

**ESTUDIO DE CAUSA RAIZ DE FALLA MECÁNICA EN LA VALVULA DE
CARGA DE LA UNIDAD HIDROTRATADORA DE DIESEL DE LA REFINERÍA
DE BARRANCABERMEJA**

CAROLINA JIMÉNEZ GUTIÉRREZ



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRONICA
ESPECIALIZACION EN CONTROL E INSTRUMENTACION INDUSTRIAL
BUCARAMANGA
2011**

**ESTUDIO DE CAUSA RAIZ DE FALLA MECÁNICA EN LA VALVULA DE
CARGA DE LA UNIDAD HIDROTRATADORA DE DIESEL DE LA REFINERÍA
DE BARRANCABERMEJA**

CAROLINA JIMÉNEZ GUTIÉRREZ

**MONOGRAFÍA DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE ESPECIALISTA EN
CONTROL E INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL**

**DIRECTOR
JUAN CARLOS MANTILLA SAAVEDRA
INGENIERO ELECTRÓNICO**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERIA Y ADMINISTRACION
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRONICA
ESPECIALIZACION EN CONTROL E INSTRUMENTACION INDUSTRIAL
BUCARAMANGA
2011**

Nota de Aceptación

Firma de Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bucaramanga, 19 de Febrero de 2011

A **Dios**, por regalarme este tiempo de vida.

A mi **Padres y Hermanos**, que me apoyaron en los momentos de cansancio.

A **Mi Empresa**, que me dio el tiempo suficiente y apoyo para seguir estudiando.

Carolina

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	1
1. MARCO REFERENCIAL.....	2
1.1. MARCO TEÓRICO.....	2
1.1.1. Historia de la Unidad Hidrotratadora de Diesel.....	2
1.1.2. Cargas y Productos.....	3
a. Cargas.....	3
b. Productos.....	4
c. Subproductos.....	4
1.1.3. Descripción General del Proceso de Hidrotratamiento de Diesel.....	5
a. Sección de Carga.....	5
b. Sección de Reacción.....	5
c. Sección de Purificación de Hidrogeno con DEA a Alta Presión.....	6
d. Sección de Compresión y Reciclo de Hidrogeno.....	7
e. Sección de Despojo de Wild Nafta.....	8
f. Sección de Depuración de Hidrogeno con DEA a Baja Presión.....	8
g. Sección de Separación de Diesel Liviano y Diesel Pesado.....	9
1.1.4. Elementos finales de Control.....	12
a. Coeficiente de Dimensionamiento Cv.....	12
b. Partes de una Válvula de Control.....	13
c. Tipos de Válvulas de Control.....	16

d. Tipos de Actuadores.....	23
e. Tipos de Acciones en una Válvula de Control.....	24
f. Características de Caudal Inherente.....	25
g. Accesorios de una Válvula de Control.....	27
h. Tipos de Circulación a través de una Válvula de Control.....	28
1.1.5. Vibración de Tuberías incluyendo Válvulas de Control.....	30
1.1.6. Especificaciones para Válvulas de Control.....	30
a. Actuador.....	31
b. Cuerpo.....	32
c. Internos.....	34
d. Especificaciones relacionadas con los internos de la Válvula de Control que manejen líquidos.....	35
e. Especificaciones relacionadas con los internos de la Válvula de Control que manejen Gas o Vapor.....	36
f. Hermeticidad de las Válvulas de Control.....	37
g. Aplicaciones de Servicio Severo.....	39
2. INVESTIGACIÓN DISPARO GENERAL DE LA UNIDAD DE DIESEL DEL PROYECTO DE HDT.....	40
2.1. DESCRIPCIÓN DE LOS HECHOS.....	40
2.2. ANALISIS DE LAS EVIDENCIAS EVENTO 13-10-2010.....	40
2.3. ANALISIS DE LAS EVIDENCIAS EVENTO 16-10-2010.....	43
3. DETERMINACIÓN DE LAS CAUSAS.....	46
3.1. ANALISIS DE POSIBLES CAUSAS.....	46

3.1.1. Falla en el Suministro de Aire en la FV-47003.....	46
3.1.2. Falla del posicionador de la FV-47003.....	46
3.1.3. Falla del Sistema de Control.....	47
3.1.4. Falla Mecánica de la FV-47003.....	47
a. Alto Diferencial de Presión en la válvula debido a Condiciones Operativas diferentes a las del diseño.....	47
b. Deficiente Diseño y/o Selección de la Válvula.....	47
c. Alta Vibración en la Línea.....	48
RECOMENDACIONES.....	49
CONCLUSIONES.....	50
BIBLIOGRAFIA.....	51
ANEXOS.....	52

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Cargas a la Unidad de Hidrotratamiento de Diesel.....	4
Tabla 2. Productos de la Unidad de Hidrotratamiento de Diesel.....	4
Tabla 3. Subproductos de la Unidad de Hidrotratamiento de Diesel.....	5

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama General de la Planta Hidrotratadora de Diesel.....	11
Figura 2. Coeficiente de Dimensionamiento Cv.....	12
Figura 3. Diagrama de una Válvula de Control.....	13
Figura 4. Pistón de una Válvula de Control.....	14
Figura 5. Cuerpo de una Válvula de Control.....	15
Figura 6. Válvula Globo.....	17
Figura 7. Válvula de Ángulo.....	17
Figura 8. Válvula de Tres Vías.....	18
Figura 9. Válvula de Trim Desbalanceado.....	18
Figura 10. Válvula de Trim Balanceado.....	19
Figura 11. Válvula en Y.....	19
Figura 12. Válvula de Compuerta.....	20
Figura 13. Válvula de Cuerpo Partido.....	20
Figura 14. Válvula de Membrana.....	21
Figura 15. Válvula de Compresión.....	21
Figura 16. Válvula Camflex.....	22
Figura 17. Válvula con Obturador Cilíndrico Excéntrico.....	22
Figura 18. Válvula de Mariposa.....	22
Figura 19. Válvula de Bola.....	23
Figura 20. Tipos de Acciones en una Válvula de Control.....	25
Figura 21. Curvas Características de una Válvula de Control.....	27
Figura 22. Tipos de canastas de una Válvula de Control.....	27

Figura 23.	Tipos de Circulación a través de una Válvula de Control.....	28
Figura 24.	Diagrama Esquemático del Sistema de Carga de Diesel.....	40
Figura 25.	Tendencia Corte de Carga a la Unidad FV-47003 y Respuesta del Controlador FIC-47003 13-10-2010.....	41
Figura 26.	Registro de la Secuencia de Eventos en el ESD 13-10-2010.....	41
Figura 27.	Cambio del Posicionador de la UV-47003.....	42
Figura 28.	Inspección de la FV-47003 13-10-2010.....	43
Figura 29.	Trim Reparado 13-10-2010.....	43
Figura 30.	Tendencia Corte de Carga a la Unidad FV-47003 y Respuesta del Controlador FIC-47003 16-10-2010.....	44
Figura 31.	Registro de la Secuencia de Eventos en el ESD 13-10-2010.....	44
Figura 32.	Ruptura del vástago 16-10-2010.....	45
Figura 33.	Trim Reparado 16-10-2010.....	45
Figura 34.	Posibles Causas de Falla FV-47003.....	47
Figura 35.	Posibles Causas de la Falla Mecánica de la FV-47003.....	47
Figura 36.	Tendencias Resultantes de Prueba Realizada en Campo.....	48

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO 1. <i>Históricos DCS Evento Octubre 13 del 2010.....</i>	I
ANEXO 2. <i>Históricos DCS Evento Octubre 16 del 2010.....</i>	II
ANEXO 3. <i>Secuenciador de Eventos Octubre 13 del 2010.....</i>	III
ANEXO 4. <i>Secuenciador de Eventos Octubre 16 del 2010.....</i>	IV
ANEXO 5. <i>Hoja de Especificaciones válvula FV-47003.....</i>	V

GLOSARIO

- **ALC.** Aceite Liviano de Ciclo
- **BPD.** Barriles por Día.
- **DCS.** (*Distributed Control System*). Sistema de Control Distribuido.
- **DEA.** Dietanolamina
- **EPC.** (*Engineering Procurement & Construction*). Contrato de Ingeniería, Compras y Construcción.
- **ESD.** (*Emergency Shutdown System*). Sistema de Parada de Emergencia.
- **FCC.** Unidades de Craqueo Catalítico.
- **GRB.** Gerencia Refinería Barrancabermeja
- **ISA.** (*International Society of Automation*). Sociedad Internacional de Automatización.
- **LVDT.** Transformador Diferencial de Voltaje Lineal
- **SOE.** (*Triconex Sequence of Events Recorder*). Secuenciador de Eventos de Triconex.
- **TASC.** Técnica de Análisis Sistemático de Causas.
- **ULSD.** Ultra Bajo Contenido de Azufre.
- **VRP.** Vicepresidencia de Refinación y Petroquímica.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Identificar la causa raíz que ocasiona la falla mecánica en la válvula de carga de la Unidad Hidrotratadora de Diesel de la Refinería de Barrancabermeja.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Evaluar condiciones operacionales para las cuales se está generando la falla mecánica de la válvula.
- Determinar qué factores y parámetros se deben tener en cuenta para obtener una adecuada selección y dimensionamiento de la instrumentación requerida para controlar una variable de proceso

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: ESTUDIO DE CAUSA RAIZ DE FALLA MECÁNICA EN LA VALVULA DE CARGA DE LA UNIDAD HIDROTRATADORA DE DIESEL DE LA REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA

AUTORES: CAROLINA JIMÉNEZ GUTIÉRREZ

FACULTAD: ESP. EN CONTROL E INSTRUMENTACION INDUSTRIAL

DIRECTOR: JUAN CARLOS MANTILLA SAAVEDRA

RESUMEN

Investigación de la causa raíz de una falla mecánica que se presenta en una válvula, la cual controla la carga a una planta hidrotratadora de Diesel. Inicialmente se describe el proceso de la Unidad para resaltar la criticidad y afectación de una parada no programada por este tipo de incidente. Para entender de una manera más detallada el funcionamiento de una válvula de control se especifican las partes internas que la componen y las diferentes clasificaciones de cada una de ellas. Se analizan las diferentes causas por las cuales se presentan altas vibraciones en los sistemas de tuberías, así como los fenómenos del fluido al pasar a través de estos elementos finales de control. Finalmente se dan algunas recomendaciones que se deben tener en cuenta para la selección adecuada de las especificaciones técnicas en el diseño de un lazo de control y la instrumentación asociada para cumplir con las necesidades del proceso y la calidad requerida de sus productos.

PALABRAS CLAVE: Válvula de control, Fluido, Vibración, Causa Raíz, Energía cinética, Velocidad.

V°B°DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

ABSTRACT OF THESIS PROJECT

TITLE: ROOT CAUSE STUDY OF MECHANICAL FAILURE OF THE FEED VALVE OF DIESEL UNIT IN BARRANCABERMEJA'S REFINERY.

AUTHORS: CAROLINA JIMÉNEZ GUTIÉRREZ

DEPARTMENT: SP. CONTROL AND INDUSTRIAL INSTRUMENTATION

DIRECTOR: JUAN CARLOS MANTILLA SAAVEDRA

ABSTRACT

Root cause study of mechanical failure of the feed valve of Diesel Unit HDT project. Initially the process of the Unit is described to emphasize the criticality and affectation of unexpected shutdown by this type of incident. In order to understand the operation of a control valve, the internal parts which compose a valve and the different classifications are specified from each of them. The different causes are analyzed by which discharges appear vibrations in the pipeline systems, as well as the fluid phenomena through the valve. Finally some recommendations for proper selection of design specifications of a control loop and the associated instrumentation to fulfill the needs of the process and the required quality of their products.

KEYWORDS: Control Valve, Fluid, Vibration, Root Cause, Kinetic Energy, Velocity.

V°B°THESIS DIRECTOR

INTRODUCCION

En todos los procesos industriales se ven implicados varias factores que pueden afectar la efectividad de su control y por consiguiente el abastecimiento y calidad de sus productos. Uno de estos factores es el correcto funcionamiento de toda su instrumentación de campo y la confiabilidad que estos pueden brindar a sus operadores supervisores del proceso.

Dentro de la variedad de equipos que se implementan actualmente en la industria y a los cuales se les debe realizar un seguimiento estricto se encuentran las válvulas, las cuales son los instrumentos de control más esenciales de la industria.

Con este estudio se pretende analizar las posibles fallas que se pueden presentar en estos elementos finales de control y los diferentes parámetros que se deben tener en cuenta para una adecuada selección de acuerdo a su aplicación, tipo de fluido y proceso.

1. MARCO REFERENCIAL

1.1 MARCO TEÓRICO

1.1.1 Historia de la Unidad Hidrotratadora de Diesel

Como parte del Plan Estratégico de la Empresa [4], se desarrolló un proyecto de inversión para disponer de plantas e instalaciones que permitieran lograr la disminución del contenido de azufre en los diferentes tipos de gasolina y el Diesel producto que produce la GRB.

Desde el año 2000 la Refinería de Barrancabermeja había iniciado estudios conceptuales de ingeniería tendientes a definir las adecuaciones en sus facilidades con el fin de lograr la reducción de azufre en los combustibles dentro del marco del programa de Optimización de Refinerías.

La Unidad de Hidrotratamiento de Diesel [4] hizo parte del Proyecto de Hidrotratamiento de Combustibles GRB, desarrollado por la Vicepresidencia de Refinación y Petroquímica, con el propósito de asegurar el cumplimiento de las especificaciones de calidad del combustible Diesel que se produce en Barrancabermeja de acuerdo con los requerimientos establecidos en la Resolución N° 1180 del 21 de Junio de 2006 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y del Ministerio de Minas y Energía, respecto a la calidad de los combustibles líquidos (Gasolinas y Diesel) para uso en Colombia.

A partir del año 2003 y en respuesta a la primera regulación emitida por el Gobierno Nacional orientada a limitar los contenidos de azufre en los combustibles, la cual fue fechada en abril 14 de ese año, ECOPETROL S.A. a través del proceso VRP-PREC-001-2003 inició la contratación de licencias para los procesos tecnológicos y los estudios de ingeniería básica de proceso con el propósito de definir las inversiones en las nuevas plantas. Así fue como a finales del 2003 y hasta agosto del 2004 se suscribieron y desarrollaron los contratos con el Licenciador de la Tecnología, Axens North America Inc., quienes además de realizar la Ingeniería Básica y el presupuesto para el Proyecto Hidrotratamiento de Combustibles GRB, realizaron un estudio de optimización de las diferentes corrientes de

gasolinas, diesel e hidrógeno proyectado a las demandas del año 2015 en el mercado Colombiano.

En junio de 2004, con el fin de llevar el proyecto a la fase de ejecución, se realizó el proceso de precalificación de firmas contratistas del perfil EPC (Engineering, Procurement & Construction).

La Unidad de Hidrotratamiento de Diesel [4] está diseñada utilizando la tecnología de hidrotratamiento Prime D+™, licenciada por Axens, para tratar una mezcla de Diesel virgen de alto contenido de azufre y aceite liviano de ciclo de cracking, para producir Diesel de ultra bajo contenido de azufre (ULSD). Con contenidos de azufre entre 5 y 25 ppm en los diferentes productos de la unidad. La unidad habilita a ECOPETROL S.A. para producir componentes que irán al sistema de *blending* de Diesel y así poder cumplir con la resolución 1180 del Gobierno Colombiano, para combustibles más limpios para el mercado Colombiano. El Diesel producto también es separado en corrientes de Diesel liviano con un punto final de 360°C y Diesel pesado con punto final de 390°C; que permitirán en el *blending* de Diesel, cumplir con las demandas de Diesel extra y Diesel regular.

La unidad está diseñada para procesar una mezcla de 83% de Diesel virgen de alto contenido de azufre (Alto Azufre) proveniente de las unidades de destilación atmosférica (U-150, U-200, U-250, U-2000 y U-2100) y 17% de aceite liviano de ciclo (ALC) de las unidades de craqueo catalítico (FCC) es decir, para una capacidad de 56,600 BPSD y con un *turndown* de 28,300 BPSD equivalentes al 50% de la capacidad de diseño.

1.1.2 Cargas y productos

a. Cargas

La tabla 1: Cargas a la Unidad de Hidrotratamiento de Diesel, presenta las materias primas que ingresan a esta unidad dentro de la operación normal de hidrotratamiento del diesel, con sus respectivos orígenes.

Cargas	Origen
Diesel de Alto Azufre (HS)	Tanque de Almacenamiento K-823 de la Casa de Bombas N° 2
Aceite Liviano de Ciclo (ALC)	Tanque de Almacenamiento K-5 de la Casa de Bombas N° 2
Hidrógeno	Unidad de Generación de Hidrógeno U-4650

Tabla 1. Cargas a la Unidad de Hidrotratamiento de Diesel [4]

b. Productos

El diesel hidrogenado liviano y pesado son los productos de la Unidad de Hidrotratamiento de Diesel los cuales son enviados hacia los tanques de diesel producto de la Casa de Bombas N° 2, K-4 y K-804/5, respectivamente.

La Tabla 2: Productos de la Unidad de Hidrotratamiento de Diesel, Corrida Normal, presenta los productos principales generados en dicha unidad en operación normal.

Productos	Destino y/o Unidad Destino
Diesel Hidrogenado Liviano	Tanque de Almacenamiento K-4 de la Casa de Bombas N° 2
Diesel Hidrogenado Pesado	Tanque de Almacenamiento K-804/805 de la Casa de Bombas N° 2

Tabla 2. Productos de la Unidad de Hidrotratamiento de Diesel [4]

c. Subproductos

La Tabla 3: Subproductos de la Unidad de Hidrotratamiento de Diesel, presenta los productos secundarios generados en dicha unidad.

El subproducto de hidrotratamiento de diesel produce *wild* nafta que es enviada hacia las unidades topping U-2000 y U-2100.

Subproductos	Destino
Wild Nafta	U-2000 y 2100

Tabla 3. Subproductos de la Unidad de Hidrotratamiento de Diesel [4]

1.1.3 Descripción General del proceso de Hidrotratamiento de Diesel

El objetivo de la Planta de Prime D es producir un Diesel de ultra bajo contenido de azufre (25 ppm en peso de azufre) de una mezcla de Diesel virgen y aceite liviano de ciclo por medio de reacciones de hidrodesulfurización [4].

a. Sección de carga

La P-3236A/B bombea la carga de Diesel desde la casa de bombas N° 2. Esta corriente pasa por un sistema de filtrado en donde se retiran partículas sólidas que afectan el lecho de catalizador de los reactores. El flujo ingresa al Tambor de Carga D-4701 en donde se acumula el líquido para que las Bombas de Carga a la Planta P-4701A/B lo envíen a la sección de reacción. Este flujo de descarga se une con la corriente de hidrógeno de reciclo y de *make-up*, para posteriormente precalentarse en el Intercambiador de Placas (*packinox*) E-4701.

b. Sección de Reacción

En la sección de reacción se lleva a cabo el hidrotratamiento de la carga, con el fin de remover el azufre, nitrógeno y oxígeno, logrando de esta manera un diesel de bajo azufre [4].

Esta sección trata los siguientes temas:

Horno de Carga a Reactores H-4701

La carga de Diesel combinada con hidrógeno entra por ocho serpentines al Horno de Carga a los Reactores H-4701 en donde se obtiene la temperatura de reacción.

Reactores de Hidrotratamiento R-4701/02

La carga combinada desde el horno, ingresa por la parte superior del primer reactor R-4701 y se distribuye uniformemente a través de un primer lecho de catalizador que protege los cuatro lechos siguientes de catalizador de hidrodesulfurización distribuidos en los dos reactores. Inyecciones de hidrógeno entre lechos son necesarias para controlar las temperaturas generadas por las reacciones exotérmicas en los lechos de los reactores. La salida del segundo reactor R-4702 luego de ceder temperatura a la carga en el E-4701, recibe la inyección de agua de lavado para diluir las sales que se forman en los lechos de los catalizadores de los reactores. Posteriormente, esta corriente se enfría en los E-4703 y se acumula en el Separador Frío D-4702, donde se independizan las corrientes de gases, hidrocarburo y agua agria [4].

c. Sección de Purificación de Hidrógeno con DEA a Alta Presión

La fase gaseosa proveniente del separador frío del efluente del segundo reactor D-4702 es enviada hacia el sistema de absorción de alta presión, pasando primero a través de un Tambor Separador D-4713 donde se garantizará el retiro de condensado presente en la corriente de gases. Posteriormente, pasará a través de la Torre Absorbedora T-4704 donde una corriente de dietanolamina (DEA) proveniente de la Unidad de Regeneración de Amina U-4860 retira el sulfuro de hidrógeno. En esta torre el hidrógeno que asciende se pone en contacto con la corriente de DEA que proviene de la descarga de la bomba P-4714A/B.

Esta corriente de DEA desciende por la torre para absorber los compuestos de azufre. La corriente de DEA rica en compuestos de azufre llega al fondo de la torre en donde sale por presión hacia la Torre Absorbedora con Amina de Baja Presión T-4703. Indicaciones de la caída de presión en la torre T-4704 y cambio de temperatura en las corrientes de entrada de gas y DEA; son considerados parámetros de control dentro del proceso de absorción.

Los gases efluentes de esta torre libres de compuestos de azufre, van hacia el Tambor de Succión D-4703 y son succionados y recuperados por el Compresor de Reciclo C-4701 y enviados nuevamente al sistema de reacción. En la cima de este tambor existe una facilidad para enviar H_2 hacia el Tambor Separador de Amina de Baja Presión D-4709, en casos de que se

presenten disturbios operacionales, pero normalmente por esta línea no se espera flujo [4].

d. Sección de Compresión y Reciclo de Hidrógeno

En la sección de compresión y reciclo de hidrógeno se combina el hidrógeno de restitución proveniente de la Unidad de Generación de Hidrógeno U-4650, con el hidrógeno de reciclo. El hidrógeno de restitución (*hydrogen make up*) se comprime en un compresor recíproco de dos etapas, mientras que el hidrógeno de reciclo se somete a una compresión baja en un compresor de tipo centrífugo.

Esta sección trata los siguientes temas:

Hidrogeno de restitución

Los Compresores de Restitución C-4702A/B, recíprocos y de dos etapas, succionan el hidrógeno proveniente de la Unidad de Generación de Hidrógeno U-4750 desde el Tambor de la Primera Etapa D-4704. Se eleva la presión en la primera etapa, se enfría, pasa al tambor de succión de la segunda etapa D-4705 donde se retira el condensado y se comprime en la segunda etapa.

Luego de ser comprimido en esta segunda etapa, el hidrógeno de *make-up* se divide en dos corrientes: la primera es enviada a un sistema de coalescedores M-4706A/B para ser exportada a la Unidad de Hidrotratamiento de Gasolina U-4750, la segunda corriente es enviada junto a la corriente del Compresor de Reciclo C-4701 al sistema de precalentamiento del Packinox E-4701 para finalmente unirse a la carga de Diesel de alto azufre de la unidad. Estos compresores de restitución aumentan la presión del hidrógeno que se inyecta al sistema de alta para el proceso de reacción, además, mantienen la presión del sistema para liberar el flujo de purga de hidrógeno hacia gas combustible [4].

Hidrogeno de reciclo

El hidrógeno proveniente de la sección de depuración de hidrógeno con DEA y va hacia la succión del Compresor de Reciclo C-4701 de tipo centrífugo operado con motor. Una parte de la descarga del compresor de reciclo es enviada como medio enfriante para las reacciones exotérmicas generadas en

los lechos del catalizador de los R-4701/02. La corriente restante de gas de reciclo se une con la corriente de *make-up* para determinar la relación hidrógeno/carga [4].

e. Sección de Despojo de Wild Nafta

La corriente de hidrocarburo proveniente del separador frío, ingresa a un tren de precalentamiento conformado inicialmente por el E-4711 donde intercambia calor con la corriente de diesel liviano, en el E-4706A-C con la corriente de Diesel pesado y finalmente en el E-4702 con el efluente del segundo reactor R-4702 para entrar a la Torre Despojadora T-4701, donde a través de una inyección de vapor de media presión son retirados los compuestos livianos, los cuales luego de ser condensados y enfriados en los E-4704 y E-4705 respectivamente. Se acumulan en el D-4707 formando tres corrientes. La primera corriente es el gas agrio que se dirige hacia el sistema de amina de baja presión. La segunda corriente es el agua agria acumulada en la bota del tambor y enviada al Tambor Acumulador de Agua Agria D-4706. Por último la tercera corriente de hidrocarburo llamada wild nafta se divide en dos flujos, el primero retorna a la cima de la torre como parte del control de temperatura de cima y el flujo excedente es enviado a las unidades de topping como subproducto de la unidad.

Por otro lado, los fondos de la torre despojadora son precalentados y enviados a la Torre Separadora T-4702 [4].

f. Sección de Depuración de Hidrógeno con DEA a Baja Presión

La corriente de gases proveniente del acumulador de cima de la Torre Despojadora D-4707 se une con otra corriente gaseosa proveniente de la U-4750 y son conducidos hacia la sección de amina de baja presión, ingresando inicialmente al Tambor Separador D-4709. Posteriormente, ingresan por la parte baja de la Torre Absorbedora de Baja Presión T-4703 donde una corriente de dietanolamina (DEA) proveniente de la Unidad de Regeneración de Amina U-4860, entra por la parte superior de la torre en contraflujo a los gases que ascienden para retirarles los compuestos de azufre.

Enriquecida esta amina en el fondo de la torre junto con la corriente de DEA rica proveniente de la Torre Absorbedora de Alta Presión T-4703, son

enviadas hacia la Unidad de Regeneración de Amina U-4860. Los gases libres de sulfuro de hidrógeno salen por la cima de esta torre dirigiéndose hacia el Tambor de Cima de Amina de Baja Presión D-4710 para acumular y eliminar cualquier traza de amina presente en la corriente gaseosa que será enviada hacia el cabezal de gas combustible o en su defecto hacia el cabezal de tea ácida de la unidad, que finalmente será enviada a la Tea N° 2 [4].

g. Sección de Separación del Diesel Liviano y Diesel Pesado

La carga a la sección de separación de Diesel liviano y pesado proveniente del fondo de la Torre Despojadora T-4701 es precalentada con los fondos de la misma Torre Separadora T-4702 en los E-4707 A/B/C. La baja presión y la alta temperatura suministrada por el Rehervidor de Fondo H-4702 facilitan el desprendimiento de los compuestos livianos presentes en el Diesel pesado. De esta torre se derivan tres corrientes: Diesel pesado, Diesel liviano y wild nafta.

El Diesel pesado acumulado en el fondo de la torre lo toman las bombas P-4704A/B y la descarga se divide en dos corrientes: la primera es enviada hacia el Rehervidor de Fondo de la Torre H-4702 donde retorna nuevamente a la torre por debajo del plato 22. La segunda corriente cede temperatura con la carga de la torre en los E-4707A/B/C, posteriormente precalienta la carga a la Torre Despojadora T-4701 y los E-4706A/B/C y finalmente se enfría en el Aeroenfriador E-4709 y en el Enfriador E-4710. Antes de salir hacia el área de almacenamiento en los K-804/05, una parte de la corriente es succionada por las bombas P-4713A/B para el lavado de los Filtros de Carga F-4701A-F.

El diesel liviano es obtenido en el plato 8 de la torre separadora y enviado a través de las bombas P-4706A/B. La descarga de estas bombas se divide en dos corrientes: la primera corriente es enviada a la torre y la segunda corriente es enviada hacia el E-4711, donde intercambia calor con la carga de la torre despojadora, luego se enfría en el E-4712 y finalmente es enviado hacia el área de almacenamiento de diesel liviano en el K-4.

Los gases de cima de la torre separadora son enfriados y acumulados en el tambor D-4708 donde se generan tres corrientes. El agua agria acumulada en la bota del tambor es enviada al Tambor de Agua de Lavado D-4706. La

corriente de wild nafta es tomada por las bombas P-4705A/B y la descarga se divide en dos corrientes: la primera corriente retorna a la cima de la torre para controlar la temperatura en esta zona y la segunda corriente es enviada hacia la salida del lado hidrocarburo del Separador Frío D-4702. Finalmente, la fase gaseosa del Tambor Acumulador de Cima de la Torre Separadora D-4708 es enviada hacia el cabezal de tea ácida de la unidad, que finalmente será enviada a la Tea N° 2 [4].

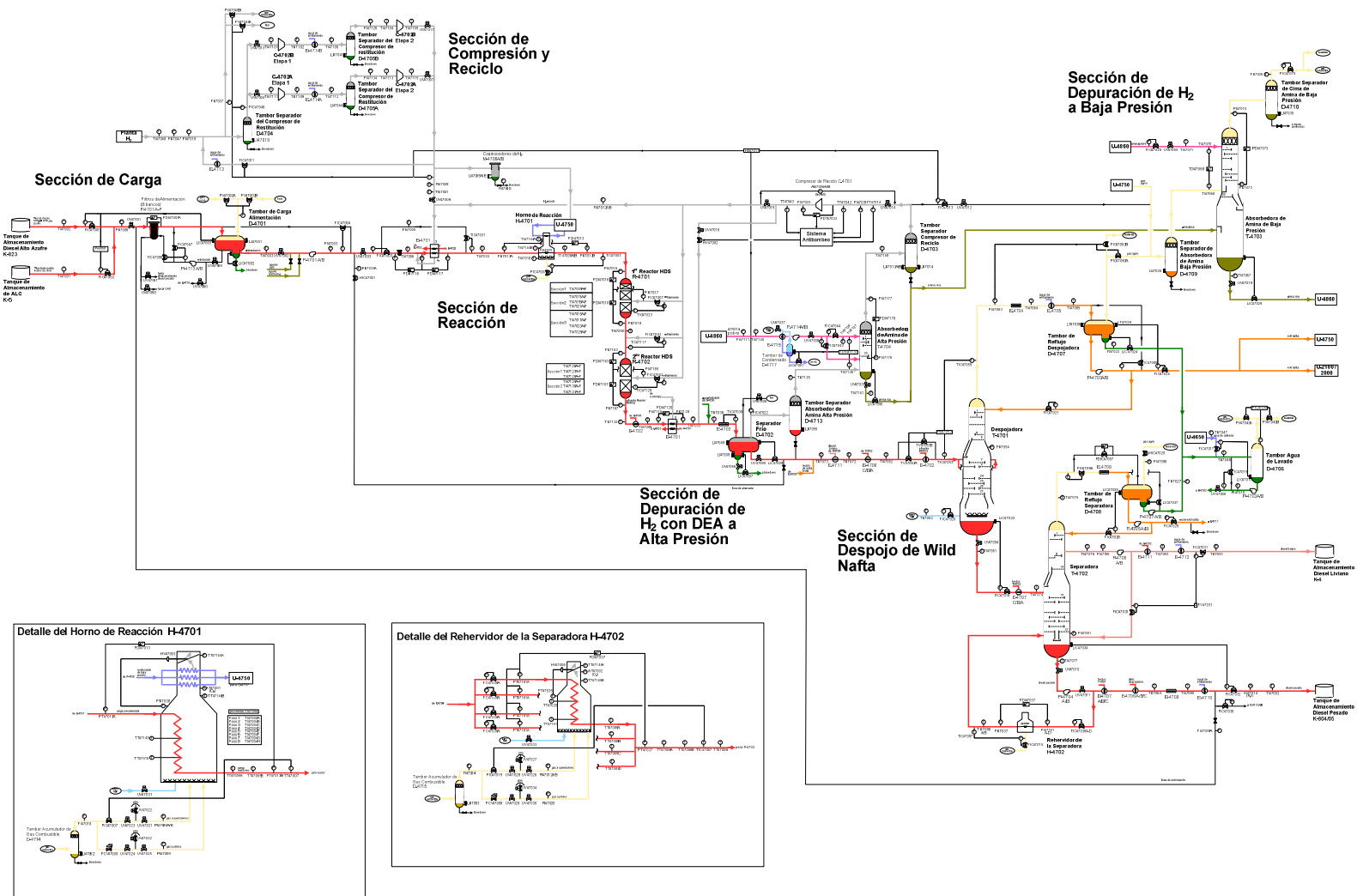


Figura 1. Diagrama General de la Planta Hidrotratadora de Diesel [4]

1.1.4 Elementos finales de control

La válvula de control es el elemento final más común de un lazo de control. Su misión consiste en ejecutar las órdenes procedentes del controlador u otros instrumentos. Estas deben responder de manera rápida y precisa a la señales de los controladores y tienen tanta importancia dentro del bucle de control como el elemento primario, el transmisor o el mismo controlador.

Las válvulas de control típicamente se componen de tres partes importantes: actuador, bonete y cuerpo. Estas tres partes están conectadas y tienen que funcionar sincronizadamente para lograr el efecto requerido por el controlador.

A estos instrumentos de control se le puede realizar una prueba Bench Set, la cual consiste en probar el motor de la válvula de control y determinar el valor de presión para iniciar su recorrido y el valor de presión final para finalizar su recorrido. Esto es ajustable con el resorte de la carga [2].

a. Coeficiente de dimensionamiento C_v

El C_v es el coeficiente más comúnmente utilizado para expresar la capacidad de flujo de un cuerpo y un trim en una válvula de control.

Se define como el caudal de agua en galones USA por minuto que pasa a través de la válvula en posición completamente abierta y con una caída de presión de 1 psi.

Este coeficiente determina la capacidad de la válvula y se selecciona de acuerdo a las necesidades del proceso.

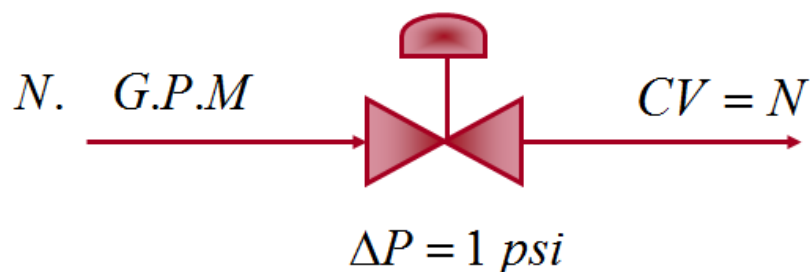


Figura 2. Coeficiente de dimensionamiento C_v [2]

b. Partes de una válvula de Control:

Actuador (Diafragma)

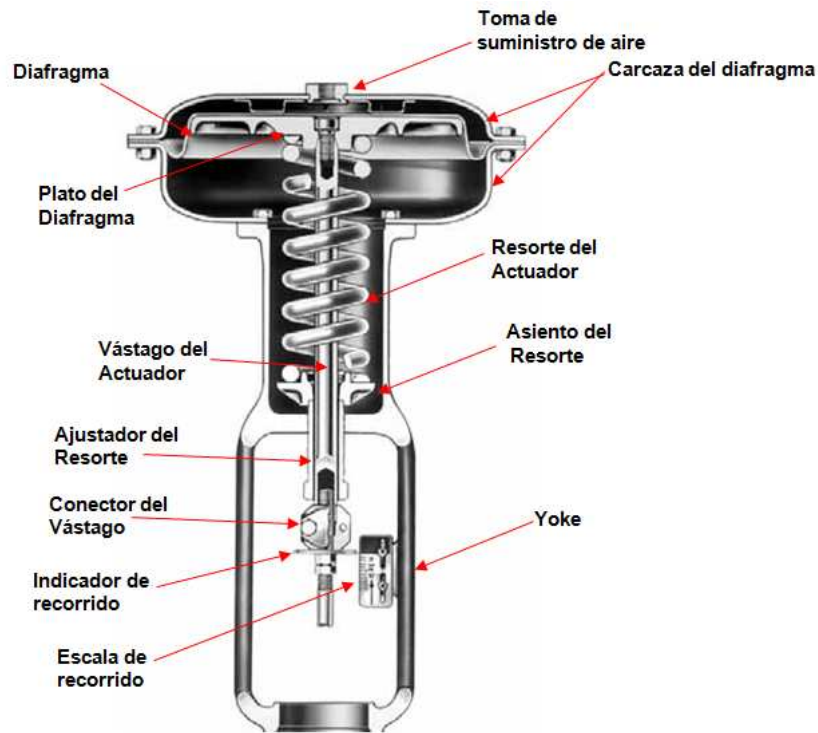


Figura 3. Diafragma de una válvula de control [2]

- ✚ **Diafragma:** Un elemento flexible que responde a la presión y que transmite la fuerza al plato de diafragma y al vástago del actuador.
- ✚ **Resorte del Actuador:** Un resorte, o grupo de resortes, localizados en el interior de la carcasa del yoke o actuador que mueve el vástago del actuador en una dirección opuesta a la creada por la presión del diafragma.
- ✚ **Vástago del Actuador:** Es un tubo que conecta el actuador con el vástago de la válvula y transmiten movimiento (fuerza) desde el actuador hacia la válvula.
- ✚ **Asiento del Resorte:** Un plato que sostiene el resorte en su lugar y que provee de una superficie plana de contacto al ajustador del resorte.

- ✚ **Ajustador del Resorte:** Un acople, usualmente roscado en el vástago del actuador o en el yoke, para ajustar la compresión del resorte.
- ✚ **Yoke:** La estructura que rígidamente conecta el actuador con el cuerpo de la válvula.
- ✚ **Plato del Diafragma:** Un plato concéntrico con el diafragma para transmitir la fuerza al vástago del actuador.
- ✚ **Conector del vástago:** Un dispositivo que conecta el vástago del actuador con el vástago de la válvula.
- ✚ **Carcasa del diafragma:** Un compartimento, que consta de una sección superior e inferior, usado para alojar el diafragma y establecer uno o dos cámaras del presión.

Actuador Pistón

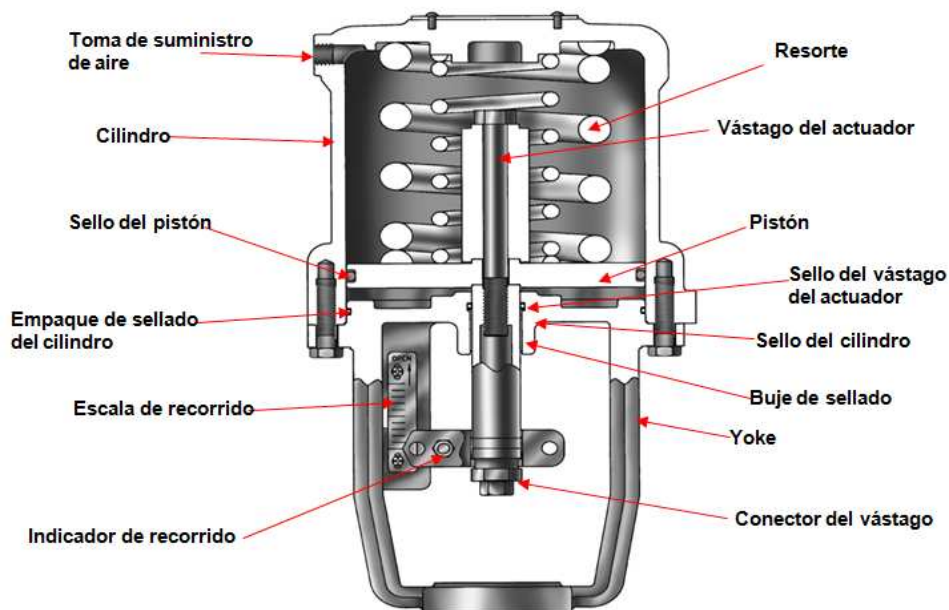


Figura 4. Pistón de una válvula de control [2]

- ✚ **Cilindro:** La cámara del actuador de pistón donde el pistón se mueve.
- ✚ **Empaque de sellado del cilindro:** El elemento de sellado en la unión entre el cilindro y el yoke.

- ✚ **Pistón:** Un elemento movable que responde a la presión y que transmite fuerza al vástago del pistón del cilindro.
- ✚ **Actuador de Pistón:** Estos pueden ser de dos clases. De acción doble donde la fuerza puede ser ejercidas en ambas direcciones o de acción simple con reposición con resorte donde solo actúa en un solo sentido y el resorte lo mueve en la dirección opuesta.

Cuerpo de la válvula de control

Las válvulas de control pueden presentar fugas en la posición de cierre. La fuga de fluido que se produce a través del conjunto asiento-tapón, esta normalizado en la norma ANSI FCI/70-2 1976 (Rev. 1982). Existen seis clases donde se clasifica el hermetismo de la válvula, siendo la Clase VI la de más alto hermetismo y la de Clase I la de menos [2].

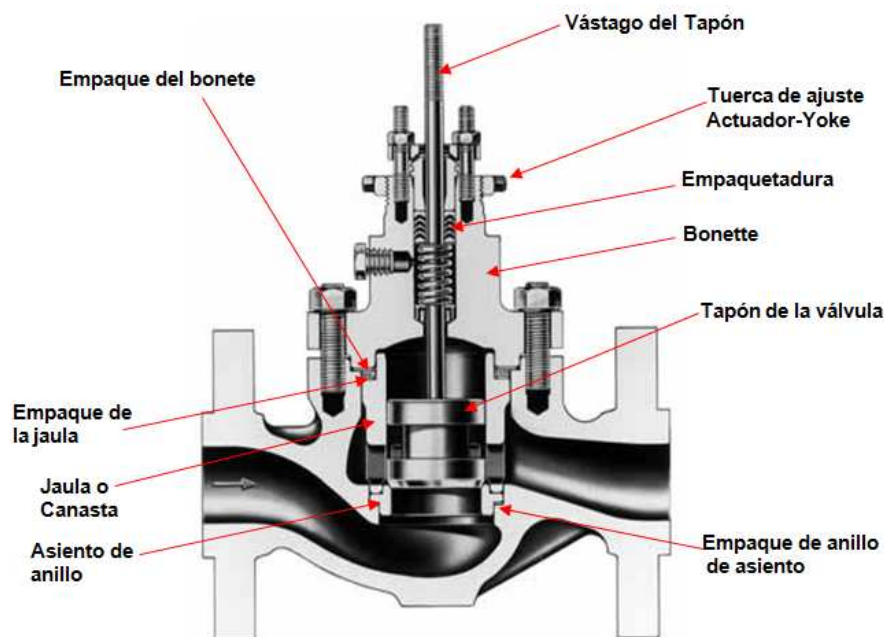


Figura 5. Cuerpo de una válvula de control [2]

- ✚ **Vástago del tapón:** Es el tubo que conecta el vástago del actuador con el tapón.
- ✚ **Tapón de la Válvula:** Un término que frecuentemente se usa como simplemente “tapón” haciendo referencia al objeto que cierra.

- ✚ **Trim:** Los componentes internos de una válvula que modulan el flujo del fluido controlado. En una válvula tipo globo, trim hará referencia al tapón, asiento anillado, jaula, vástago y el pin del vástago.
- ✚ **Asiento de anillado:** Una parte del conjunto del cuerpo de la válvula que provee de una superficie de asiento para el tapón y puede formar parte del orificio de control de flujo.
- ✚ **Bonete:** La porción de la válvula que contiene la caja de empaques (sellos) del vástago y puede guiar el vástago. Provee la principal abertura a la cavidad del cuerpo o puede venir integrada como parte del cuerpo. Por lo general estos elementos son atornillados, roscados, soldados o forman parte del cuerpo de la válvula.
- ✚ **Jaula o Canasta:** Es una de las partes del trim de la válvula que rodea al tapón y puede dar características al flujo y/o superficie de sellado. También, entrega estabilidad, guiado, balance y alineamiento y facilitan el armado de las otras partes del trim de la válvula. Las paredes de la jaula tienen aberturas que usualmente determinan las características de flujo de la válvula de control. Estas pueden ser de: apertura rápida, lineal o igual porcentaje.

c. Tipos de Válvulas de Control

Las válvulas de control pueden ser clasificadas según el diseño del cuerpo y el movimiento del tapón. Esta clasificación consta de dos grandes familias: Válvulas de vástago deslizante y con vástago rotativo.

Las válvulas de vástago deslizante son aquellas en que su *movimiento es lineal* y su vástago se mueve en la dirección de su propio eje.

Las válvulas de vástago rotativo son aquellas que su *movimiento es rotacional* y su vástago se mueve en círculos alrededor del centro de su propio eje [2].

Vástago deslizante

Dentro de estas válvulas podemos encontrar la siguiente clasificación:

- **Válvulas de Globo:** Son denominadas así por tener un tapón (u obturador) en forma de globo, se caracteriza porque el flujo de entrada o salida es

perpendicular al eje del tapón. Se pueden encontrar de simple asiento y doble asiento.

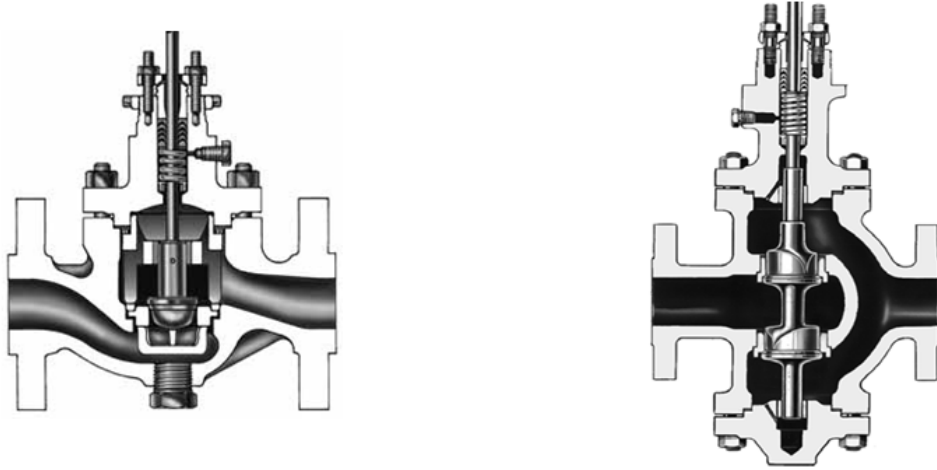


Figura 6. Válvula de globo [2]

- **Válvulas de Angulo:** Presentan un flujo de salida perpendicular al flujo de entrada con un recorrido menos curvilíneo que una válvula de globo, por lo que permite obtener un flujo de caudal regular sin excesivas turbulencias.

Es adecuada para sustituir una válvula globo cuando el fluido circula con sólidos en suspensión o a excesiva velocidad provocada por alta presión diferencial de trabajo.

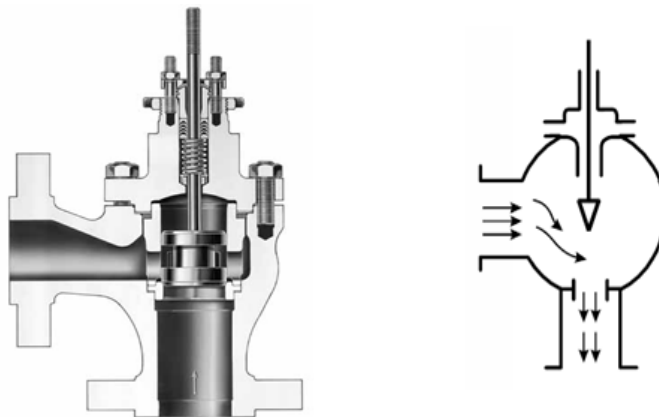


Figura 7. Válvula de ángulo [2]

- **Válvula de Tres Vías (Mezcladora o Diversora):** Este tipo de válvulas se emplean generalmente para mezclar fluidos (válvulas mezcladoras) o para derivar de un flujo de entrada para dos salidas (válvula diversoras).

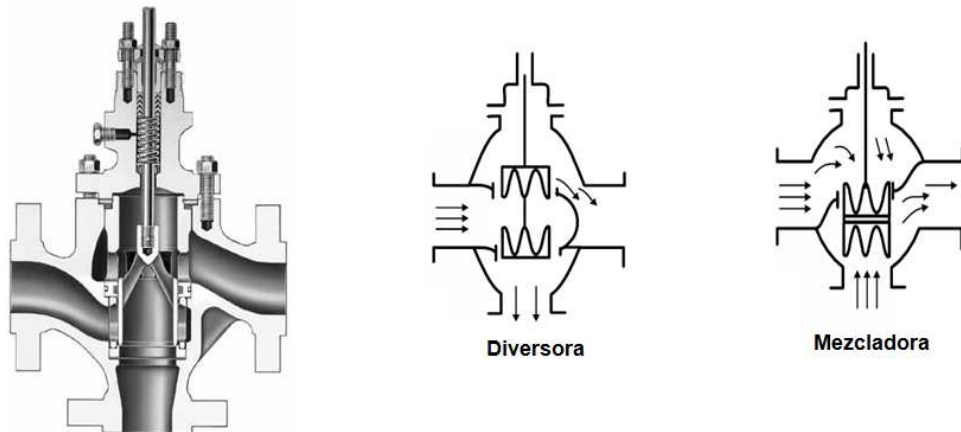


Figura 8. Válvula de tres vías [2]

- **Válvula de Canasta:** Este tipo de válvulas se encuentran de dos tipos: canasta fija y móvil. Estos orificios son los que le dan las características de flujo de la válvula (relación carrera-caudal).

Estas válvulas pueden ser balanceadas o desbalanceadas.

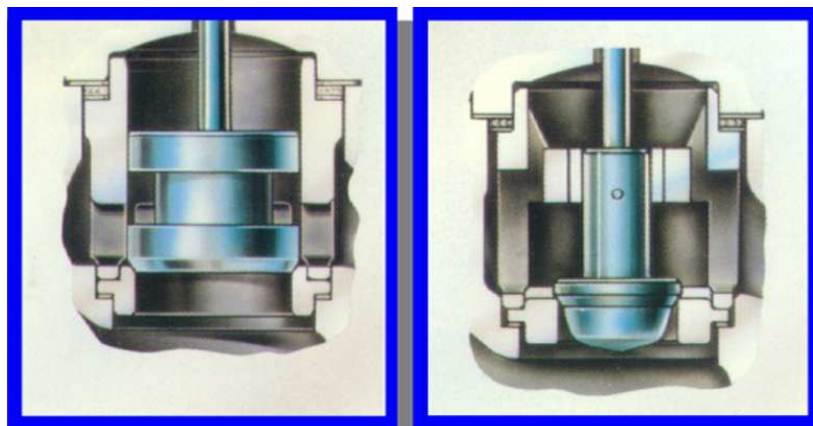


Figura 9. Válvula de Trim desbalanceado [2]

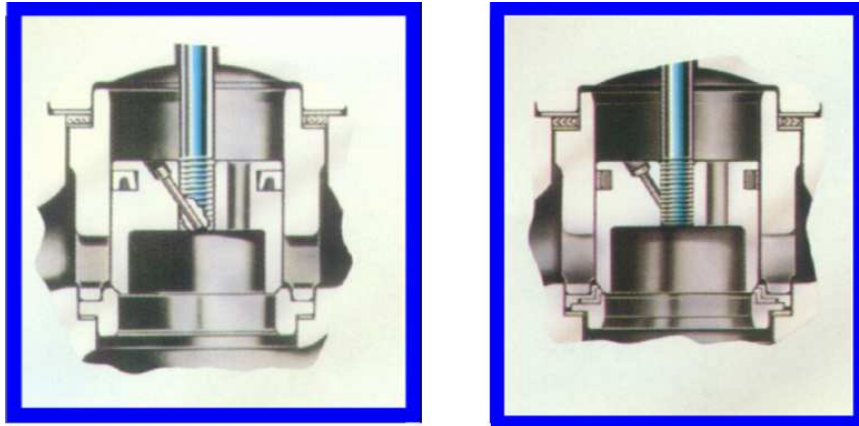


Figura 10. Válvulas de Trim balanceado [2]

- **Válvulas en Y:** Este tipo de válvulas tienen el asiento y el tapón inclinados 45° con respecto al flujo del fluido. Son adecuadas para usar como válvulas on-off por su baja pérdida de carga y como válvula de control presenta una gran capacidad de caudal.

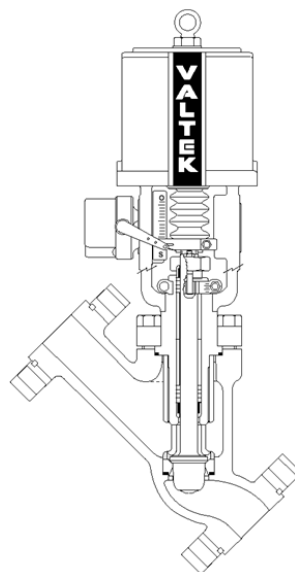


Figura 11. Válvula en Y [2]

- **Válvula de Compuerta:** Este tipo de válvulas se conoce como válvula de tajadera. Ya que efectúa el cierre con un disco vertical plano, o de forma especial, y que se mueve verticalmente al fluido. Por su construcción en

muy buena para control del tipo on-off que en posiciones intermedias tienden a bloquearse.



Figura 12. Válvula de compuerta [2]

- **Válvula de Cuerpo Partido:** Es una modificación de la válvula tipo globo de asiento simple teniendo el cuerpo partido en dos partes entre las cuales está presionado el asiento. Este arreglo permite facilidad en el mantenimiento para sustituir el asiento. Se emplean para fluidos viscosos y en la industria alimenticia.

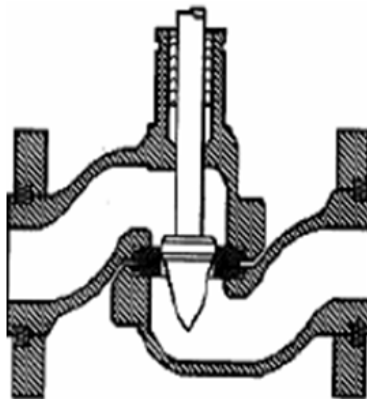


Figura 13. Válvula de Cuerpo partido [2]

- **Válvula de Membrana (Saunders):** El tapón es una membrana flexible que a través de un vástago unido a un servomotor, es forzada contra un resalte del cuerpo, que actúa de asiento, cerrando así el paso del fluido. La válvula se caracteriza porque el cuerpo puede revestirse fácilmente de goma o de plástico para trabajar con fluidos agresivos. Tiene la desventaja que el servomotor de accionamiento debe ser muy potente.

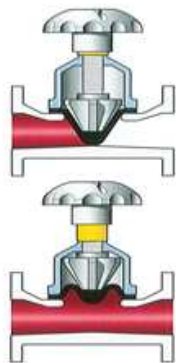


Figura 14. Válvula de membrana [2]

- **Válvula de Compresión:** Funciona mediante el pinzamiento de dos o más elementos flexibles, por ejemplo un tubo de goma. Igual que las de Membrana, se caracteriza porque proporciona un óptimo control en posición de cierre parcial y se aplica fundamentalmente en el manejo de fluidos negros corrosivos, viscosos o conteniendo partículas sólidas en suspensión.

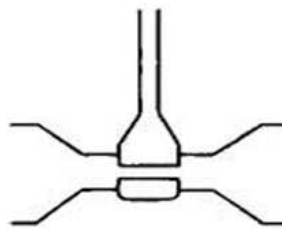


Figura 15. Válvula de compresión [2]

Vástago rotativo

Dentro de estas válvulas podemos encontrar la siguiente clasificación:

- **Válvula de movimiento excéntrico rotativo (Camflex):** Es una forma derivada de la válvula de bola segmentada. Es una válvula que tiene una gran capacidad de caudal en comparación con la bola y mariposa. Posee un buen sello estanco.

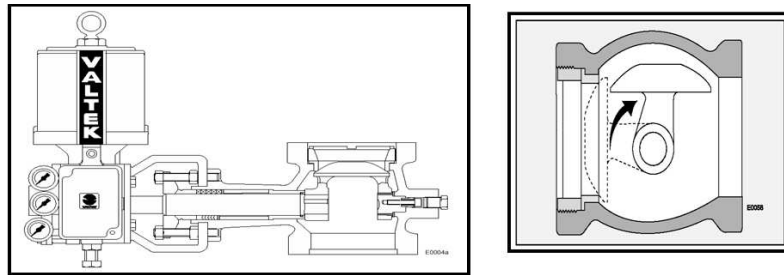


Figura 16. Válvula Camflex [2]

- **Válvula de obturador cilíndrico excéntrico:** Estas válvulas poseen un tapón con forma de cilindro que asienta contra un cuerpo en forma de cilindro. El cierre hermético se logra colocándole un revestimiento de teflón o goma del lado de la cara del cuerpo que hace contacto con el tapón.

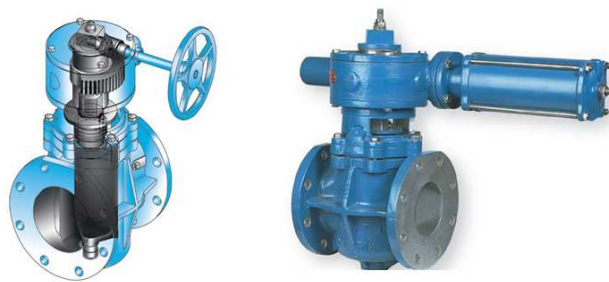


Figura 17. Válvula con obturador cilíndrico excéntrico [2]

- **Válvula de mariposa:** El cuerpo está formado por un anillo cilíndrico dentro del cual gira transversalmente un disco circular. La válvula puede cerrar herméticamente mediante un anillo de goma incrustado en el cuerpo. Se emplean para el control de grandes caudales de fluidos a baja presión.



Figura 18. Válvula de mariposa [2]

- **Válvula de bola:** El cuerpo tiene una cavidad interna esférica que contiene un tapón en forma de esfera o de bola. La bola tiene un corte adecuado (usualmente en V por lo que se le denomina: *Bola Segmentada*) que fija la curva característica del flujo de la válvula.

El cierre hermético se logra colocándole un aro de teflón, o de un material e acuerdo a la aplicación, incorporado al lado del cuerpo que hace contacto con la cara de la bola. Maneja grandes caudales.



Figura 19. Válvula de Bola [2]

d. Tipos de Actuadores

- **Manual**

Son usados donde un control automático no es requerido pero donde es necesario una manipulación fácil y un buen control manual. Este tipo de actuadores están disponibles en varios tamaños tanto para los de tipo deslizante como rotativos y son mucho más económicos que los demás [2].

- **Neumáticos de Diafragma:**

Utilizan el suministro de aire de un controlador, posicionador u otra fuente. Son simples y económicos. Funcionan tanto para las válvulas de tipo deslizantes como rotativas [2].

Acción Directa quieren decir que al incrementar la presión de aire empujan hacia abajo el diafragma y extiende el vástago del actuador. También, son llamados *Aire para cerrar o Falla Abierta*.

Acción Inversa quieren decir que al incrementar la presión de aire empujan hacia arriba el diafragma y contraen el vástago del actuador. También, son llamados *Aire para abrir o Falla Cerrada*.

- **Neumáticos de Pistón:**

Tiene un alto torque y rápida respuesta. Pueden ser de doble efecto para entregar la máxima fuerza en ambos sentidos o de simple efecto con reposición con resorte para proveer la condición de *falla abierta o falla cerrada*. Varios accesorios pueden ser colocados para posicionar un pistón de doble efecto en caso de pérdida de aire. Se pueden colocar válvulas de disparo y sistemas de enclavamientos. Son neumáticamente operados, con frecuencia eliminando la necesidad de reguladores de presión de suministro [2].

- **Hidráulicos:**

Son ideales en zonas de difícil acceso donde el suministro de aire no está disponible pero es requerido un control preciso de la posición del obturador. Las unidades son fácilmente reversibles con unos mínimos cambios y pueden servir para condiciones ambientes hostiles o a prueba de explosión. Se utilizan en aplicaciones donde es requerido un alto torque debido a las altas presiones del proceso [2].

- **Electro Mecánicos:**

Este tipo de actuadores usan la potencia de un motor eléctrico y un juego de mecanismos (engranajes reductores) para mover la válvula. Esta aplicación ha sido usada para el control continuo con pocos grados de variación de éxito. Es un área de mucho potencial de crecimiento en sus diseños. Estos actuadores son mucho más costosos que los neumáticos [2].

e. Tipos de Acciones en una Válvula de Control

Los servomotores de las válvulas de control pueden ser de dos tipos: Acción Directa y Acción Inversa. Para hacer estas consideraciones siempre se debe tener en cuenta la posición de la válvula sin aire sobre su diafragma.

- ❖ **Acción Directa:** Cuando al aplicarle aire al servomotor, el vástago se mueve hacia *abajo* o *sale del servomotor*.
- ❖ **Acción Inversa:** Cuando al aplicarle aire al servomotor, el vástago se mueve hacia *arriba* o *entra al servomotor*.
- ❖ **Aire para Cerrar:** Cuando al quitarle el aire al diafragma, la válvula se abre.
- ❖ **Aire para Abrir:** Cuando al quitarle el aire al diafragma, la válvula se cierra.
- ❖ **Acción Directa + Aire para Cerrar:** Cuando al aplicarle aire al servomotor, el vástago se mueve hacia abajo y cierra la válvula.
- ❖ **Acción Inversa + Aire para Abrir:** Cuando al aplicarle aire al servomotor, el vástago se mueve hacia arriba y abre la válvula.
- ❖ **Acción Directa + Aire para Abrir:** Cuando al aplicarle aire al servomotor, el vástago se mueve hacia abajo y abre la válvula.
- ❖ **Acción Inversa + Aire para Cerrar:** Cuando al aplicarle aire al servomotor, el vástago se mueve hacia arriba y cierra la válvula.

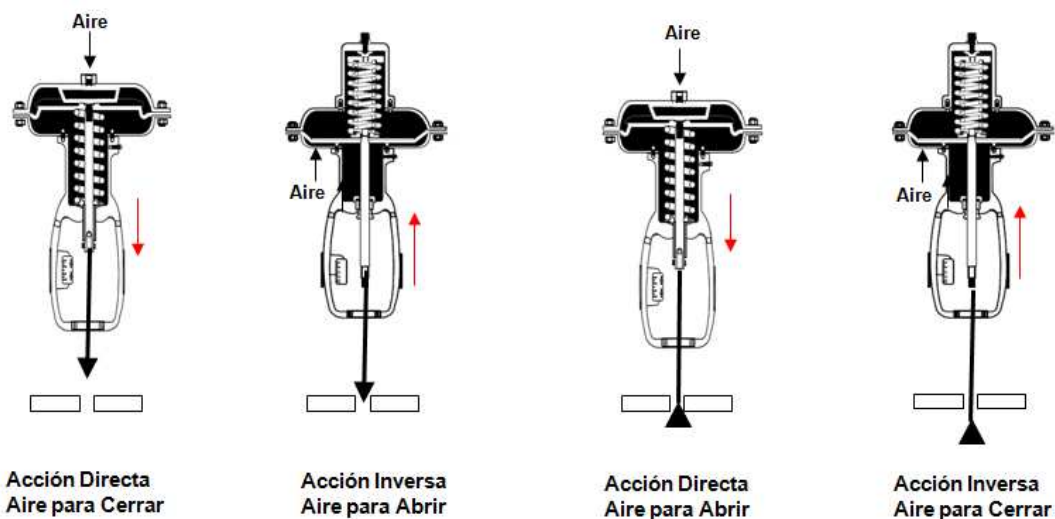


Figura 20. Tipos de acciones en una válvula de control [2]

f. Características de Caudal Inherente

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

Las curvas características más significativas son las de *apertura rápida*, *lineal* e *isoporcentual* o *igual porcentaje*. Otras curvas son las parabólicas y las

correspondientes a las válvulas de tajadera, mariposa, membrana y con obturador excéntrico rotativo.

Estas curvas características se pueden lograr de dos maneras:

- ✓ Las curvas características se obtienen del diseño del tapón para que al variar la carrera, varíe el área entre el contorno del obturador y el asiento, esto configura la característica de la válvula.
- ✓ En las válvulas de tipo globo que utilizan canasta, esta canasta es diseñada para que al momento de levantarse el tapón se produzca el efecto deseado.

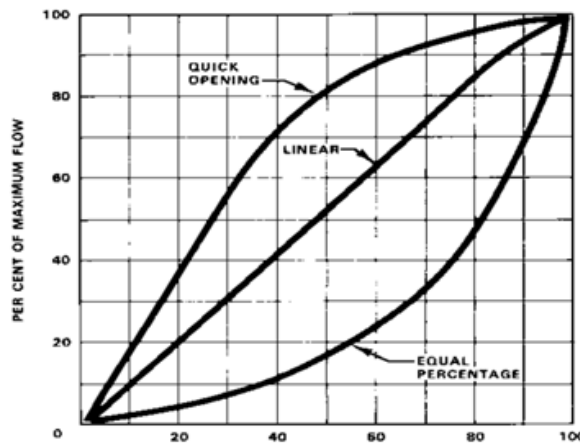


Figura 21. Curvas características de una válvula de control [2]

- ✓ **Lineal:** Como su nombre lo indica una válvula de este tipo produce una rata de flujo directamente proporcional a la cantidad de recorrido de la válvula, a lo largo de todo el rango de recorrido de la válvula. Por ejemplo, un 50% de recorrido de la válvula corresponderá a un 50% del flujo máximo. *Las válvulas con estas características son específicas para controles de nivel y flujo.*
- ✓ **Igual Porcentaje o Isoporcentual:** El cambio en la rata de flujo observada al correspondiente recorrido será relativamente pequeño cuando el tapón esta cerca al asiento y será relativamente grande cuando el tapón este cercanamente abierto. Por lo tanto, este tipo de válvulas suministran un preciso estrangulamiento en su parte baja del recorrido y rápidos incrementos de flujo en la medida que la válvula se abre. *Este tipo de válvulas son utilizadas en lazos de control de presión.*

- ✓ **Apertura Rápida:** Este tipo de característica de flujo suministra un gran cambio en la rata de flujo con poco recorrido de la válvula. Esta curva es lineal hasta el 40% del recorrido de la válvula, luego se comienza a achatar notablemente mostrando que se darán pequeños cambios en la rata de flujo cuando el recorrido de la válvula tiende a 100%. *Este tipo de válvulas son seleccionadas para las mismas aplicaciones como las lineales*, porque la característica de *apertura rápida* es lineal hasta el 70% de su máxima rata de flujo. La linealidad decrece rápidamente cuando el área de flujo generada por el recorrido del tapón iguala al área del puerto de salida. Esto ocurre cuando el recorrido del tapón es igual a $\frac{1}{4}$ del diámetro del puerto de salida.

Las válvulas de canasta fija tienen los orificios dispuestos en una canasta, en cuyo interior se desliza el tapón y las válvulas de canasta móvil tienen los orificios directamente en el tapón.



Figura 22. Tipos de canastas de una válvula

g. Accesorios de una válvula de control

Una válvula de control posee otros accesorios que utiliza para su funcionamiento y correcto desempeño. Entre la lista de accesorios podemos nombrar:

- ✓ Posicionador
- ✓ Válvulas solenoides
- ✓ Convertidores de corriente a presión (I/P)
- ✓ Interruptores de final de carrera
- ✓ Transmisores de posiciones (LVDT o LDT)

- ✓ Regulador presión de aire
- ✓ Booster
- ✓ Volante

h. Tipos de circulación a través de una válvula

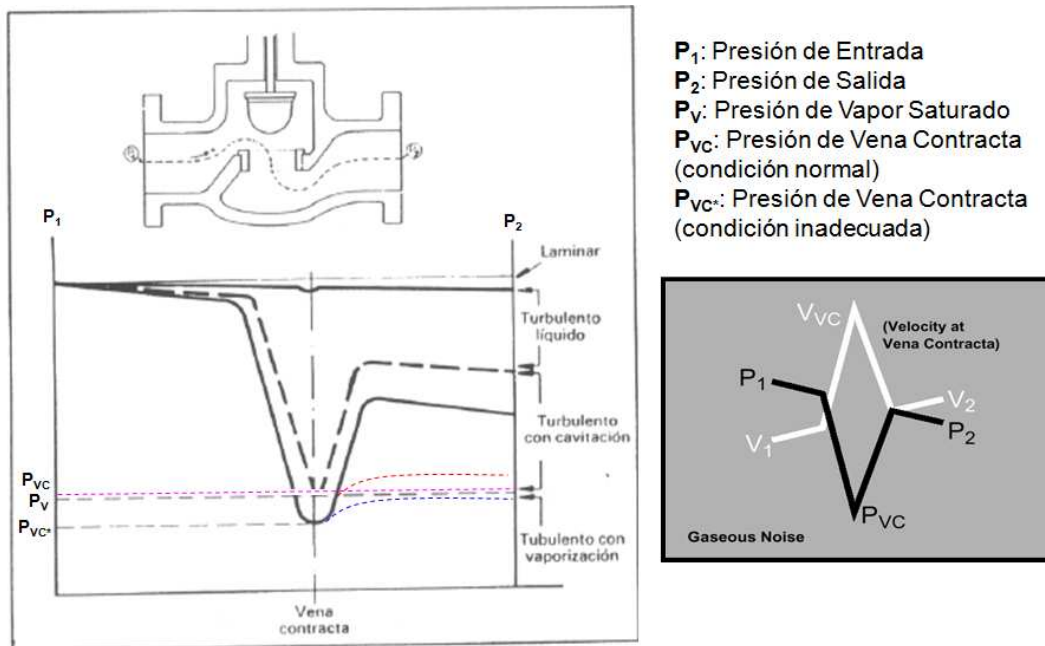


Figura 23. Tipos de circulación a través de una válvula [2]

En la anterior gráfica se muestran dos curvas. La curva de la línea punteada pertenece al comportamiento (*normal*) interno de la presión del fluido cuando pasa por dentro de la restricción que ofrece los interiores de la válvula y donde se aprecia que la presión de vena contracta (P_{vc}) está por encima de la presión de vaporización (P_v) del fluido. La curva de la línea continua muestra el comportamiento (*inadecuado*) de la presión del fluido pero mostrando que la presión de vena contracta (P_{vc}^*) está por debajo de la presión de vaporización (P_v) del fluido.

❖ Vaporización

En algunas aplicaciones de las válvulas de control el fluido existe antes de la válvula de control en estado líquido y aguas abajo en estado de vapor. Es evidente que en estas circunstancias se ha presentado una vaporización parcial o completa en alguna parte de la válvula por la estrangulación que esta crea, *al existir en la*

salida (P_2) una presión inferior o igual a la presión de vapor (P_v) del líquido a la temperatura de ebullición.

El fenómeno de vaporización da lugar al paso de la mezcla líquido-vapor a gran velocidad a través de la válvula, con lo que el choque de *gotas de líquido* sobre el material de las paredes de la válvula y de la tubería *erosiona la superficie, dando un aspecto mate y liso a la misma, y provocando vibraciones de mucha menor importancia que el fenómeno de la cavitación.*

En la Figura 22 se puede observar que todas las presiones de salida (P_2) que se encuentran en la zona entre la presión de vena contracta (P_{vc}) y la presión de vaporización (P_v), originan un flujo *turbulento de vaporización*. O dicho de otra manera, es cuando la presión de salida (P_2) es inferior a la presión de vaporización (P_v) [2].

❖ Cavitación

En la estrangulación de la vena del líquido, llamada zona de vena contraída, el fluido alcanza su máxima velocidad y su mínima presión. Si en esta zona, la velocidad es suficiente, la presión de vapor del líquido llega a ser inferior a la presión de vapor saturado, *formando burbujas que colapsan (implosión) si a la salida de la válvula la presión (P_2) es superior a la presión de saturación del líquido (P_v).* Este fenómeno de formación continua de burbujas de vapor y su desaparición a la salida de la válvula, recibe el nombre de *cavitación*.

La cavitación se inicia a presiones estáticas algo superiores a la presión de vapor del líquido. Las cavidades (burbujas) que nacen dentro del líquido y que colapsan (implosionan) súbitamente, limitan la capacidad de la válvula a partir de un determinado caudal crítico y *pueden generar ruidos y vibraciones excesivos con el peligro de causar daños mecánicos graves* provocados por el impacto de las burbujas de vapor en implosión con alguna parte sólida del cuerpo de la válvula o la tubería; la energía liberada por las burbujas es lo suficientemente grande como para destruir el material o la superficie de protección en poco tiempo. La cavitación debe evitarse y desaparece cuando la presión en la vena contraída es superior a la presión de vapor saturado.

En la Figura 22 se puede observar que si la presión en la zona interna de la válvula donde el líquido alcanza su máxima velocidad (P_{vc}) es menor que su presión de vapor (P_v) y, al mismo tiempo, la presión de salida (P_2), debido a la recuperación de presión, es mayor que la presión de vapor del líquido (P_v), se forman burbujas de vapor en el interior de la válvula que colapsan a la salida apareciendo el fenómeno de *flujo turbulento con cavitación* [2].

1.1.5 Vibración de Tuberías incluyendo Válvulas de Control

Existen muchas causas de vibración en sistemas de tuberías que envuelven a las válvulas de control. Muchas de estas causas son discutidas, tales como la cavitación, el flujo intermitente, ondas constantes, vortex shedding y la alta energía cinética del fluido. La mayoría de estos problemas de vibración se resuelven al dirigir la energía cinética del fluido en la salida de ajuste fino de aire de la válvula en el sentido opuesto de la velocidad del fluido en la salida del cuerpo de la válvula. Se discute un parámetro de diseño para el ajuste de la válvula y los límites proporcionados que aseguran el mínimo riesgo en un sistema de tuberías que experimenta problemas perjudiciales de vibración. Este parámetro de diseño es el ajuste del nivel de energía cinética, el cual es aplicable para ambos tipos de fluido a través de la válvula, fluidos comprensibles e incomprensibles [1].

Se presentan dos casos de instalación para los cuales los datos de vibración cuantificados han sido tomados antes y después del ajuste. Estos datos muestran una reducción del 90 % en las variables de vibración medidas. Se presentan los espectros de la frecuencia que demuestran las reducciones y el cambio en los niveles máximos gracias al ajuste. Los resultados ilustran que la causa raíz de la vibración es la alta energía cinética impartida al fluido al pasar a través del ajuste de la válvula [1].

1.1.6. Especificaciones para válvulas de control

Las especificaciones para válvulas de control son lo que indica lo mínimo que debe de contener una válvula para satisfacer todas las condiciones de operación, el tipo de aplicación y los requerimientos del usuario. Todas las especificaciones se relacionan con las partes de la válvula de control y el flujo de fluidos, considerando la experiencia acumulada del usuario y de las instituciones que normalizan todo lo relacionado con las válvulas de control, como es la ISA que rige para toda América.

Las especificaciones mencionan cómo deben de diseñarse y calcularse las diferentes partes de la válvula de control en función de los datos y detalles de operación y diseño y de los requerimientos del usuario.

Cuando un usuario solicita una válvula de control para una construcción nueva o en sustitución de una válvula existente, debe de dar junto con los datos de operación las especificaciones, pero si no las diera el fabricante *debe* de respetar lo mínimo especificado por la ISA [3].

Por lo tanto, en general las especificaciones para una válvula de control deben de ser las siguientes:

a. Actuador

- Tipos de Actuador

El fabricante será responsable del tamaño seleccionado del actuador, tomando en consideración las condiciones de operación y estas especificaciones. Los actuadores pueden ser tipo neumático de diafragma o de pistón de doble acción. ***Para aplicaciones con válvulas mayores de 2 pulgadas de diámetro y caídas de presión de > 580 psi no deben de usarse actuadores de diafragma.*** La presión de aire será de 135 psi o menores.

Se pueden usar otro tipo de actuadores como excepción, por petición escrita del vendedor al comprador.

- Materiales

El material de un actuador tipo pistón debe ser el requerido para la aplicación y las condiciones ambientales.

El material de la tubería, válvulas y accesorios para el aire entre el actuador y la válvula de control debe de ser de acero inoxidable AISI 316. El diámetro mínimo debe de ser de 1/4 de pulgada NPT.

- Funcionamiento.

La inexactitud de la carrera de la válvula debido a cualquier limitación, debe ser menor a 2%.

El actuador cuando module debe de presentar estabilidad, solamente se permite una condición de inestabilidad de 2% en las pruebas en la fábrica y en el campo. El vendedor junto con la propuesta debe de presentar un reporte de prueba, que muestre la curva de funcionamiento en una experiencia previa en condiciones similares con la misma especificación.

La posición a la falla debe de llevarse a cabo sin ayuda de la presión del proceso. La posición a la falla de aire debe de probarse durante la inspección y antes de

que la válvula opere estando el sistema depresionado. Cuando el resorte de retorno en un actuador tipo pistón no alcance la posición a la falla, el actuador debe ser equipado con un sistema seguro de falla.

Los aumentadores de señal (booster) deben usarse cuando se necesiten para dar la velocidad de acción de actuación ya sea rápida o lenta, de acuerdo con la señal controlada.

El fabricante debe seleccionar una válvula con su actuador que cumpla con los requerimientos de velocidad de cierre o apertura especificados en las hojas de datos del proceso.

En todo tipo de aplicación se necesita verificar la velocidad de acción de la válvula. Los tiempos de apertura y cierre de la válvula deben de verificarse con el 100 % de rango de la señal de control sin ayuda de la presión del proceso. Estos tiempos se deben de probar durante la inspección del vendedor. Se pueden usar aumentadores de señal para alcanzar la velocidad requerida, pero los movimientos de la válvula al 20, 50 y 80 % de señal deben de permanecer estables en cada cambio.

El tiempo requerido para operación rápida de la válvula bajo condiciones de falla deben ser especificados separadamente. El fabricante puede usar válvulas de apertura rápida, probando que esto no interfiere con el control normal de operación del sistema del actuador [3].

b. Cuerpo

Cada válvula de control debe diseñarse y seleccionarse para proveer una operación y control confiable a las condiciones de operación y diseño especificadas. El dimensionamiento de una válvula de control generalmente debe basarse en ISA S75.01 que son las ecuaciones de flujo para dimensionar válvulas de control.

El fabricante debe de seleccionar una válvula de control junto con su actuador y evaluar cuidadosamente el requerimiento mínimo de funcionamiento de sus internos.

Los cálculos de capacidad de la válvula para todas las condiciones de operación deben de darse. Las bases de cálculo y resultados deben ser mostradas por medio de cálculos en forma manual o por computadora.

La capacidad seleccionada de los internos de la válvula de control Cv debe de cumplir con lo siguiente:

Para una característica de igual porcentaje los internos deben operar al 95% de carrera a máximo flujo.

Para característica lineal y de apertura rápida los internos deben de operar al 90 % a máximo flujo.

Cuando se menciona 95 o 90 % se refiere a la abertura que debe de mostrar la válvula de control con el flujo máximo. A la capacidad requerida Cv que cumpla con el criterio mencionado se le llama "Cv requerida". A la capacidad Cv actual de la válvula se le llama "Cv seleccionada". Las aplicaciones específicas pueden requerir una capacidad Cv sobre dimensionada, lo cual debe ser especificado por el usuario.

Debe de tomarse en cuenta el factor FP cuando la válvula de control se va a colocar entre reductores u otros accesorios, por lo que la Cv calculada debe ser corregida debido a la reducción de capacidad de la válvula, de acuerdo a lo que se menciona en ISA S75.01.

Los internos de una válvula de control pueden ser muy sencillos pero reducen su área de paso mientras más ocupan espacio dentro del cuerpo. El cuerpo de una válvula de control con internos reducidos se debe considerar las siguientes condiciones:

- **Caídas de presión > 750 psi**
- **Velocidades de salida de gas o vapor que excedan 0.3 Mach**
- **Nivel de ruido alto > 85 decibeles audibles**
- **Estrangulación de flujo**
- **Vaporización instantánea sostenida > 5 % del líquido que se trate**
- **Fluidos erosivos**
- **Si se proyecta aumento de capacidad en el futuro.**

Para cualquier caso el tamaño del cuerpo de la válvula no debe de exceder el tamaño de la tubería que la contendrá.

El tamaño de cada válvula de control seleccionada debe de cumplir con cualquier variación de flujo a todas las condiciones de operación especificadas. La condición de flujo mínimo especificada debe ser totalmente controlable.

El cuerpo de la válvula de control debe de calculado para que tenga el grueso suficiente para las condiciones de presión y temperatura especificados. Para válvulas con bridas, la clase de la válvula debe ser al mínimo igual a la de las bridas que usan. La clase de las bridas de una válvula de control menor a 16 pulgadas debe ser como mínimo ASME 300. La clase de las bridas de una válvula mayor de 16 pulgadas debe ser mínimo ASME 150.

Los materiales del cuerpo deben de alcanzar o exceder los requerimientos de la aplicación. El material del cuerpo y sus internos deben de cumplir los requerimientos de temperatura. Las válvulas que manejen hidrocarburos deben de ser de materiales resistentes a la presencia de sulfuros de acuerdo con NACE MR0175 [3].

c. Internos

Los internos de una válvula de control en inglés lo llaman *trim*.

Los internos tienen una parte fija y una parte móvil que es la permite que la válvula se mantenga abierta o cerrada. La parte móvil es el ensamble del tapón con la parte del vástago que estará en contacto con el medio. La parte fija de los internos es muy sencilla en aplicaciones convencionales, pero en aplicaciones para servicio severo es una jaula con diferentes diseños, por ejemplo jaulas concéntricas, placas perforadas, pila de discos, etc., y con las piezas necesarias para acomodar la jaula por dentro.

Los internos deben de ser del tipo de cambio rápido, por lo que ningún componente debe de ir soldado o roscado en el cuerpo o bonete.

Como en algunas válvulas de control se nota que el tapón a veces se pega y queda fijo en una posición, por lo tanto se debe de especificar que los internos deben de tener un anillo igualador de presión alrededor del tapón para minimizar la vibración y que no se flexione el tapón por flujo concentrado en una sola porción del tapón. El fabricante debe de cumplir con este diseño para cumplir con los requerimientos de la especificación.

Para las aplicaciones de servicio severo, cuando un fabricante proponga el diseño de ciertos internos, debe de haber probado durante cinco años este diseño lo cual debe de certificarlo.

Los fluidos líquidos o gaseosos al pasar por una válvula de control con gran caída de presión pueden provocar ciertos fenómenos, los cuales normalmente son

destructivos. Los líquidos pueden provocar *cavitación* y “*flashing*”, y los gases pueden provocar *ruido y su fenómeno asociado que es la vibración*. Todos estos fenómenos son función de la velocidad alta del fluido, por lo que todos pueden evitarse controlando la velocidad del fluido al pasar y salir de los internos. Lo único que no puede evitarse es el *flashing* porque las condiciones del proceso no lo permiten, pero regulando la velocidad del líquido a través de la válvula se modera el efecto destructivo de este fenómeno.

Por lo tanto cuando se detecte que la presión de entrada es igual al doble o más de la presión de salida de la válvula, se sabe que se trata de una aplicación de servicio severo o crítico o riguroso o riesgoso pues la energía potencial de la diferencial de presiones puede convertirse en energía cinética dentro y a la salida de los internos de la válvula que es donde la velocidad sería la mayor, entonces se deberá especificar cuidadosamente la requisición de una válvula, pues de no hacerlo el ingeniero se arriesga a seleccionar un equipo deficiente que podría causar problemas operativos de control y físicos, costos enormes operativos y de mantenimiento y en algunas ocasiones riesgos, sobre todo cuando se manejan combustibles.

Las especificaciones que se mencionan en los libros especializados como el de Crane y de la ISA son el resultado de las experiencias recopiladas en los últimos 50 años y muy someramente se mencionan [3].

d. Especificaciones relacionadas con los internos de las válvulas de control que manejen líquidos.

- **Velocidad**

La velocidad de un líquido a la salida de los internos de la válvula de control debe ser menor a 23 metros por segundo. Nótese que no se dice a la salida de la válvula, pues ahí sería ya la velocidad correspondiente a una tubería.

Los internos que permiten hacer un diseño a la medida de la aplicación son los que se llaman tipo multipasos – multietapas, que al entrar el líquido a la válvula se divide en varios pasajes o pasos de flujo y cada pasaje contiene una serie de etapas o accesorios como los de la tubería (codos, expansiones) que vienen siendo cambios de dirección en 90 grados que reducen la velocidad del líquido al hacerlo pasar por el número suficientes de etapas que resultan de aplicar la Ecuación de Darcy. Las etapas existen físicamente dentro de los internos de la válvula y se pueden ver en un dibujo.

La velocidad del líquido se debe alcanzar SIN artificios en la tubería anterior y posterior de la válvula de control.

- **Dirección de flujo**

La dirección del líquido en la válvula de control debe ser por arriba del tapón o sea en el sentido en que la válvula cierra. Esto es porque los líquidos suelen llevar sólidos ya sea por óxidos u otro material, los cuales serían atrapados en la pila de discos o en la jaula de la válvula y solamente pasarían las partículas sólidas que dejaran pasar los internos y no incidirían directamente sobre los asientos de la válvula.

- **Anillo igualador de presión**

Los internos deben de contener un anillo igualador de presión que distribuya el flujo de líquido alrededor del tapón para evitar vibración por concentración de flujo en una sola sección y flexionamiento del tapón que puede provocar que el tapón se pegue en alguna posición.

e. Especificaciones relacionadas con los internos de las válvulas de control que manejen gas o vapor.

- **Velocidad**

La velocidad de un gas o vapor a la salida de los internos de la válvula de control debe ser equivalente a una cabeza velocidad V_h menor a 70 psi. La cabeza velocidad V_h es igual a la densidad del gas multiplicada por la velocidad al cuadrado, todo entre 2 g que es la constante universal de cálculo.

Se prefiere la V_h porque el gas que es un fluido compresible varía su densidad por el peso molecular, la presión y la temperatura.

Desde luego que si se habla de velocidad se debe siempre recordar que no se deben manejar velocidades cercanas al Mach correspondiente del gas o vapor, pues se tendrían vibraciones en la válvula de control que pudieran fracturar el material de alguna parte del sistema.

En aplicaciones de operación poco frecuente se puede aceptar una $V_h < 150$ psi. Los internos que permiten un diseño a la medida de la válvula de control cuando se tienen grandes caídas de presión, cuando se tiene que regular la velocidad del

gas o vapor y el nivel de sonido, son aquellos que son tipo multipasos—multietapas, pues estos internos tendrán las etapas requeridas por donde pasará el gas para bajar verdaderamente la velocidad hasta alcanzar el nivel de sonido especificado.

- **Dirección de flujo**

La dirección del gas o vapor en la válvula de control puede ser por abajo o por arriba del tapón si se trata de un gas o vapor limpio, pero si se sospecha que puede haber contaminación con sólidos, es imperativo que la dirección del gas sea por arriba del tapón, para proteger los asientos de la válvula por los efectos de los sólidos que pudieran causar erosión y abrasión.

- **Nivel de sonido**

El nivel de sonido de un gas o vapor a la salida de los internos de una válvula de control debe ser menor a 85 decibeles audibles a un metro de distancia, sin aislamiento de ningún tipo, pues el ruido se genera por el paso del gas a través de la válvula y si se modera el ruido con aislamiento, el efecto físico del ruido a la válvula no se elimina. El ruido tiene efecto sobre las aleaciones y está asociado con la vibración.

El nivel de sonido < 85 decibeles audibles a un metro de distancia se debe alcanzar *sin* artificios en la tubería anterior y posterior a la válvula, como orificios, deflectores, etc.

Para aplicaciones no frecuentes y recirculación se acepta un nivel de sonido < 90 decibeles A.

- **Anillo igualador de presión**

Los internos de la válvula deben de contener un anillo igualador de presión para distribuir el flujo alrededor del tapón para evitar vibración inducida por flujo concentrado en una sección y que se flexione el tapón.

f. Hermeticidad de las válvulas de control

Considerando que en las instalaciones automatizadas y con válvulas de control hay grandes pérdidas por fugas internas en los asientos de las válvulas cuando están cerradas, y además situaciones anómalas de operación cuando una válvula

al estar cerrada deja pasar constantemente el fluido que maneja provocando que se pierda el sello de una fase líquida hacia una gaseosa por ejemplo, es muy conveniente saber cómo especificar la hermeticidad de una válvula de control al estar cerrada.

Si usted observa un cabezal que contenga una válvula de control con sus válvulas de bloqueo y su válvula de derivación (bypass), sabe que para darle mantenimiento a la válvula de control debe de cerrar las válvulas de bloqueo antes y después de ella y abrir lo requerido a la de bypass, dichas válvulas de bloqueo no permiten fugas al estar cerradas. La norma que rige la hermeticidad de las válvulas de control es FCI 70-2 y se tienen clase IV, V, VI, donde una clase IV tiene menos hermeticidad que la clase V, y la clase VI tiene una hermeticidad superior, pero la VI utiliza asientos no metálicos que a temperaturas elevadas y con fluidos que caviten o vaporicen no deben de utilizarse, entonces para una aplicación de servicio severo que requiera hermeticidad muy buena se especifica clase VI cuando se pueda, y clase V donde los asientos del tapón y de la válvula son metálicos. Pero si se requiere una mejor hermeticidad, cuando el usuario especifica “fuga cero”, entonces en comparación con las válvulas de bloqueo se especifica hermeticidad tipo válvula de bloqueo cuya norma es MSS – SP61.

Hay válvulas de control que pueden diseñarse con hermeticidad MSS-SP61. ¿Por qué las válvulas de diferente clase son más o menos herméticas? Esto es porque cada válvula se diseña con un *actuador* más o menos potente (más o menos grande) que mantiene mejor cerrada la válvula, esto es que la fuerza disponible por el actuador aprieta el asiento del tapón contra el asiento del cuerpo de la válvula.

Esto puede ser suficiente pero cuando el tamaño del actuador ya es muy grande o no da la fuerza requerida, entonces los internos de ciertas válvulas de control cuentan con avances que aumentan la fuerza de cierre del tapón utilizando la presión disponible del fluido antes de la válvula.

Analizando por qué la hermeticidad de una válvula de control es tan importante, se comenta que si una válvula con alta caída de presión debe de permanecer cerrada la mayor parte del tiempo, pero si no se mantiene muy bien cerrada, tiende a haber fuga y ésta aumenta con el tiempo pues la energía debido a la diferencial de presiones es muy alta y el fluido se abrirá camino, erosionando mas y mas a los asientos ya sea del tapón o del cuerpo de la válvula. Si se compara lo que fuga una válvula clase V vs una MSS SP61, debe de hacerse en función del Cv provocado por las condiciones de operación, si se cree que es muy poca la

ganancia especificando una clase V en lugar de MSS SP61, ¿por qué no especificar mejor una clase IV?

Comparativamente la hermeticidad de las válvulas de control depende de la fuerza de que disponen para mantener cerrada la válvula como se ve enseguida:

CLASE	FUERZA REQUERIDA PARA CLASE MANTENER CERRADA LA VÁLVULA
IV	5.4 kgsf/mm de la circunferencia del Asiento
V	8.9 kgsf/mm "
MSS-SP61	17.9 kgsf/mm "

La circunferencia del asiento se define como la línea de contacto entre el tapón y el asiento en el cuerpo de la válvula cuando la válvula está en la posición totalmente cerrada. Por esto es necesario solicitar la memoria de cálculos del actuador y / o los internos de la válvula que solo o juntos darán la fuerza de cierre necesaria para la hermeticidad escogida [3].

g. Aplicaciones de servicio severo

Como ya se ha mencionado las aplicaciones de servicio severo son aquellas cuando va a haber caída alta de presión a través de la válvula de control.

En la industria de la fuerza hay muchas aplicaciones de servicio severo por ejemplo:

Recirculación de condensado; Control de nivel del desaerador; Control de nivel del domo; Recirculación o flujo mínimo del agua de alimentación; Agua de atemperación; Vapor auxiliar; Soplado de hollín; Bypass de turbina.

En la industria del petróleo:

Válvulas choke; Recirculación o flujo mínimo en bombas de crudo del tercer separador; Válvulas de antisurge y recirculación de gas en compresores; Flujo mínimo en bombas de carga de cualquier planta; Control de presión de agua de contraincendio; Manejo de condensados del gas; gas al quemador de campo; Control de nivel de separadores de alta presión; Manejo de fluidos en plantas criogénicas, etc [3].

2. INVESTIGACIÓN DISPARO GENERAL DE LA UNIDAD DE DIESEL (U4700) DEL PROYECTO HDT

2.1 DESCRIPCIÓN DE LOS HECHOS

El día 13 de Octubre de 2010, se encontraba en operación la planta Hidrotratadora de Diesel U-4700, a una capacidad de 53600 BPD de ACPM y 3000 BPD de Aceite Liviano de Ciclo, con todas sus protecciones habilitadas.

Siendo a las 23:45:39 se genera el corte por bajo flujo de alimentación a la Unidad U-4700 (FALL_47003A). Se activa el Interlock 02 (Disparo Reactores R-4701/R-4702), lo cual genera a su vez la activación del Interlock 01 (Disparo de Bombas de alimentación P-4701A/B), el Interlock 12 (Alimentación Tambor D-4701), y el disparo de los siguientes equipos: UV-47037 (Válvula de entrada de vapor a E-4715), P-4714A/B (Bombas de Amina Pobre), UV-47036 (Descarga de P-4714A/B), UV-47021/22/23 (Gas combustible a Quemadores H-4701) y HV-47003 (Damper H-4701). Como consecuencia de la activación de los anteriores Interlocks se genera la apagada general de la Unidad de Diesel U-4700.

2.2 ANÁLISIS DE LAS EVIDENCIAS (13-10-2010)

Luego de revisadas las gráficas de tendencia de las variables en cuestión, los históricos del DCS (Anexo 1) y el secuenciador de eventos del ESD (Anexo 2), a continuación se hace un análisis cronológico de los hechos:

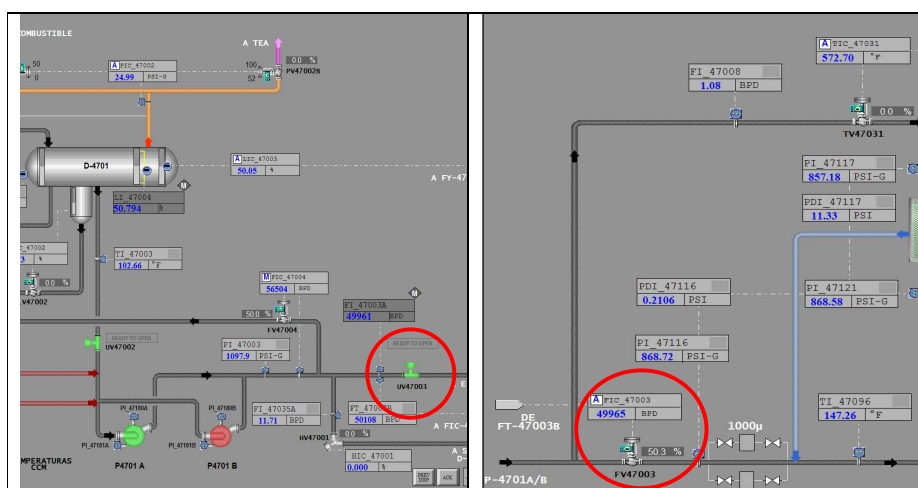


Figura 24. Diagrama esquemático del sistema de carga a Diesel

Analizando las tendencias del evento se puede observar que antes del disparo de la planta U-4700, se operaba al 100 % de capacidad (56600 BPD) y se presenta repentinamente el corte de carga a la Unidad a las 23:45:39. En la Figura 3 se evidencia la respuesta rápida del controlador enviando un comando de apertura del 100 % a la FV-47003, sin obtener respuesta del flujo. Finalmente el flujo cae a cero a las 23:46:24.



Figura 25. Tendencia Corte de Carga a la Unidad FV-47003 y Respuesta del Controlador FIC-47003 13-10-2010.

Adicionalmente se analizó el registro de eventos en el SOE (Triconex Sequence of Events Recorder), evidenciando el corte por bajo flujo FALL_47003A (29283 BPD) a las 23:45:39.379, y la activación posterior del Interlock 02 (XL_47004) y el Interlock 12 (XL_47040) a las 23:45:42.879 y la activación del Interlock 01 (XL_47001) a las 23:45:43.129.

Triconex Sequence of Events Recorder - [SOE Retrieve: U4700_16102010.SOE]									
Date	Time	Alias	TagName	Variable State	Node	Block	Group1	Group2	Description
10/13/2010	08:54:55.794		MPXS_47005B	RUNNING	01 - TRINODE01	01 - 4700	ESD		P-4705B SPLITTER REFLEX PUMP
10/13/2010	08:55:15.794		MPXS_47005A	NOT RUNNING	01 - TRINODE01	01 - 4700	ESD		P-4705A SPLITTER REFLEX PUMP
10/13/2010	09:43:19.760		MPXS_47006B	RUNNING	01 - TRINODE01	01 - 4700	ESD		P-4706B LIGHT DIESEL PUMP
10/13/2010	09:43:30.510		MPXS_47006A	NOT RUNNING	01 - TRINODE01	01 - 4700	ESD		P-4706A LIGHT DIESEL PUMP
10/13/2010	12:43:00.424		ZSH_47003A	OPEN	01 - TRINODE01	01 - 4700	ESD		
10/13/2010	12:53:54.407		ZSH_47003A	NOT OPEN	01 - TRINODE01	01 - 4700	ESD		
10/13/2010	13:54:28.654	05202	PHS_47155	MOS DEACTIVE	01 - TRINODE01	01 - 4700	DCS_ALIASED		
10/13/2010	14:28:25.388		ZSH_47003A	OPEN	01 - TRINODE01	01 - 4700	ESD		
10/13/2010	15:17:09.617		BSL_47001E	FLAME OFF	01 - TRINODE01	01 - 4700	ESD		H-4701 PILOT 5 DETECTOR
10/13/2010	15:17:10.367		BSL_47001E	FLAME ON	01 - TRINODE01	01 - 4700	ESD		H-4701 PILOT 5 DETECTOR
10/13/2010	16:17:17.594		ZSH_47003A	NOT OPEN	01 - TRINODE01	01 - 4700	ESD		
10/13/2010	23:45:39.379	15079	FALL_47003A	FALSE	01 - TRINODE01	01 - 4700	DCS_PACKED	PACK_4703-VOT4700_01PK.PAKCIN.B1	DISCHARGE FEED PUMPS P-4701A/B
10/13/2010	23:45:42.879	15091	XL_47004	FALSE	01 - TRINODE01	01 - 4700	DCS_PACKED	PACK_4703-ALM4700_01PK.PAKCIN.B8	
10/13/2010	23:45:42.879	15105	XL_47040	FALSE	01 - TRINODE01	01 - 4700	DCS_PACKED	PACK_4703-ALM4700_01PK.PAKCIN.B2	
10/13/2010	23:45:43.129		MPXS_47014B	NOT RUNNING	01 - TRINODE01	01 - 4700	ESD		P-4714B LEAN AMINE BOOSTER PUMP
10/13/2010	23:45:43.129	15086	UML_47069	FALSE	01 - TRINODE01	01 - 4700	DCS_PACKED	PACK_4703-VL4700_03PK.PAKCIN.B1	
10/13/2010	23:45:43.129	15087	UML_47060	FALSE	01 - TRINODE01	01 - 4700	DCS_PACKED	PACK_4703-VL4700_03PK.PAKCIN.B1	
10/13/2010	23:45:43.129	15090	XL_47001	FALSE	01 - TRINODE01	01 - 4700	DCS_PACKED	PACK_4703-ALM4700_01PK.PAKCIN.B7	
10/13/2010	23:45:43.879		ZSL_47002A	CLOSE	01 - TRINODE01	01 - 4700	ESD		LIGHT CYCLE OIL FROM STORAGE
10/13/2010	23:45:44.379	15080	FALL_47044B	FALSE	01 - TRINODE01	01 - 4700	DCS_PACKED	PACK_4703-VOT4700_04PK.PAKCIN.B2	
10/13/2010	23:45:46.629		ZSH_47021	NOT OPEN	01 - TRINODE01	01 - 4700	ESD		FUEL GAS TO BURNERS H-4701
10/13/2010	23:45:46.629		ZSH_47037	NOT OPEN	01 - TRINODE01	01 - 4700	ESD		DESUPERHEATED MP STEAM TO E-4715
10/13/2010	23:45:46.629		ZSH_47023	NOT OPEN	01 - TRINODE01	01 - 4700	ESD		FUEL GAS TO BURNERS H-4701
10/13/2010	23:45:47.379		ZSH_47036	NOT OPEN	01 - TRINODE01	01 - 4700	ESD		LEAN AMINE TO HP AMINE ABS T4704
10/13/2010	23:45:47.629		ZSL_47023	CLOSE	01 - TRINODE01	01 - 4700	ESD		FUEL GAS TO BURNERS H-4701
10/13/2010	23:45:47.629		ZSL_47037	CLOSE	01 - TRINODE01	01 - 4700	ESD		DESUPERHEATED MP STEAM TO E-4715
10/13/2010	23:45:47.879		ZSL_47021	CLOSE	01 - TRINODE01	01 - 4700	ESD		FUEL GAS TO BURNERS H-4701

Figura 26. Registro de la secuencia de Eventos en el ESD 13-10-2010

Después del proceso de apagada segura de la Unidad, operaciones procedió a arrancar la Unidad por el bypass de la FV-47003, y se evidenció que la UV-47003 que está en la misma línea aguas arriba, se había quedado en estado de disparo en posición cerrada y no respondía a los comandos de apertura enviados desde el DCS ni el ESD, lo que impidió poner en servicio la Unidad.

En la revisión realizada en campo de la UV-47003 se encontró que la salida de aire del posicionador no presentaba flujo, lo que ocasionó que la válvula no respondiera ante los comandos de apertura. Se procedió a realizar pruebas de desempeño al posicionador las cuales no fueron satisfactorias. Se conectó directamente la línea de aire a la válvula sin el posicionador obteniendo una correcta respuesta de la válvula. Finalmente se tomó la decisión de cambiar el posicionador. Se realizó una autocalibración localmente, prueba de recorrido y se entregó a operaciones a las 9:21:48 el día 14-10-2010. Ver Figura 27.

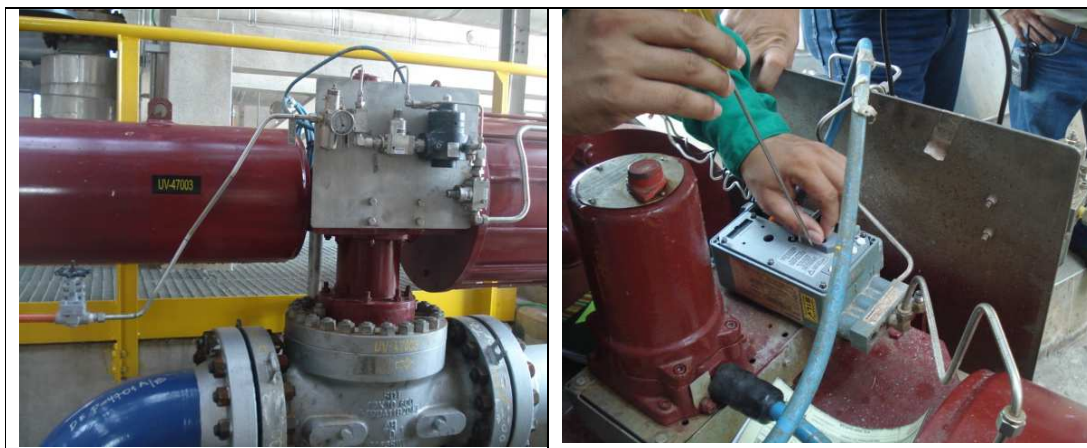


Figura 27. Cambio del posicionador de la UV-47003

Operaciones autorizó el desmontaje de la FV-47003 para realizar su inspección en el Taller de Instrumentos de Ecopetrol. Durante esta revisión, se encontró que el vástago estaba partido y el tapón se encontraba alojado en la canastilla de la válvula, impidiendo el paso del fluido y perdiendo el control de la misma. Ver Figura 28.



Figura 28. Inspección de la FV-47003 13-10-2010

En el taller de mecánica de Ecopetrol se fabricó un nuevo vástago para acoplarlo al tapón mediante un pin (Ver Figura 29) como recomendación de los especialistas de FlowServe y así evitar la fatiga del material.



Figura 29. Trim reparado 13-10-2010

2.3 ANÁLISIS DE LAS EVIDENCIAS (16-10-2010)

El día 16-10-2010 a las 05:57:16.043 se presenta nuevamente el disparo de la Planta Hidrotratadora de Diesel por bajo flujo de carga a la Unidad (FALL_47030A).

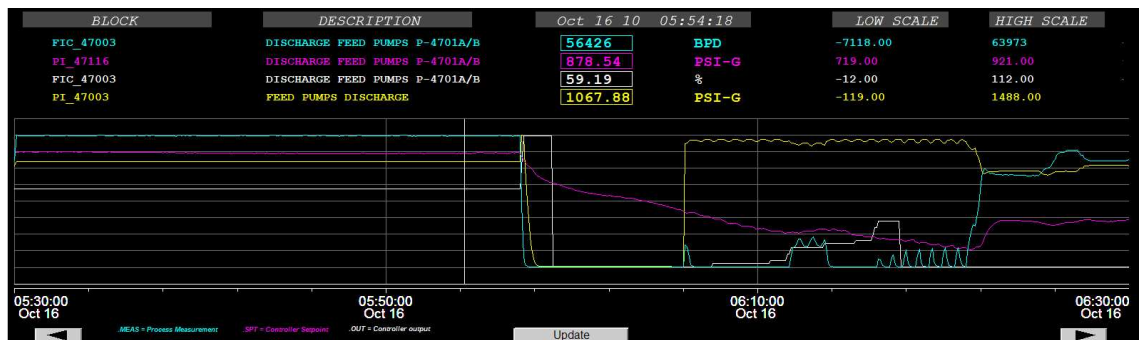


Figura 30. Tendencia Corte de Carga a la Unidad FV-47003 y Respuesta del Controlador FIC-47003 16-10-2010.

Analizando las tendencias del evento se puede observar que antes del disparo de la planta U-4700, se operaba al 100 % de capacidad (56600 BPD) y se presenta repentinamente el corte de carga a la Unidad a las 05:57:16. En la Figura 30 se evidencia la respuesta rápida del controlador enviando un comando de apertura del 100 % a la FV-47003, sin obtener respuesta del flujo. Finalmente el flujo cae a cero a las 05:57:48. El personal de operaciones restablece la carga de la Unidad por el bypass de la FV-47003 a las 06:21:18.

Adicionalmente se analizó el registro de eventos en el SOE (Triconex Sequence of Events Recorder), evidenciando el corte por bajo flujo FALL_47003A (29283 BPD) a las 05:57:16.043, y la activación posterior del Interlock 02 (XL_47004) y el Interlock 12 (XL_47040) a las 05:57:19.543 y la activación del Interlock 01 (XL_47001) a las 05:57:19.793.

10/16/2010	05:11:24.046	05110	PHS_47171	MOS ACTIVE	01 - TRINCOE01	01 - 4700	DCS_ALIASED		
10/16/2010	05:29:21.050		HS_47099	NORMAL	01 - TRINCOE01	01 - 4700	ESD		
10/16/2010	05:40:29.052	05118	PHS_47171	MOS DEACTIVE	01 - TRINCOE01	01 - 4700	DCS_ALIASED		
10/16/2010	05:57:16.043	15079	FALL_47003A	FALSE	01 - TRINCOE01	01 - 4700	DCS_PACKED	PACK_4703-VOT4700_01PK.PAKCIN.B1	DISCHARGE FEED PUMPS P-4701A/B
10/16/2010	05:57:19.543	15091	XL_47004	FALSE	01 - TRINCOE01	01 - 4700	DCS_PACKED	PACK_4703-ALM4700_01PK.PAKCIN.B8	
10/16/2010	05:57:19.543	15105	XL_47040	FALSE	01 - TRINCOE01	01 - 4700	DCS_PACKED	PACK_4703-ALM4700_01PK.PAKCIN.B2	
10/16/2010	05:57:19.793		MPIS_47014B	NOT RUNNING	01 - TRINCOE01	01 - 4700	ESD		P-4714B LEAN AMINE BOOSTER PUMP
10/16/2010	05:57:19.793	15086	UWL_47069	FALSE	01 - TRINCOE01	01 - 4700	DCS_PACKED	PACK_4703-VL4700_03PK.PAKCIN.B1	
10/16/2010	05:57:19.793	15087	UWL_47060	FALSE	01 - TRINCOE01	01 - 4700	DCS_PACKED	PACK_4703-VL4700_03PK.PAKCIN.B1	
10/16/2010	05:57:19.793	15090	XL_47001	FALSE	01 - TRINCOE01	01 - 4700	DCS_PACKED	PACK_4703-ALM4700_01PK.PAKCIN.B7	
10/16/2010	05:57:20.793	15080	FALL_47044B	FALSE	01 - TRINCOE01	01 - 4700	DCS_PACKED	PACK_4703-VOT4700_04PK.PAKCIN.B2	
10/16/2010	05:57:23.293		ZSH_47021	NOT OPEN	01 - TRINCOE01	01 - 4700	ESD		FUEL GAS TO BURNERS H-4701
10/16/2010	05:57:23.293		ZSH_47023	NOT OPEN	01 - TRINCOE01	01 - 4700	ESD		DESUPERHEATED MP STEAM TO E-4715
10/16/2010	05:57:23.293		ZSH_47036	NOT OPEN	01 - TRINCOE01	01 - 4700	ESD		FUEL GAS TO BURNERS H-4701
10/16/2010	05:57:24.293		ZSL_47023	CLOSE	01 - TRINCOE01	01 - 4700	ESD		LEAN AMINE TO HP AMINE ABS T4704
10/16/2010	05:57:24.293		ZSL_47037	CLOSE	01 - TRINCOE01	01 - 4700	ESD		FUEL GAS TO BURNERS H-4701
10/16/2010	05:57:24.293	15099	XL_47034	FALSE	01 - TRINCOE01	01 - 4700	DCS_PACKED	PACK_4703-ALM4700_01PK.PAKCIN.B1	DESUPERHEATED MP STEAM TO E-4715
10/16/2010	05:57:24.543		ZSL_47021	CLOSE	01 - TRINCOE01	01 - 4700	ESD		FUEL GAS TO BURNERS H-4701
10/16/2010	05:57:24.793		ZSL_47036	CLOSE	01 - TRINCOE01	01 - 4700	ESD		LEAN AMINE TO HP AMINE ABS T4704
10/16/2010	05:57:25.293		MPIS_47001A	NOT RUNNING	01 - TRINCOE01	01 - 4700	ESD		P-4701A FEED PUMP
10/16/2010	05:57:25.793		ZSL_47022	NOT CLOSE	01 - TRINCOE01	01 - 4700	ESD		FUEL GAS TO ATMOSPHERE H-4701
10/16/2010	05:57:25.793		BSL_47001A	FLAME OFF	01 - TRINCOE01	01 - 4700	ESD		H-4701 PILOT 1 DETECTOR
10/16/2010	05:57:26.043		ZSH_47022	OPEN	01 - TRINCOE01	01 - 4700	ESD		FUEL GAS TO ATMOSPHERE H-4701
10/16/2010	05:57:26.043		BSL_47001C	FLAME OFF	01 - TRINCOE01	01 - 4700	ESD		H-4701 PILOT 3 DETECTOR
10/16/2010	05:57:26.293		BSL_47001D	FLAME OFF	01 - TRINCOE01	01 - 4700	ESD		H-4701 PILOT 4 DETECTOR
10/16/2010	05:57:26.293	15059	PALL_47005	FALSE	01 - TRINCOE01	01 - 4700	DCS_PACKED	PACK_4703-VOT4700_05PK.PAKCIN.B2	FUEL GAS TO BURNERS H-4701
10/16/2010	05:57:26.543		BSL_47001B	FLAME OFF	01 - TRINCOE01	01 - 4700	ESD		H-4701 PILOT 2 DETECTOR
10/16/2010	05:57:26.793		BSL_47001E	FLAME OFF	01 - TRINCOE01	01 - 4700	ESD		H-4701 PILOT 5 DETECTOR
10/16/2010	05:57:26.793		BSL_47001F	FLAME OFF	01 - TRINCOE01	01 - 4700	ESD		H-4701 PILOT 6 DETECTOR

Figura 31. Registro de la secuencia de Eventos en el ESD 16-10-2010

Operaciones autorizó el desmontaje de la FV-47003 para realizar nuevamente su inspección en el Taller de Instrumentos de Ecopetrol. Durante esta revisión, se

volvió a evidenciar la ruptura del vástago y fatiga del material donde se encontraba el pin instalado en la anterior reparación. (Ver Figura 32).



Figura 32. Ruptura del Vástago 16-10-2010

Como una solución temporal se fabrica nuevamente el vástago en el taller de mecánica con la ampliación del diámetro de la base del vástago que es roscada en el tapón para finalmente ser soldada (Ver Figura 33).



Figura 33. Trim Reparado 16-10-2010

Alrededor de las 3:00 pm del día 16-10-2010 se da inicio al proceso armado y acople de la válvula de control, se verifica la correcta instalación de los internos, se realiza una auto calibración a la válvula, se verifica recorrido desde el DCS y a las 3:40 pm la válvula es entregada a operaciones para ponerla en servicio nuevamente.

3. DETERMINACIÓN DE LAS CAUSAS

Para el análisis del incidente se aplicó Técnica de Análisis sistemático de causas (TASC).

3.1 ANÁLISIS DE POSIBLES CAUSAS

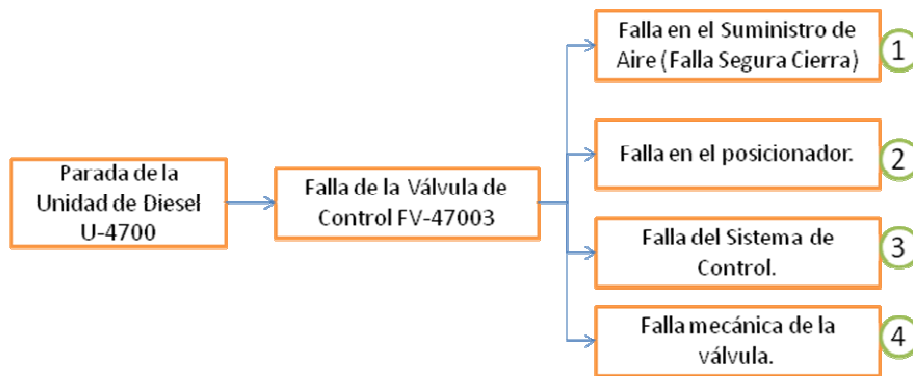


Figura 34. Posibles causas de falla FV-47003

Teniendo en cuenta el análisis de la evidencia suministrada por el secuenciador de eventos del ESD, se puede determinar que la causa que generó el disparo de la Unidad fue la detección de bajo flujo en el transmisor FI_47003A. Adicionalmente, se verificó el estado de la UV-47003, evidenciando que esta se encontraba abierta antes del evento, y como efecto de la activación del Interlock 01 se disparó a las 23:45:57.129, quedando cerrada.

3.1.1 Falla en el suministro de aire en la FV-47003

El personal presente el día del evento, revisó el aire de instrumentos y no evidenció anomalías en el suministro de aire de la válvula de control.

3.1.2 Falla del posicionador de la FV-47003

En la inspección que se le realizó a la válvula después del disparo, se le realizó una prueba de recorrido desde el DCS verificando por parte de operaciones su respuesta en campo, observando que el vástago respondía correctamente al comando de apertura. Por consiguiente, se puede descartar la opción de que el posicionador haya fallado en el momento del evento.

3.1.3 Falla del sistema de control

Se verificaron que los parámetros de sintonía y acción del controlador FIC-47003 fueran los adecuados para el tipo de variable que maneja. No se encontró ninguna anomalía en la configuración del lazo de control en el DCS.

3.1.4 Falla mecánica de la válvula FV-47003

Del resultado de la inspección realizada en el taller de instrumentos, se concluyó que la pérdida del control de la válvula se debió al desprendimiento entre el tapón y el vástago.

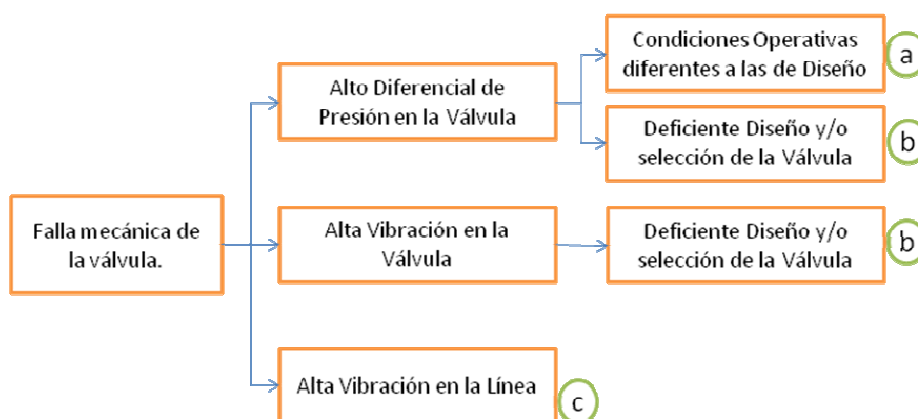


Figura 35. Posibles causas de la falla mecánica de la válvula FV-47003

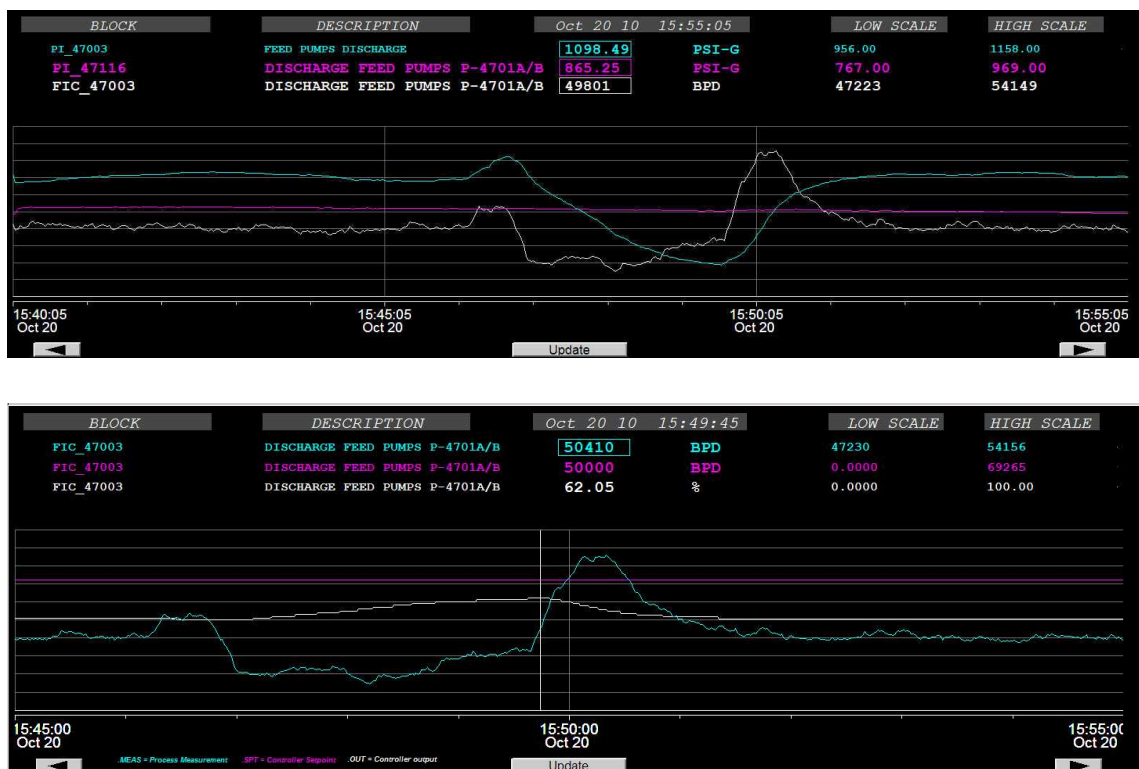
a) Alto diferencial de Presión en la Válvula debido a Condiciones Operativas diferentes a las del Diseño

Durante el proceso de arranque y operación normal de la planta se presentan altos diferenciales de presión a los que es sometida la válvula (400 Psig y 200 Psig respectivamente). Según la hoja de datos de la válvula, la diferencial de presión calculada debería ser alrededor de 100 Psig.

b) Deficiente Diseño y/o selección de la válvula

El tipo de ruptura que se evidencia en el vástago de la válvula muestra una fractura por fatiga, la cual es característica de fallas debidas a fenómenos vibratorios en la válvula inducidos por la velocidad del fluido y no por un excesivo

Prueba realizada en campo, aumentando la velocidad del fluido a través de la válvula, donde se tomaron valores de vibración alrededor de los 88.67 mm/s RMS y 177.33 mm/s 0-P, confirmando la presencia de resonancia en la válvula.



c) Alta vibración en la línea

48

RECOMENDACIONES

En la selección de una válvula de control se deben tener presente una cantidad de factores y cálculos de variables que son los que finalmente reflejan la efectividad de su comportamiento en un proceso industrial.

La falla que se presentó en la válvula de carga a la Unidad de Diesel, fue generada por una alta velocidad en el fluido y la vibración que éste generaba en el trim de la misma. Como se observó en las evidencias fotográficas durante la inspección en el taller, el tamaño del tapón y las constantes vibraciones en los internos generaron una fatiga en el material del vástago, ocasionando una ruptura del trim, quedando finalmente el tapón alojado en el asiento de la válvula.

Una recomendación por parte del proveedor de la válvula fue el cambio de los internos por un trim guiado para evitar la vibración y por ende la fatiga del material. Las pruebas realizadas y los datos recopilados durante la ejecución de las mismas, ayudaron al proveedor a realizar un recalcu de las especificaciones de la válvula, teniendo en cuenta las condiciones operacionales a la que debe ser sometido el elemento final de control.

Al proceso de selección de una válvula se le debe dedicar el tiempo suficiente para verificar las memorias de cálculo del fabricante, datos de operación y especificaciones para el servicio de diseño, ya que la inadecuada selección de una válvula provocará un control inestable, costos operativos altos, costos excesivos en mantenimiento correctivo, paradas de emergencia no programadas y riesgos para las personas, los equipos asociados y el medio ambiente.

CONCLUSIONES

En la industria del petróleo, cuando se presentan paradas inesperadas en sus plantas, independientemente de la que sea, afectan en gran magnitud la producción de la empresa y el compromiso de abastecimiento de la misma con sus clientes, que en este caso es el país entero.

Es por esta razón que se implementan procedimientos y normas desde el proceso de ingeniería, para cumplir al 100 % con las necesidades del negocio y obtener diseños de control efectivos con instrumentación y tecnología de punta.

La adecuada selección de la instrumentación es la pauta para obtener una operación estable de las unidades y además disminuir el riesgo de daño en equipos asociados al proceso. Además cuando se selecciona cualquier tipo de instrumento con ciertas especificaciones de diseño, es importante cumplir con estos parámetros operacionalmente, ya que en caso de no operar en los rangos de diseño, no se obtiene la respuesta deseada del instrumento, lo cual generaría la disminución de su vida útil y un control no deseado.

En el caso de válvulas de control, está claro que se deben evaluar cada una de las condiciones del proceso en el cual se van a implementar, tales como, el servicio, temperatura, velocidad del fluido, tamaño de la tubería, tiempo de respuesta que se requiere, falla segura, accesorios, entre otras. Del análisis de estos parámetros depende el comportamiento del sistema de control de la planta.

La vibración en los sistemas de tuberías que incluyen válvulas de control, puede ocasionar daños internos en la instrumentación, como es el caso de este estudio, en el cual se evidenció que la alta velocidad del fluido afectaba directamente el trim de la válvula desprendiendo en varias ocasiones el tapón del vástago. Además, estas vibraciones pueden causar posibles escapes de productos debido a bridas flojas, generando emergencias delicadas para los mantenedores y operadores de estas unidades.

Cuando se presenta cualquier tipo de falla en una planta industrial, es de gran ayuda herramientas como lo son el secuenciador de eventos del sistema de protección, los históricos de las variables de proceso, el análisis de las especificaciones de diseño de los equipos y la ayuda del personal de operaciones que estuvo presente en el incidente. Con estos datos como entrada se puede llegar a la causa raíz de cualquier tipo de falla y a la solución rápida del inconveniente.

BIBLIOGRAFIA

- [1]** Herbert L. Miller. Piping Vibration Involving Control Valves. New Orleans, LA. June 4-7, 2001.
- [2]** Rodríguez Soto N. Curso Fundamentos de Instrumentación Industrial. Ecopetrol Gerencia Refinería de Barrancabermeja. Departamento de Mantenimiento. Septiembre del 2008.
- [3]** Arroyo Arroyo A. Especificaciones de Válvulas de Control. México. 4, 5 y 6 de octubre de 2000.
- [4]** Operaciones HDT. Manual de Descripción de Procesos de la Unidad de Hidrotratamiento de Diesel U-4700 – Gerencia Refinería Barrancabermeja. Año 2001.

ANEXOS

ANEXO 1. *Históricos DCS Evento 13 Octubre del 2010*

ANEXO 2. *Históricos DCS Evento 16 Octubre del 2010*

ANEXO 3. *Secuenciador de Eventos Octubre 13 del 2010*

ANEXO 4. *Secuenciador de Eventos Octubre 16 del 2010*

ANEXO 5. *Hoja de Especificaciones Válvula FV-47003*