Es decir que un mismo elemento final de control es gobernado por varias variables de proceso al mismo tiempo. Esto resulta ser complicado, sin embargo, es de suma importancia en el sistema de control de nivel y producción de las calderas (figura 27) y cualquier otro proceso de transporte que implique acumulación y/o disminución del volumen de control.

Figura 27. Control a tres elementos del nivel de una caldera



Fuente: [www.valvexport.com](http://www.valvexport.com). Consulta: julio de 2015.

El nombre de dos o tres elementos se refiere al número de variables de proceso que se miden para efectuar el control. Esta estrategia de control se utiliza principalmente para el control de nivel en el domo de la caldera.

Las variables que se miden en este caso son: el nivel de agua del domo de la caldera, el flujo de agua de alimentación hacia el domo de la caldera y el flujo de vapor que sale del domo de la caldera. Se dice que el control es a dos elementos si se utiliza solo el nivel (variable primaria) y el caudal (variable secundaria). Por otro lado, si se utiliza el tercer elemento (caudal de vapor) entonces el control se denomina a tres elementos.

## **2.4. Lazos de control utilizados en calderas**

En una caldera todos los procesos se encuentran enlazados y al realizar un cambio sobre cualquiera de las variables de proceso, se genera una reacción en cadena que modifica, en alguna medida las otras variables, por lo tanto, se exige que estas variables inicien su autorregulación. A pesar de que los procesos se encuentran entrelazados, es posible aislarlos idealizándolos para su análisis respectivo y posterior diseño de su lazo de control. En una caldera, es posible observar varios lazos de control bien definidos.

### **2.4.1. Control de nivel del domo**

El domo de la caldera, es sin duda alguna, el equipo al que más atención y cuidado se le debe prestar. Esto se debe a que es el lugar donde se acumula el agua de alimentación de la caldera y también de donde se extrae la producción de vapor es la misma. Asimismo, es importante mencionar el hecho de que se trata de un tanque que se encuentra sometido a altas presiones y temperaturas.

El nivel de agua en el domo, en condiciones normales de operación, se debe mantener en un 50 %. Un nivel más alto de agua puede provocar arrastre hacia la turbina y uno más bajo puede causar problemas de suministro de vapor al variar la demanda. La parte inferior del domo debe estar ocupada por el agua de alimentación y la parte superior del mismo debe estar ocupada por vapor saturado. Sin embargo, debido a la dinámica de los procesos de la caldera, mantener este nivel en el domo es una tarea complicada.

La variable controlable o variable de proceso, en este caso, es el nivel. La variable manipulable es el caudal de agua de alimentación, el cual es regulado por medio de una válvula de control. A pesar de que resulta bastante lógica la forma del lazo de control, existen perturbaciones que pueden modificar muy rápidamente el nivel del domo.

Si el consumo de vapor aumenta, el nivel del domo disminuirá y, por lo tanto, se exigirá a la válvula que aumente su apertura consiguiendo un aumento proporcional del flujo de agua hacia el domo. En el caso del domo de la caldera se acostumbra usar un control a dos o tres elementos, de tal forma que cuando el lazo de control detecta una variación en la demanda de vapor, se actúa directamente sobre la válvula de agua, sin esperar a que se afecte el nivel. Con esto se consigue una mayor estabilidad en la variable de proceso.

#### **2.4.2. Control de la presión del hogar**

En las calderas acuotubulares lo común es contar con un flujo de aire de entrada que es proporcionado por los ventiladores forzados y un flujo de salida de aire que es aspirado por los ventiladores inducidos, manteniendo en el hogar de la caldera un volumen constante de aire, el cual proporciona el aire en exceso necesario para llevar a cabo una buena combustión.

La entrada y salida de aire en el hogar de la caldera generan un diferencial de presión, que debe mantenerse para asegurar el flujo de los gases de combustión hacia afuera y evitar que el humo ahogue la caldera. En general se debe mantener una presión ligeramente menor a la presión atmosférica (vacío moderado) para garantizar la extracción de gases del hogar.

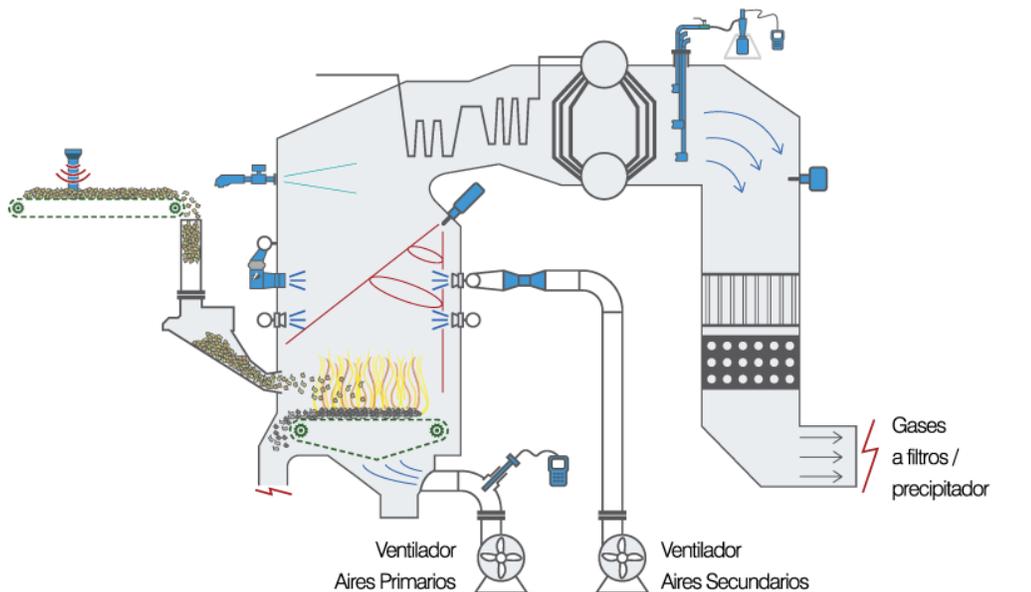
El lazo de control, en este caso, está formado por el sensor de presión, que monitorea la variable de proceso y el elemento final de control es un variador de frecuencia que controla la velocidad de los ventiladores inducidos. Además del variador de frecuencia, también puede gobernar sobre los *dampers* instalados en el conducto para afinar el lazo de control.

### **2.4.3. Control del combustible (bagazo y bunker)**

El costo de la producción de energía está directamente relacionado con el costo del combustible utilizado. En las centrales térmicas de biomasa, el costo es moderado, ya que la biomasa, generalmente, es un subproducto del proceso, como en el caso de la caña de azúcar. Si la central térmica es de carbón o bunker, el costo es más elevado, asimismo, produce más contaminantes y representa más gastos para la limpieza de los gases de combustión que se liberan a la atmósfera.

Se debe asegurar que el combustible ingresado a la caldera sea quemado en su totalidad y que el poder calorífico del mismo también sea utilizado por completo para la transformación del agua en vapor. La cantidad de combustible ingresado a la caldera está gobernado, principalmente, por la demanda de vapor que se le hace a la caldera, cuanto más vapor se le extraiga a la misma, más calor se necesitará y, por consiguiente, más combustible.

Figura 28. Diagrama de alimentación y combustión de biomasa



Fuente: [www.valvexport.com](http://www.valvexport.com). Consulta: julio de 2015.

En la figura 28 se observa cómo ingresa el carbón por los conductos hacia el hogar de la caldera, la combustión es apoyada por el ventilador de aire primario y el ventilador de aire secundario ayuda a esparcir el carbón pulverizado por todo el hogar. Se debe mantener controlada la relación aire/combustible para asegurar que se tenga el aire en exceso necesario y que no se exceda la capacidad de los ventiladores forzados ni de los inducidos.

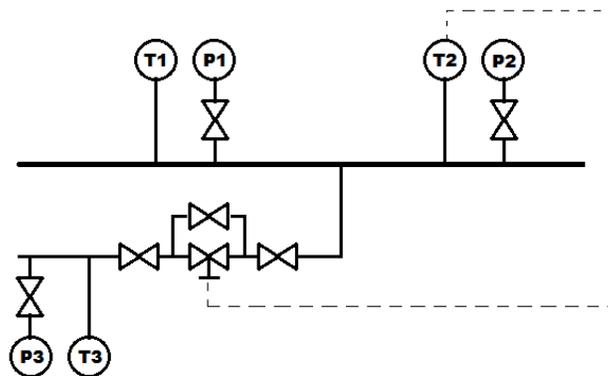
El lazo de control se realiza dependiendo del tipo de combustible, ya sea que este sea sólido, líquido o gaseoso. En el caso de ser líquido o gaseoso, la variable de proceso es la producción de vapor y, como elemento final de control, se utiliza una válvula, la cual controla la cantidad de combustible que ingresa a los quemadores, ambos relacionados siempre por un controlador.

En el caso de ser un combustible sólido, como en el caso del bagazo de caña o el carbón pulverizado, la variable de proceso es la producción de vapor y el elemento final de control está conformado por un conjunto de variadores de frecuencia, quienes controlan la velocidad de los alimentadores y que además se encuentran en secuencia y van arrancando conforme la demanda de vapor lo solicita.

#### 2.4.4. Control de temperatura del cabezal de vapor

El objetivo de este control es mantener, en un valor constante, la temperatura del vapor a la salida de la caldera para su transporte hasta el turbogenerador, sin sobrepasar el límite de diseño térmico de la turbina. En una caldera, los elementos de sobrecalentamiento aprovechan la transmisión de calor por convección en cada una de sus etapas, esto puede aumentar de forma peligrosa la temperatura del vapor. En general, se debe trabajar en conjunto con atemperadores para contrarrestar el calentamiento excesivo por efecto de los sobrecalentadores. En la figura 29 se ilustra el diagrama de control de una válvula de atemperación.

Figura 29. Control automático de la atemperación



Fuente: elaboración propia, empleando Paint.net.

El lazo de control, generalmente, gobierna sobre la atemperación como se observa en la figura 29. La variable controlable es la temperatura del vapor y el elemento final de control es la válvula reguladora de agua de atemperación. Debe tomarse en cuenta que al tratarse de un proceso isobárico, al modificar la temperatura del vapor no cambia la presión del cabezal de vapor, asimismo, la presión de agua de atemperación deberá ser ligeramente superior a la presión de vapor para asegurar un flujo unidireccional adecuado.



### **3. VÁLVULAS, ACTUADORES Y ACCESORIOS**

La válvula es un elemento mecánico que se utiliza para iniciar, detener o regular el paso o circulación de líquidos, gases, sólidos granulados o fluidificados, se compone, principalmente, por una coraza denominado el cuerpo de la válvula que contiene al mecanismo y un elemento de estrangulación, el cual puede estar constituido por un disco, un tapón o una bola, entre otros. La apertura o cierre de la válvula se realiza utilizando movimiento rotativo o movimiento lineal. Este, según la naturaleza del proceso y del tamaño de la válvula puede realizarse de forma manual (por acción directa del operador) o con la ayuda de un actuador (por comandos desde un sistema de control).

#### **3.1. Propiedades de las válvulas**

Existen ciertas propiedades de las válvulas que se deben considerar para seleccionarlas y dimensionarlas adecuadamente, dependiendo de la función que el equipo desempeñará en el proceso, propiedades como la rangeabilidad y la característica de flujo son importantes para dimensionar adecuadamente la válvula.

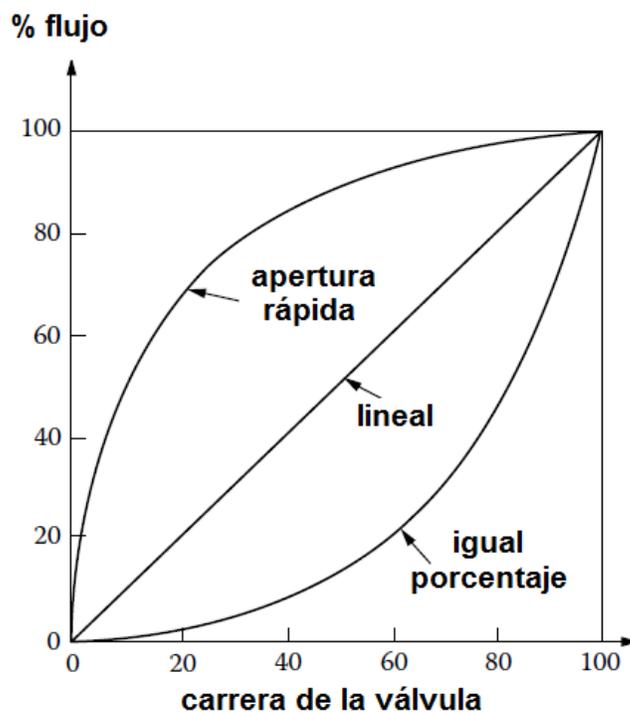
##### **3.1.1. Característica de la válvula**

También llamada característica inherente de la válvula, es la relación entre el porcentaje de la carrera de la válvula y el flujo a través de la válvula, siempre que se cumplan las condiciones enlistadas a continuación.

- El actuador es lineal (la carrera de la válvula es proporcional a la salida del controlador)
- La diferencia de presión a través de la válvula es constante
- El fluido de proceso no sufre cavitación ni vaporización

En la figura 30 se observa un diagrama de la carrera de la válvula *versus* el porcentaje de flujo, en el cual se ilustran las características de flujo más comunes de las válvulas de control. En una válvula con característica lineal, un incremento en la carrera (**dx**) o apertura produce un aumento proporcional en el caudal (**dF**) que circula a través de la válvula, eso significa que la ganancia teórica es constante (**k**) para todas las cargas.

Figura 30. **Características de flujo**



Fuente: LIPTÁK, Béla. *Instrument Engineer's Handbook*. p. 1156.

En las válvulas de igual porcentaje, un incremento en la carrera (dx) de la válvula produce un cambio en el caudal (dF), que es proporcional al producto de la posición del vástago y la variación del caudal. En las válvulas de apertura rápida el incremento en la posición del vástago es proporcional a la apertura e inversamente proporcional al caudal. En la tabla I se puede observar la ecuación característica que modela la forma en que cambian la posición x y el flujo F dependiendo del tipo de característica que posee la válvula. Siendo k una constante.

Tabla VIII. **Características de flujo y su modelo matemático**

<b>Característica de flujo</b>	<b>Ecuación Característica</b>
<b>Lineal</b>	$dF/dx = k$
<b>Igual porcentaje</b>	$dF/dx = kF$
<b>Parabólico</b>	$dF/dx = kx$
<b>Apertura rápida</b>	$dF/dx = k/F$

Fuente: elaboración propia.

### 3.1.2. **Coefficiente de flujo**

El coeficiente de flujo es un valor característico de las válvulas, el cual representa la capacidad de manejo de flujo que poseen las válvulas de control. Este coeficiente se denomina  $C_v$  o  $K_v$  según su definición en los sistemas de medición inglés e internacional, respectivamente.

En el sistema ingles se define al  $C_v$  como el caudal de agua en galones USA por minuto a una temperatura de 60 °F que pasa a través de la válvula en posición completamente abierta y con una pérdida de carga de una libra por pulgada cuadrada.

En el sistema internacional de medidas, se define al  $K_v$  como el caudal de agua en metros cúbicos por hora y a una temperatura de 16 °C que, pasando a través de la válvula a una apertura dada, produce una pérdida de carga de un bar. Los coeficientes  $K_v$  y  $C_v$  se encuentran relacionados por el siguiente factor de conversión:

$$K_v = 0.865 C_v$$

### **3.1.3. Rangeabilidad**

Es la relación que existe entre el flujo máximo controlable y el flujo mínimo controlable que pasa a través de la válvula a una caída de presión constante. El flujo mínimo no se refiere a la fuga sino más bien al valor mínimo de flujo que puede ser controlado, en el sentido de que este cambia cuando cambia la carrera de la válvula.

$$Rangeabilidad = \frac{Cv \text{ máximo}}{Cv \text{ mínimo}}$$

Según los ensayos realizados por los fabricantes de las válvulas, se establece que la rangeabilidad de una válvula de igual porcentaje es de 50:1, esto significa que la válvula es capaz de controlar el flujo a través de ella hasta un mínimo del dos por ciento de su respectivo  $C_v$ .

$$\text{Rangeabilidad} = \frac{100 \% C_v}{2 \% C_v} = \frac{50}{1}$$

Asimismo, la rangeabilidad de una válvula lineal es de 33:1 y la de una válvula de apertura rápida es de 20:1. Esto significa que estas válvulas son capaces de controlar el flujo hasta un mínimo del 3 % y 5 % de su correspondiente  $C_v$  o  $K_v$ .

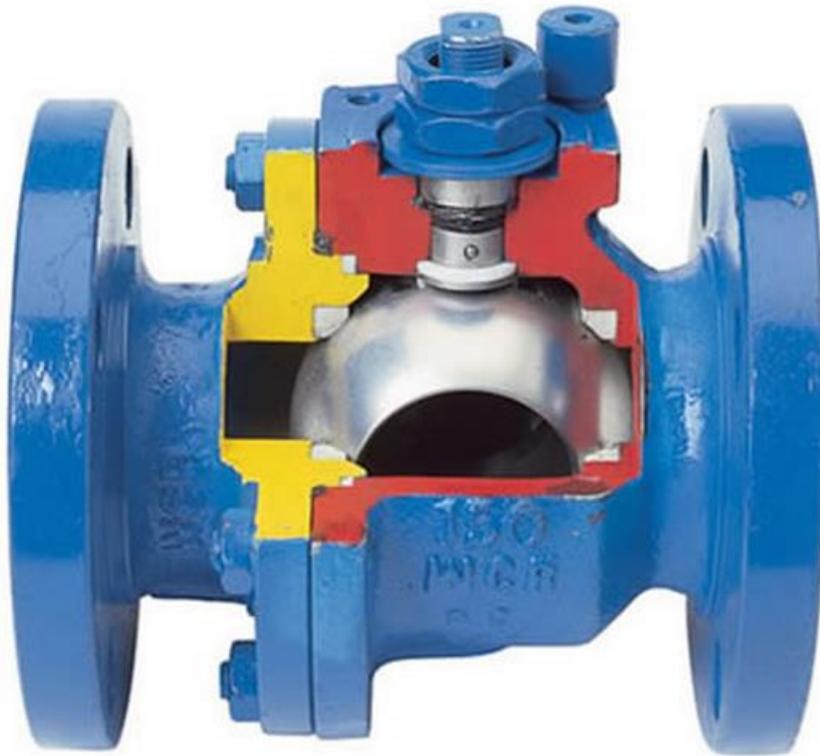
### **3.2. Tipos de válvulas**

A pesar de que la función principal de la válvula es siempre la misma, es decir, permitir, regular o bloquear el flujo del fluido, existen varios tipos de válvulas que pueden utilizarse, según las características físicas y químicas del proceso, como la viscosidad y acidez del material, la temperatura y la presión que se manejará, entre otras. Asimismo, además del conocimiento del proceso, es importante considerar el costo relativo de la válvula ya que, generalmente, los costos son elevados y resultan muy significativos al momento de comisionar un proyecto de automatización.

#### **3.2.1. Válvula de bola**

Es una válvula de tipo rotativa que se compone por un tapón esférico que controla el paso del flujo a través del cuerpo de la válvula. Esta válvula posee un eje diametral a la bola el cual tiene que girar solamente una fracción de vuelta para abrir o cerrar. Se manufacturan dos tipos básicos de válvula de bola, la válvula convencional o de un cuarto de vuelta y la válvula de tipo caracterizado. En la figura 31 se aprecia el corte de una válvula de bola convencional, las dos partes del cuerpo de la válvula están coloreadas en rojo y amarillo y el elemento de estrangulación contrasta por su color plateado.

Figura 31. **Corte de una válvula de bola convencional**



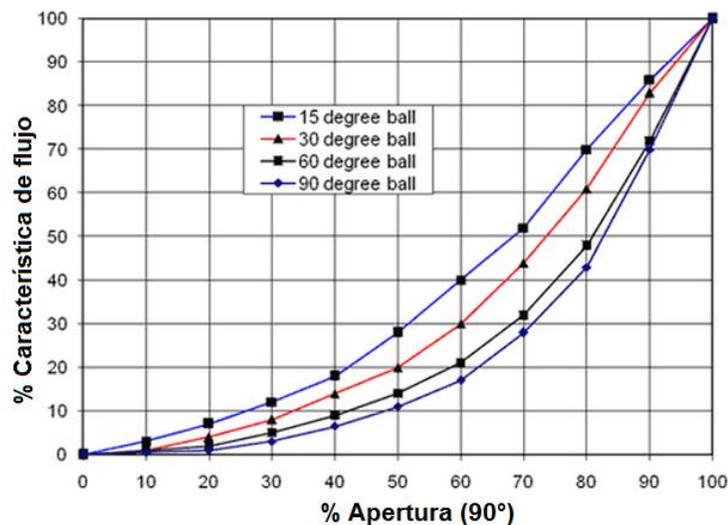
Fuente: [www.sureflowequipment.com](http://www.sureflowequipment.com). Consulta: junio de 2015.

La válvula de un cuarto de vuelta, como su nombre lo indica tiene una rotación máxima de  $90^\circ$  y está conformado por una esfera sólida de acero la cual se encuentra perforada diametralmente. El eje de la perforación es perpendicular al eje de rotación de la válvula. La perforación maquinada en la bola es cilíndrica y posee el mismo diámetro de la tubería. En consecuencia, la bola es de un diámetro mayor al diámetro de la tubería. Se caracteriza, principalmente, por ser de apertura rápida y generar muy bajas pérdidas de presión en apertura máxima.

La válvula de bola caracterizada se subdivide principalmente en tipo V, tipo U y parabólica. En esencia, todas las válvulas de bola caracterizadas poseen una bola que ha sido modificada para que presente una característica de flujo específica.

En la figura 32 se observa un diagrama dinámico de una válvula V-ball (tipo V). Con los procesos actuales de maquinado se puede conseguir cualquier tipo de característica de flujo en la válvula ya que es posible darle la forma adecuada al corte de la válvula para que se comporte como lo requiera el proceso.

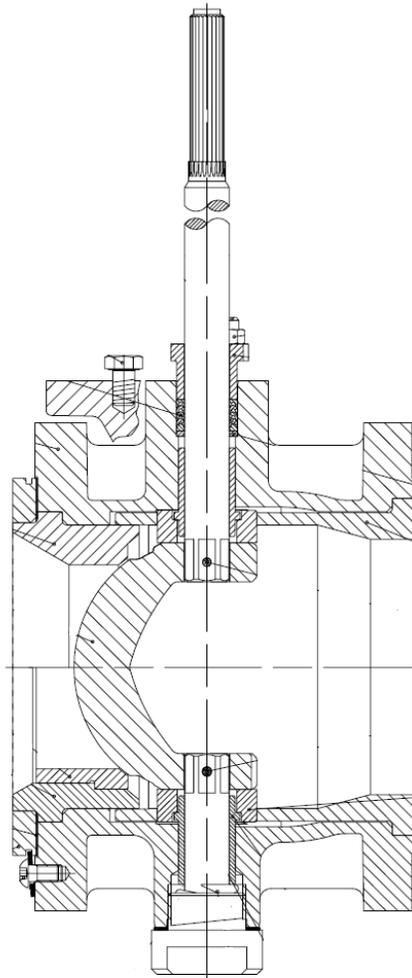
Figura 32. **Características de flujo de la válvula V-Ball y sus perfiles**



Fuente: [www.nilcor.com](http://www.nilcor.com). Consulta: junio de 2015.

Las válvulas de bola, anteriormente, se consideraban como válvulas del tipo *on-off*, sin embargo en la actualidad se utilizan ampliamente como válvulas de control, principalmente las de tipo caracterizado. Estas válvulas comparadas con las tradicionales válvulas de globo, poseen, entre otras ventajas, un bajo costo, menor peso y capacidad para manejar flujos mayores, dos o tres veces mayores a la capacidad soportada por las válvulas de globo. En la figura 33 se observa el corte transversal de una válvula de bola caracterizada.

Figura 33. **Corte de una válvula tipo V-ball**



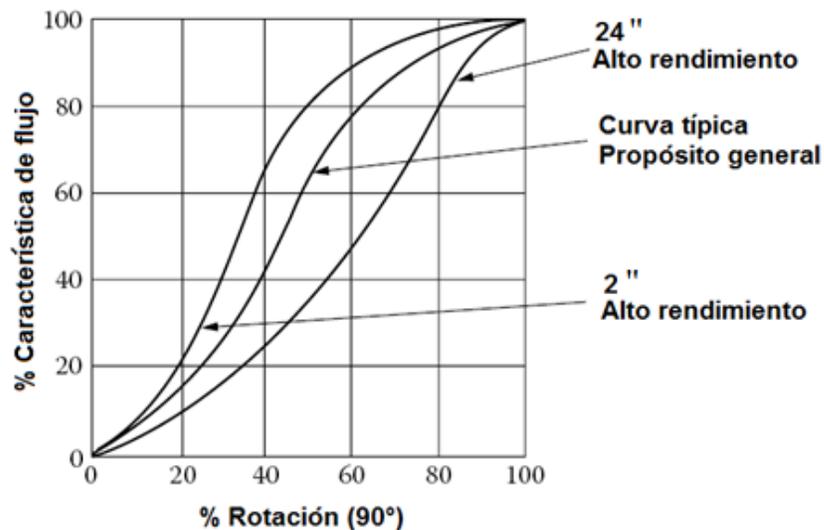
Fuente: *Manual Válvulas Fisher*. Formulario 5772. p. 10.

### 3.2.2. Válvula de mariposa

Este tipo de válvula consiste, principalmente, en un disco que gira respecto a un eje ubicado diametralmente sobre sí mismo y su rango de giro se encuentra restringido entre cero y 90 grados.

En la figura 34 se observan algunas curvas características de la válvula de mariposa. El flujo característico de la válvula se ve afectado por la posición y tamaño relativo del eje comparado con la válvula. Asimismo, la característica de flujo también se ve ligeramente afectada por la posición desde la cual se mueve el eje (por arriba o por abajo). Para propósitos de estrangulación, la rotación de la válvula, generalmente, se limita entre las posiciones de 0 y 60 grados, ya que por encima de estos valores, la capacidad de producir una caída de presión en la válvula no es significativa.

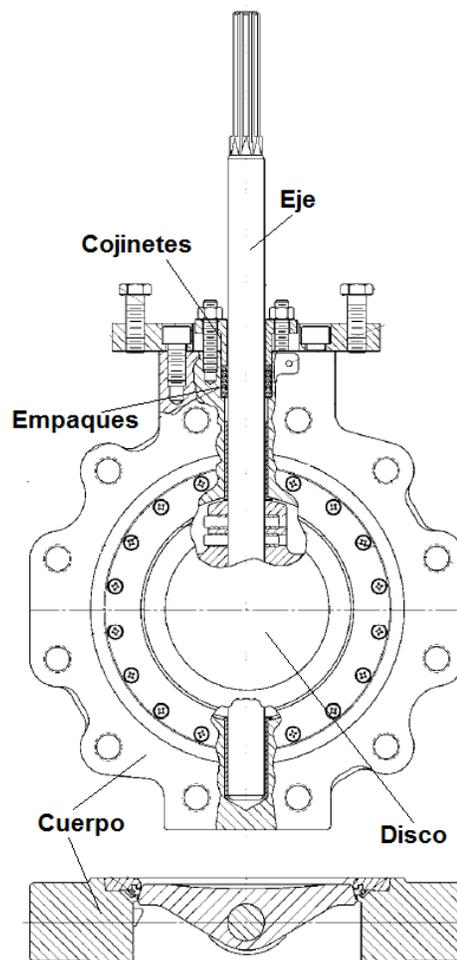
Figura 34. Curva característica de la válvula de mariposa



Fuente: LIPTÁK, Béla. *Instrument Engineer's Handbook*. p. 1274.

Las ventajas principales de esta válvula son su alta capacidad para el manejo de fluidos y su tamaño compacto, comparada con otro tipo de válvulas del mismo diámetro. Entre sus desventajas se pueden mencionar su baja capacidad de manejo de presión y es bastante propensa a sufrir cavitación y, en consecuencia, a sufrir daños considerables en la medalla. En la figura 35 se muestra un diagrama de una válvula de mariposa y sus partes más importantes.

Figura 35. **Válvula de mariposa**

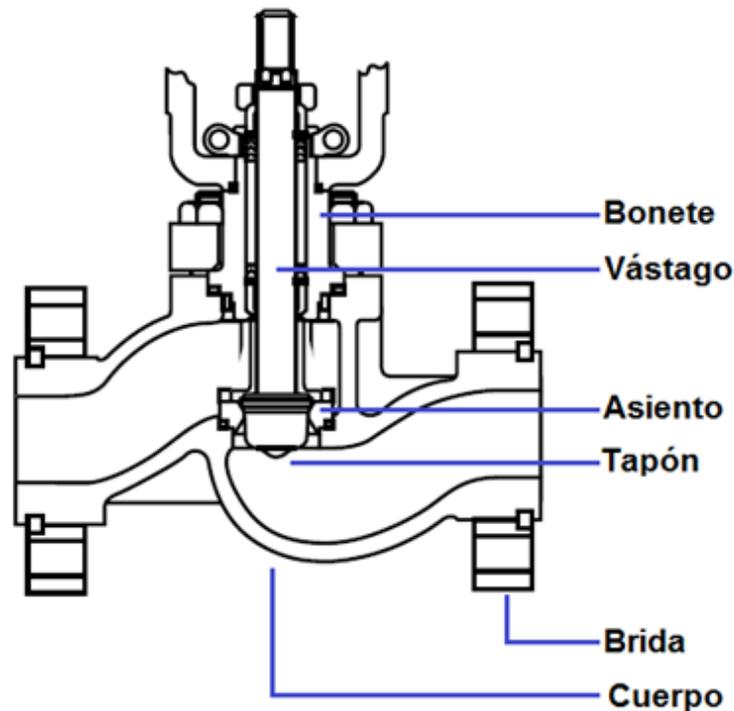


Fuente: *Manual Válvulas Fisher*. Formulario 5343. p 31.

### 3.2.3. Válvulas de globo

Es un tipo de válvula de vástago deslizante. Estas válvulas se caracterizan por realizar un movimiento lineal para iniciar, detener o regular el flujo del fluido. En esencia, el principio de operación de la válvula consiste en el movimiento del tapón alejándose del asiento para permitir el paso del fluido y asentándose para obstaculizar por completo el paso del fluido. Este movimiento vertical del vástago causa que el anillo formado entre el asiento y el tapón varíe de forma gradual su área, con esto consigue una excelente característica de estrangulamiento. En la figura 36 se ilustra un corte de una válvula de globo en donde se indican las partes importantes de la válvula.

Figura 36. Corte transversal de una válvula de globo

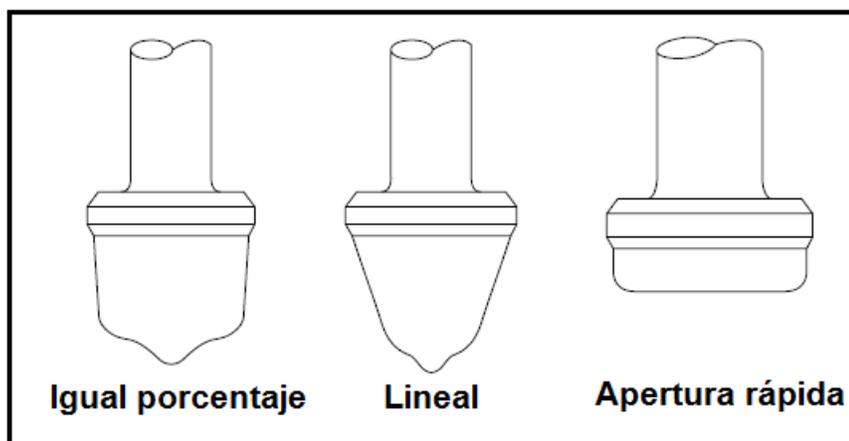


Fuente: LIPTÁK, Béla. *Instrument Engineer's Handbook*. p. 1310.

Los componentes internos más importantes de la válvula de globo son el tapón, el vástago, la caja y el asiento. Estas partes, en conjunto, se conocen comúnmente como el *trim* de la válvula, de manera correcta se debe referir a ellos como los internos de la válvula. El diseño de los internos determina el flujo característico inherente de la válvula, asimismo, los internos son los componentes responsables de la mayoría de pérdidas de presión registradas en este tipo de válvulas.

Las válvulas de globo son dispositivos que funcionan basados en la reducción de presión; es decir, es necesario que las válvulas estrangulen el flujo para controlarlo. Los internos son el corazón de la válvula y operan para darle una relación específica entre el caudal y la elevación del tapón (carrera de la válvula). Esta relación se conoce como la característica de flujo de la válvula y puede manipularse cambiando las características de los orificios de la caja o cambiando la forma del tapón como se ilustra en la figura 37.

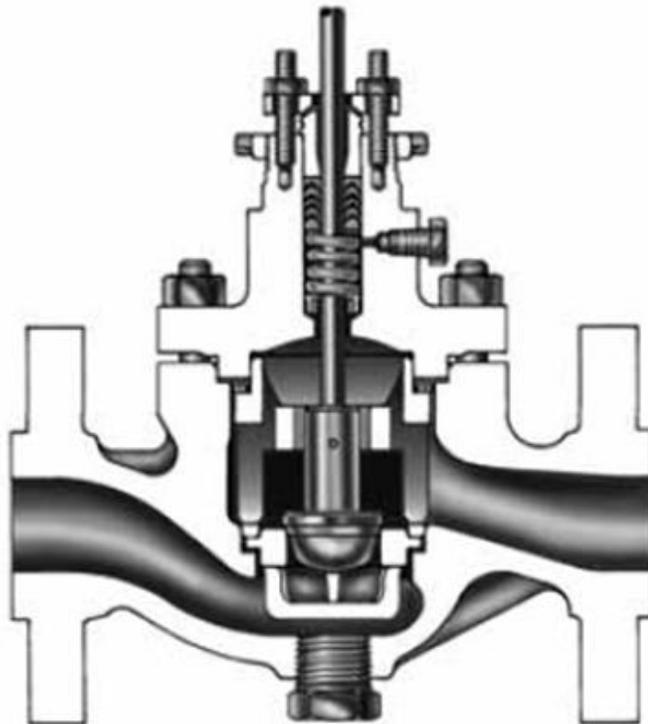
Figura 37. **Tipos de tapones para distintas características de flujo**



Fuente: LIPTÁK, Béla. *Instrument Engineer's Handbook*. p. 1294.

Generalmente las válvulas de globo utilizan una caja caracterizada, la cual tiene como función guiar el vástago y proporcionar asiento al tapón. Asimismo, se puede construir la caja de tal forma que proporcione alguna característica de flujo en particular, además, la caja se puede diseñar para atenuar el ruido y reducir la cavitación. Dependiendo de las necesidades y propiedades del proceso, el cuerpo y los internos de la válvula pueden variar en forma y tamaño como se muestra a continuación. En la figura 38 se ilustra una válvula de puerto simple, es el tipo de válvula de globo más común y relativamente barata con la que cuenta la industria.

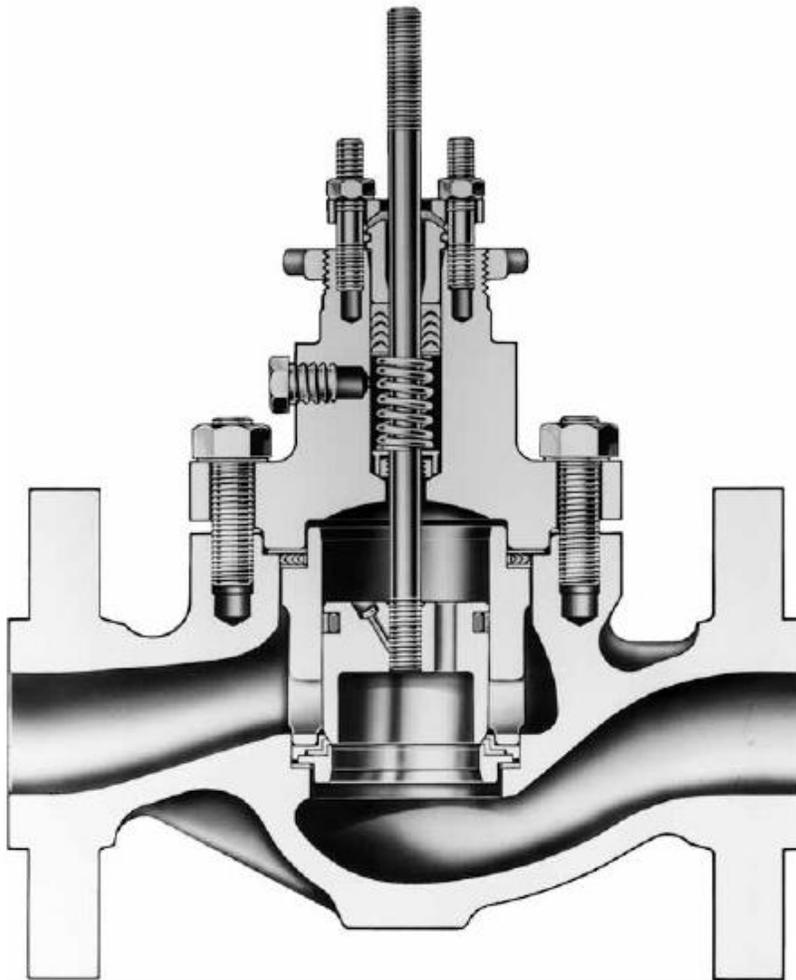
Figura 38. **Válvula de puerto simple**



Fuente: Fisher controls. *Control valve handbook*. p. 42.

En la figura 39 se observa una válvula de globo con caja, esta funciona como guía para el tapón. En este tipo de válvulas la caja es la parte que se utiliza para la caracterización de la válvula.

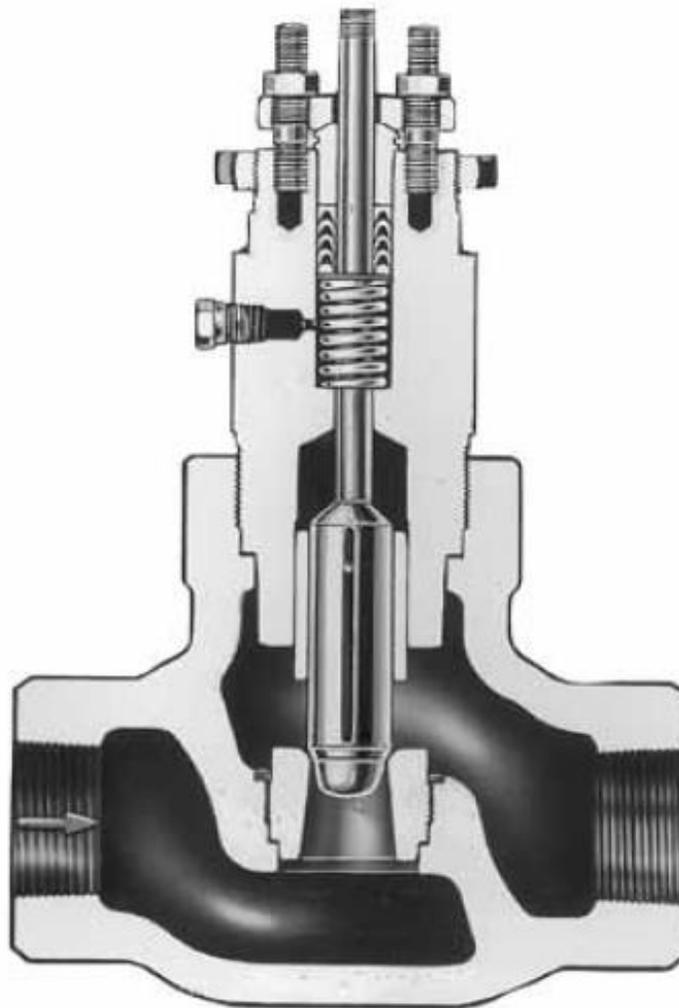
Figura 39. **Válvula de caja**



Fuente: Fisher controls. *Control valve handbook*. p. 43.

En la figura 40 se observa una válvula de globo diseñada para soportar altas presiones. Su característica principal es que posee un tapón más robusto el cual se encuentra sujeto por un bonete más largo. Esto proporciona mayor estabilidad frente a las grandes fuerzas generadas por el paso del flujo.

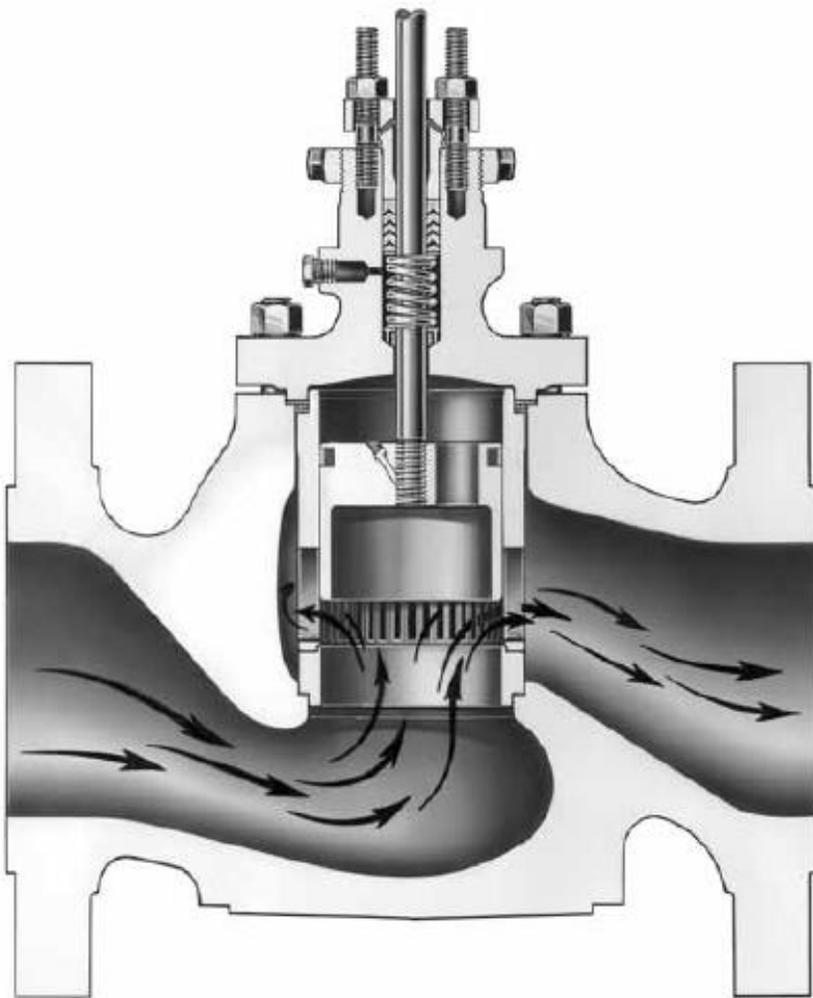
Figura 40. **Válvula para alta presión**



Fuente: Fisher controls. *Control valve handbook*. p. 43.

En la figura 41 se muestra una válvula de globo con una caja especializada para la reducción de ruido. Esta caja se caracteriza por tener perforaciones dispuestas de forma tal que dividen el flujo estrangulado, con ello consiguen la atenuación del ruido.

Figura 41. **Válvula con reducción de ruido**

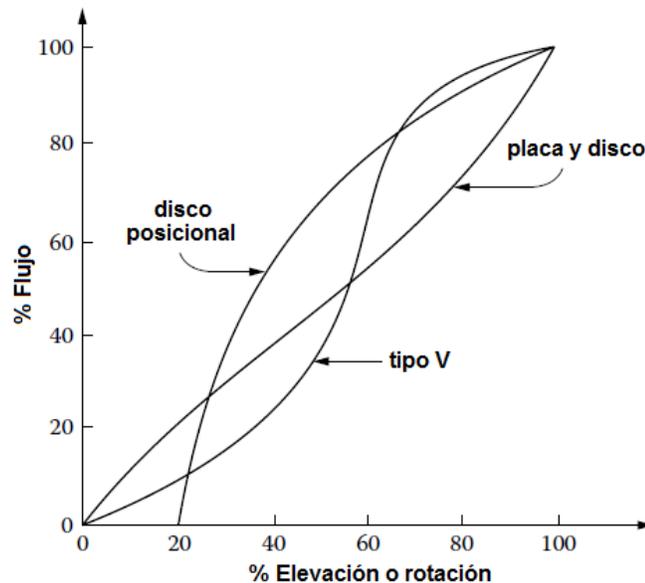


Fuente: Fisher controls. *Control valve handbook*. p. 44.

### 3.2.4. Válvula de compuerta

También conocida como válvula de cuchilla. Introduce una placa que se desliza estrangulando el fluido hasta impedir por completo su paso. De esta manera controla el paso del fluido. Este tipo de válvulas se utilizan, principalmente, para aplicaciones del tipo *on-off*. Si se realizan modificaciones a la compuerta es posible cambiar la característica de flujo de la válvula y por consiguiente darle características de control. En la figura 42 se observan tres características de flujo correspondientes a distintos tipos de válvula de compuerta.

Figura 42. Características de flujo de la válvula de compuerta



Fuente: LIPTÁK, Béla. *Instrument Engineer's Handbook*. p. 1354.

- Válvula de compuerta tipo V. Si se coloca una placa fija con un corte en "V" se crea una válvula con características parabólicas. La capacidad de control de este tipo de válvula depende principalmente de la precisión del actuador y el posicionador.

- Válvula de compuerta de disco posicional. Esta variación de la válvula de compuerta permite el manejo de flujos de muy altas presiones. Consiste en dos discos perforados, uno fijo y otro móvil, el cual ejecuta la operación de estrangulación.
- Válvula de compuerta de placa y disco. En este tipo, se agrega una placa fija a la válvula, la cual produce una caída de presión constante a través de la misma y ayuda a proteger el disco para aplicaciones de alta presión y para líquidos corrosivos.

Figura 43.

### Válvula de compuerta



Fuente: [www.pepisagp.com](http://www.pepisagp.com). Consulta: julio de 2015.

Las ventajas principales de esta válvula son su alta capacidad, su cierre totalmente hermético, su bajo costo comparado con otras válvulas de la misma capacidad. Entre sus desventajas están que son muy grandes y pesadas lo cual complica su instalación y mantenimiento, además su cierre es muy lento debido a que se debe girar varias veces el volante para conseguir la apertura o cierre de la misma.

Tabla IX. **Resumen de características de las válvulas**

<b>Válvula de bola</b>	
<b>Uso recomendado</b>	Rangeabilidad típica de 50:1
	Servicio de conducción y corte sin estrangulación y control de flujo solo en el caso de las válvulas caracterizadas.
	Cuando se requiere apertura rápida.
	Apta para el manejo de fluidos viscosos o con fibras y sólidos en suspensión.
	Bajas pérdidas de presión.
<b>Ventajas</b>	Bajo costo, alta capacidad, corte bidireccional, pocas fugas, poco mantenimiento, cierre hermético.
<b>Desventajas</b>	Requiere alta torsión para manejarla, es susceptible al desgaste de sellos, propensa a la cavitación.
<b>Válvula de mariposa</b>	
<b>Uso recomendado</b>	Servicio con apertura total o cierre total.
	Servicio con estrangulación.
	Accionamiento frecuente.
	Bajas pérdidas de presión.
<b>Ventajas</b>	De peso ligero, compacta y de bajo costo, número mínimo de piezas móviles, alta capacidad, buena disponibilidad para grandes diámetros (hasta 150")
<b>Desventajas</b>	Alta torsión para accionarla, capacidad limitada para caída de presión, propensa a la cavitación, para cierre hermético es necesario utilizar empaques especiales.

Continuación de la tabla IX.

<b>Válvula de globo</b>	
<b>Uso recomendado</b>	Rangeabilidad de 35:1 a 50:1
	Estrangulación o regulación de flujo.
	Para accionamiento frecuente.
	Disponibilidad para aplicaciones criogénicas, vaporización, altas temperaturas, etc.
	Cuando es aceptable cierta resistencia a la circulación (pérdidas).
<b>Ventajas</b>	Estrangulación eficiente con mínima erosión en el asiento, control preciso del flujo, disponibilidad para diferentes características de flujo, disponibilidad para reducción de ruido y cavitación.
<b>Desventajas</b>	Pérdidas de presión elevadas, costo relativo alto, aplicación limitada para líquidos con sólidos en suspensión.
<b>Válvula de compuerta</b>	
<b>Uso recomendado</b>	Servicio de apertura total o cierre total sin estrangulación.
	Para uso poco frecuente.
	Para mínimas cantidades de fluido o líquido atrapados en la tubería.
<b>Ventajas</b>	Alta capacidad, cierre hermético, bajo costo, pocas pérdidas.
<b>Desventajas</b>	Control deficiente del flujo, requiere mucha fuerza para accionarla, produce cavitación en presencia de bajas presiones, en posición de estrangulación producirá erosión del asiento y del disco.

Fuente: elaboración propia.

### 3.3. Tipos de actuadores y posicionadores

Para accionar la válvula se debe aplicar el torque necesario para vencer al proceso y conseguir girar el elemento de estrangulación, en el caso de las válvulas rotativas, o aplicar una fuerza axial en el caso de las válvulas de movimiento lineal. En una planta automatizada la fuerza motriz para la válvula es proporcionada por medio de un actuador.

Los actuadores pueden ser de varios tipos y formas. Sin embargo, es posible clasificarlos en tres clases básicas, en función del tipo de energía que utilizan para generar el movimiento. Desde este punto de vista, los actuadores pueden ser del tipo eléctrico, hidráulico o neumático.

### 3.3.1. Actuadores eléctricos

Se trata básicamente de un arreglo de engranajes acoplado a un motor eléctrico. Se aprovechan las altas revoluciones generadas por el motor para obtener un torque elevado debido a la relación de vueltas del arreglo de engranajes. Generalmente el motor eléctrico de este tipo de actuadores está constituido por un motor de inducción, un motor paso a paso o un servo motor como el que se aprecia en la figura 44.

Figura 44. **Actuador eléctrico manejado por servomotor**



Fuente: [www.flowserve.com](http://www.flowserve.com). Consulta: julio de 2015.

La principal ventaja de los actuadores eléctricos es que eliminan la necesidad de otra fuente de energía, utilizando únicamente energía eléctrica. Sin embargo, este tipo de actuadores tienen la desventaja de su capacidad limitada para el manejo de cargas grandes. No pueden utilizarse en válvulas de gran tamaño y tampoco en procesos donde la presión del fluido ejerza fuerzas elevadas sobre el elemento de estrangulación. Este tipo de actuadores, generalmente, no cuentan con la capacidad de ir a una posición de falla en el caso de que se pierda el suministro de energía eléctrica, se mantienen en la última posición alcanzada.

Los actuadores eléctricos son dispositivos lineales, pues realizan el movimiento de la carga a velocidad constante. Esto significa que la relación entre el control y el elemento de estrangulación es proporcional y solamente dependen de la velocidad nominal del motor y de la relación de engranajes, siendo ambas cantidades constantes.

### **3.3.2. Actuadores hidráulicos**

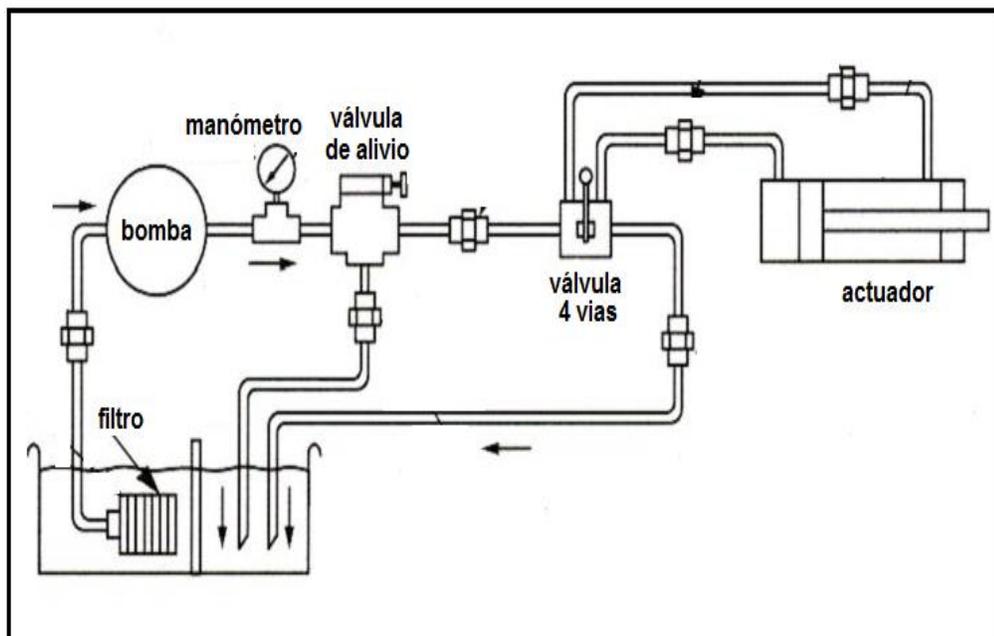
Este tipo de actuadores funcionan con base en la presión ejercida por un fluido de trabajo, generalmente algún tipo de aceite. La presión generada por las unidades hidráulicas son elevadas por lo que se requiere que cualquier sistema hidráulico se encuentre sellado herméticamente a modo que no permita fugas de ningún tipo.

Los actuadores hidráulicos, se utilizan a menudo en plantas donde no se dispone de un suministro de aire para instrumentación, donde se requiere de una mayor rigidez para el manejo de cargas elevadas o cuando se requiere cierta confiabilidad que no puede alcanzarse utilizando actuadores neumáticos.

Los actuadores hidráulicos son superiores a los actuadores electromecánicos en velocidad, rigidez del actuador y posicionamiento más preciso, lo que conlleva una mayor complejidad en su diseño y en sus componentes. En la figura 45 se aprecia un diagrama de un sistema hidráulico básico.

Estos actuadores requieren el uso de una bomba. Regulan la presión del fluido por medio de servomotores o servo válvulas. En los actuadores que utilizan servomotor, este únicamente se acciona cuando el actuador necesita reposicionarse bombeando aceite al actuador. En el caso de tratarse de un sistema manejado por servo válvulas, la bomba siempre está en movimiento y el encargado de regular el flujo del aceite es la válvula.

Figura 45. **Sistema hidráulico básico**



Fuente: [datoscarterpillar.blogspot.com](http://datoscarterpillar.blogspot.com). Consulta: julio de 2015.

### 3.3.3. Actuadores neumáticos

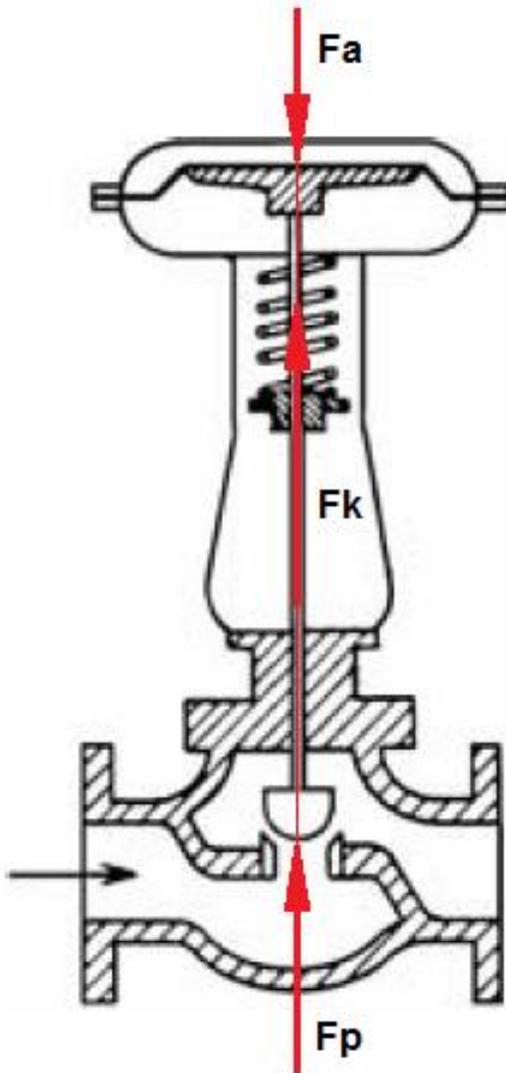
Estos actuadores responden ante una señal de aire para mover el vástago o eje de la válvula hasta una posición de estrangulamiento requerida. Básicamente existen dos tipos de actuadores neumáticos, los de diafragma y los de pistón. En un actuador de diafragma, se aplica aire de presión variable en oposición a un resorte, de tal forma que la combinación de fuerzas del diafragma y el resorte actúan para balancear la fuerza del fluido que pasa a través de la válvula. En el caso de un actuador de pistón, se utiliza aire de presión constante y aire de presión variable para balancear las fuerzas del flujo en la válvula.

Los actuadores de diafragma, generalmente, proporcionan un desplazamiento lineal, por lo que su uso en válvulas de globo es bastante común, se deben de calcular considerando todas las fuerzas involucradas en el conjunto válvula y actuador.

En la figura 46 se aprecia el diagrama de cuerpo libre de una válvula con actuador tipo diafragma. Se observa que existen tres fuerzas que actúan sobre el conjunto de la válvula y actuador, estas son la fuerza producida por el fluido que circula a través de la válvula ( $F_p$ ), la fuerza del resorte del actuador ( $F_k$ ) y la fuerza proporcionada por la presión de aire que ingresa al actuador ( $F_a$ ), estas fuerzas se definen como sigue:

- $F_p$  = presión del fluido X área del tapón
- $F_k$  = constante del resorte X desplazamiento del vástago
- $F_a$  = presión de aire en la cámara X área efectiva del diafragma

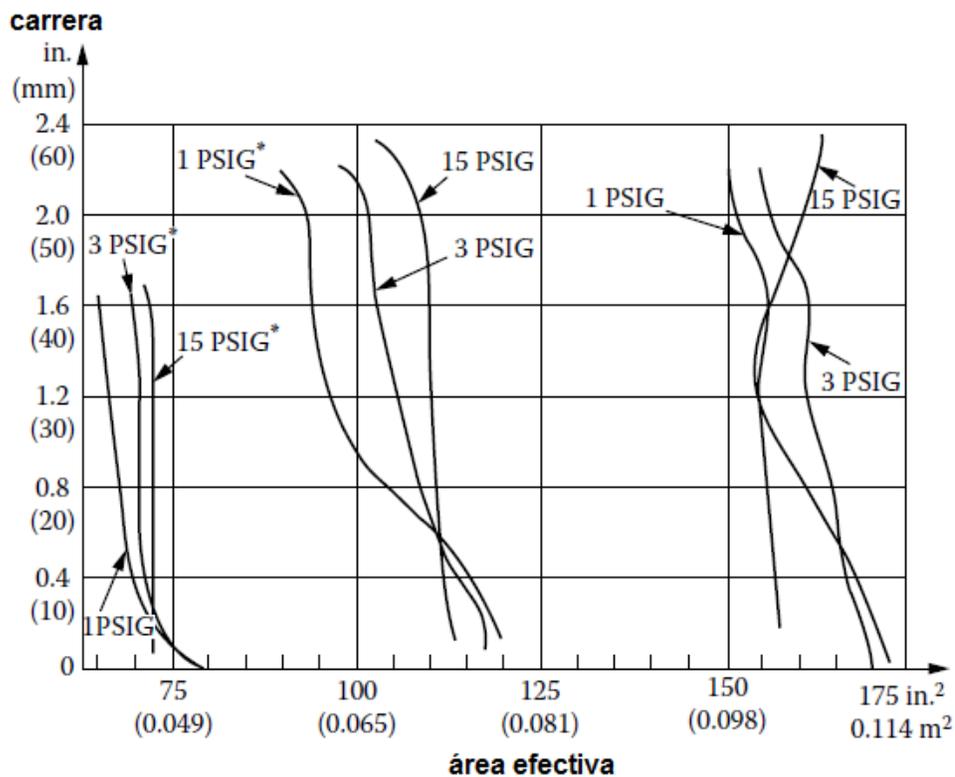
Figura 46. Diagrama de cuerpo libre de una válvula y su actuador



Fuente: elaboración propia, empleando Paint.net.

En la práctica se encuentran muchas no-linealidades que afectan el desempeño del actuador. Una de ellas es la variación del área efectiva del diafragma, el cual varía en función de la carrera y de la presión aplicada tal como se observa en la figura 47.

Figura 47. Área efectiva del diafragma *versus* de la carrera del vástago

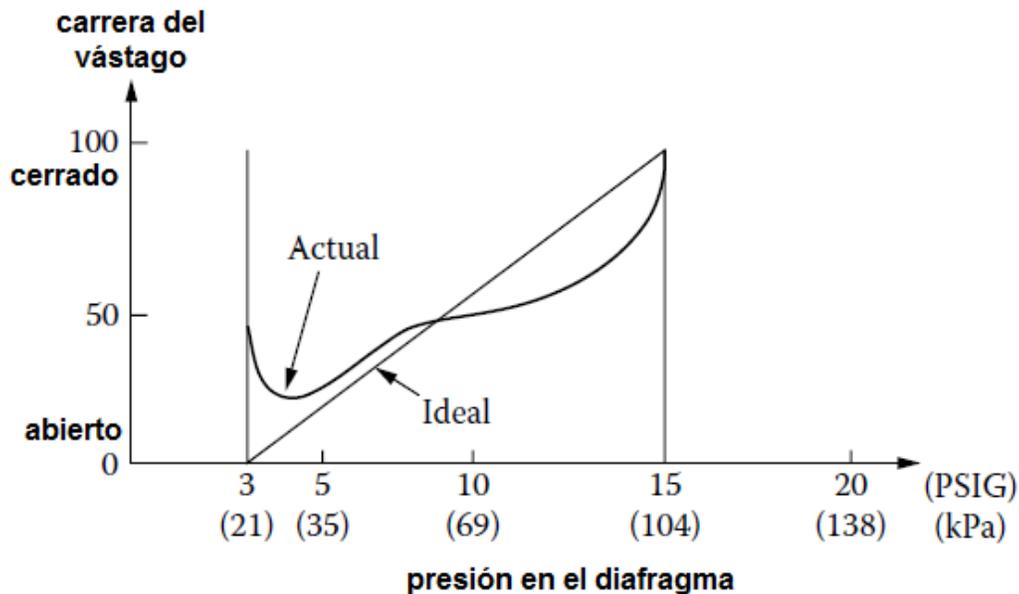


Fuente: LIPTÁK, Béla. *Instrument Engineer's Handbook*. p. 1130.

Otra fuente de no linealidad se encuentra en las fuerzas que actúan sobre el tapón debido a que la presión diferencial a través de la válvula varía como una función no lineal de la carrera del vástago.

De igual forma, los resortes también pueden comportarse de manera no lineal, sin embargo con la elección adecuada de los mismos esta no linealidad se puede reducir al mínimo. En la figura 48 se aprecia una gráfica del comportamiento de la carrera de la válvula *versus* la presión aplicada al diafragma considerando todas las no linealidades mencionadas anteriormente.

Figura 48. **Carrera del vástago en función de la presión sobre el diafragma**

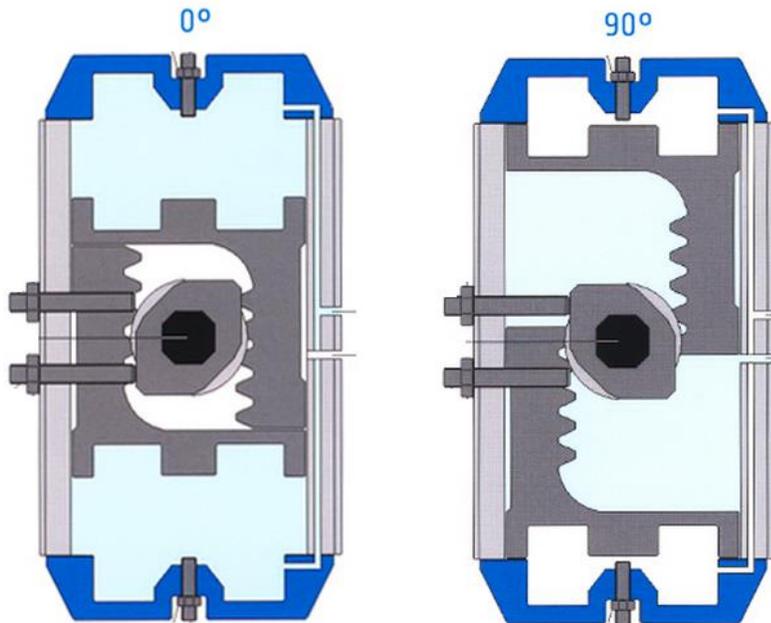


Fuente: LIPTÁK, Béla. *Instrument Engineer's Handbook*. p. 1130.

Los actuadores de pistón son populares en el caso de actuadores de movimiento rotativo, ya que simplifican el diseño del mismo. Esto no significa que no se pueda utilizar un actuador de diafragma para generar movimiento rotativo o un actuador de pistón para generar movimiento lineal, simplemente, es más directa la transmisión del movimiento.

Una de las principales ventajas de los actuadores de pistón con respecto a los de diafragma es su capacidad de manejar presiones mayores. Esto quiere decir que facilita su uso en actuadores de alta velocidad. Asimismo, esto es útil cuando se requiere el manejo de mucha carga. En la industria un actuador de diafragma no puede soportar más de 40 psig, a diferencia de un actuador de pistón que es capaz de manejar hasta 150 psig, la presión que soportan es función del tipo de material.

Figura 49. **Corte de un actuador de piñón y cremallera**



Fuente: airpower-gmbh.com. Consulta: julio de 2015.

Uno de los tipos de actuador rotativo de tipo pistón más populares en la industria guatemalteca es el actuador de tipo piñón y cremallera. Como su nombre lo indica, consiste en un arreglo de cremalleras y un piñón colocados dentro de una caja o cilindro de aluminio.

Este tipo de actuador también puede ser de doble o de simple efecto. Si es de simple efecto, dentro de la caja se debe contar con un arreglo de resortes para mantener el actuador en su posición de falla. En los actuadores de doble efecto no se utilizan los resortes y el cilindro debe contar con dos entradas de aire opuestas para el manejo de los pistones.

### 3.3.4. Posicionadores mecánicos

Para propósitos de control, un actuador siempre debe estar acompañado de un posicionador, el cual básicamente es un dispositivo de realimentación que indica al controlador la posición actual del elemento de estrangulación para que en el caso de que exista un error con respecto al *setpoint*, este tome las acciones correctivas y busque el punto de consigna solicitado.

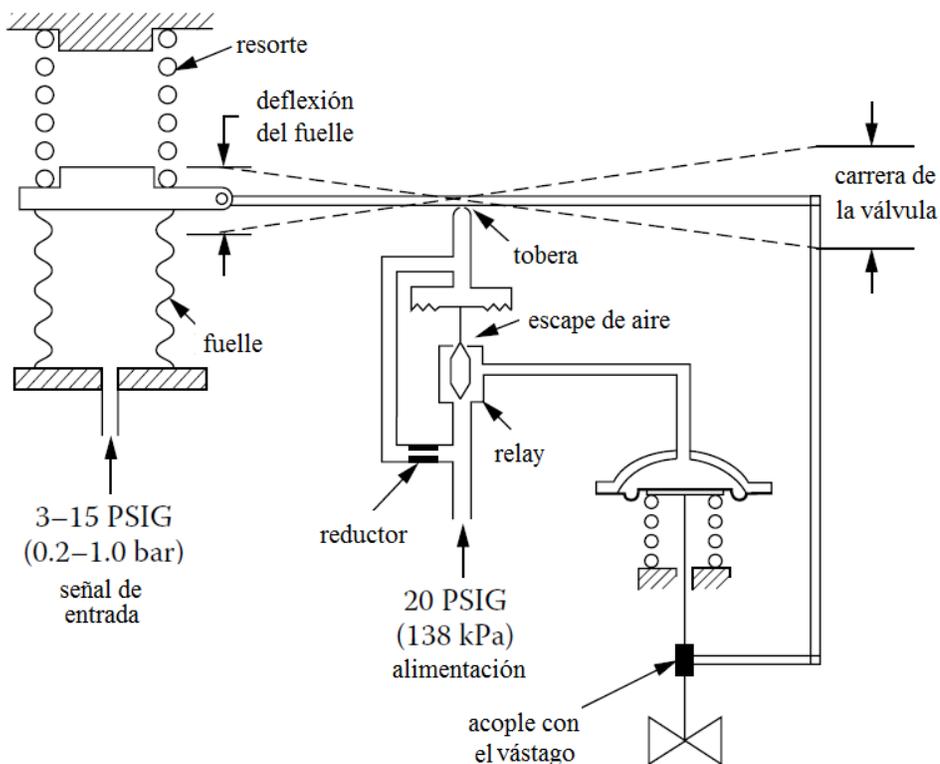
El control de la válvula se realiza por medio de una señal neumática de 3 a 15 psig (0.2 a 1 bar). Esta señal ingresa al posicionador el cual es el encargado de indicarle al actuador en qué proporción debe cambiar su carrera. En condiciones normales, una señal neumática de 3 psig representa el cierre total de la válvula (0 % de la carrera) y una señal de 15 psig representa la apertura total de la válvula (100 % de la carrera). El posicionador es un elemento lineal y por lo tanto a 9 psig la carrera de la válvula debe ser del 50 %.

Aunque el mecanismo de un posicionador suele ser complicado, su funcionamiento es relativamente simple. La señal neumática (3 a 15 psig) deforma el fuelle de manera proporcional, de tal forma que una palanca acoplada al fuelle libera u obstruye la salida de aire de la tobera, lo que permite que fluya más o menos aire respectivamente.

Dependiendo de la cantidad de aire liberado por la tobera, el relé neumático permite el paso de aire de alimentación hacia el actuador, lo que se traduce en movimiento del vástago dependiendo de la presión aplicada al diafragma del actuador.

En la figura 50 se aprecia el diagrama básico de un posicionador mecánico del tipo "movimiento balanceado". De acuerdo con el diagrama, si la señal recibida por el fuelle es de 3 psig, la deflexión en el fuelle es nula y no hay obstrucción alguna en la tobera, por lo que el relé no permite paso alguno de aire hacia la cámara del diafragma del actuador y, por lo tanto, el vástago no realizará ningún movimiento (3 psig = 0 % de la carrera). Por otro lado si la presión aplicada al fuelle es de 15 psig, el fuelle se comprime al máximo y obstruye por completo el escape de aire en la tobera. Esto significa que el relé permitirá el paso máximo de aire hacia el actuador y por lo tanto, el vástago se debe mover un 100 % de su carrera.

Figura 50. Diagrama de un posicionador mecánico

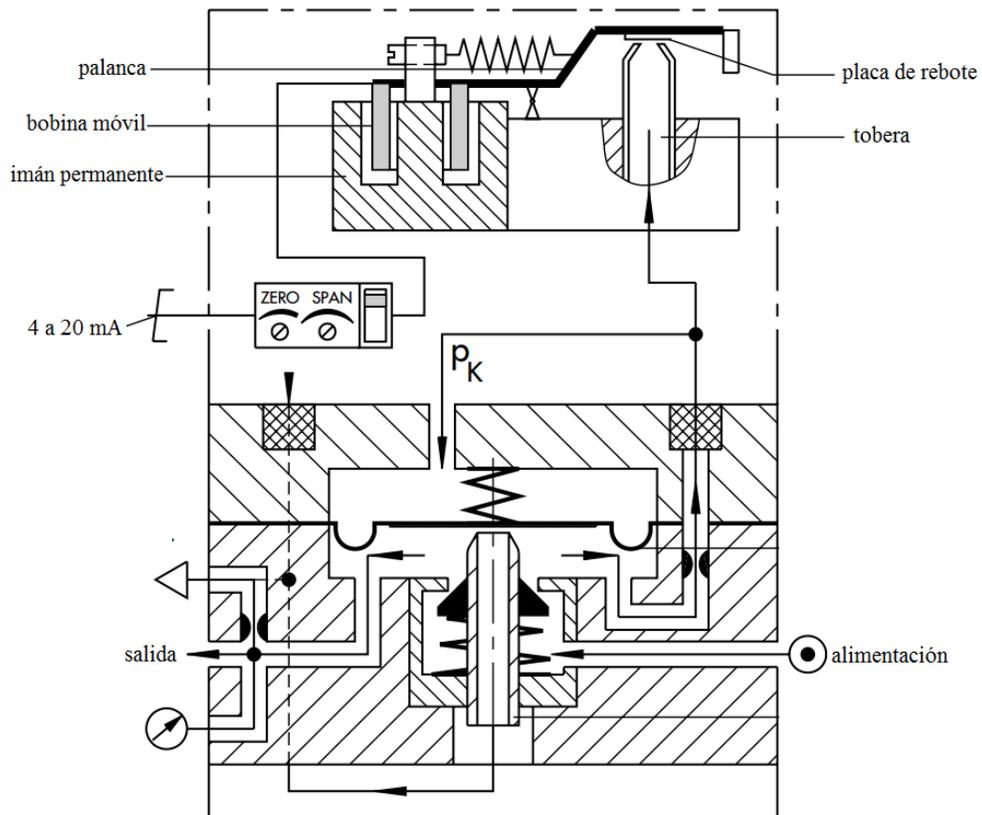


Fuente: LIPTÁK, Béla. *Instrument Engineer's Handbook*. p. 1095.

### 3.3.5. Posicionadores electro-neumáticos

Los posicionadores electro-neumáticos utilizan el mismo principio de trabajo de los posicionadores mecánicos. Se diferencian en que al posicionador electro-neumático se le agrega un convertidor de corriente eléctrica a presión para su comunicación con el controlador o PLC. Además, dependiendo de la complejidad del posicionador (posicionador inteligente) este puede contar con un circuito de control con microprocesador, de tal forma que el dispositivo es capaz de auto calibrarse, guardar en memoria posiciones y generar ciertos perfiles de apertura de la válvula.

Figura 51. Convertidor de corriente a presión



Fuente: [www.samson.de](http://www.samson.de). Consulta: julio de 2015.

En la figura 51 se aprecia el diagrama de un convertidor I/P. El convertidor de corriente a presión es un dispositivo electro-neumático que convierte una señal eléctrica de 4 a 20 miliamperios a una señal neumática de 3 a 15 psig. Los convertidores I/P son parte esencial de cualquier tipo de posicionador que utilice un protocolo de comunicación o señal de campo para comunicar el controlador con la válvula, puede tratarse de una señal 4 a 20 mA o señales de campo del tipo Profibus o Modbus entre otras.

El convertidor funciona según un sistema de compensación de fuerzas, la corriente a la entrada del convertidor (4 a 20 mA) pasa por la bobina móvil situada en el campo magnético de un imán permanente. En la palanca se contrarresta la fuerza de la bobina móvil, de forma proporcional a la corriente eléctrica con la fuerza de la presión dinámica producida por el choque del chorro de aire que sale por la tobera contra la palanca de rebote. Se debe calibrar el chorro de aire de tal forma que produzca una salida de presión lineal de 3 a 15 psig.

### **3.4. Deterioro de las válvulas**

Durante su operación normal, la válvula es sometida a esfuerzos y desgastes debido a las características del proceso y a la dinámica de los fluidos que circulan a través de ella. Asimismo la fricción que se genera entre el elemento de estrangulación y los empaques o el mismo fluido contribuyen al desgaste y deterioro de la misma. Las principales causas de deterioro de la válvula son la erosión, la corrosión, la cavitación y la vaporización.

### 3.4.1. Corrosión

Se trata del deterioro de un material como consecuencia de un ataque electroquímico producido por su entorno o por el proceso al que se encuentra expuesto debido a la presencia de oxígeno disuelto. En la figura 52 se aprecia el ataque corrosivo que causa el ácido nítrico sobre el metal. En general, todos los metales expuestos a ambientes corrosivos deben poseer un revestimiento que se utiliza como material de sacrificio, cuya función es formar una película de óxido metálico por encima del metal base aislándolo y protegiéndolo del agente corrosivo

Figura 52. Corrosión por ácido nítrico



Fuente: [www.cosmos.com.mx](http://www.cosmos.com.mx). Consulta: julio de 2015.

Con el tiempo, el paso del fluido a través de los sistemas de tuberías y principalmente a través de las válvulas y reductores, puede crear efectos electroquímicos y mecánicos sobre la película protectora. La velocidad y la turbulencia pueden incrementar los ciclos de polarización de las reacciones de oxidación reducción, disminuyendo el espesor de la capa protectora del óxido metálico hasta alcanzar el metal base. En este punto, el metal base reacciona nuevamente con el proceso creando un nuevo óxido metálico, pero esta vez, sacrificando el metal base, esto conlleva a un rápido deterioro del material que compone el cuerpo de la válvula.

La corrosión en las válvulas se puede controlar eligiendo el material adecuado para el revestimiento, según el proceso en el cual se pretende instalar la válvula. Actualmente, se cuenta con la capacidad de utilizar revestimientos de cerámica o polímeros especializados para resistir a ciertos ataques químicos, reduciendo la dependencia de metales difíciles de trabajar por su dureza o por sus costos elevados y aumentando significativamente el tiempo de vida de las válvulas.

### **3.4.2. Erosión**

Es un fenómeno causado por el impacto a alta velocidad del agua, partículas abrasivas y por efecto de la corrosión. El daño producido por la erosión es proporcional a la velocidad del líquido y a la cantidad de material erosivo en suspensión. Para reducir la erosión se debe reducir la velocidad del fluido a través de los internos de la válvula, lo cual solo puede conseguirse hasta cierto punto, dependiendo de las pérdidas máximas permitidas.

La erosión abrasiva ocurre cuando la corriente del fluido arrastra partículas sólidas de alta dureza, mayor a la dureza de la superficie interna de la válvula y sus componentes. Si el flujo viaja a suficiente velocidad e impacta directamente sobre las superficies, con el tiempo producirá daños visibles al material, como se observa en la figura 53, lo cual producirá fugas en la válvula.

La solución del problema involucra el uso de materiales más duros, cambiar el patrón del flujo y reducir la velocidad, sin embargo la erosión solo puede reducirse en magnitud y no puede eliminarse por completo.

Figura 53. **Daños típicos producidos por erosión**

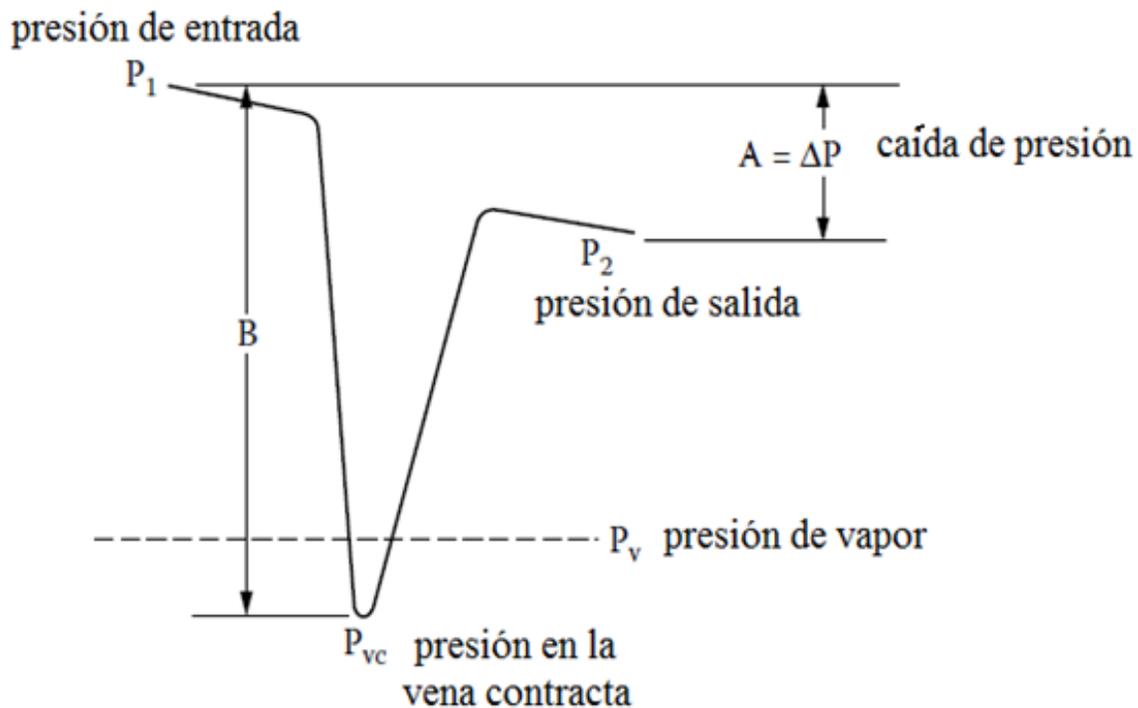


Fuente: [www.hubhomedesign.com](http://www.hubhomedesign.com). Consulta: julio de 2015.

### 3.4.3. Cavitación

Es una reacción hidrodinámica compleja que ocurre cuando se da un cambio de presión en el fluido. El proceso básico de cavitación ocurre cuando un líquido fluye a través de una restricción o un orificio manteniendo su energía de presión constante, según el principio de conservación de la energía. Este líquido describe una línea piezométrica según el teorema de Bernoulli, como la que se muestra en la figura 54, lo que causa una descompresión en el fluido.

Figura 54. Línea piezométrica de un fluido que presenta cavitación



Fuente: LIPTÁK, Béla. *Instrument Engineer's Handbook*. p. 1295.

Cuando el líquido alcanza la presión de vapor cambia de estado formando burbujas de gas, las cuales, al viajar a una región de mayor presión implosionan generando fuerzas de impacto en contra de las paredes de la válvula o tubería que contiene el fluido. Esto causa la fatiga de las superficies y hasta posibles micro fracturas, que paulatinamente, arrancan el metal de la superficie y producen los patrones inconfundibles de la cavitación.

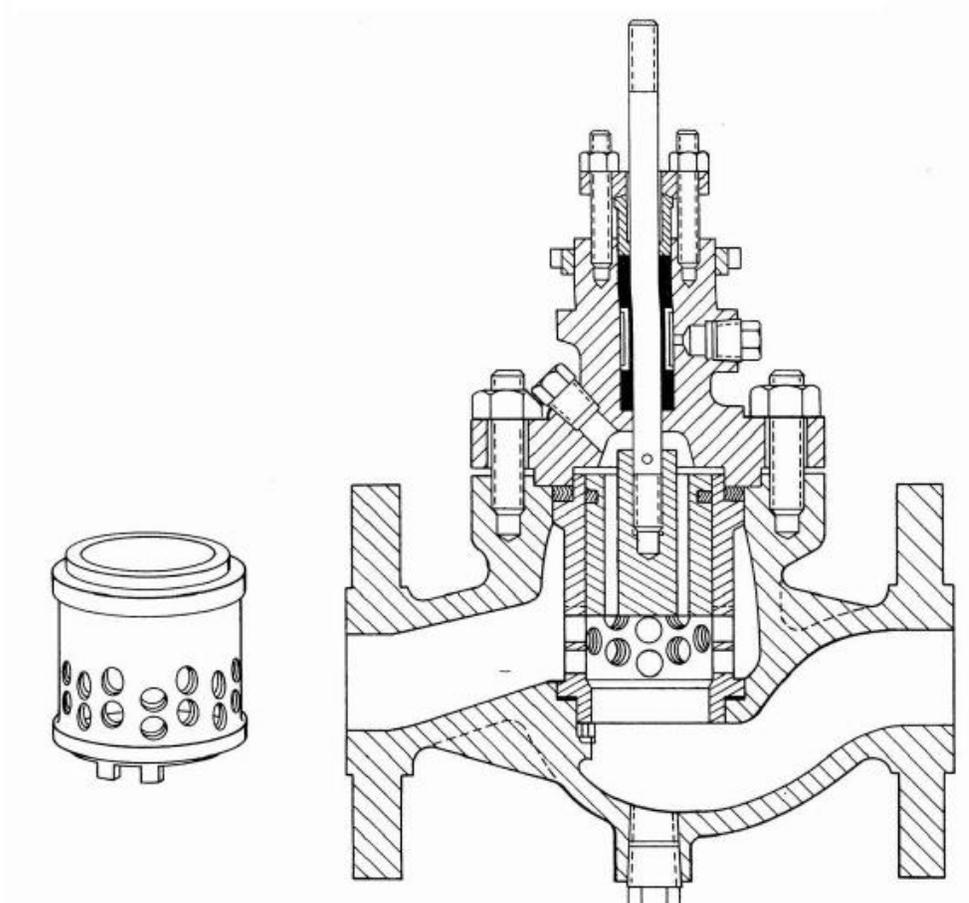
Figura 55. **Daños producidos por cavitación**



Fuente: [www.hidraol.es](http://www.hidraol.es). Consulta: julio de 2015.

No existe ningún material que pueda resistir la cavitación, pues esta, sin importar su grado de severidad, generará daños en la superficie y, eventualmente, conseguirá que el material falle (figura 55). El tiempo que esto tome es función del fluido, el tipo de material de fabricación del cuerpo y los internos de la válvula y la severidad de la cavitación. Sin el uso adecuado de internos especialmente diseñados para controlar la cavitación como los que se observan en la figura 56, se reduce drásticamente el tiempo de vida de la válvula.

Figura 56. **Caja especializada para reducir la cavitación**



Fuente: LIPTÁK, Béla. *Instrument Engineer's Handbook*. p. 1071.

#### **3.4.4. Vaporización o *flashing***

Se trata de un fenómeno asociado al cambio de fase del fluido de líquido a vapor debido a cambios drásticos en la presión del fluido al pasar por restricciones u orificios que, básicamente, es de lo que está conformada una válvula.

La cavitación ocurre cuando  $P_2 > P_v$ , es decir, cuando la presión de salida aun es mayor a la presión de vapor. La vaporización se da cuando  $P_2 < P_v$ , en este caso, la presión de salida es menor que la presión de vapor. Como se observa en la gráfica de la figura 54.

Cuando un líquido cambia súbitamente a vapor, como sucede en el caso del *flashing*, también cambia de manera significativa su volumen. En la figura 57 se observa un tapón dañado por efectos de la vaporización.

Figura 57. **Daños típicos producidos por vaporización**

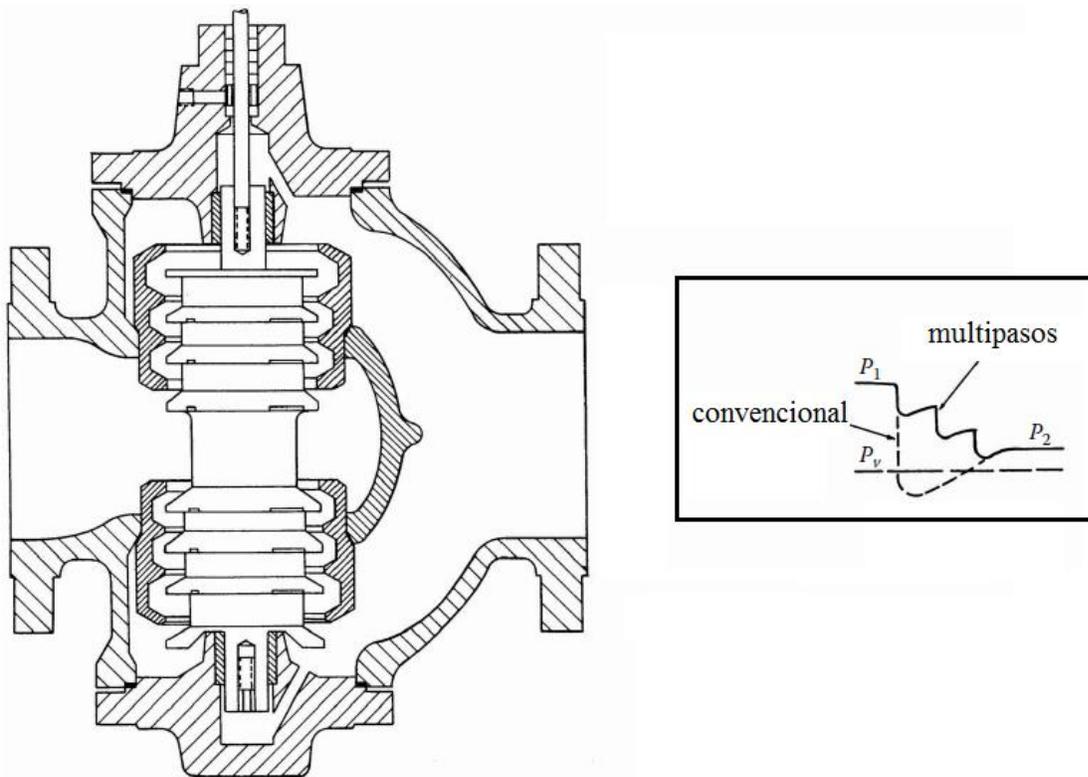


Fuente: Fisher controls. *Control valve handbook*. p. 137.

Si es imposible evitar la vaporización, la tubería de aguas abajo de la válvula debe ser mucho más grande que la tubería de entrada, de tal forma que se mantenga la velocidad de la corriente bifásica (líquido y vapor) lo suficientemente baja como para prevenir erosión. La válvula ideal para usarla en este tipo de aplicaciones es una válvula en ángulo con una conexión a la salida sobredimensionada.

El uso de una válvula multipasos como la que se observa en la figura 58 representa una solución para el problema de la vaporización, pues se consigue que la energía de presión cambie por etapas y no de forma abrupta, esto evita que el fluido alcance la presión de vapor.

Figura 58. **Válvula multipasos**



Fuente: LIPTÁK, Béla. *Instrument Engineer's Handbook*. p. 1073.

## 4. DIMENSIONAMIENTO DE LA VÁLVULA DE CONTROL

La válvula es un elemento importante para el control de los procesos y el dimensionamiento adecuado de la misma es esencial para que cumpla de manera correcta con su función. Existen dos requisitos para que una válvula de control funcione adecuadamente.

- Se deben conocer los datos correctos del proceso. Esto incluye el conocimiento de las condiciones de flujo máximo y mínimo, las caídas de presión permitidas en la válvula, la presión y temperatura máximas de entrada, la viscosidad del fluido y cualquier otra propiedad fisicoquímica relevante. Cuanta mayor cantidad de información sea posible recopilar, mejor será la elección de la válvula.
- La selección correcta de las ecuaciones de dimensionamiento, dependiendo de las condiciones que predominan en el fluido durante su paso a través de la válvula.

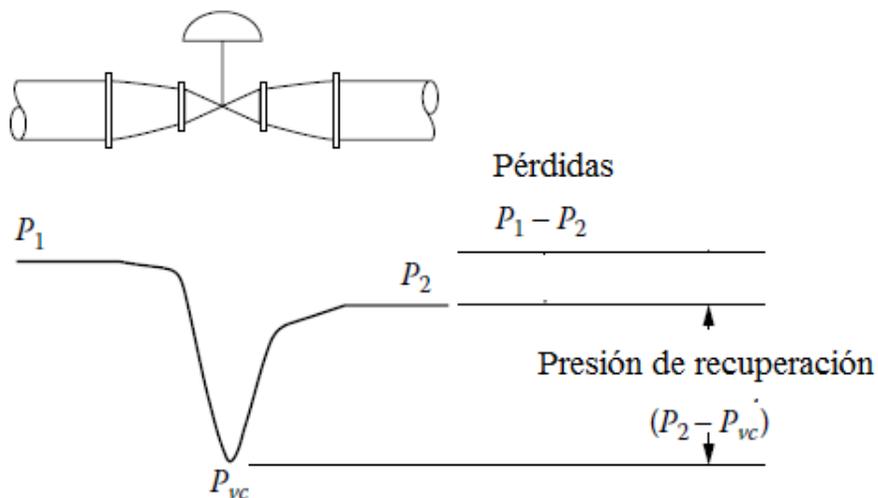
Antes de iniciar el proceso de dimensionamiento, el ingeniero de control de proceso debe determinar en qué condiciones se encuentra el fluido. Es decir, se debe determinar si el flujo es turbulento, laminar, viscoso, no newtoniano. Asimismo, es importante definir si el fluido es líquido, gaseoso o una mezcla de ambos.

#### 4.1. Dimensionamiento de una válvula para líquidos

El paso de un fluido a través de una válvula de control obedece las leyes básicas de la conservación de la masa y la energía. Cuando la corriente se aproxima a la restricción impuesta por la válvula la velocidad del fluido se incrementa para mantener constante la cantidad de materia que pasa a través del elemento de estrangulación.

La energía para acelerar el flujo se obtiene de la correspondiente disminución de la presión estática, como se ilustra en la figura 59. La máxima velocidad y la mínima presión estática ocurren inmediatamente aguas abajo del área más pequeña de la restricción de la válvula (el punto de estrangulamiento). Este punto de presión mínima se conoce como la vena contracta.

Figura 59. Línea piezométrica de la válvula



Fuente: LIPTÁK, Béla. *Instrument Engineer's Handbook*. p. 1237.

Luego que la velocidad disminuye después de la vena contracta, parte de la energía cinética se convierte nuevamente en energía de presión, esta conversión se conoce como presión de recuperación de la válvula y su valor es igual a la diferencia entre la presión de salida y la presión en la vena contracta.

Para el dimensionamiento de válvulas, la ISA (*International Society of Automation*) provee una lista de ecuaciones que facilitan y reducen el tiempo dedicado al cálculo. Estas incluyen constantes numéricas que se utilizan para la conversión entre los tipos de sistemas de medición que caracterizan el proceso. Estas constantes se enlistan en la Tabla X.

Tabla X. **Constantes ISA para ecuaciones de dimensionamiento**

<i>Numerical Constants for the Conversion of Liquid Flow Equations*</i>							
	<i>Constant</i>	<i>Units Used in Equations</i>					
		<i>w</i>	<i>Q</i>	<i>P, ΔP</i>	<i>d, D</i>	$\gamma_i$	<i>v (nu)</i>
$N_1$	0.0865	—	m <sup>3</sup> /h	KPa	—	—	—
	0.865	—	m <sup>3</sup> /h	Bar	—	—	—
	1.00	—	gpm	psia	—	—	—
$N_2$	0.00214	—	—	—	mm	—	—
	890	—	—	—	in.	—	—
$N_4$	76,000	—	m <sup>3</sup> /h	—	mm	—	Centistokes**
	17,300	—	gpm	—	in.	—	Centistokes**
$N_6$	2.73	kg/h	—	KPa	—	kg/m <sup>3</sup>	—
	27.3	kg/h	—	Bar	—	kg/m <sup>3</sup>	—
	63.3	lb/h	—	psia	—	lb/ft <sup>3</sup>	—

\*Reprinted by permission. Copyright © 1985, Instrumentation, Systems, and Automation Society. From ANSI/ISA-S75.01, "Flow Equations for Sizing Control Valves."

\*\*To convert m<sup>2</sup>/s to centistokes, multiply m<sup>2</sup>/s by 10<sup>6</sup>. To convert centipoise to centistokes, divide centipoise by  $G_f$ .

Fuente: LIPTÁK, Béla. *Instrument Engineer's Handbook*. p. 1242.

#### 4.1.1. Coeficiente de capacidad relativa ( $C_d$ )

El coeficiente de capacidad de la válvula  $C_v$ , se incrementa cuando el tamaño de la válvula aumenta. Sin embargo, la geometría de la válvula también es un factor importante en el total de las pérdidas de presión para un flujo dado. Se debe conocer la capacidad relativa de las válvulas ( $C_d$ ) para comparar los efectos de la geometría en diferentes diseños y tamaños de válvulas,  $C_d$  se define como:

Tabla XI. Coeficiente de capacidad relativa

Ecuación	Variable	Descripción
$C_d = C_v/d^2$	$C_d$	Coeficiente de capacidad relativa
	$C_v$	Coeficiente de capacidad
	$D$	Diámetro de la válvula

Fuente: elaboración propia.

#### 4.1.2. Factores $F_L$ , $F_F$ , $F_P$ y $F_{LP}$

- Factor de recuperación de presión ( $F_L$ ). Indica la magnitud de la recuperación de presión luego de pasar por la vena contracta como una función de las pérdidas de presión de la válvula.

$F_L$  se define de la siguiente forma; en donde  $F_L$  es adimensional y las presiones se encuentran dadas en libras sobre pulgada cuadrada absolutos.

Tabla XII. **Factor de recuperación de presión**

Ecuación	Variable	Descripción
$F_L = [(P_1 - P_2)/(P_1 - P_{vc})]^{1/2}$	$P_1$	Presión en la entrada
	$P_2$	Presión a la salida
	$P_{vc}$	Presión en la vena contracta

Fuente: elaboración propia.

- Factor de relación de la presión de vapor ( $F_F$ ). La geometría compleja de la mayoría de las válvulas hace que la medición experimental de la presión en la vena contracta ( $P_{vc}$ ) sea imposible. Se utiliza el factor  $F_F$  en las ecuaciones de dimensionamiento de válvulas de la ISA para aproximar el valor de  $P_{vc}$  en condiciones de flujo de líquido saturado.  $F_F$  es un factor adimensional y se aproxima de la siguiente forma:

Tabla XIII. **Factor de la relación de la presión de vapor**

Ecuación	Variable	Descripción
$F_F \cong 0.96 - 0.28(P_v/P_c)^{1/2}$	$P_v$	Presión de vapor. [psia]
	$P_c$	Presión crítica [psia]
	$F_F$	Relación de la presión de vapor

Fuente: elaboración propia.

En la figura 60 se aprecia una gráfica para la aproximación de la presión de vapor en función de la relación de la presión de vaporización y la presión crítica. Asimismo, en la tabla XIV se presentan las propiedades físicas del agua, útiles para estos cálculos.

Tabla XIV. **Propiedades físicas del agua**

*Properties of Water at Various Temperatures from 40 to 540°F (4.4 to 282.2°C)*

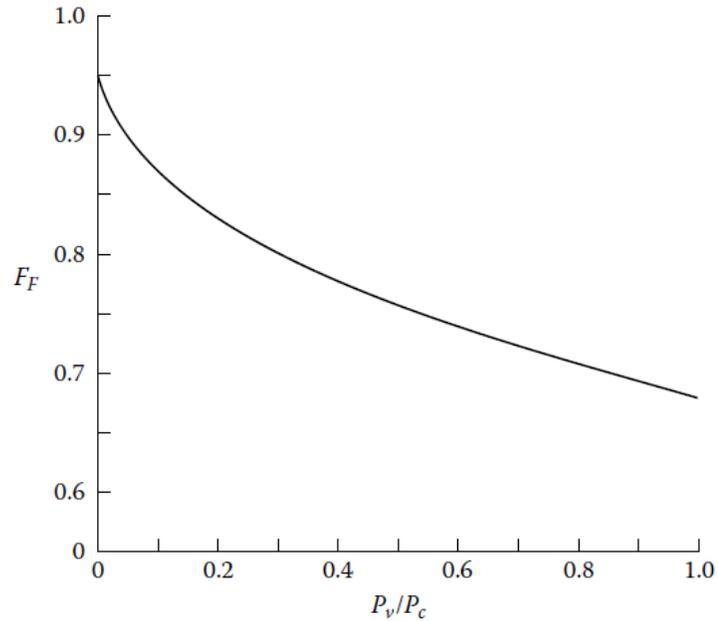
<i>Temp., °F</i>	<i>Temp., °C</i>	<i>Specific Volume<sup>a</sup> ft<sup>3</sup>/lb</i>	<i>Specific Gravity</i>	<i>Weight<sup>a</sup> (lb/ft<sup>3</sup>)</i>	<i>Vapor Pressure<sup>a</sup> PSIA</i>
40	4.4	.01602	1.0013	62.42	0.1217
50	10.0	.01603	1.0006	62.38	0.1781
60	15.6	.01604	1.0000	62.34	0.2563
70	21.1	.01606	0.9987	62.27	0.3631
80	26.7	.01608	0.9975	62.19	0.5069
90	32.2	.01610	0.9963	62.11	0.6982
100	37.8	.01613	0.9944	62.00	0.9492
120	48.9	.01620	0.9901	61.73	1.692
140	60.0	.01629	0.9846	61.39	2.889
160	71.1	.01639	0.9786	61.01	4.741
180	82.2	.01651	0.9715	60.57	7.510
200	93.3	.01663	0.9645	60.13	11.526
212	100.0	.01672	0.9593	59.81	14.696
220	104.4	.01677	0.9565	59.63	17.186
240	115.6	.01692	0.9480	59.10	24.97
260	126.7	.01709	0.9386	58.51	35.43
280	137.8	.01726	0.9293	58.00	49.20
300	148.9	.01745	0.9192	57.31	67.01
320	160.0	.01765	0.9088	56.66	89.66
340	171.1	.01787	0.8976	55.96	118.01
360	182.2	.01811	0.8857	55.22	153.04
380	193.3	.01836	0.8736	54.47	195.77
400	204.4	.01864	0.8605	53.65	247.31
420	215.6	.01894	0.8469	52.80	308.83
440	226.7	.01926	0.8328	51.92	381.59
460	237.8	.0196	0.8183	51.02	466.9
480	248.9	.0200	0.8020	50.00	566.1
500	260.0	.0204	0.7863	49.02	680.8
520	271.1	.0209	0.7674	47.85	812.4
540	282.2	.0215	0.7460	46.51	962.5

<sup>a</sup>ft<sup>3</sup>/lb = 62.4 l/Kg; lb/ft<sup>3</sup> = 0.016 Kg/l; PSIA = 0.069 bar (abs.).

Computed from Keenan & Keyes Steam Table.

Fuente: [www.civil.frba.utn.edu.ar](http://www.civil.frba.utn.edu.ar). Consulta: noviembre de 2016.

Figura 60. **Factor de relación de presión de vapor**



Fuente: LIPTÁK, Béla. *Instrument Engineer's Handbook*. p. 1240.

Conociendo el valor del factor de la relación de la presión de vapor, se puede aproximar el valor de la presión en la vena contracta, dado que estos valores se relacionan de la siguiente forma:

Tabla XV. **Presión en la vena contracta**

Ecuación	Variable	Descripción
$P_{VC} = F_F P_V$	$P_{vc}$	Presión en la vena contracta [psia]
	$F_F$	Relación de la presión de vapor [psia]
	$P_V$	Presión de vapor [psia]

Fuente: elaboración propia.

- **Factor geométrico de la tubería ( $F_p$ ).** Por convención, las pruebas y cálculos de la válvula deben incluir una porción de la tubería en ambas direcciones adyacentes a la válvula.  $F_p$  representa la forma en la cual la geometría de la tubería afecta el comportamiento de la válvula en función de las pérdidas de presión.

Tabla XVI. **Factor geométrico de la tubería**

Ecuación	Variable	Descripción
$F_p = [1 + (\Sigma K)(C_d)^2/890]^{-1/2}$	$\Sigma K$	Sumatoria de pérdidas
	$C_d$	Coeficiente de capacidad relativa
	$F_p$	Factor geométrico de la tubería

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Pérdidas de presión por cambio de diámetro en tuberías**

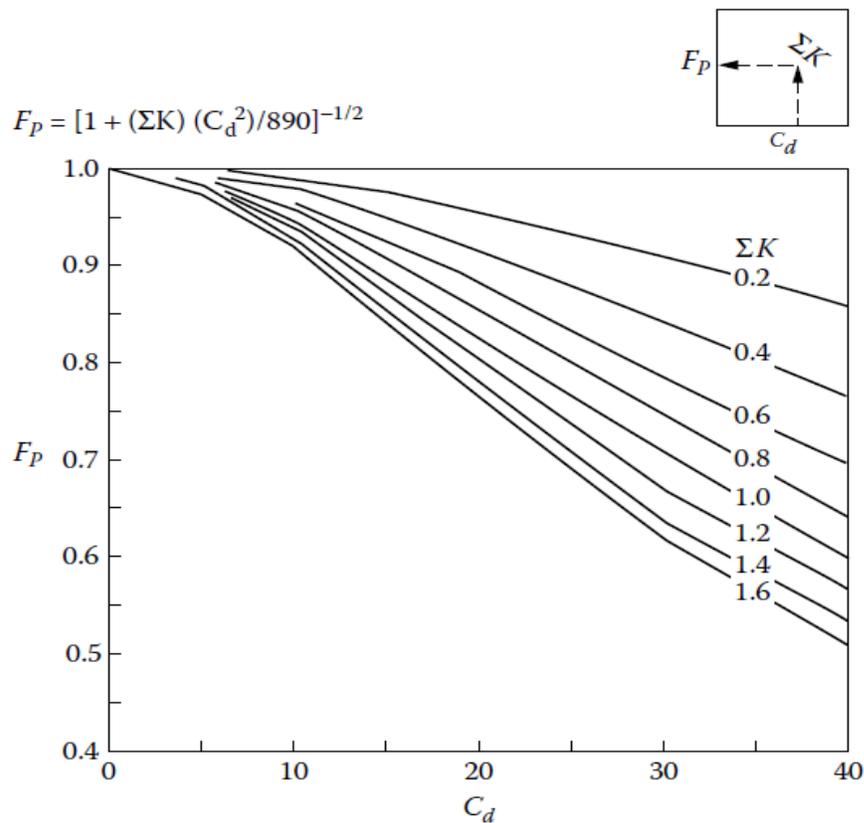
Ecuación	Descripción
$K_1 = 0,5(1 - (d/D)^2)^2$	Pérdida por reductor a la entrada de la válvula
$K_2 = (1 - (d/D)^2)^2$	Pérdida por expansión a la salida de la válvula
$K_{B1} = 1 - (d/D)^4$	Pérdida por transformación de presión a velocidad en la entrada
$K_{B2} = (d/D)^4 - 1$	Pérdida por transformación de presión a velocidad en la salida

Fuente: elaboración propia.

En la tabla XVII se enlistan las pérdidas de presión a causa de los cambios de medidas en la tubería, las cuales dependen únicamente del diámetro D de la tubería y del diámetro d de la válvula. Posteriormente, al cálculo de estas pérdidas, se procede a calcular  $F_p$  en función de dichas pérdidas.

En la figura 61 se presenta el diagrama para calcular de forma directa el valor del factor geométrico de la tubería, basado en el valor del  $C_d$  y el valor total de las pérdidas de presión en la válvula.

Figura 61. Factor geométrico de la tubería

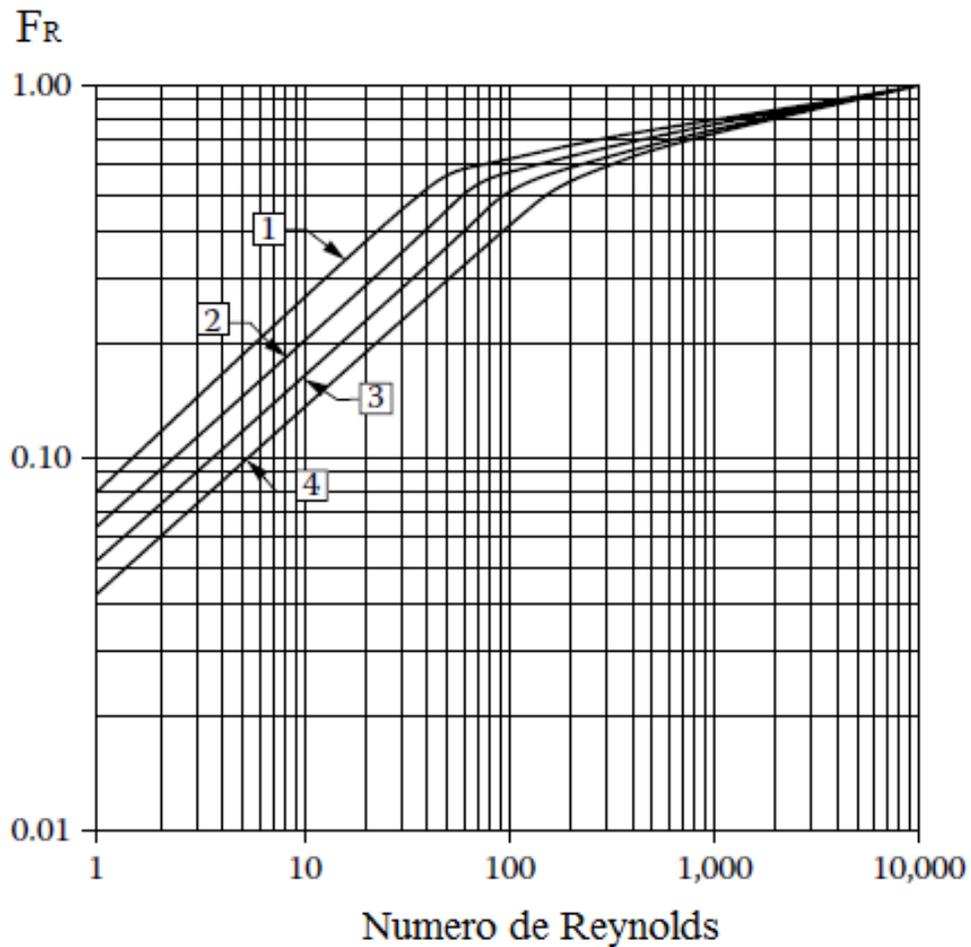


Fuente: LIPTÁK, Béla. *Instrument Engineer's Handbook*. p. 1240.

### 4.1.3. Factor de número de Reynolds

Se trata de un factor adimensional que se utiliza para considerar la naturaleza turbulenta del fluido a través de la válvula. Para calcular  $F_R$  se debe calcular el número de Reynolds y, posteriormente, se aproxima el valor de  $F_R$  utilizando la gráfica de la figura 62.

Figura 62. Factor y Número de Reynolds



Fuente: LIPTÁK, Béla. *Instrument Engineer's Handbook*. p. 1250.

Tabla XVIII. Factores de diseño para válvulas

Representative values of relative valve capacity coefficients ( $C_d$ ) and of other sizing factors for a variety of valve designs. The $C_d$ values listed are for valves with Full area trims, when the valve is fully open.									
Valve Type	Trim Type	Flow Direction	$\chi T$	FL	Fd	Fs	$C_d = C_v/d^2$	Kc	
GLOBE	Single-port	Ported plug, 4 port	Either	0.70	0.90	0.48	1.00	9.50	0.65
			Countoured plug	Open	0.72	0.90	0.46	1.10	11.00
	Close	0.55		0.80	1.00	1.10	11.00	0.58	
	Double-port	Characterized cage, 4 port	Open	0.75	0.90	0.45	1.10	14.00	0.65
			Close	0.75	0.85	0.41	1.10	16.00	0.60
		Wing-guided, 3 wings	Either	0.75	0.90	0.58	1.10	11.00	0.60
			Ported plug	Either	0.75	0.90	0.28	0.84	12.50
		Contoured plug		Either	0.70	0.85	0.32	0.85	13.00
			Wing-guided	Either	0.75	0.90	0.41	0.84	14.00
	Rotary	Eccentric spherical plug		Open	0.60	0.85	0.42	1.10	12.00
			Close	0.40	0.68	0.42	1.20	13.50	0.35
	ANGLE	Countoured plug	Open	0.72	0.90	0.46	1.10	17.00	0.65
Close			0.65	0.80	1.00	1.10	20.00	0.55	
Characterized cage, 4 port		Open	0.65	0.85	0.45	1.10	12.00	0.60	
		Close	0.60	0.80	1.00	1.10	12.00	0.55	
Venturi		Close	0.20	0.50	1.00	1.30	22.00	0.21	
BALL	Segmented (throttling) standard port (diameter 0.8d)	Open	0.30	0.80	0.98	1.20	25.00	0.25	
		Either	0.42	0.74	0.99	1.30	30.00	0.20	

Continuación de la tabla XVIII.

BUTTERFLY	60 deg. No offset seat	Either	0.42	0.70	0.50	0.95	17.50	0.39
	90 deg. Offset seat	Either	0.35	0.60	0.45	0.98	29.00	0.32
	90 deg. No offset seat	Either	0.08	0.53	0.45	1.20	40.00	0.12
Flow direction tends to open or close the valve, i.e., push the closure member away from or toward the seat.								
In this table, <b>d</b> may be taken as the nominal valve size, in inches.								

Fuente: LIPTÁK, Béla. *Instrument Engineer's Handbook*. p. 1240.

#### 4.1.4. Ilustración del dimensionamiento de válvulas para líquidos

A continuación se ilustra un procedimiento para calcular el coeficiente de capacidad requerido ( $C_v$ ) y el tamaño de la válvula de globo para un proceso caracterizado por las siguientes propiedades.

Fluido	Agua
Presión Crítica ( $P_c$ )	3206.2 psia
Temperatura	250 °F
Presión aguas arriba y abajo	(P1) 314.7 psia, (P2) 204.7 psia
Tamaño de la tubería	4 inch. ANSI clase 600
Caudal	500 gpm
Presión de vapor ( $P_v$ )	30 psia
Viscosidad cinemática ( $\nu$ )	0.014 centistokes
Característica de la válvula	Igual porcentaje

Paso 1: calcular la diferencia de presión  $\Delta P$

Tabla XIX. **Diferencial de presión**

Ecuación	Variable	Descripción
$\Delta P = P_1 - P_2$	$\Delta P$	Diferencia de presión
	$P_1$	Presión aguas arriba
	$P_2$	Presión aguas abajo

Fuente: elaboración propia.

$$\Delta P = 314.7\text{psi} - 204.7\text{psi} = 110\text{ psi}$$

Paso 2: determinar la caída de presión permisible  $\Delta P_a$ . El valor de la caída de presión permisible debe ser el menor valor entre la caída de presión  $\Delta P$  y la caída de presión crítica  $\Delta P_{ch}$ . Del paso uno se conoce el valor de  $\Delta P$ , se debe calcular el valor numérico de  $\Delta P_{ch}$  para realizar la comparación respectiva. Para determinar el valor de  $\Delta P_{ch}$  se utiliza la siguiente expresión, donde se encuentran involucrados  $F_L$  y  $F_F$ , factores que aún son desconocidos.

Tabla XX. **Caída de presión crítica**

Ecuación	Variable	Descripción
$\Delta P_{ch} = F_L^2 [P_1 - F_F P_v]$	$\Delta P_{ch}$	Caída de presión crítica
	$F_L$	Coefficiente de recuperación presión
	$P_1$	Presión aguas arriba
	$F_F$	Relación de la presión de vapor
	$P_v$	Presión de vaporización

Fuente: elaboración propia.

Para utilizar esta ecuación se debe hacer una selección preliminar de una válvula para establecer un coeficiente de recuperación de presión  $F_L$ , asimismo, se debe calcular el valor de la relación de presión de vapor  $F_F$ . De la tabla XVIII se elige una válvula de globo sencilla, de donde se obtiene que  $F_L$  posee un valor de 0.9.

Para calcular  $F_F$ , se recurre a la ecuación presentada en la tabla XIII (página 103) y a la tabla XIV de las propiedades del agua (página 114), de donde, por interpolación, se obtiene el valor de la presión de vapor.

$$F_F \cong 0,96 - 0,28(P_v/P_C)^{1/2}$$

$$F_F \cong 0,96 - 0,28(30,2/3206,2)^{1/2} = 0,932$$

Conociendo  $F_L$  y  $F_F$  se procede al cálculo de  $\Delta P_a$

$$\Delta P_{ch} = 0,9^2[314,7 - (0,932)(30)] = 232,3 \text{ ps}$$

Dado que  $\Delta P_a = \begin{cases} \Delta P & \text{si } \Delta P \leq \Delta P_{ch} \\ \Delta P_{ch} & \text{si } \Delta P_{ch} \leq \Delta P \end{cases}$ ;  $\Delta P_a$  deberá ser igual a  $\Delta P$ , es decir debe tener un valor de 110 psi.

Paso 3: se debe determinar la gravedad específica  $G_f$  del fluido, las ecuaciones presentadas en el presente capítulo, desarrolladas por la Sociedad Internacional de Automatización ISA, están condicionadas para el agua a 60 °F con una densidad de 62.37 lb/ft<sup>3</sup>. Se debe calcular el valor de la gravedad específica utilizando como referencia la densidad del agua a 60 grados Fahrenheit.

Tabla XXI. **Gravedad específica**

Ecuación	Variable	Descripción
$G_f = \frac{\rho_T}{\rho_{60^\circ\text{F}}}$	<b>G<sub>f</sub></b>	Gravedad específica
	<b>ρ<sub>T</sub></b>	Densidad a la temperatura de trabajo
	<b>ρ<sub>60°F</sub></b>	Densidad de referencia a 60°F

Fuente: elaboración propia.

De las tablas de las propiedades del agua (tabla XIV) e interpolando, se obtiene que, a una temperatura de 250 °F, la densidad del agua es 58.8 lb/ft<sup>3</sup>, por lo tanto.

$$G_f = 58.80 \text{ lb/ft}^3 / 62.37 \text{ lb/ft}^3$$

$$G_f = 0.94$$

Paso 4: cálculo aproximado del valor de C<sub>v</sub>, para conseguir esto, se debe partir asumiendo que tanto F<sub>P</sub> como F<sub>R</sub> son iguales a la unidad.

Tabla XXII. **Coefficiente de capacidad**

Ecuación	Variable	Descripción
$C_v = \frac{q}{F_R F_P} \sqrt{\frac{G_f}{\Delta p_a}}$	<b>C<sub>v</sub></b>	Coefficiente de capacidad
	<b>Q</b>	Flujo en galones por minuto
	<b>F<sub>R</sub></b>	Factor de Reynolds
	<b>F<sub>P</sub></b>	Factor geométrico de la tubería
	<b>G<sub>f</sub></b>	Gravedad específica
	<b>ΔP<sub>a</sub></b>	Caída de presión permisible

Fuente: elaboración propia.

$$C_v = 500(0.94/110)^{\frac{1}{2}} = 46.2$$

Paso 5: selección aproximada del cuerpo de la válvula con base en el valor del  $C_v$  calculado en el paso 4, De los catálogos proporcionados por los fabricantes (tabla XXIII) se puede determinar que la válvula de globo más pequeña que contiene al  $C_v$  de 46.2 es una válvula de 2 pulgadas, la cual posee un coeficiente de capacidad de 47.4.

Tabla XXIII. **Coefficientes de caudal típicos para válvulas de globo**

Tamaño de válvula, NPS	Estilo de válvula	Característica	Cv máxima
1	HP Clase 1500	Igual porcentaje modificado	17,1
2	HP Clase 1500	Lineal	52,2
3	HP Clase 1500	Lineal	121
4	HP Clase 1500	Lineal	201
6	HP Clase 1500	Lineal	425
1	HPA Clase 1500	Igual porcentaje modificado	19,5
2	HPA Clase 1500	Lineal	64,3
1	HPA Clase 2500	Igual porcentaje modificado	14,3
2	HPA Clase 2500	Lineal	47,4

Fuente: FISHER controls. *Boletín 51.2:HP, diciembre 2015.* p. 6.

Paso 6: teniendo el valor de referencia del diámetro de la válvula, se determina el factor geométrico de la tubería  $F_p$ . Si el valor de  $F_p$  no lo provee el fabricante de la válvula. Entonces, este factor se debe calcular utilizando la ecuación que define  $F_p$  o utilizando el diagrama que aparece en la figura 61.

Para determinar el valor de  $F_p$ , es necesario obtener todos los datos contenidos en la ecuación, es decir, la sumatoria de pérdidas y el coeficiente de capacidad relativo. Para obtener las pérdidas, se debe calcular la relación de diámetros de válvula y tubería:  $d/D = 2'' / 4'' = 0.5$ . Posteriormente, la sumatoria de pérdidas se obtiene como sigue:

Tabla XXIV. **Cálculo de pérdidas por cambio de diámetro en tuberías**

Ecuación	Descripción
$K_1 = 0,5(1 - 0,5^2)^2 = 0,2813$	Pérdida por reductor a la entrada de la válvula
$K_2 = (1 - 0,5^2)^2 = 0,5625$	Pérdida por expansión a la entrada de la válvula
$K_{B1} = 1 - 0,5^4 = 0,9375$	Pérdida por transformación de presión a velocidad en la entrada
$K_{B2} = 0,5^4 - 1 = -0,9375$	Pérdida por transformación de presión a velocidad en la salida
$\Sigma K = 0,8438$	Sumatoria de pérdidas

Fuente: elaboración propia.

Conociendo la sumatoria de las pérdidas se calcula el valor de  $F_p$  como sigue:

$$C_d = 46,2/2^2 = 11,55 \quad (\text{Tabla XI})$$

$$F_p = [1 + (\Sigma K)(C_d)^2/890]^{-1/2} \quad (\text{Tabla XVI})$$

$$F_p = [1 + (0,8438)(11,55)^2/890]^{-1/2}$$

$$F_p = 1,12462$$

Paso 7: se calcula el factor del número de Reynolds,  $F_R$ . Para la mayoría de los procesos este paso no es necesario, debido a que generalmente las condiciones del fluido siempre son en régimen turbulento ( $Re > 10,000$ )

$$Re_v = \frac{(17300)(1)(500)}{(0,014)(0,9X46,2)^{1/2}} \left[ \frac{(0,9X11,55)^2}{890} + 1 \right]^{1/4}$$

$$Re_v = 98.6 X 10^6$$

Conociendo  $Re_v$ , se utiliza el diagrama de la figura 62 para aproximar el factor de Reynolds. Para flujos turbulentos, el valor de  $F_R$  siempre es 1.0.

Paso 8: cálculo final del  $C_v$  requerido utilizando la ecuación trabajada en el paso 4 y considerando los factores  $F_P$  y  $F_R$  ya calculados.

$$C_v = \frac{q}{F_R F_P} \sqrt{\frac{G_f}{\Delta p_a}}$$

$$C_v = \left( \frac{500}{[0,94X1]} \right) (0,94/110)^{\frac{1}{2}} = 49,17$$

Se observa que el  $C_v$  calculado es cercano al  $C_v$  máximo de la válvula de 2 pulgadas, excediendo el 85 % del mismo y según recomendaciones de la ISA. Si el valor del  $C_v$  es mayor al 85 % del valor máximo se deberá elegir la válvula del diámetro mayor más próximo, en este caso se debe utilizar una válvula de 3 pulgadas.

## 4.2. Dimensionamiento de una válvula para gases y vapor

El comportamiento de los gases es distinto al de los líquidos, dado que el caudal de un fluido compresible varía en función de la relación de la presión diferencial y la presión absoluta de entrada ( $\Delta P/P_1$ ). Esta relación de presión se designa con el símbolo " $\chi$ ". Valores de  $\chi$  cercanos a cero indican fluidos newtonianos incompresibles. En este caso, las ecuaciones utilizadas para trabajar este tipo de fluidos se reducen a las ecuaciones básicas de Bernoulli. Sin embargo, valores altos de  $\chi$  indican la existencia de expansión y compresibilidad, por lo tanto es necesario que se utilicen los factores de corrección apropiados.

### 4.2.1. Ecuaciones y unidades para dimensionamiento en vapor.

El caudal de gas o vapor a través de la válvula o el valor requerido de  $C_v$  se pueden calcular utilizando cualquiera de las ecuaciones que aparecen en la tabla XXV, dependiendo del tipo de flujo y de las unidades de medida a utilizar.

Tabla XXV. Ecuaciones para dimensionamiento en vapor

	Peso específico	Peso molecular
Flujo másico	$C_v = \frac{w}{N_6 F_p Y \sqrt{x P_1 \gamma_1}}$	$C_v = \frac{w}{N_8 F_p P_1 Y} \sqrt{\frac{T_1 Z}{x M}}$
Flujo volumétrico	$C_v = \frac{Q}{N_7 F_p P_1 Y} \sqrt{\frac{G_g T_1 Z}{x}}$	$C_v = \frac{Q}{N_9 F_p P_1 Y} \sqrt{\frac{M T_1 Z}{x}}$

Continuación de la tabla XXV.

$C_v$	Coeficiente de capacidad
Q	Flujo volumétrico
W	Flujo másico
$F_p$	Factor geométrico de la tubería
Y	Factor de expansión
$\chi$	Relación de presión
$P_1$	Presión del fluido
$\gamma_1 / G_g$	Densidad y gravedad específica
$T_1$	Temperatura del fluido
Z	Factor de compresibilidad
M	Peso molecular

Fuente: elaboración propia.

Las constantes  $N_6$ ,  $N_7$ ,  $N_8$  y  $N_9$  se eligen en base al tipo de flujo y a las unidades de medida según la tabla XXVI.

#### 4.2.2. Factor de expansión (Y)

Este factor se utiliza debido al cambio que sufre la densidad de los fluidos compresibles mientras estos se mueven de la entrada de la válvula hacia la vena contracta y debido al cambio del área en la vena contracta, las caídas de presión se vuelven variables. En la figura 63 se ilustra la relación del factor de expansión y la razón de la caída de presión.

Tabla XXVI. **Constantes utilizadas en las ecuaciones de flujo de gases y vapor**

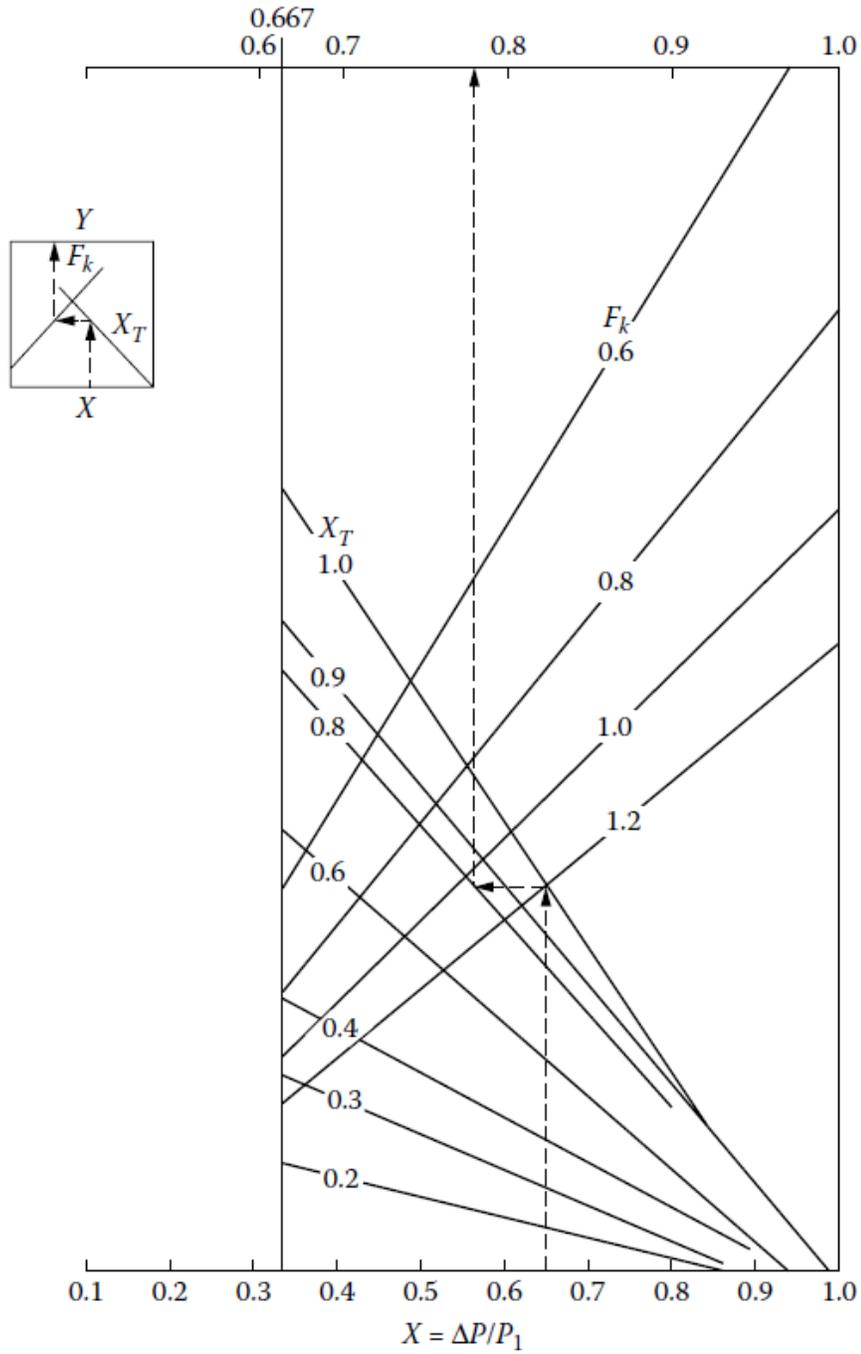
	Constante	Unidades utilizadas en la ecuación					
	$N$	$W$	$Q^{**}$	$P, \Delta P$	$\gamma_i$	$T_i$	$d, D$
$N_5$	0.00241	—	—	—	—	—	mm
	1000	—	—	—	—	—	in.
$N_6$	2.73	kg/h	—	kPa	kg/m <sup>3</sup>	—	—
	27.3	kg/h	—	Bar	kg/m <sup>3</sup>	—	—
	63.3	lb/h	—	psia	lb/ft <sup>3</sup>	—	—
$N_7$	4.17	—	m <sup>3</sup> /h	kPa	—	K	—
	417	—	m <sup>3</sup> /h	Bar	—	K	—
	1360	—	scfh	psia	—	°R	—
$N_8$	0.948	kg/h	—	kPa	—	K	—
	94.8	kg/h	—	Bar	—	K	—
	19.3	lb/h	—	psia	—	°R	—
$N_9$	22.5	—	m <sup>3</sup> /h	kPa	—	K	—
	2250	—	m <sup>3</sup> /h	Bar	—	K	—
	7320	—	scfh	psia	—	°R	—

\*Reprinted by permission. Copyright © 1985, Instrumentation, Systems, and Automation Society. From ANSI/ISA-S75.01, "Flow Equations for Sizing Control Valves."

\*\* $Q$  is in cubic feet per hour measured at 14.73 psia and 60°F, or cubic meters per hour measured at 101.3 kPa and 15.6°C.

Fuente: LIPTÁK, Béla. *Instrument Engineer's Handbook*. p. 1253.

Figura 63. Gráfica del factor de expansión Y



Fuente: LIPTÁK, Béla. *Instrument Engineer's Handbook*. p. 1256.

El factor de expansión se modela con la siguiente ecuación:

Tabla XXVII. **Factor de expansión**

$Y = 1 - x/(3F_k\chi_T)$ si y solo si $1,0 \geq Y \geq 0,67$	
Variable	Descripción
$Y$	Factor de expansión
$\chi$	Razón de la caída de presión
$F_k$	Factor de la relación del calor específico
$\chi_T$	Factor de relación de la caída de presión crítica.

Fuente: elaboración propia.

#### 4.2.3. Factor de relación de la caída de presión crítica ( $\chi_T$ )

Los valores de  $\chi_T$  debe proporcionarlos el fabricante y deben ser específicos para cada tipo de válvula. En la tabla XVIII se muestran algunos valores representativos para  $\chi_T$ , sin embargo estos valores solo sirven como referencia, el valor real de  $\chi_T$  lo debe proporcionar el fabricante.

Cuando la válvula se instala con reductores u otro tipo de conexión, la relación de caída de presión crítica del arreglo ( $\chi_{TP}$ ) posee un valor distinto al factor de la válvula aislada ( $\chi_T$ ). Para una mayor exactitud, el valor de estas constantes se debe determinar por medio de pruebas; sin embargo, si se permite tener solo una estimación del valor se utiliza ésta ecuación:

Tabla XXVIII. **Caída de presión crítica del arreglo**

Ecuación	Variable	Descripción
$x_{TP} = \frac{x_T}{F_p^2} \left[ \frac{x_T K_i C_v^2}{N_5 d^4} + 1 \right]^{-1}$	$X_T$	Relación de caída de presión crítica
	$F_p$	Factor geométrica de la tubería
	$K_i$	Sumatoria de pérdidas por accesorios
	$C_v$	Coeficiente de capacidad
	$D$	Diámetro de la tubería
	$N_5$	Constante de conversión (T5)

Fuente: elaboración propia.

En esta ecuación,  $\chi_T$  es el factor de caída de presión para una válvula dada instalada sin reductores o cualquier otro tipo de conector, asimismo,  $K_i$  es la suma de los coeficientes de pérdidas a la entrada del reductor o cualquier otro accesorio a la entrada de la válvula ( $K_1 + K_{B1}$ ).

#### 4.2.4. Factor de relación del calor específico ( $F_k$ )

Esta relación en un fluido compresible indica la forma en la cual las variaciones del calor específico del fluido afectan su comportamiento al pasar a través de la válvula, comparada con el comportamiento del aire en condiciones moderadas.

$F_k$  posee un valor de 1,0 para el aire a temperatura y presión moderadas, cuando su calor específico es 1,40. La evidencia teórica y experimental indica que para propósitos de dimensionamiento de válvulas,  $F_k$  puede considerarse que tiene una relación lineal con el valor de  $k$ , como indica la siguiente ecuación:

Tabla XXIX. **Factor de relación del calor específico**

Ecuación	Variable	Descripción
$F_k = \frac{k}{1,40}$	<b>F<sub>k</sub></b>	Factor de relación de calor específico
	<b>κ</b>	Calor específico del fluido
	<b>1,40</b>	Calor específico del aire

Fuente: elaboración propia.

#### 4.2.5. **Factor de compresibilidad (Z)**

Es la razón del volumen molar de un gas con respecto al volumen molar de un gas ideal a la misma presión y temperatura. Cuando el comportamiento de los gases reales se desvía demasiado del comportamiento ideal, el factor de compresibilidad se utiliza para compensar esta discrepancia. Se trata de una función de la temperatura y la presión reducidas. La presión reducida y la temperatura reducida se calculan dividiendo el valor de entrada entre el valor crítico.

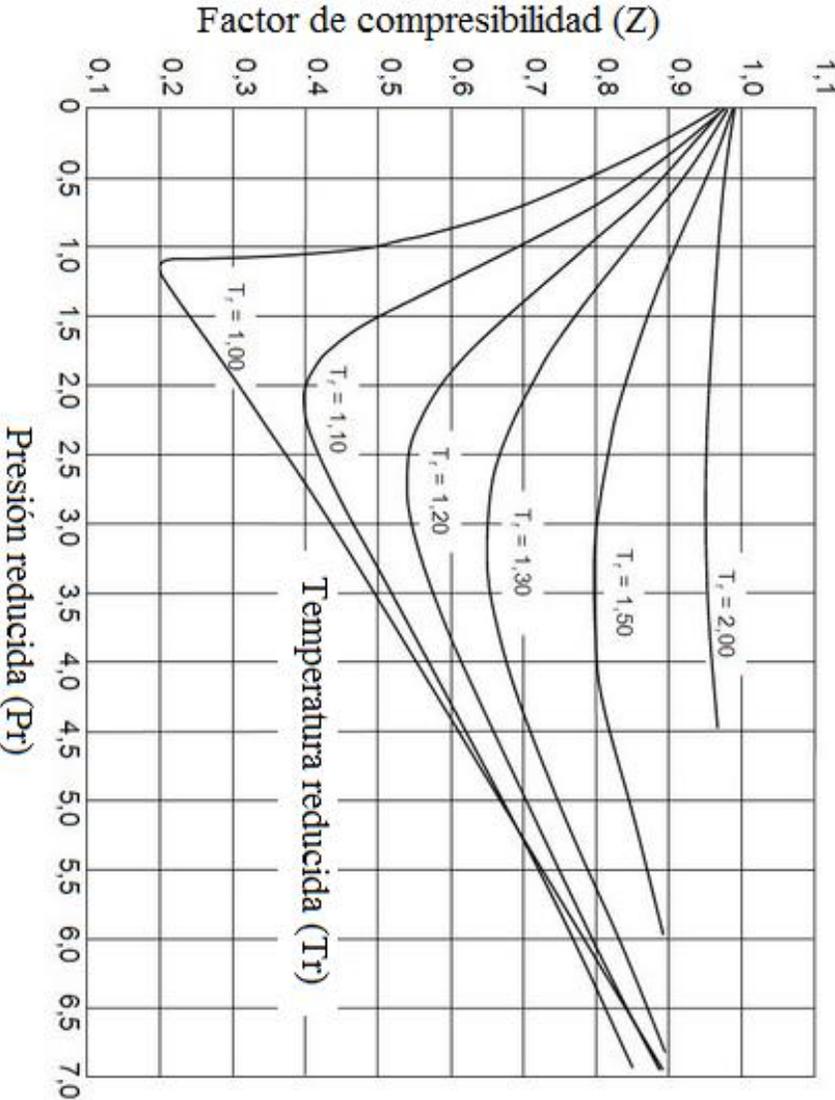
Tabla XXX. **Temperatura y presión reducidas**

Ecuación	Variable	Descripción
$P_r = P_1/P_c$	<b>P<sub>r</sub></b>	Presión reducida
	<b>P<sub>1</sub></b>	Presión del proceso
	<b>P<sub>c</sub></b>	Presión crítica
$T_r = T_1/T_c$	<b>T<sub>r</sub></b>	Temperatura reducida
	<b>T<sub>1</sub></b>	Temperatura del proceso
	<b>T<sub>c</sub></b>	Temperatura crítica

Fuente: elaboración propia.

En la figura 64 se observa el diagrama utilizado para aproximar a  $Z$  en función de la presión reducida  $P_r$  y la temperatura reducida  $T_r$ .

Figura 64. Diagrama del factor de compresibilidad  $Z$



Fuente: [www.wikiwand.com](http://www.wikiwand.com). Consulta: julio de 2015.

#### 4.2.6. Ilustración del procedimiento para dimensionar válvulas para vapor

Determinar el tamaño de la válvula más adecuada para las siguientes condiciones de proceso.

Fluido	Vapor
Temperatura	450 °F
Presión aguas arriba ( $P_1$ )	150 psia
Presión aguas abajo ( $P_2$ )	65 psia
Volumen específico aguas abajo ( $n$ )	7.98 ft <sup>3</sup> /lb
Caudal	15,000 lb/h
Característica de flujo	igual porcentaje
Tamaño de la línea	3 pulgadas

Paso 1: seleccionar la ecuación apropiada (Tabla XXV), basados en la información del proceso y las unidades de medida. En este caso, se conoce el flujo másico, por lo tanto es posible utilizar la siguiente ecuación. El valor de la constante  $N_8$  se obtiene de la tabla XXVI.

$$C_V = \frac{w}{N_8 F_P P_1 Y} \sqrt{\frac{T_1 Z}{xM}}$$

Para aplicar esta ecuación, es necesario obtener ciertas propiedades físicas del vapor necesarias para realizar los cálculos. Se necesita conocer la temperatura y presión críticas, el peso molecular y el calor específico, estos datos se pueden obtener de cualquier tabla de propiedades de gases y vapores (Tabla XXXI).

Tabla XXXI. **Propiedades físicas de gases y vapores comunes**

*Physical Data for a Number of Common Gases and Vapors*

<i>Gas</i>	<i>Critical Pressure, P<sub>c</sub> (psia)</i>	<i>Critical Temperature, T<sub>c</sub> (°R)</i>	<i>Molecular Weight, M</i>	<i>Ratio of Specific Heats, k</i>
Air	492.4	227.1	28.97	1.40
Ammonia	1636.1	729.8	17.0	1.31
Argon	707.0	271.4	39.9	1.67
Butane	551.0	765.2	58.1	1.09
Carbon dioxide	1070.2	547.5	44.0	1.29
Carbon monoxide	507.1	239.2	28.01	1.40
Chlorine	1120.0	751.0	70.91	1.34
Ethane	708.5	549.7	30.0	1.18
Ethylene	730.5	508.3	28.05	1.21
Helium	33.2	9.45	4.00	1.67
Hydrogen	188.1	59.9	2.02	1.40
Methane	673.0	343.9	16.04	1.32
Natural gas	673.0	343.9	16.04	1.32
Nitrogen	492.4	227.1	28.02	1.40
Oxygen	736.0	278.6	32.0	1.40
Propane	615.9	665.9	44.1	1.12
Steam	3208.2	1165.5	18.02	1.33

Fuente: LIPTÁK, Béla. *Instrument Engineer's Handbook*. p. 1257.

En el caso del vapor, se tienen los siguientes datos:

Presión crítica (P<sub>C</sub>) = 3208.2 psia

Temperatura crítica (T<sub>C</sub>) = 1165.5 °R

Peso Molecular (M) = 18.02

Relación de calor específico (k) = 1.33

Paso 2: verificar si el flujo entra en la región crítica. Para ello, se determina primero la relación de caída de presión crítica,  $\chi_T$ , por medio de los datos del fabricante o de los datos estimados en la tabla XVIII, para hacerlo, se requiere una selección preliminar de un tipo de válvula.

Para esta aplicación es posible utilizar una válvula de globo de asiento simple con tapón (*contoured plug*). De la tabla XVIII se obtiene el valor de  $\chi_T = 0,72$ . Además, se debe conocer el factor de la relación de calor específico  $F_k$ , el cual se calcula como sigue:

$$F_k = k/1,40 = 1, \frac{33}{1}, 40 = 0,95$$

Asimismo, se calcula el valor real de la relación de caída de presión.

$$\chi = \Delta P/P_1 = (150 - 65)/150 = 0,57$$

El flujo crítico ocurre cuando  $\chi$  es igual o mayor que el valor de  $(F_k)(\chi_T)$  o  $(F_k)(\chi_{TP})$ , si el valor es menor, el flujo no entra en la región crítica.

$$F_k \chi_T = (0,95)(0,72) = 0,684$$

Esto es importante ya que, si el valor de  $\chi$  fuera mayor que  $(F_k)(\chi_T)$ , entonces el valor de  $(F_k)(\chi_T)$  deberá reemplazar a  $\chi$  en los cálculos de  $Y$  y  $C_v$ .

Paso 3: cálculo del factor de expansión  $Y$

$$Y = 1 - x/(3F_k \chi_T) = 1 - 0,57/(3 \times 0,684) = 0,72$$

Paso 4: cálculo de la presión reducida y la temperatura reducida para obtener el factor de compresibilidad ( $Z$ ), este valor se debe determinar utilizando el diagrama de compresibilidad (figura 64) utilizando los datos de presión y temperatura reducidas.

$$P_r = P_1/P_c = \frac{150}{3\,208,2} = 0,04$$

$$T_r = T_1/T_c = \frac{910}{1\,165,5} = 0,78$$

Conociendo los valores de la presión y la temperatura reducida, se ubica el valor del factor de compresibilidad en el diagrama presentado en la figura 64, página 124.

$$Z = 1,0$$

Paso 5: cálculo preliminar de  $C_v$  utilizando la ecuación definida en el paso 1 y asumiendo una tubería con un factor geométrico de la tubería  $F_p$  igual a la unidad.

$$C_v = \frac{w}{19,3 F_p P_1 Y} \sqrt{\frac{T_1 Z}{xM}}$$

$$C_v = \frac{15000}{19,3(1)(150)(0,72)} \sqrt{\frac{(910)(1)}{(0,57)(18,02)}} = 67,7$$

Paso 6: seleccionar el tamaño aproximado del cuerpo de la válvula basados en el cálculo preliminar de  $C_v$ . Las tablas proporcionadas por los fabricantes son las mejores fuentes de información para seleccionar valores de  $C_v$ .

Sin embargo, es posible hacer una estimación del valor de  $C_v$  utilizando los valores de  $C_d$  enlistados en la tabla XVIII. Para la válvula seleccionada se tiene un coeficiente  $C_d = 11$ , con este valor es posible calcular el diámetro  $d$ .

$$d = \sqrt{\frac{C_v}{C_d}}$$

$$d = \sqrt{67,7/11} = 2,48 \text{ in}$$

Por lo tanto, se debe elegir una válvula de 3 pulgadas.

Paso 7: determinar el efecto de la geometría de los conductos. Si la válvula es menor que la línea del proceso y tiene instalados reductores, se deben conocer los valores de  $F_P$  y  $\chi_{TP}$  o, en todo caso, se deben calcular. Para este caso particular, dado que el tamaño de la válvula es igual al tamaño de la tubería, el factor  $F_P = 1$ .

Paso 8: calcular el valor final del  $C_v$  requerido utilizando el valor de  $F_P$ , sin embargo, ya que en este caso el valor de  $F_P$  no cambio, se mantiene el mismo valor del  $C_v$ . El factor del número de Reynolds,  $F_R$ , generalmente, no es considerado al dimensionar para gases y vapores. Sin embargo, en caso de que la válvula sea muy pequeña, con un  $C_v < 0.01$ ,  $F_R$  debe aplicarse de la misma forma como se aplica en el dimensionamiento para líquidos.

#### **4.3. Consideraciones importantes para la elección de la válvula**

Además del cálculo del valor del  $C_v$  necesario para dimensionar adecuadamente la válvula de control, es importante realizar otras consideraciones para asegurar la continuidad del servicio de la válvula y, sobre todo, que su influencia sobre el lazo de control sea la especificada.

#### 4.3.1. Selección de la característica de la válvula

En la tabla XXXII se enlistan varias recomendaciones para elegir la característica de la válvula, dependiendo del tipo de proceso que se desea controlar y las condiciones propias del proceso.

Tabla XXXII. Guía de selección de la característica de la válvula

<b>Caudal</b>	
<b>Condiciones del proceso</b>	<b>Característica por utilizar</b>
Señal del elemento primario de medición proporcional al flujo.	Lineal
Pequeñas variaciones de flujo, pero grandes variaciones de caída de presión con el aumento del caudal.	Igual porcentaje/ parabólica
Señal del elemento primario proporcional al cuadrado del flujo.	Lineal
<b>Presión</b>	
<b>Condiciones del proceso</b>	<b>Característica por utilizar</b>
Líquidos	Igual porcentaje/ parabólica
Gases. Sistemas rápidos: volumen pequeño, tramo de tubería menor a 3 metros corriente debajo de la válvula.	Igual porcentaje/ parabólica
Gases. Sistemas lentos: volumen grande, el sistema de distribución es superior a 30 metros corriente abajo. Si disminuye la presión con el aumento de caudal	
a) Si la caída de presión a caudal máximo fuera mayor que 20 % de la caída de presión a caudal mínimo	Lineal

Continuación de la tabla XXXII.

b) Si la caída de presión a caudal máximo fuera menor a 20 % de la caída de presión a caudal mínimo	Igual porcentaje/ parabólica
<b>Nivel</b>	
<b>Condiciones del proceso</b>	<b>Característica a utilizar</b>
Con caída de presión constante	Lineal
Si hay disminución de la caída de presión con el aumento del caudal: si la caída de presión a caudal mínimo fuera mayor que 20 % de la caída de presión a caudal mínimo.	Lineal
Si hay disminución de la caída de presión con el aumento del caudal: si la caída de presión a caudal máximo fuera mayor que 20 % de la caída de presión a caudal mínimo.	Igual porcentaje

Fuente: elaboración propia.

#### 4.3.2. Selección de los sellos

Elegir los sellos adecuados para cada aplicación de las válvulas es también una tarea importante, debido a que, de la calidad y versatilidad de los sellos elegidos, dependerá que no haya fugas a través de las válvulas según la clase de sello que se requiera en la aplicación.

Es posible elegir entre una variedad de materiales para empaques dependiendo de las condiciones de servicio esperadas y si la aplicación requiere del cumplimiento de algún tipo de regulación ambiental. A continuación, se describen los tipos de materiales para empaquetaduras más comunes en válvulas.

PTFE: es el acrónimo de politetrafluoroetileno, más conocido por el nombre comercial de teflón. Es un polímero similar al polietileno, en el que los átomos de hidrogeno han sido sustituidos por átomos de flúor. Entre sus propiedades se mencionan las siguientes:

- Es un plástico con la habilidad inherente de reducir la fricción.
- Resistente a la mayoría de químicos conocidos.
- Requiere acabados bastante finos para sellar adecuadamente, habrá fuga si la superficie está dañada.
- Su operación se recomienda entre -40 °C hasta 232 °C.
- No es apropiado para utilizarse en aplicaciones nucleares, debido a que el PTFE se destruye en presencia de radiación.

Grafito: los empaques pueden ser de grafito laminado o de filamentos de grafito, entre sus propiedades se pueden mencionar:

- Apropiado para trabajar a altas temperaturas y en aplicaciones nucleares.
- Provee una operación libre de fugas y una larga vida operacional, sin embargo produce mucha fricción en el vástago lo que degenera en histéresis.
- Impermeable a los fluidos más difíciles de manejar y con alta radiación.
- Apropiado para temperaturas del rango de las criogénicas hasta 650 °C.
- No requiere lubricación.
- Se recomienda el uso de un bonete extendido o un yugo de acero cuando la temperatura excede los 427 °C.

Cada fabricante produce diversos tipos de sellos de distintos materiales y materiales compuestos para cada aplicación. Sin embargo, en general los sellos fabricados de PTFE y los sellos de grafito cubren la gran mayoría de las aplicaciones.

#### **4.4. Mantenimiento de la válvula de control**

Las válvulas son los componentes que más mantenimiento requieren en los procesos. Se debe a que las válvulas son dispositivos dinámicos y para que funcionen apropiadamente, todos sus componentes, deben operar adecuadamente, a diferencia de los instrumentos de medición que únicamente monitorean el proceso. Si cualquiera de sus componentes falla, resultaría en la incapacidad de controlar el proceso de forma remota y la pérdida de continuidad del proceso para solucionar el problema.

El diagnóstico de las válvulas y el mantenimiento predictivo de las mismas son conceptos relativamente nuevos. Anteriormente, el programa de mantenimiento de las válvulas más importantes o críticas, se basaba en el tiempo de servicio de la válvula y no en la verdadera necesidad de mantenimiento de la misma.

Este método de mantenimiento presenta los siguientes inconvenientes:

- Se realizan una gran cantidad de mantenimientos innecesarios. Luego, si ocurre una falla crítica entre el intervalo de mantenimiento, dependiendo de la severidad de la falla, es posible que se deje trabajar la válvula hasta que esta falle por completo, produciendo daños más nocivos a la válvula

- Al realizar el mantenimiento de la válvula se pueden producir problemas que no existían antes, debido al propio mantenimiento.

Cuando se realiza el mantenimiento, se deben seguir las instrucciones del fabricante de la válvula de control, La optimización del funcionamiento de las válvulas de control depende de una filosofía de mantenimiento efectiva.

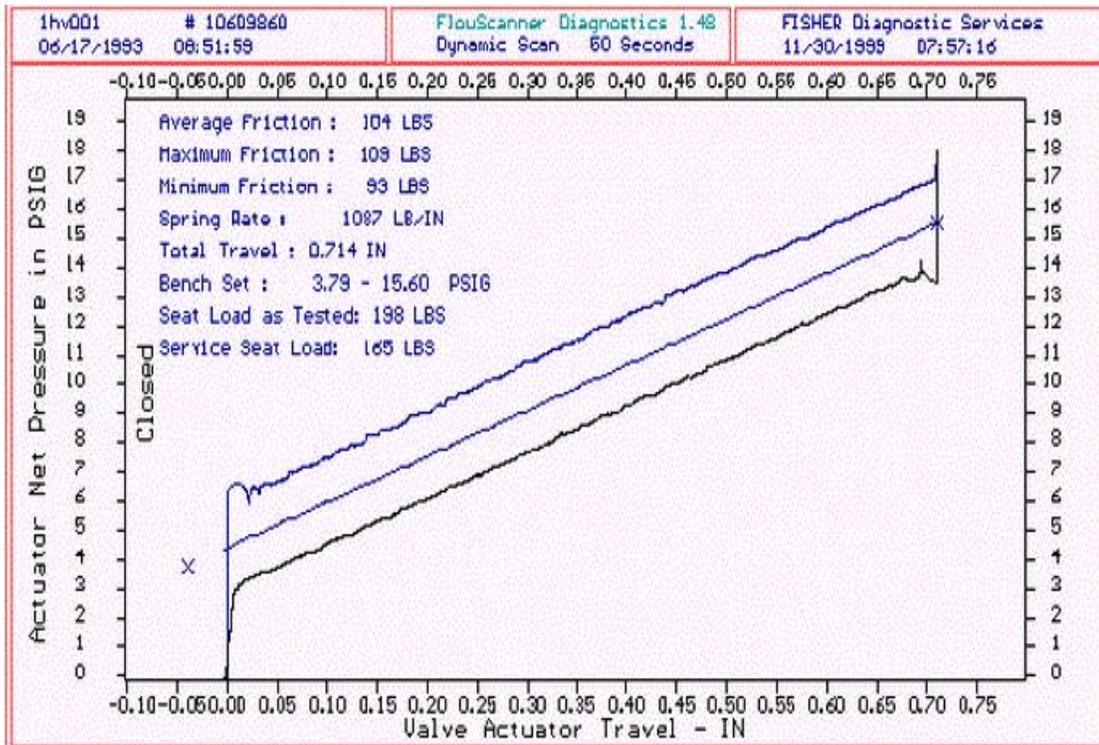
#### **4.4.1. Diagnóstico de las válvulas de control**

El diagnóstico de las válvulas de control se realiza gracias a la capacidad que poseen los posicionadores inteligentes de guardar y transferir información hacia una computadora personal o algún equipo o instrumento de diagnóstico especializado. Generalmente, los posicionadores poseen comunicación Hart, Profibus o Modbus, en cada caso, debe existir un equipo de diagnóstico especializado.

Los posicionadores inteligentes son capaces de guardar un historial de los datos para el análisis del comportamiento de la válvula en función del tiempo. Asimismo, estos dispositivos son capaces de transmitir información acerca de la posición del vástago y de la presión aplicada al diafragma para conseguir la carrera solicitada.

Una herramienta muy importante para diagnosticar el estado de la válvula es el uso de la "firma de la válvula", este procedimiento consiste en solicitarle a la válvula que realice una carrera completa de cierre y apertura en función de una señal aplicada, de tal forma que la válvula utiliza cierta presión para cambiar de posición durante el cierre y apertura de la misma. Como se muestra en la figura 65.

Figura 65. Firma de una válvula



Fuente: [www.emersonprocess.com](http://www.emersonprocess.com). Consulta: julio de 2015.

Este procedimiento se realiza por primera vez cuando la válvula se instala y antes de que entre en servicio, de tal forma que, cada cierto tiempo programado, se vuelve a aplicar el mismo procedimiento para luego comparar las gráficas del comportamiento de la válvula y evaluar si ha habido cambios evidentes en la firma de la válvula. La firma de la válvula se puede utilizar para determinar el estado de los sellos de la válvula, para determinar si el tapón asienta perfectamente o si existe algún daño en los internos de la válvula. Todo esto puede diagnosticarse observando las gráficas de la firma de la válvula a través del *software* de diagnóstico proporcionado por los fabricantes.

#### 4.4.2. Descripción del mantenimiento típico de una válvula

A continuación, se describen las etapas principales para el mantenimiento de una válvula de globo de dos pulgadas, utilizada para el control de atemperación de vapor de una caldera de 900 psi. Se ilustra adecuadamente el proceso de armado de la válvula, indicando el orden de los componentes.

Para llevar a cabo el mantenimiento de esta válvula es necesario contar con el *kit* de sellos básico recomendado por el fabricante de la válvula. En este caso, se necesitan dos empaques espiro-metálicos y dos sellos de grafito, los cuales se aprecian en la figura 66. Es importante utilizar sellos nuevos siempre, ya que al momento de darle apriete a la válvula estos se deforman permanentemente.

Figura 66. **Empaque espiro-metálico y sello de grafito**



Fuente: ingenio azucarero.

Se inicia el mantenimiento retirando el actuador del cuerpo de la válvula, luego de retirar el actuador, solamente queda el bonete atornillado al cuerpo de la válvula, como se ve en la figura 67, se debe desmontar el bonete previo al desmontaje de los internos de la válvula.

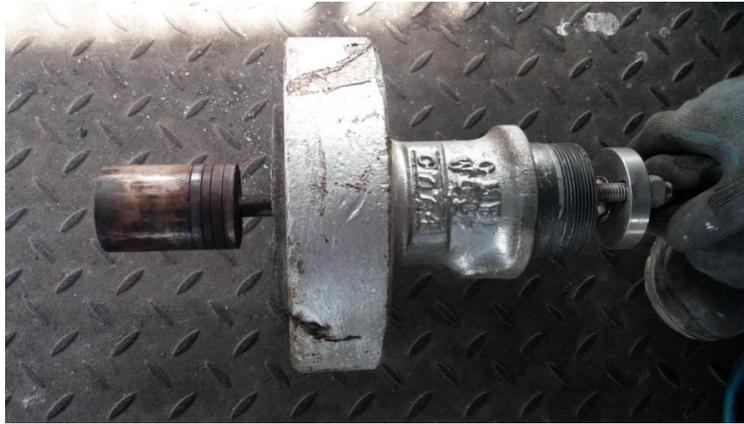
Figura 67. **Bonete y cuerpo de la válvula**



Fuente: ingenio azucarero.

Al retirar el bonete quedan expuestos los internos de la válvula, como se observa en las figuras 68 y 69.

Figura 68. **Bonete y tapón de la válvula**



Fuente: ingenio azucarero.

Figura 69. **Cuerpo y caja de la válvula**



Fuente: ingenio azucarero.

En la figura 70 se tiene un detalle de los internos de esta válvula, quienes están conformados por el asiento, la jaula y el tapón con su respectivo vástago.

Figura 70. **Detalle de los internos de la válvula**



Fuente: ingenio azucarero.

El tapón utiliza sellos de grafito, los cuales deben partirse para que sea posible colocarlos. En la figura 71 se aprecia el tapón con los sellos puestos, sin los sellos y posteriormente se aprecia un detalle de los sellos de grafito.

Figura 71. **Tapón de la válvula y sus sellos**



Fuente: ingenio azucarero.

Se deben verificar cuidadosamente la caja, el tapón y el asiento de la válvula para asegurar que estos no presentan daños visibles, como ralladuras, fracturas, marcas de cavitación, corrosión o vaporización. Una vez verificada la ausencia de daños se limpia cuidadosamente el conjunto de internos de la válvula, el bonete y el cuerpo de la válvula. También es importante verificar el estado del cuerpo de la válvula, ya que en algunos casos puede mostrar erosión o cavitación en las paredes o en el fondo.

En el caso del actuador (figura 72), es necesario que se verifique el estado del resorte de equilibrio y el estado del diafragma. El resorte no debe presentar marcas de deformación o daños debido a corrosión. Asimismo, el diafragma no debe mostrar fisuras ni endurecimiento del material.

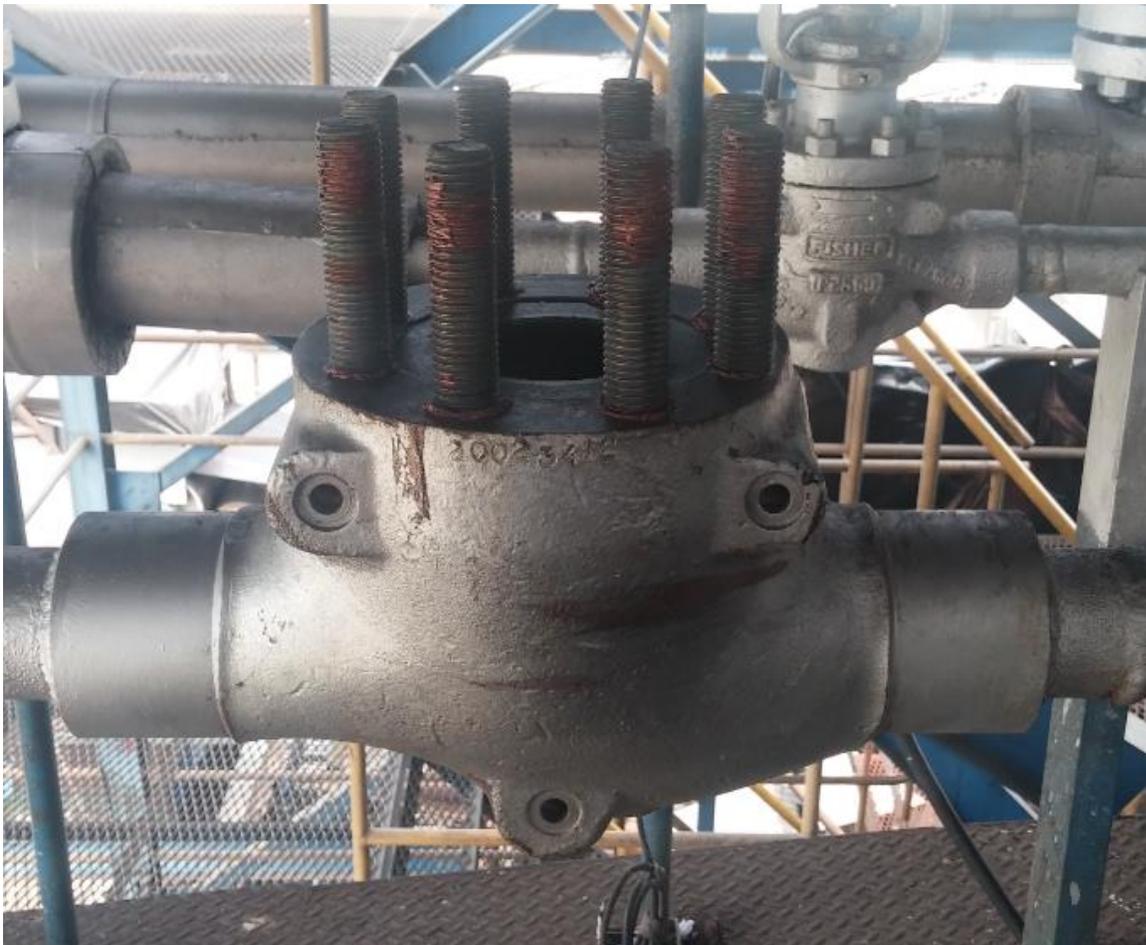
Figura 72. **Partes principales del actuador**



Fuente: ingenio azucarero.

Luego de limpiar y verificar el estado de los componentes de la válvula se inicia el ensamblaje de la misma. La preparación inicial del cuerpo de la válvula consiste en colocar los espárragos que sujetan el bonete al cuerpo de la válvula, tal como se presenta en la figura 73.

Figura 73. **Preparación del cuerpo de la válvula**



Fuente: ingenio azucarero.

En la figura 74 se muestra la secuencia del armado de los internos de la válvula, se coloca el asiento, luego la jaula. En este caso se observa que la jaula es del tipo anti cavitación, luego se coloca el empaque espiro metálico, quedando el cuerpo listo para colocar el tapón de la válvula.

Figura 74. **Armado de los internos de la válvula**



Fuente: ingenio azucarero.

Se deben colocar los empaques de grafito nuevos al tapón de la válvula, los anillos de grafito se deben partir por la mitad para poder colocarlos, esta operación debe realizarse cuidadosamente para evitar pérdidas de material en el empaque, lo que implicaría la posibilidad de fugas por el tapón.

Figura 75. **Preparación del tapón**



Fuente: ingenio azucarero.

El tapón se introduce en el cuerpo de la válvula, luego de haber armado adecuadamente el *trim* en el interior del cuerpo.

Figura 76. **Armado final de los internos de la válvula**



Fuente: ingenio azucarero.

Posterior al ensamblaje completo de los internos de la válvula, se coloca el bonete y se atornilla al cuerpo de la válvula tal como se observa en la figura 77.

Figura 77. **Ensamblado del bonete y el cuerpo**



Fuente: ingenio azucarero.

En la figura 78 se observa el ensamblado del estopero y en la figura 79 se tiene un detalle del ensamblado del diafragma del actuador.

Figura 78. **Apriete del bonete y ensamblado del estopero**



Fuente: ingenio azucarero.

Figura 79. **Ensamblaje del diafragma y resorte del actuador**



Fuente: ingenio azucarero.

En la figura 80 se observa en la parte superior el cuerpo del actuador y la tapadera, quienes en conjunto forman la cámara de presión del actuador. En esta cámara se introduce aire comprimido para presionar sobre el diafragma y generar el movimiento en el vástago de la válvula. En la figura 81 se muestra la válvula y el actuador completamente ensamblados.

Figura 80. **Ensamblado final del actuador**



Fuente: ingenio azucarero.

Figura 81. **Montaje completo de la válvula y su actuador**



Fuente: ingenio azucarero.

## CONCLUSIONES

1. Los sistemas de cogeneración dependen en gran medida de las calderas especializadas en la quema de bagazo. Estas calderas deben ser del tipo acuotubulares debido a las altas presiones y temperaturas requeridas para la producción de vapor con la suficiente energía térmica para su respectiva transformación en energía mecánica y, posteriormente, en energía eléctrica en los turbogeneradores.
2. Los sistemas de control de las calderas y sistemas de control en general, dependen tanto de la medición como de los elementos finales de control para gobernar adecuadamente sobre las variables de procesos. Es importante verificar la calibración adecuada de los instrumentos y cruzar la información con los valores especificados por los diseñadores de las calderas. Asimismo, se deben hacer verificaciones periódicas en las válvulas para asegurar que no exista desvío en la carrera, pues esto incide directamente en la eficiencia de los lazos de control.
3. Existe gran variedad de tipos de válvulas, de la misma forma, cada tipo de válvula puede modificarse para mejorar ciertas características. Entre estas modificaciones se pueden mencionar el uso de materiales más resistentes o revestimientos para aplicaciones específicas, tanto en el cuerpo como en la empaquetadura. Además, es posible agregar modificaciones estructurales o en el elemento de estrangulación para mejorar las características de control, reducir el ruido y eliminar la cavitación.

4. El dimensionamiento analítico de la válvula es importante para tener una idea clara del rango entre el cual se debe encontrar el tamaño de la válvula. Sin embargo, es importante reconocer que existen fenómenos que ocurren dentro de la válvula que no se pueden predecir, del mismo modo, el comportamiento de una válvula en el proceso es diferente a su comportamiento en el laboratorio. Por esta razón, es necesario auxiliarse en la experiencia de los operadores y en el conocimiento de procesos similares para conseguir, con ello, la elección más acertada del elemento final de control.

## RECOMENDACIONES

1. Para dimensionar una válvula de control de forma adecuada es importante conocer el proceso y utilizar la experiencia previa de los operadores de los sistemas para realizar una elección adecuada. No basta con apegarse al cálculo analítico de la válvula, ya que existen situaciones imposibles de predecir y que varían de un tipo de instalación a otra, aun cuando el proceso sea el mismo y las dimensiones de la tubería también sean iguales
2. Consultar el manual de la ISA de ecuaciones para el dimensionamiento de válvulas de control. En él se encuentra información ampliada y basada en muchos años de experiencia de los ingenieros de procesos encargados de diseñar lazos de control y equipos automáticos en donde se involucra el uso de válvulas.
3. La mayoría de ecuaciones utilizadas para dimensionamiento de válvulas, los factores y coeficientes que se utilizan se han establecido de manera aproximada y basados en las observaciones del comportamiento de las válvulas en las instalaciones industriales. Se debe verificar adecuadamente los resultados obtenidos y cruzar la información con las condiciones reales del proceso específico que se esté analizando para conseguir el resultado más óptimo.



## BIBLIOGRAFÍA

1. CREUS, Antonio. *Instrumentación Industrial*. 8a ed. México: S.A. Marcombo, 2011. 792 p.
2. Fisher Controls Co. *Control valve Handbook*. 2a ed. Estados Unidos: Fisher, 2005. 275 p.
3. LIPTÁK, Béla G. *Instrument engineer's handbook Vol. II*. 4a ed. Estados Unidos: CRC Press, 2006. 2304 p.
4. SMITH, Carlos A. *Control automático de procesos*. México: Noriega Limusa, 1991. 702 p.
5. WOODRUF, Everett B. *Steam plants operation*. 9a ed. Estados Unidos: McGraw-Hill, 2011. 630 p.

