



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**DESARROLLO DE UN SISTEMA MAESTRO PARA LA SELECCIÓN DE
VÁLVULAS DE CONTROL REGULADORAS DE FLUJO PARA PLANTAS DE
PROCESOS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

GABRIEL ESTEBAN PEREIRA VILCHES

PROFESOR GUÍA:
JORGE POBLETE AGUIRRE

PROFESOR CO-GUÍA:
MARCOS ORCHARD CONCHA

COMISIÓN:
JORGE URRUTIA RIVEROS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por:
Hatch Ingenieros y Consultores Limitada

SANTIAGO DE CHILE
2024

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO.
POR: GABRIEL ESTEBAN PEREIRA VILCHES
FECHA: 2024
PROF. GUÍA: JORGE POBLETE AGUIRRE

DESARROLLO DE UN SISTEMA MAESTRO PARA LA SELECCIÓN DE VÁLVULAS DE CONTROL REGULADORAS DE FLUJO PARA PLANTAS DE PROCESOS

En el presente trabajo se desarrolló un sistema maestro de selección de válvulas de control reguladoras de flujo para la empresa consultora de ingeniería Hatch Ingenieros y Consultores Limitada, a fin de facilitar esta tarea en proyectos relacionados con plantas de procesamiento de minerales.

El desarrollo del sistema constó en sentar las bases del mismo, para lo cual se realizó una investigación bibliográfica sobre los fundamentos teóricos, prácticas y estándares industriales relacionados a la selección y dimensionamientos de válvulas de control reguladoras.

Utilizando los resultados de la investigación como base, se desarrolló un procedimiento para realizar la selección y el dimensionamiento de válvulas de control reguladoras de forma sistemática. Además, se programó un prototipo de una aplicación de software que asiste en la implementación del procedimiento antes mencionado.

Tanto el procedimiento y la aplicación fueron probados a través de un caso de estudio con datos de una memoria de cálculo de válvulas de control utilizada en un proyecto de una planta recuperadora de litio. Donde el procedimiento y el prototipo de aplicación de software llegaron a las mismas conclusiones que la memoria de cálculo.

Finalmente, se realizó un análisis de la propuesta de valor, se plantearon posibles trabajos a futuro y se discute sobre el cumplimiento de los objetivos del trabajo de título, los cuales se consideran mayormente cumplidos.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Contextualización	1
1.2. Motivación	3
1.3. Objetivos del Proyecto	4
1.3.1. Objetivo General	4
1.3.2. Objetivos Específicos	4
1.4. Alcances del Trabajo de Título	4
1.5. Metodología	5
1.6. Estructura de la Memoria	5
2. Válvulas de Control	6
2.1. Conceptos Fundamentales	6
2.1.1. Control de Procesos	6
2.1.2. Definición de Válvula de Control	9
2.1.3. Principio de Bernoulli	13
2.1.4. Propiedades de Fluidos	15
2.1.5. Cavitación y <i>Flashing</i>	16
2.2. Modelo Fundamental de Flujo Incompresible	17
2.2.1. Gravedad Específica (ρ_1/ρ_0)	17
2.2.2. Coeficiente de Flujo (C , C_v o K_v)	18
2.2.3. Diferencial de Presión para Cálculos de Dimensionamiento (Δp_{sizing})	18
2.2.4. Factor de Corrección por Geometría de Cañerías (F_P)	21
2.2.5. Factor de Corrección por Número de Reynolds (F_R)	23
2.3. Índice de Cavitación σ	24
2.4. Niveles de Ruido	25
2.4.1. Nivel de Ruido Aceptable	25
2.4.2. Predicción de Ruido	26
2.5. Curvas Características Inherente e Instalada	26
2.6. Lista de Estándares y Normas	29
2.7. Estado del Arte	30
2.7.1. Herramientas de Software Existentes	30
2.7.2. Desarrollo de Herramientas y Sistemas Similares	30
3. Procedimiento de Selección de Válvulas de Control Regulatoras	32
3.1. Obtención de Información	32
3.1.1. Información Mínima Requerida	32
3.1.2. Obtención de Datos	33

3.1.3.	Revisión de Congruencia	36
3.1.4.	Cálculo de Curvas de Proceso	37
3.1.5.	Presentación de los Datos de Proceso	38
3.2.	Selección del Tipo de Válvula	39
3.2.1.	Criterio por Función Operativa	39
3.2.2.	Criterio por Tamaño de Línea	40
3.2.3.	Criterio por Características del Fluido	40
3.2.4.	Criterio por Presión y Temperatura de Operación	41
3.2.5.	Criterio por Condiciones de Cavitación y <i>Flashing</i>	41
3.2.6.	Decisión del Tipo de Válvula	41
3.3.	Dimensionamiento de la Válvula	42
3.3.1.	Consideraciones sobre el Tamaño de la Válvula	42
3.3.2.	Obtención de Curvas Instaladas	42
3.3.3.	Criterio de Apertura de la Válvula	43
3.3.4.	Criterio de Ganancia Instalada de Válvula	43
3.3.5.	Revisión de Condiciones Especiales y Niveles de Ruido	43
3.3.6.	Reserva de Flujo	44
3.3.7.	Velocidad del Fluido	44
3.3.8.	Elección del Diámetro Nominal de la Válvula	44
3.3.9.	Selección y Dimensionamiento de Actuadores, Controladores y Accesorios	44
3.3.10.	Memoria de Cálculo de Válvulas de Control	45
3.4.	Comparación de Opciones	45
3.4.1.	Envío de Información a Proveedores	46
3.4.2.	Recepción de Propuestas de Proveedores	46
3.4.3.	Selección de Oferta	46
4.	Caso de Estudio	47
4.1.	Obtención de Datos	47
4.2.	Selección del Tipo de Válvula	49
4.3.	Dimensionamiento	50
4.4.	Comparación de Ofertas	52
4.5.	Comparación con Memoria de Cálculo de Válvulas de Control Existente	52
5.	Conclusiones	53
5.1.	Propuesta de Valor	53
5.2.	Trabajo Futuro	53
5.3.	Cumplimiento de los Objetivos	54
	Bibliografía	55
	Anexos	59
	Anexo A. Cálculo del Factor de Corrección por Número de Reynolds	59
	Anexo B. Reporte de Resultados Exportado de <i>AFT Fathom</i>	60
	Anexo C. Pantalla de Resultados <i>AFT Fathom</i>	61
	Anexo D. Estimación de la Curva de Presión Instalada	63

Índice de Tablas

2.1.	Tipo de coeficiente de flujo, según unidades empleadas y valor de N_1 [19, 20]. .	18
2.2.	Valores de N_2 , según unidades empleadas para los diámetros y tipo de coeficiente de flujo [19, 20].	23
2.3.	Valor de la constante N_4 , según el tipo de coeficiente de flujo y unidades de flujo y viscosidad [19, 20].	24
2.4.	Niveles de presión sonora continua equivalente máximos (dB(A)) para una jornada de 8 horas, según normativa [26–28].	26
3.1.	Ejemplo de tabla de datos en formato IEC 60534-7:2010 [34].	38
3.2.	Tabla de conversión de tamaños estándar en pulgadas (NPS) y tamaños estándar en mm (DN) [37–41].	42
4.1.	Tabla resumen de los datos de proceso de la válvula. Los datos fueron analizados por el prototipo de aplicación. Y la estructura de la Tabla corresponde al formato IEC 60534-7:2010.	48
4.2.	Tabla con parámetros relevantes para la evaluación de la curva característica de la válvula.	52
A.1.	Valores de las constantes numéricas N_2 , N_{18} y N_{32} [19].	59

Índice de Ilustraciones

1.1.	Diagrama explicativo de la metodología FEL y el grado de profundidad de la ingeniería realizada en cada etapa. Cada una cuenta con sus respectivos entregables y controles que permiten avanzar a la siguiente etapa, según la maduración del proyecto [4].	3
2.1.	Jerarquía de un sistema de control de procesos e información general [7]. . . .	6
2.2.	Lazo retroalimentado de control regulatorio básico [9].	7
2.3.	Lazo de control de flujo en una cañería y una válvula de control reguladora [5].	8
2.4.	Válvulas de bola segmentada de 4" con asientos metálicos, actuadores de diafragma y posicionadores estándar, las cuales están en condiciones de proceso distintas [8].	9
2.5.	Partes principales de una válvula de globo típica [5].	10
2.6.	Montaje típico de un actuador neumático sobre una válvula de globo [6]. . . .	11
2.7.	Ejemplos de válvulas de movimiento lineal.	12
2.8.	Ejemplos de válvulas de movimiento rotativo.	12
2.9.	Presión y velocidad de un fluido a través de una restricción en una cañería, el flujo va en dirección de p_1 a p_2 [5].	14
2.10.	Presión estática y velocidad de un fluido a través de una restricción en una cañería comparada con tres presiones de vapor distintas p_{v1} , p_{v2} y p_{v3} . El flujo va en dirección de p_1 a p_2 [5].	16
2.11.	A la derecha se muestra un obturador nuevo, a la izquierda otro idéntico, pero luego de haber sido sometido a condiciones de <i>flashing</i> [18].	17
2.12.	Diagrama de una válvula de control con o sin adaptadores instalada en una cañería. El diagrama indica donde deben tomarse las mediciones de presión estática requeridas por el Modelo Fundamental para Flujo Incompresible [19, 20].	19
2.13.	Comparación del Modelo Fundamental de Flujo Incompresible y el flujo real, para un coeficiente de flujo determinado en función de la raíz cuadrada del diferencial de presión [21].	20
2.14.	Montajes típicos de válvulas de control en una cañería.	22
2.15.	Gráfico ilustrativo del nivel de ruido y vibraciones en la válvula en función del índice σ , los límites no están dibujados a escala [23].	25
2.16.	Características inherentes típicas para válvulas de control [5].	27
2.17.	Pérdidas de presión a lo largo de un sistema de cañerías [32].	28
4.1.	Gráficos de procesos obtenidos por el prototipo de herramienta de software. . .	49
4.2.	Captura de la pantalla de selección del cuerpo de válvula del prototipo de herramienta de software.	49
4.3.	Curva característica instalada de válvula dos válvulas diafragma <i>Schubert & Salzer</i> modelo 7069 con la presiones del proceso. Característica instalada obtenida con Valsize 10 [44].	51

4.4.	Curva de ganancia instalada para los rangos de operación de dos válvulas diafragma <i>Schubert & Salzer</i> modelo 7069 con la presiones del proceso, calculada a partir de la curva característica instalada.	51
B.1.	Captura del informe de resultados exportado de ATF Fathom, correspondiente a la primera hoja del mismo. Los rectángulos muestran donde se puede encontrar algunos valores de interés.	60
C.1.	Pantalla de resultados para las válvulas de control de una simulación de <i>ATF Fathom</i>	61

Capítulo 1

Introducción

1.1. Contextualización

En Chile, la industria minera es uno de los sectores productivos más importantes económicamente [1]. Este sector consta de muchos agentes los cuales tienen múltiples y diferentes relaciones entre sí, los agentes principales son las empresas mineras que realizan la extracción y/o procesamiento de minerales, que posteriormente son ofrecidos al mundo.

Uno de los desafíos que enfrentan las empresas mineras es que el material extraído directamente desde un yacimiento no siempre puede ser vendido en ese estado, puesto que su valorización en el mercado no siempre cumple con los objetivos económicos de la empresa.

En consecuencia, las mineras pueden verse motivadas a procesar el material del yacimiento para aumentar sus ganancias. Donde a partir del material extraído se aumenta su ley para obtener concentrados, cátodos, lingotes, etc, según el mineral, la tecnología y la capacidad que la minera disponga. Este procesamiento de mineral se lleva a cabo en instalaciones denominadas plantas de procesos [2].

Las plantas de procesos son instalaciones tan importantes como complejas, no solo por sus variados tamaños, sino que también la gran cantidad de factores que influyen y deben ser considerados al momento de realizar su diseño, construcción, operación y mantención. Cada una de estas acciones son trabajos multidisciplinarios donde participan un gran número de personas con diferentes especializaciones. La complejidad de estas plantas lleva a que las empresas mineras tengan diversas áreas especializadas, que se encargan de la operación y mantención. Sin embargo, esta misma complejidad impulsa a las mineras a delegar las labores de diseño y construcción a otras empresas.

Las empresas mineras contratan los servicios de otras empresas a través de contratos que pueden tener diversas estructuras. Por ejemplo, para proyectos de gran envergadura, los contratos suelen ser del tipo EPCM o EPC.

Los contratos EPCM, por sus siglas en inglés *Engineering, Procurement, Construction Management*, es una estructura de contrato que contempla 3 tipos de labores distintas asociadas a un proyecto [3]:

- **Ingeniería** (*Engineering*): son las labores asociadas al diseño de la planta.
- **Suministro** (*Procurement*): son todas las actividades necesarias para asegurar contar con los materiales y equipos requeridos por el proyecto.
- **Administración de la Construcción** (*Construction Management*): es decir, la ejecución de la construcción no queda a cargo del contratista, sino de otro agente. Además, el contratista actúa por cuenta del dueño o mandante con respecto a las compras de equipos y los contratos de construcción.

Por su lado, los contratos EPC, son de ingeniería, suministro y construcción. Implicando que el contratista es el responsable de la ejecución de la construcción. Lo anterior, no significa que el mandante se desentienda del proyecto, sino que realiza un control global y general del proyecto y no de sus labores específicas.

La principal consecuencia de lo expuesto en los párrafos anteriores es que las relaciones entre empresas mineras, ingeniería, construcción y suministro varía según el proyecto y la entidad que esté encargada de la gestión.

Dentro de las metodologías para el desarrollo de grandes proyectos, es común encontrar en Chile y el rubro minero la utilización de la metodología *Front-End-Loading* (FEL), la cual define el orden en que se abordan y desarrollan los aspectos técnicos, económicos, ejecutivos, etc., del proyecto [4].

La Figura 1.1 muestra un diagrama simplificado de la metodología FEL, donde se puede ver que durante la etapa FEL-1 se realizan los estudios técnicos, económicos, etc., para identificar la propuesta de negocios del proyecto.

La etapa FEL-2 consiste en el desarrollo del alcance del proyecto mediante la exploración de alternativas disponibles para llevar a cabo la propuesta de negocios, además, se realiza la ingeniería conceptual estableciendo una estimación de costos y un cronograma aproximados iniciales.

Durante la etapa FEL-3 se realiza la definición del proyecto, durante esta fase se lleva a cabo la ingeniería básica y otros estudios, a fin de obtener el plan de ejecución, el costo y el cronograma del proyecto, con el mínimo error posible.

Una vez terminada la etapa FEL-3 y la ingeniería básica, se realiza la ingeniería de detalles y se establecen los requerimientos técnicos y criterios de diseño de cada disciplina requerida por el proyecto: Estructural, Mecánica, Eléctrica, Control y Automatización, Cañerías, etc. Luego, cada disciplina se encarga de generar la suficiente documentación para comprar equipos, construir y ejecutar el proyecto.

En particular, la disciplina de Control y Automatización tiene por objetivo diseñar e implementar sistemas de control de procesos que permitan que la planta funcione de acuerdo al grado de automatización definido por el proyecto en su criterio de diseño.

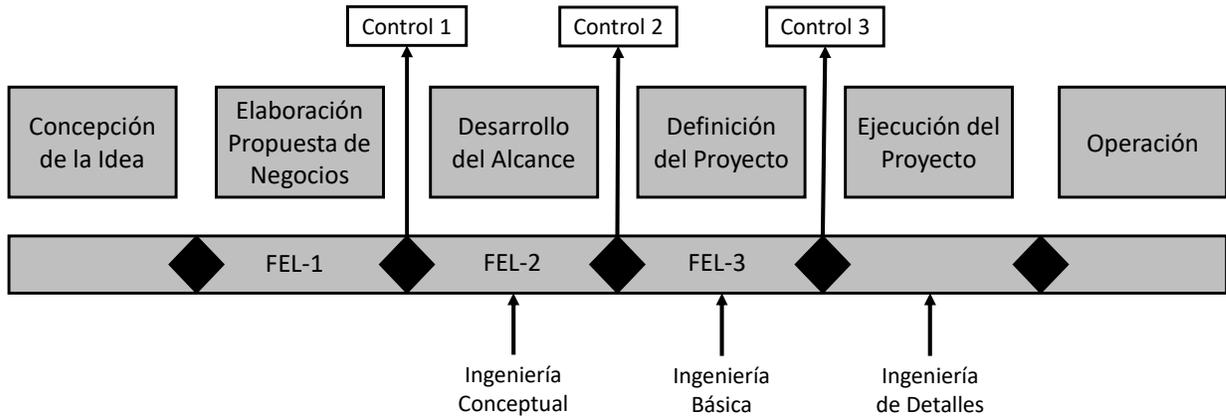


Figura 1.1: Diagrama explicativo de la metodología FEL y el grado de profundidad de la ingeniería realizada en cada etapa. Cada una cuenta con sus respectivos entregables y controles que permiten avanzar a la siguiente etapa, según la maduración del proyecto [4].

La empresa Hatch es una consultora global multidisciplinaria de gestión, ingeniería y desarrollo. En Chile, participa principalmente en el estudio y desarrollo de proyectos relacionados con minería y plantas de proceso de mineral. Dentro de estas actividades se encuentra la ingeniería de detalles, la cual define los parámetros para realizar licitaciones y compras de equipos.

En el caso de las válvulas de control, desde el punto de vista técnico, el principal documento entregable es la memoria de cálculo, en la cual se presentan todos los datos considerados para su selección y dimensionamiento; se especifican los criterios de selección y se presentan los resultados obtenidos como respaldo técnico de manera previa al desarrollo de los entregables necesarios para la licitación y adquisición de estos equipos.

1.2. Motivación

Las válvulas de control son elementos finales de control, dicho de otra forma, son la última frontera entre la realidad física que es un fluido en una cañería y la abstracción que significa el control de una planta de procesos. Consecuentemente, los profesionales a cargo de la selección y dimensionamiento de válvulas de control no tienen la misma formación, dado que dependiendo de sector productivo, los alcances de disciplina internos de cada empresa y otros factores, esta labor puede quedar a cargo de ingenieros mecánicos, químicos, eléctricos, electrónicos, etc.

En el caso de la empresa Hatch en Chile, la labor de selección y dimensionamiento de válvulas de control recae en la disciplina de Control y Automatización, la cual está conformada principalmente por ingenieros eléctricos y electrónicos, cuya formación no siempre incluye la enseñanza explícita de esta labor, pero sí sus conceptos fundamentales. Luego, los nuevos ingenieros que se integran a la organización deben aprender a seleccionar y dimensionar válvulas de control durante el ejercicio profesional, debiendo no solo aprender la labor específica, sino que sintetizar la información existente y adaptarla a los proyectos que se realizan en la empresa.

Dado que existe mucha información y literatura sobre los fenómenos físicos, estándares, normas, criterios, etc., asociados a las válvulas de control, se identificó una necesidad de sintetizar la información disponible para facilitar la curva de aprendizaje y la transmisión de conocimientos entre los ingenieros de la empresa Hatch. La cual se mostró abierta al desarrollo de un sistema que integre las partes de la problemática de selección y dimensionamiento de válvulas de control. No solo para facilitar la transmisión de conocimiento sino que también permitir una mejor estandarización y trazabilidad del proceso de selección de válvulas de control.

1.3. Objetivos del Proyecto

1.3.1. Objetivo General

Desarrollar un sistema maestro que facilite y estandarice el procedimiento con el cual Hatch realiza la selección de válvulas de control reguladoras.

1.3.2. Objetivos Específicos

1. Realizar una investigación que defina el contexto teórico y normativo respecto a la selección y dimensionamiento de válvulas de control.
2. Establecer un procedimiento y criterios para la selección y dimensionamiento de válvulas de control reguladoras, basada en la investigación realizada.
3. Desarrollar un prototipo de una herramienta de software que integre los siguientes elementos:
 - Facilitar la aplicación del procedimiento y los criterios de selección y dimensionamiento definidos en el punto 2.
 - Asistir en generación de información para memorias de cálculo.
 - Facilitar la comparación de las ofertas realizadas por proveedores.
 - Facilitar la acumulación de información y experiencia sobre los diferentes procesos y válvulas que se vayan utilizando en los proyectos que emprenda la empresa.
4. Generar la documentación requerida para el correcto uso y el desarrollo futuro de la herramienta descrita en el punto 3.

1.4. Alcances del Trabajo de Título

- El proyecto de título se realizó enfocado en plantas de proceso de minerales de cobre y litio en Chile.
- El procedimiento de selección y herramientas desarrolladas está limitado solamente a fluidos incompresibles y abarca solamente la elección de la válvula, no considerando los actuadores u otros accesorios.
- Este trabajo de título se limitó a la obtención un prototipo funcional de la herramienta de software y no se realizó su implementación.

1.5. Metodología

El trabajo se dividió en 4 grandes etapas, especificadas a continuación:

1. **Investigación bibliográfica:** donde se buscó la información necesaria para llevar a cabo el trabajo de título.
2. **Diseño del procedimiento:** consistió en el desarrollo de un procedimiento de selección de válvulas de control reguladoras.
3. **Programación del prototipo:** constó en la obtención del prototipo funcional de la herramienta de software.
4. **Finalización:** durante esta etapa se prepararon los entregables.

1.6. Estructura de la Memoria

La memoria se estructura en 5 capítulos:

1. **Introducción:** donde se hace una contextualización del trabajo de título, sus objetivos y alcances.
2. **Válvulas de Control:** corresponde a un resumen de lo obtenido durante la fase de investigación.
3. **Procedimiento de Selección de Válvulas de Control Reguladoras:** se detalla el procedimiento de selección desarrollado en la fase de diseño del procedimiento.
4. **Caso de Estudio:** utilizando datos de una memoria de cálculo de válvulas de control utilizada en un proyecto real se aplica el procedimiento descrito en el Capítulo 3 y se comparan los resultados de la aplicación del procedimiento con las conclusiones de la memoria de cálculo.
5. **Conclusiones:** se concluye sobre la relevancia, el trabajo a futuro y los objetivos del trabajo de título.

Capítulo 2

Válvulas de Control

2.1. Conceptos Fundamentales

2.1.1. Control de Procesos

Las plantas de procesamiento de mineral se ven sujetas a metas económicas, productivas, operacionales, entre otras, impuestas por las empresas según su estrategia de negocios. Por este motivo se implementan sistemas de control de procesos, para asegurar que las plantas cumplan con estos objetivos productivos. La Figura 2.1 muestra la jerarquía de un sistema de control de procesos, donde se puede apreciar que el horizonte de posibilidades se ve acotado por el control regulatorio básico. Así, la interacción física del sistema de control con el proceso es un factor determinante de las posibilidades de operación de una planta de procesos. [5–8].

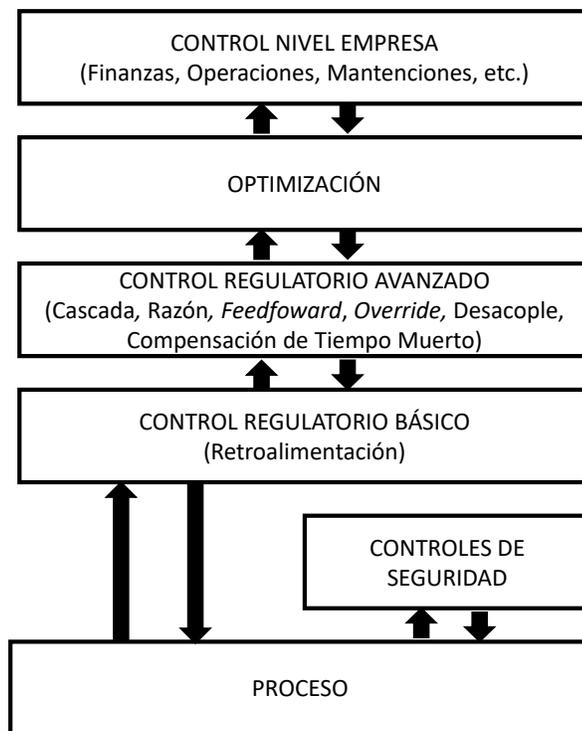


Figura 2.1: Jerarquía de un sistema de control de procesos e información general [7].

El control regulatorio básico interactúa con el proceso través de lazos de control, conformados por controladores, sensores, transmisores, elementos finales de control. La Figura 2.2 muestra un lazo de control retroalimentado típico, donde hay una variable de proceso que se quiere regular y punto de operación deseado (*set point*). La variable de proceso es medida por un sensor y el valor de la medición es transmitido al controlador, donde la medición es comparada con el *set point*, luego, el controlador genera una señal de control para ajustar la variable manipulada, a través de un elemento final de control que recibe esta señal y ajusta la variable manipulada acordeamente, controlando la variable de proceso.

El cálculo del valor de la señal de control se obtiene según la estrategia de control o algoritmo que haya sido seleccionado para el controlador (e.g. PID). Son los lazos como el de la Figura 2.2 los que permiten que una variable de proceso se mantenga controlada, tanto en el caso que el proceso sea perturbado o el valor del *set point* haya sido cambiado [9].

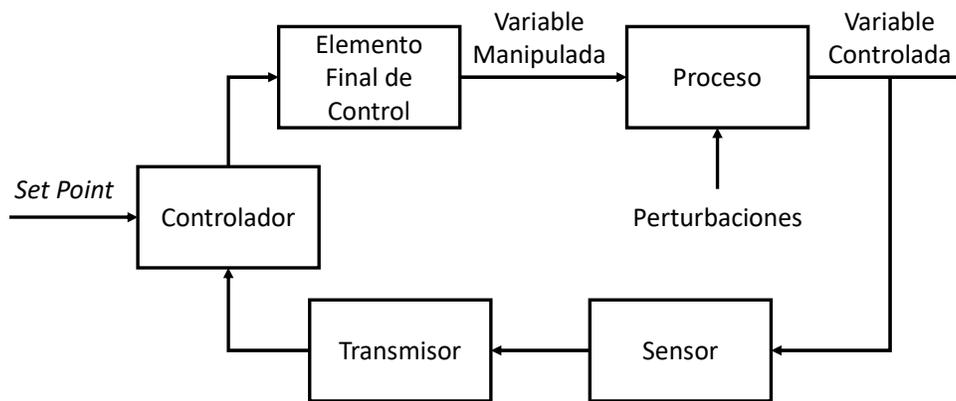


Figura 2.2: Lazo retroalimentado de control regulatorio básico [9].

Dentro de los principales elementos finales de control utilizados en plantas de procesos se encuentran las válvulas de control, estas se pueden clasificar en 2 según su función operativa [5, 6, 9]:

- **On/Off**: es aquella válvula de control que tiene solo dos posiciones: abierta y cerrada, es decir, solo pueden permitir o interrumpir el flujo.
- **Reguladora**: también conocidas como moduladoras, permiten aperturas intermedias para regular el caudal. Las válvulas de control reguladoras de flujo son las que requieren mayor atención al momento de seleccionarse y dimensionarse [9].

La Figura 2.3 muestra un lazo de control típico para regular el flujo en una línea de proceso, el controlador de válvula determina la apertura requerida para controlar el flujo y el actuador abre y cierra la válvula. Puesto que la función operativa de esta válvula es reguladora, existe un posicionador encargado de controlar la apertura, este tiene un lazo de control entre un sensor de posición y el actuador [9].

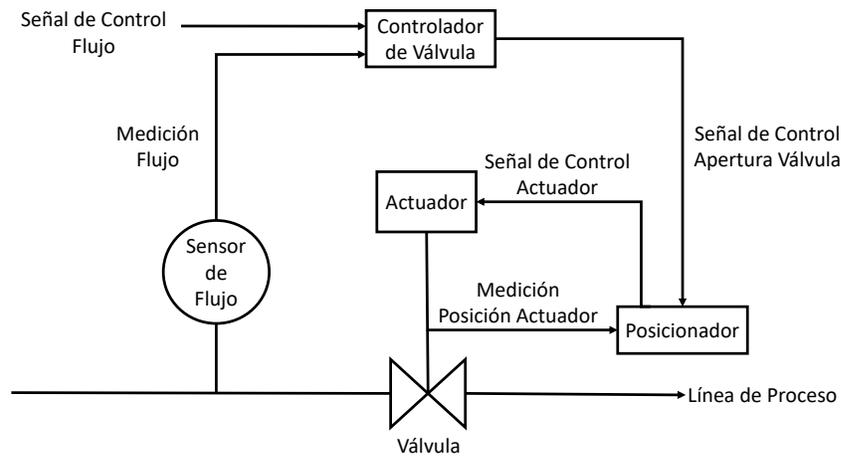


Figura 2.3: Lazo de control de flujo en una cañería y una válvula de control reguladora [5].

Todo lo mencionado anteriormente en esta sección de Control y Instrumentación, permite anticipar que el desempeño del lazo de la válvula de control se verá afectado por muchos factores, que se pueden clasificar en dos dimensiones:

- **Dimensión hidráulica:** que es el diseño particular de la válvula y su intervención en el caudal a nivel físico.
- **Dimensión de control:** que son las características de los componentes que forman el lazo de control y su comportamiento con respecto al sistema de control.

El comportamiento del lazo de control no es solo dictado por la válvula, sino que también influyen: el actuador, el posicionador, el controlador, el sensor de flujo y su transmisor. Si la elección de estos componentes no es realizada prudentemente es posible que la respuesta del lazo de control no permita cumplir con sus requerimientos o tenga efectos indeseados, por ejemplo, una gran banda muerta.

La banda muerta es el rango en el cual la señal de control puede ser invertida y cambiar de magnitud sin producir cambios en la variable de proceso controlada [5]. Este fenómeno es producto de múltiples causas, como la fricción y la holgura entre las piezas de la válvula, los límites (*wind-up*) y precisión de la señal de salida del actuador, la relación entre el porcentaje de apertura de la válvula y el caudal, entre otros. La banda muerta tiene efectos sobre los tiempos de respuesta, afectando directamente la controlabilidad del proceso [8].

La Figura 2.4 muestra los efectos de la banda muerta en la regulación de un proceso, donde se muestran 3 válvulas del mismo modelo y tamaño, pero en distintas condiciones de operación. La válvula A es más sensible y requiere perturbaciones más pequeñas para generar un impacto en el caudal, esto es porque tiene una banda muerta más pequeña. Las válvulas B y C tienen mayor banda muerta y se puede ver que necesitan escalones de mayor amplitud para poder generar cambios en el caudal.

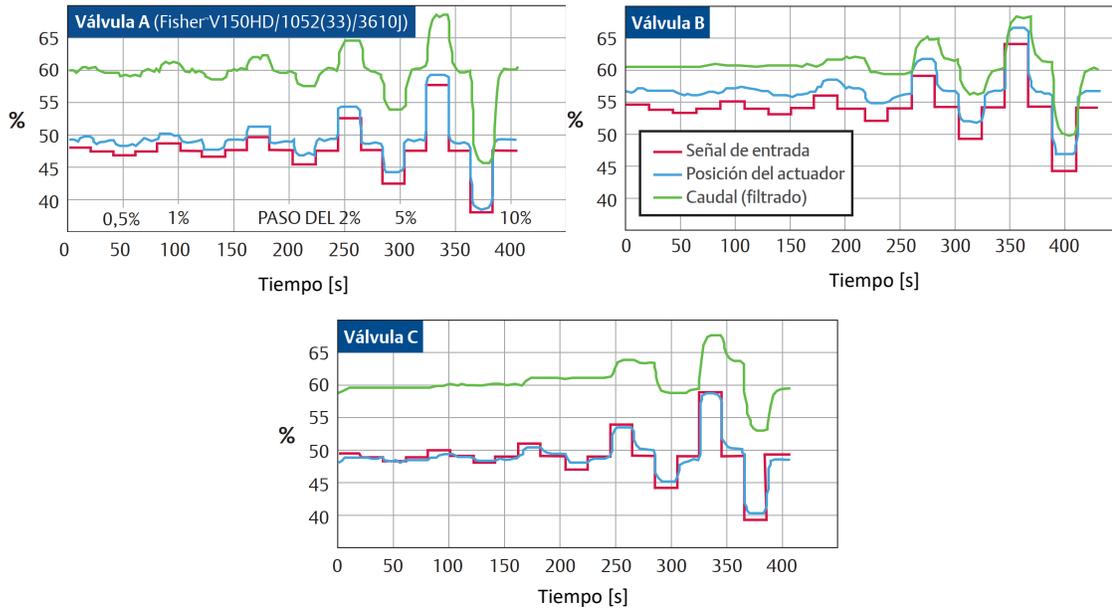


Figura 2.4: Válvulas de bola segmentada de 4" con asientos metálicos, actuadores de diafragma y posicionadores estándar, las cuales están en condiciones de proceso distintas [8].

Una manera efectiva de garantizar una banda muerta pequeña, tener mayor controlabilidad y facilitar la sintonización de los controladores en los lazos de control, es comenzar con una buena selección y dimensionamiento de la válvula. Principalmente, porque los efectos de una mala elección de válvula no siempre son corregibles a través de otros componentes como actuadores y/o controladores [5–8].

2.1.2. Definición de Válvula de Control

Según la Comisión Electrotécnica Internacional y la Sociedad Internacional de Automatización (respectivamente, IEC e ISA, por sus siglas en inglés), una válvula de control es un dispositivo accionado de forma no manual el cual modifica el flujo de un líquido o gas en un sistema de control de procesos. Se constituye a partir de una válvula conectada a un mecanismo, denominado actuador, capaz de cambiar la posición de un elemento de cierre en respuesta a una señal desde un sistema de control [10, 11]. En palabras más simples, una válvula se comporta como una restricción variable que define el caudal en una cañería [5]. Particularmente para válvulas de control, el caudal puede ser modificado sin un esfuerzo manual gracias a un actuador.

Las Figuras 2.5 y 2.6 ilustran los principales componentes y el montaje típico de un actuador neumático sobre una válvula respectivamente [5, 9–11]. A continuación, se describe el rol de los diferentes componentes de una válvula:

- **Cuerpo** (*Body*): es la principal barrera de la válvula con el exterior, además, es la estructura que encierra el obturador, soporta el actuador y las conexiones de la válvula a una cañería.
- **Elemento de Cierre u Obturador** (*Closure Member*): es la pieza móvil que se coloca en el camino del fluido para modificar el caudal a través de la válvula.

- **Asiento** (*Seat*): es la superficie sellante de la válvula que tiene contacto completo con el obturador cuando la válvula se encuentra completamente cerrada.
- **Internos** (*Trim*): corresponde al conjunto de componentes internos de la válvula que producen la modificación de flujo y están en contacto directo con el fluido. Usualmente, los internos corresponden al conjunto del elemento de cierre y el asiento, sin embargo, puede incluir otras partes dependiendo del tipo y modelo de cada válvula en particular.
- **Vástago o Eje** (*Stem* o *Shaft*): es un componente que conecta el actuador con el elemento de cierre. Si el elemento de cierre tiene movimiento rotatorio se llama eje o *shaft*.
- **Bonete o Tapa** (*Bonnet*): es la pieza que cierra la apertura en el cuerpo por donde atraviesa el vástago o eje que conecta el obturador con el actuador.
- **Actuador** (*Actuator*): es el componente encargado de transformar una señal de control en movimiento del elemento de cierre. Los actuadores pueden contar con mecanismos neumáticos, hidráulicos y/o eléctricos. De acuerdo al estándar IEC 60534-1:2023, los actuadores tienen 3 partes:
 - **Power Unit**: transforma la energía eléctrica, mecánica, etc., en movimiento del vástago del actuador. Por ejemplo, en la Figura 2.6 corresponde al conjunto entre el diafragma, el resorte y la fuente de presión neumática que se encuentre conectada a la entrada de aire.
 - **Yugo** (*Yoke*): corresponde a la estructura que fija la *power unit* del actuador a la válvula.
 - **Vástago** (*Stem*): es la pieza del actuador que transmite el movimiento de la *power unit* al vástago o eje de la válvula.

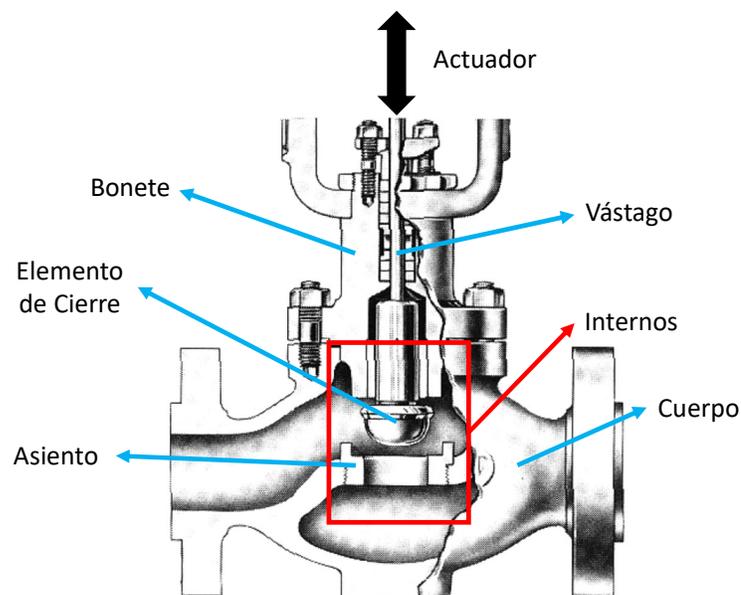


Figura 2.5: Partes principales de una válvula de globo típica [5].

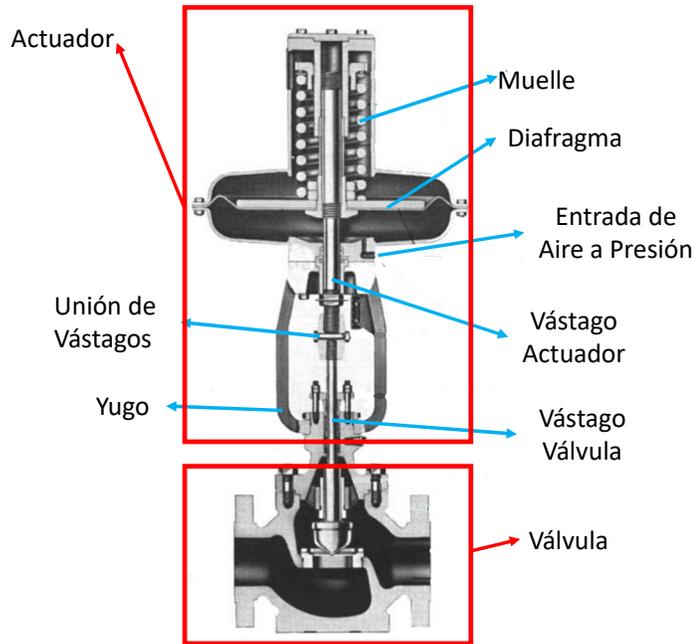


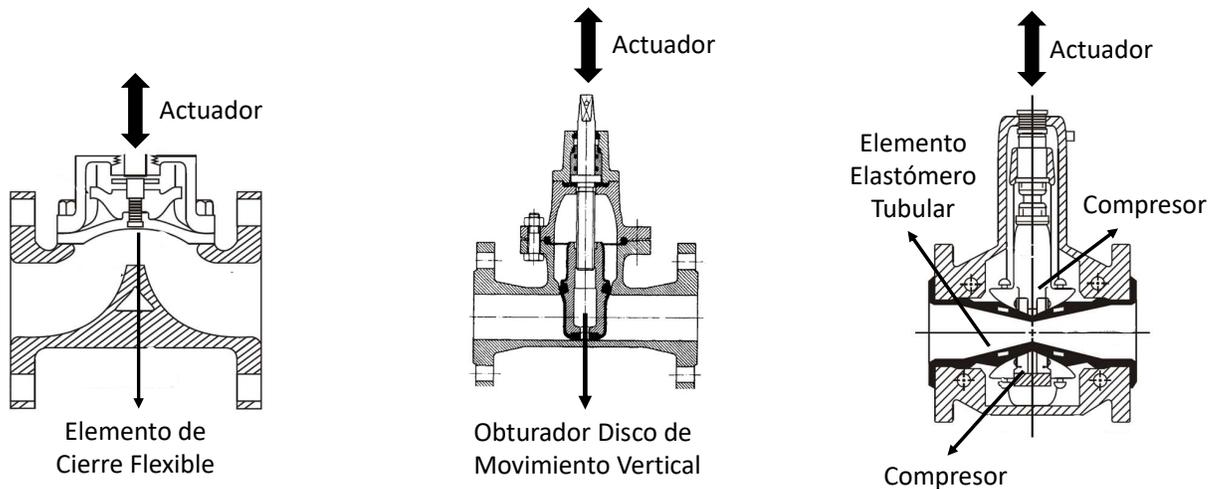
Figura 2.6: Montaje típico de un actuador neumático sobre una válvula de globo [6].

El uso de válvulas de control es requerido en una gran variedad de fluidos y condiciones de operación, por lo tanto existe una incontable oferta de tipos de válvulas, opciones de modificación, variaciones de geometría, etc. De todas formas, los estándares y la literatura establecen una clasificación de válvulas en base al cuerpo y el elemento de cierre de la válvula [5, 6, 9–11].

Las válvulas de control se dividen en dos grandes grupos según el movimiento del elemento de cierre. Luego, según la geometría del cuerpo y el obturador se establecen los siguientes tipos de válvula:

- **Válvulas de movimiento lineal:** el movimiento del elemento de cierre es lineal.
 - Diafragma (*Diaphragm*): un elemento de cierre flexible separa al actuador del fluido y actúa como sello del fluido con la atmósfera (Figura 2.7.a).
 - Compuerta (*Gate*): el obturador se desplaza de forma paralela al plano del asiento de la válvula (Figura 2.7.b).
 - Globo (*Globe*): el elemento de cierre se desplaza de forma perpendicular al plano del asiento de la válvula (Figura 2.5).
 - *Pinch*: un elemento elastómero tubular cuya cerradura y modulación se produce apretando mecánicamente las paredes de un elemento elastómero (Figura 2.7.c). De acuerdo a la IEC, este tipo de válvula es una variante de la válvula de control de diafragma, sin embargo, la ISA lo considera un tipo distinto [11].
- **Válvulas de movimiento rotativo:** el obturador tiene un movimiento rotatorio.
 - Bola (*Ball*): el elemento de cierre es una esfera con un pasaje interno y el centro de la superficie de la esfera es coincidente con el eje de rotación (Figura 2.8.a).

- Bola Segmentada (*Segmented Ball*): el elemento de cierre es un segmento de superficie esférica donde el centro de la superficie es coincidente con el eje de rotación. Los estándares ISA lo consideran una variante de la válvula de control tipo bola, sin embargo, los estándares IEC lo clasifican como uno diferente [10].
- Mariposa (*Butterfly*): es una válvula de cuerpo circular donde el elemento de cierre es un disco pivotado en su eje, este eje puede ser centrado o con un *offset* (Figura 2.8.b).
- *Plug*: tiene la misma estructura que una válvula de bola, pero su obturador tiene forma cilíndrica o cónica con un pasaje interno.
- Rotatoria Excéntrica (*Excentric Plug*): tiene un elemento de cierre que rota excéntricamente pudiendo ser un segmento esférico, cilíndrico o cónico (Figura 2.8.c).

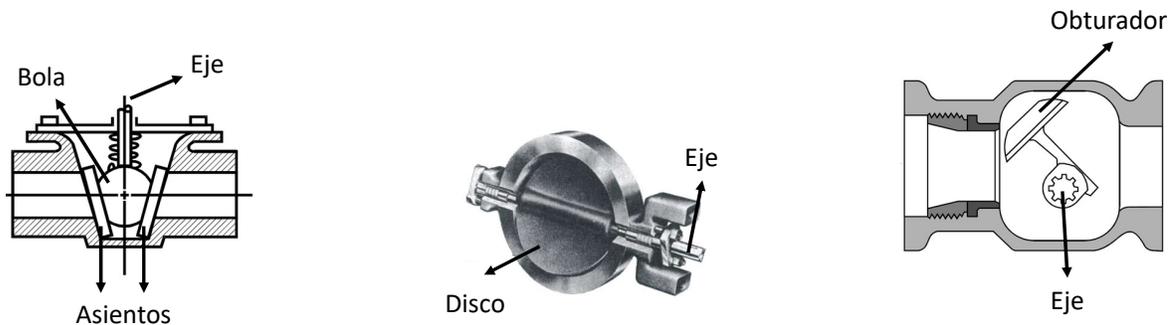


(a) Diagrama de una válvula de diafragma con cuerpo tipo *weir* [11].

(b) Diagrama de una válvula de compuerta tipo *wedge* sin cavidad en el fondo [12].

(c) Diagrama de una válvula *pinch*, los dos compresores presionan el tubo elastómero [11].

Figura 2.7: Ejemplos de válvulas de movimiento lineal.



(a) Diagrama de una válvula de bola [5].

(b) Ilustración de una válvula mariposa típica [11].

(c) Diagrama de una válvula rotatoria excéntrica de sector esférico [5].

Figura 2.8: Ejemplos de válvulas de movimiento rotativo.

2.1.3. Principio de Bernoulli

Un fluido es un material comúnmente conocido bajo la idea de que toma la forma del recipiente que lo contiene. Los fluidos pueden clasificarse en compresibles e incompresibles, para estos últimos la variación de su densidad es mínima incluso cuando se someten a presiones extremas, es decir, que su volumen se conserva.

El principio de Bernoulli es una ecuación que modela el comportamiento del flujo incompresible en una tubería ideal y es la base de la dinámica de fluidos, este principio proviene de la suma de la energía cinética, potencial gravitatoria y la energía de la presión que somete al fluido. La suma de la total energía se mantiene constante a lo largo de la cañería.

La Ecuación 2.1 es la fórmula de Bernoulli para flujo incompresible en una sección de cañería, donde P_{tot} es la presión total, P es la presión a la cual se somete el fluido, ρ y v son su densidad y velocidad respectivamente, z es la altura de la tubería con respecto a una referencia (e.g. altura sobre el nivel del mar) y g es la constante de aceleración de gravedad. Si la tubería es ideal la presión total se conservará a lo largo de su recorrido [13].

$$\rho \frac{v^2}{2} + P + \rho g z = P_{tot} \quad (2.1)$$

El peso específico del fluido (γ) es el peso del fluido dividido en el volumen y es posible calcularlo multiplicando la densidad por la aceleración de gravedad ($\gamma = \rho g$). Si se reemplaza el peso específico en la Ecuación 2.1 se obtiene la expresión de la Ecuación 2.2.

$$\rho \frac{v^2}{2} + P + \gamma z = P_{tot} \quad (2.2)$$

A partir de la Ecuación 2.2, se pueden hacer las siguientes definiciones [13]:

- **Presión Estática** (p_{stat}): es la presión sobre el fluido que no depende de su velocidad (Ecuación 2.3)

$$p_{stat} = P + \gamma z \quad (2.3)$$

- **Presión Dinámica** (p_{dyn}): es la presión generada por el movimiento del fluido (Ecuación 2.4).

$$p_{dyn} = \rho \frac{v^2}{2} \quad (2.4)$$

- **Presión Total** (p_{tot}): corresponde a la suma de la presión estática y presión dinámica (Ecuación 2.5).

$$p_{tot} = p_{stat} + p_{dyn} \quad (2.5)$$

- **Presión de Estancamiento** (p_{stag}): en inglés se conoce como *Stagnate Pressure*. Corresponde a la presión total si el fluido tuviese velocidad 0. Para fluidos incompresibles en cañerías esta presión es igual a la presión total (Ecuación 2.6) [14].

$$p_{stag} = p_{tot} = p_{stat} + p_{dyn} \quad (2.6)$$

Para medir la presión dinámica y estática se requieren instrumentos distintos, los sensores de presión normalmente utilizados en las líneas de las plantas de procesos miden presión estática. Por otro lado, la presión dinámica se puede medir con instrumentos tipo *pitot*.

El valor numérico de la magnitud de la presión varía según la referencia que se utilice en la medición. A continuación, se definen las siguientes dos presiones dependiendo de la referencia utilizada [13]:

- **Presión Manométrica** (p_{gauge}): también conocida como *gauge*. Corresponde a la presión con la presión atmosférica (p_{atm}) como referencia. Para efectos prácticos, es la presión que muestra un manómetro en una línea de proceso. La presión manométrica se denota con la unidad de presión seguida con la letra G (e.g. barG, psig, kPa.g).
- **Presión Absoluta** (p_{abs}): es la presión cuando la referencia es la presión del vacío absoluto. Usualmente se denota con la unidad de presión sola, seguida con “abs” o la letra A (e.g. psi, bara, Pa.abs).

La presión manométrica y absoluta se relacionan a través de la Ecuación 2.7.

$$p_{abs} = p_{atm} + p_{gauge} \quad (2.7)$$

La Figura 2.9 en su parte superior, muestra la sección lateral de una tubería con una restricción, el diagrama de la parte inferior muestra la presión estática y la velocidad del fluido a lo largo de la restricción. El principio de Bernoulli de la Ecuación 2.2 señala que mientras más pequeño sea el diámetro de la cañería más rápida será la velocidad del fluido.

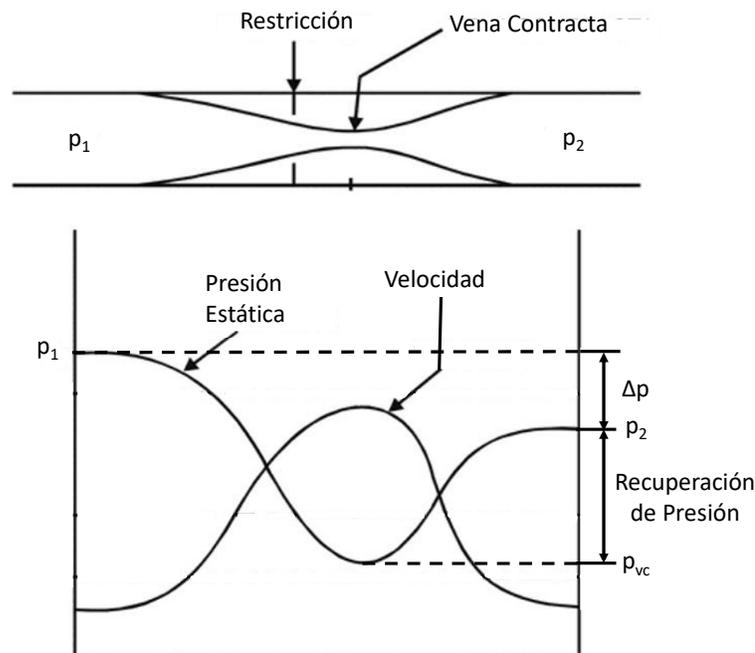


Figura 2.9: Presión y velocidad de un fluido a través de una restricción en una cañería, el flujo va en dirección de p_1 a p_2 [5].

Conforme se reduce el diámetro de una cañería, la presión dinámica aumenta, mientras la presión estática baja. Se define como *vena contracta* como la posición a lo largo de la cañería donde la velocidad del fluido es máxima y la presión estática es mínima [13].

En el mundo real las cañerías no son ideales, esto se traduce en que la presión estática a la entrada (p_1) es más alta que en la salida (p_2). Esta disminución de presión estática se conoce como diferencial, caída, pérdida de presión y en muchas ocasiones se denota Δp . La presión estática en la *vena contracta* (p_{vc}) es más baja que p_2 y la diferencia entre ambas se conoce como recuperación de presión (Figura 2.9) [6, 13, 14].

2.1.4. Propiedades de Fluidos

Dentro de las innumerables propiedades cuantificables que tiene un fluido, existen algunas que son particularmente importantes para las válvulas de control:

- **Densidad**(ρ): es la masa de un fluido por unidad de volumen. Si se normaliza la densidad del fluido a la densidad del agua se conoce como gravedad específica o densidad relativa.
- **Viscosidad**(μ): en palabras simples, cuantifica que tan fácil es para un fluido “fluir”, donde a mayor viscosidad, mayor es la dificultad para fluir. Dependiendo de la aplicación, se cuantifica de dos formas [13]:
 - *Viscosidad o Viscosidad Dinámica* (μ): es la viscosidad cuantificada en unidades de presión por tiempo (e.g $Pa \cdot s$).
 - *Viscosidad Cinemática* ($\nu = \mu/\rho$): es la viscosidad dinámica normalizada por la densidad del fluido. Las unidades quedan en unidades de distancia al cuadrado dividido en tiempo (e.g. m^2/s). Este tipo de viscosidad es la preferida para trabajar en dinámica de fluidos, dado que simplifica los cálculos [13].
- **Presión de Vapor**: en el vacío, todo fluido en estado líquido independientemente de su temperatura tendrá una nube de moléculas en estado gaseoso en su superficie, la presión de esta nube es conocida como presión de vapor. Esta última depende principalmente de la temperatura del fluido, de tal forma que a mayor temperatura, más alta será la presión de vapor. Si un fluido es sometido a una presión inferior a la presión de vapor, este empezará a evaporarse [13].

Por ejemplo, la presión de vapor del agua a $100^\circ C$ es de 1,013 bar, pero a $30^\circ C$ son 0,04 bar, es decir, si el agua alcanza $100^\circ C$ se requiere que sea sometida a una presión mayor a la presión atmosférica a nivel del mar para mantenerse en estado líquido, pero cuando está a $30^\circ C$ la presión atmosférica es más que suficiente para lograr mantener el agua en estado líquido [15].

- **Presión Crítica**: en el contexto del trabajo de título, se denomina presión crítica a la presión termodinámica crítica absoluta. Para efectos prácticos, puede definirse como la máxima presión de vapor de un fluido. Si un fluido se somete a una presión superior se tiene que el estado gaseoso y el estado líquido tienen la misma densidad.

La presión crítica se caracteriza por ser relativamente alta, por ejemplo, la presión crítica del agua es 220,05 bar [16, 17].

2.1.5. Cavitación y *Flashing*

Si un fluido en estado líquido se somete a presiones inferiores a la presión de vapor, se forman cavidades llenas de vapor, más conocidas como burbujas, que se desplazan dentro del líquido. Cuando estas burbujas llegan a zonas de mayor presión, implosionan generando ondas de presión que viajan a velocidades cercanas a la del sonido, las cuales se disipan en el fluido o en las paredes del recipiente. Estas implosiones pueden llegar a dañar la superficie del contenedor del fluido si no es lo suficientemente resistente. [5, 6, 8, 9, 13].

En la Figura 2.10 se indican 3 presiones de vapor distintas p_{v1} , p_{v2} y p_{v3} , distinguiendo tres casos: no hay cavitación, hay cavitación y *flashing*.

- **No hay cavitación:** la presión en la entrada, *vena contracta* y salida son mayores a la presión de vapor p_{v3} . Esta corresponde a la condición de operación óptima.
- **Hay cavitación:** solo la presión en la *vena contracta* es inferior a la presión de vapor p_{v2} . Luego, habrá cavitación dentro de la válvula, esto aumentará el desgaste de la válvula y por lo tanto disminuye su vida útil.
- **Flashing:** la presión en la *vena contracta* y la salida están por debajo de la presión de vapor p_{v1} . Esto quiere decir que la cavitación no solo está confinada a la válvula, sino que también al resto de la cañería, causando daños a la válvula y la tubería en la salida.

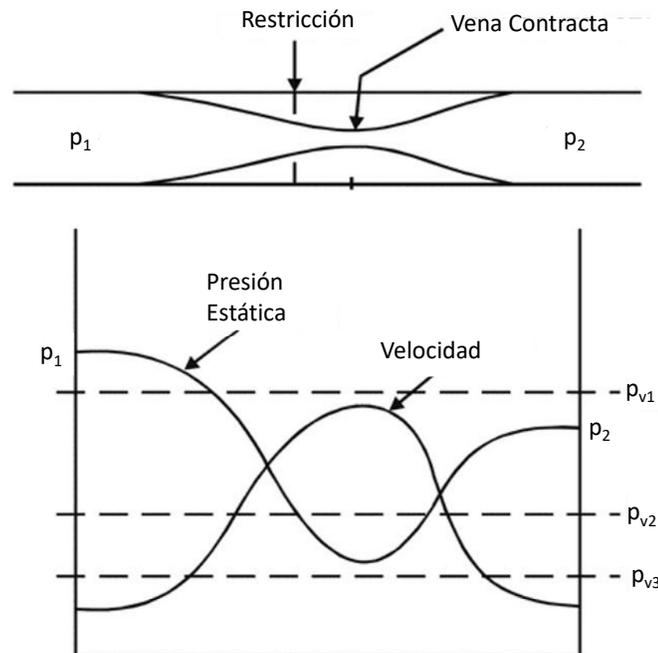


Figura 2.10: Presión estática y velocidad de un fluido a través de una restricción en una cañería comparada con tres presiones de vapor distintas p_{v1} , p_{v2} y p_{v3} . El flujo va en dirección de p_1 a p_2 [5].

Si bien las condiciones óptimas de operación son cuando una válvula no presenta cavitaciones, es posible operar con cavitación o *flashing* presentes. Dependiendo del caso, es posible colocar elementos al interior de la válvula que mejoren la recuperación o materiales más resistentes [5, 13]. La Figura 2.11 ilustra el daño que puede sufrir el obturador de una válvula si las condiciones de cavitación y *flashing* no son consideradas adecuadamente.



Figura 2.11: A la derecha se muestra un obturador nuevo, a la izquierda otro idéntico, pero luego de haber sido sometido a condiciones de *flashing* [18].

2.2. Modelo Fundamental de Flujo Incompresible

Los estándares IEC 60534-2-1:2011 y ANSI/ISA 75.01.01-2012 establecen el Modelo Fundamental de Flujo Incompresible a través de una válvula de control, este modelo consiste en la expresión de la Ecuación 2.8 [19, 20].

$$Q = CN_1 F_P \sqrt{\frac{\Delta p_{sizing}}{\rho_1 / \rho_0}} \quad (2.8)$$

En la Ecuación 2.8, Q es el flujo volumétrico, C es el coeficiente de flujo, N_1 es una constante de proporcionalidad que cambia según las unidades empleadas en las variables, Δp_{sizing} es el diferencial de presión para realizar los cálculos de dimensionamiento, ρ_1 es la densidad de fluido que está pasando a través de la válvula, ρ_0 es la densidad del agua a 15 °C y F_P corresponde al factor de corrección por geometría de cañerías.

2.2.1. Gravedad Específica (ρ_1 / ρ_0)

La gravedad específica, también conocida como densidad relativa, es la densidad del fluido normalizada por la densidad del agua. Por definición de los estándares IEC e ISA, la gravedad específica es 1 cuando el fluido a través de la válvula es agua a 15 °C o 60 °F [19, 20].

Para efectos de cálculo, el estándar IEC 60534-1:2013 indica que el valor de la densidad del agua a 15 °C o 60 °F puede considerarse 1000 kg/m³ o 62,42 lb/ft³ [10].

2.2.2. Coeficiente de Flujo (C , C_v o K_v)

El coeficiente de flujo C es un valor que cuantifica el volumen de fluido que pasará a través de una válvula que se somete a una diferencia de presión. El término N_1 de las Ecuaciones 2.8 y 2.9 es la constante de proporcionalidad que permite calcular el coeficiente de flujo en sus dos variantes: imperial (C_v) y métrica (K_v) [19, 20].

Para las válvulas de control, la industria solamente utiliza K_v o C_v para las hojas de datos, realizar cálculos, compras, etc., por lo tanto, siempre es necesario indicar que variante se está utilizando. El coeficiente de flujo C es una generalización que utiliza los estándares IEC e ISA para facilitar el planteamiento de los modelos y fórmulas que deben ser empleados. A continuación, se muestra el significado de C_v y K_v :

- C_v : es la cantidad de galones estadounidenses de agua a 60°F por minuto que pasarán por la válvula con una diferencia de presión de un psi.
- K_v : es la cantidad de metros cúbicos de agua a 15°C por hora que pasarán por la válvula con una diferencia de presión de un bar.

La Tabla 2.1 contiene el tipo de coeficiente de flujo C_v o K_v que se obtiene según el valor de N_1 y las unidades de presión y caudal utilizadas. De todas formas, el estándar ANSI/ISA 75.01.01-2012 plantea que el coeficiente de flujo puede obtenerse con la Ecuación 2.9 y que la relación directa entre C_v y K_v viene dada por la Ecuación 2.10.

$$C = \frac{Q}{N_1 F_P} \sqrt{\frac{\rho_1/\rho_0}{\Delta p_{sizing}}} \quad (2.9)$$

$$K_v = 0,865 C_v \quad (2.10)$$

Tabla 2.1: Tipo de coeficiente de flujo, según unidades empleadas y valor de N_1 [19, 20].

Unidades		N_1	Coeficiente de Flujo C
Presión Δp_{sizing}	Caudal Q		
bar	m^3/h	1	K_v
bar	m^3/h	0,865	C_v
psi	$US\ gpm$	1	C_v

2.2.3. Diferencial de Presión para Cálculos de Dimensionamiento (Δp_{sizing})

Como se mencionó en la Sección 2.1.3, si el diferencial de presión es lo suficientemente grande, existe un punto donde la presión en la vena contracta será menor a la presión de vapor del fluido. Esta situación puede producir condiciones de cavitación o *flashing* según corresponda.

Cuando una válvula opera bajo condiciones de cavitación o *flashing*, el vapor generado restringe el paso del líquido. En estas situaciones, el caudal deja de ser proporcional a la raíz del diferencial de presión y el aumento de caudal es cada vez menor conforme crece Δp . Si el diferencial de presión es suficientemente grande, el flujo no aumentará aunque la presión sea incrementada, esta situación se conoce como flujo “obstruido” [5, 6, 8, 9]. A continuación, se definen las presiones para modelar esta situación:

- p_1 : es la presión estática y absoluta a la entrada de la válvula, medida 2 diámetros nominales de cañería aguas arriba de la válvula con todos sus adaptadores. (Ver toma de medición de presión A de la Figura 2.12).
- p_2 : es la presión estática y absoluta a la salida de la válvula, medida 6 diámetros nominales de cañería aguas abajo de la válvula con todos sus adaptadores. (Ver toma de medición de presión B de la Figura 2.12).
- Δp : es el diferencial de presión al cual se somete realmente la válvula y se calcula mediante la expresión de la Ecuación 2.11.

$$\Delta p = p_1 - p_2 \quad (2.11)$$

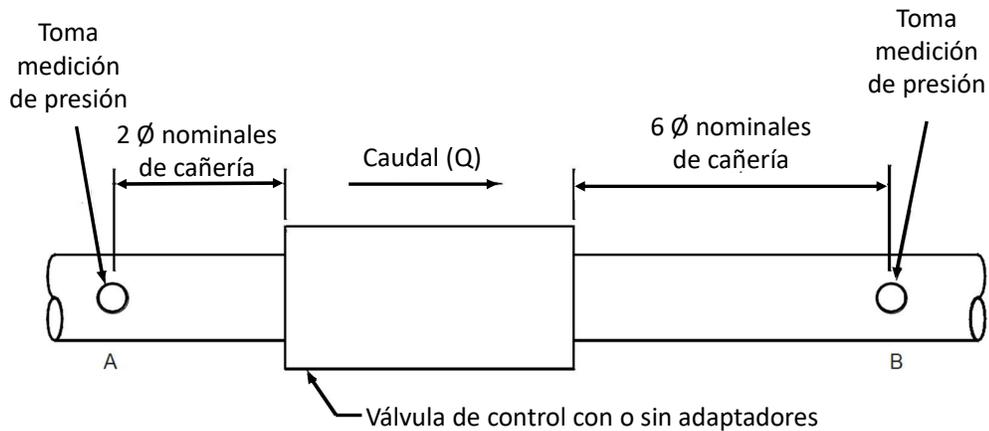


Figura 2.12: Diagrama de una válvula de control con o sin adaptadores instalada en una cañería. El diagrama indica donde deben tomarse las mediciones de presión estática requeridas por el Modelo Fundamental para Flujo Incompresible [19, 20].

- Δp_{choked} : es el diferencial de presión a partir del cual se considera flujo obstruido. Su valor se puede aproximar con la expresión de la Ecuación 2.12, donde p_v es la presión de vapor, F_L es el factor de recuperación de presión líquida de la válvula sin adaptadores y F_F es el factor de razón de presión crítica [19, 20].

$$\Delta p_{choked} = F_L^2 (p_1 - F_F p_v) \quad (2.12)$$

- Δp_{sizing} es el diferencial que se debe usar para computar el flujo según el modelo de los estándares IEC 60534-2-1:2011 y ANSI/ISA 75.01.01-2012 (Ecuación 2.13) [19, 20].

$$\Delta p_{sizing} = \begin{cases} \Delta p & \text{si } \Delta p < \Delta p_{choked} \\ \Delta p_{choked} & \text{si } \Delta p \geq \Delta p_{choked} \end{cases} \quad (2.13)$$

La estimación del flujo ahogado (Ecuación 2.12) requiere conocer los factores F_L y F_F , a continuación se muestran sus significados [19, 20]:

- F_L : es el factor de recuperación de presión líquida de la válvula sin adaptadores, este relaciona Δp y la presión en la vena contracta (Ecuación 2.14) [21]. Su valor se obtiene de forma experimental y puede ser especificado por el fabricante. Su magnitud oscila entre 1 y 0,3, mientras más bajo es su valor más grande es la recuperación, aumentando la posibilidad de experimentar flujo ahogado [6].

$$F_L = \sqrt{\frac{p_1 - p_2}{p_1 - p_{vc}}} \quad (2.14)$$

- F_F : es el factor de razón de presión crítica, este relaciona la presión de vapor y la presión crítica (p_c). Su valor para fluidos de un solo componente se puede obtener mediante la expresión de la Ecuación 2.15. Este factor oscila entre 0,96 y 0,68, mientras más bajo sea más probable será el flujo ahogado.

$$F_F = 0,96 - 0,28 \sqrt{\frac{p_v}{p_c}} \quad (2.15)$$

La Figura 2.13 muestra la diferencia entre el modelo de flujo de la Ecuación 2.8 y el comportamiento real del flujo en una válvula. Es importante notar que el coeficiente de flujo corresponde a la pendiente del flujo en función de la raíz cuadrada de Δp cuando no hay cavitación.

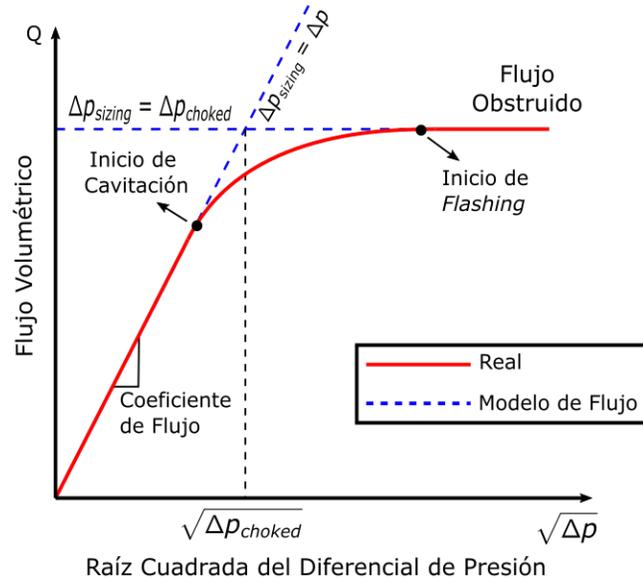


Figura 2.13: Comparación del Modelo Fundamental de Flujo Incompresible y el flujo real, para un coeficiente de flujo determinado en función de la raíz cuadrada del diferencial de presión [21].

2.2.4. Factor de Corrección por Geometría de Cañerías (F_P)

En algunas ocasiones, ya sea por razones de espacio o tamaño, las válvulas de control deben ser instaladas con adaptadores entre las conexiones de la válvula y la cañería. Estos adaptadores generan pérdidas de presión adicionales, caracterizadas a través de la pérdida de cabezal hidráulico ζ [13, 19, 20]. A continuación, se definen las siguientes pérdidas:

- ζ_1 es la pérdida de cabezal hidráulico de los adaptadores aguas arriba de la válvula.
- ζ_2 es la pérdida de cabezal hidráulico de los adaptadores aguas abajo de la válvula.
- ζ_{B1} es el coeficiente de Bernoulli de la entrada de la válvula. Si se define d como el diámetro nominal de la válvula y D_1 como el diámetro interno de la cañería aguas arriba de la válvula, ζ_{B1} se calcula con la expresión de la Ecuación 2.16.

$$\zeta_{B1} = 1 - \left(\frac{d}{D_1}\right)^4 \quad (2.16)$$

- ζ_{B2} es el coeficiente de Bernoulli de la salida de la válvula. Análogamente, si se define D_2 como el diámetro interno de la cañería aguas abajo, ζ_{B2} se calcula con la expresión de la Ecuación 2.17.

$$\zeta_{B2} = 1 - \left(\frac{d}{D_2}\right)^4 \quad (2.17)$$

- $\sum \zeta$ son las pérdidas totales de los adaptadores y se calcula con la expresión de la Ecuación 2.18. Es importante destacar que si los diámetros internos de las cañerías aguas arriba y aguas abajo son iguales, se tiene que $\sum \zeta = \zeta_1 + \zeta_2$.

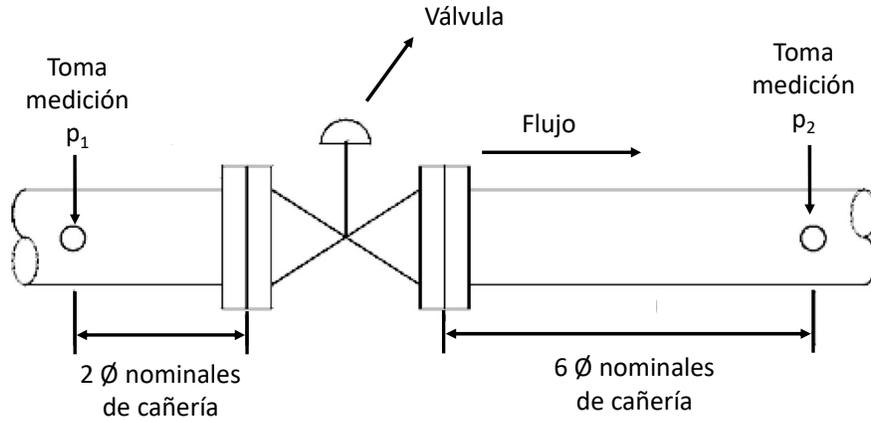
$$\sum \zeta = \zeta_1 + \zeta_2 + \zeta_{B1} - \zeta_{B2} \quad (2.18)$$

Si se trata de adaptadores reductores concéntricos típicos, los valores de ζ_1 y ζ_2 pueden ser aproximados mediante expresiones explicitadas en los estándares IEC 60534-2-1:2011 y ANSI/ISA 75.01.01-2012 [13, 19, 20].

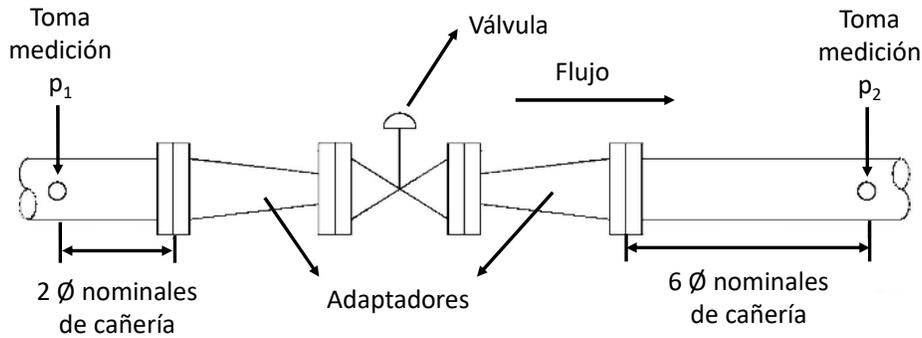
El valor F_P viene dictado por la Ecuación 2.19, donde N_2 es una constante de proporcionalidad que depende de las unidades del coeficiente de flujo y del diámetro nominal de la válvula (Tabla 2.2). Cabe destacar que si la válvula no tiene adaptadores se debe asumir que $F_P = 1$, por ejemplo, en el caso de la Figura 2.14.a.

En el caso que F_P sea distinto de uno (Figura 2.14.b), su valor estará entre 1 y 0,6. Si las pérdidas de cabezal hidráulico generadas por los adaptadores aumentan, el valor de F_P disminuye. Luego, dado un diferencial de presión y coeficiente de flujo iguales, una válvula con adaptadores producirá menos caudal que una sin adaptadores con el mismo diferencial de presión [13, 19, 20].

$$F_P = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\sum \zeta}{N_2} \left(\frac{C}{d^2}\right)^2}} \quad (2.19)$$



(a) Montaje típico de una válvula sin adaptadores [22].



(b) Montaje típico de una válvula con adaptadores, en este caso, el diámetro nominal de la válvula es menor al de la cañería [22].

Figura 2.14: Montajes típicos de válvulas de control en una cañería.

Naturalmente, los adaptadores inciden en el comportamiento frente al flujo obstruido, puesto que el comportamiento hidráulico de la válvula se ve afectado por los adaptadores. En primer lugar, se calcula el factor de recuperación de presión líquida y corrección por geometría de cañerías combinados (F_{LP}) mediante la Ecuación 2.20.

$$F_{LP} = \frac{F_L}{\sqrt{1 + \frac{F_L^2}{N_2} (\zeta_1 + \zeta_{B1}) \left(\frac{C}{d^5}\right)^2}} \quad (2.20)$$

Finalmente, se corrige el cálculo de Δp_{choked} para la válvula con adaptadores, el cual se calcula mediante la expresión de la Ecuación 2.21 [19–21].

$$\Delta p_{choked} = \left(\frac{F_{LP}}{F_P}\right)^2 (p_1 - F_F p_v) \quad (2.21)$$

Tabla 2.2: Valores de N_2 , según unidades empleadas para los diámetros y tipo de coeficiente de flujo [19, 20].

Coeficiente de Flujo C	Unidades	N_2
	Diámetros d, D	
K_v	<i>mm</i>	$1,60 \cdot 10^{-3}$
C_v	<i>inch</i>	$8,9 \cdot 10^2$

2.2.5. Factor de Corrección por Número de Reynolds (F_R)

En el caso que el fluido sea muy viscoso o el diferencial de presión es demasiado bajo para el flujo requerido, es posible que el flujo sea considerado no completamente turbulento. Para determinar esto último, se requiere calcular el número de Reynolds de la válvula (Re_v).

Para calcular el número de Reynolds se debe conocer el modificador de estilo de la válvula F_d , que es un factor que convierte la geometría real de los internos de la válvula a un equivalente de una sola tubería circular. Su valor se obtiene de forma experimental y puede ser especificado por el fabricante.

El valor del número de Reynolds (Re_v) de la válvula se obtiene mediante la Ecuación 2.22, donde N_4 es una constante de proporcionalidad cuyo valor depende de las unidades empleadas (Tabla 2.3).

$$Re_v = \frac{N_4 F_d Q}{\nu \sqrt{C F_L}} \left(\frac{F_L^2 C^2}{N_2 d^4} + 1 \right)^{1/4} \quad (2.22)$$

A partir del número de Reynolds de la válvula se pueden determinar diferentes regímenes de flujo:

1. **Flujo Completamente Turbulento:** cuando el número de Reynolds es superior a 10.000.
2. **Flujo de Transición:** el número de Reynolds está entre 10 y 10.000.
3. **Flujo Laminar:** el número de Reynolds es menor a 10.

En el caso que el número de Reynolds sea inferior a 10.000, el modelo de flujo debe ser corregido de acuerdo a la Ecuación 2.23, donde F_R es el factor de corrección por número de Reynolds. Nótese que el diferencial de presión empleado es Δp y no Δp_{sizing} . El cálculo del factor F_R se encuentra en el anexo A.

$$Q = \begin{cases} C N_1 F_P \sqrt{\frac{\Delta p_{sizing}}{\rho_1 / \rho_0}} & \text{si } Re_v \geq 10000 \\ C N_1 F_R \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho_1 / \rho_0}} & \text{si } Re_v < 10000 \end{cases} \quad (2.23)$$

Mientras más viscoso sea el fluido, más bajo será el número de Reynolds de la válvula, disminuyendo el valor del factor de corrección F_R , por lo tanto, el caudal será menor para un mismo coeficiente de flujo y diferencial de presión.

Tabla 2.3: Valor de la constante N_4 , según el tipo de coeficiente de flujo y unidades de flujo y viscosidad [19, 20].

Coeficiente de Flujo C	Unidades		N_4
	Flujo Q	Viscosidad ν	
K_v	m^3/h	m^2/s	$7,07 \cdot 10^{-2}$
C_v	$US\ gpm$	cSt	$1,73 \cdot 10^4$

2.3. Índice de Cavitación σ

El índice σ de la Ecuación 2.24 cuantifica el potencial de cavitación o *flashing*, mientras más bajo sea su valor más probable se vuelve la cavitación. El índice de la Ecuación se encuentra estandarizado a través del estándar ISA-RP75.23-1995 y se conoce como índice σ de proceso [23].

$$\sigma = \frac{p_1 - p_v}{p_1 - p_2} \quad (2.24)$$

Por otro lado, el índice σ es concordante con el indicador de razón de presión diferencial (x_F) de la IEC, el cual está dado por la Ecuación 2.25 [23–25].

$$x_F = \frac{1}{\sigma} = \frac{p_1 - p_2}{p_1 - p_v} \quad (2.25)$$

La Figura 2.15 muestra los 4 regímenes de operación posibles para una válvula según el nivel de ruido y vibraciones, donde los límites exactos de cada régimen dependen de la válvula y su apertura. Sin embargo, si $\sigma > 20$ es seguro asumir que no habrá cavitación independientemente de la válvula utilizada, mientras $\sigma < 1$ indica que la válvula operará en condiciones de *flashing* [23]. Existe mucha información que el fabricante puede especificar, pero se destacan dos límites:

- **Límite de cavitación recomendado por el fabricante (σ_{mr}):** es el límite de cavitación máximo donde una válvula no sufrirá daños. Este valor puede encontrarse en cualquier punto dentro de los regímenes II, III, IV e incluso cuando σ es menor a 1.
- **Cavitación incipiente (σ_i):** es el límite mínimo del régimen I sin cavitación, cabe destacar que este valor está asociado a la razón de presión diferencial específica de válvula del estándar IEC 60534-8-2:2011 (x_{F_z}) de la forma de la Ecuación 2.26 [23]. Además, el estándar IEC 60534-8-4:2015 entrega una expresión para calcular x_{F_z} a partir de F_L , F_d y C [25].

$$\sigma_i \approx \frac{1}{x_{F_z}} \quad (2.26)$$

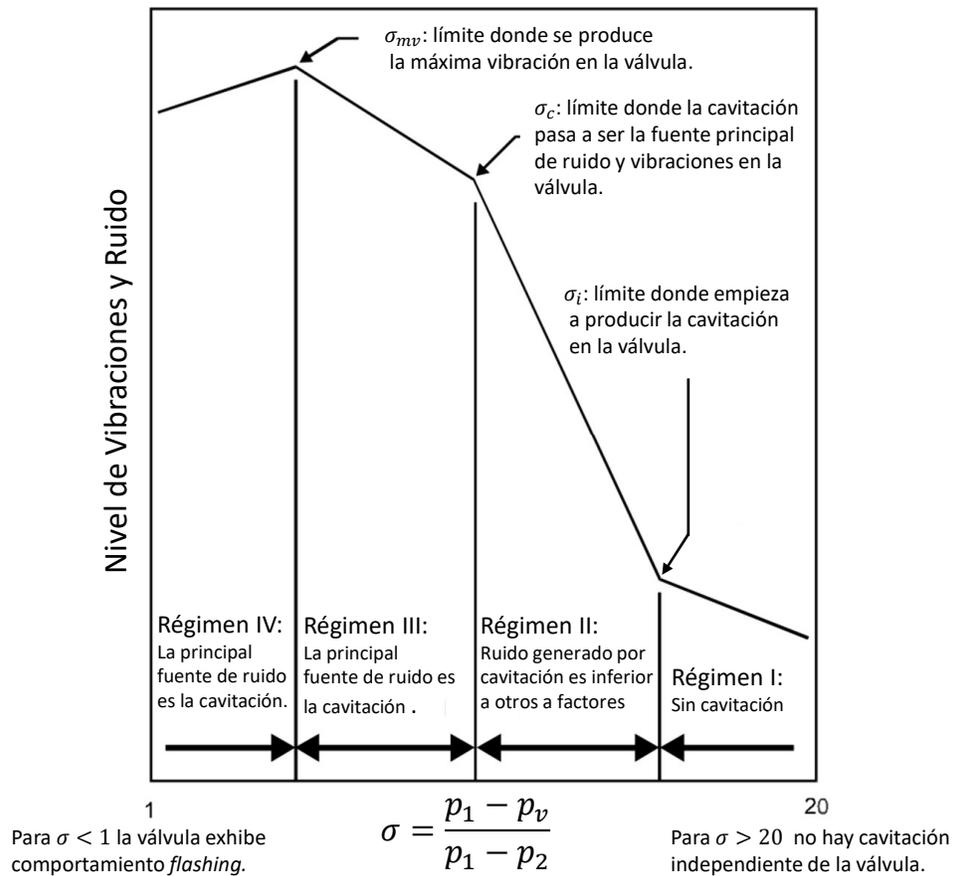


Figura 2.15: Gráfico ilustrativo del nivel de ruido y vibraciones en la válvula en función del índice σ , los límites no están dibujados a escala [23].

2.4. Niveles de Ruido

2.4.1. Nivel de Ruido Aceptable

La mayor causa de ruido para flujo incompresible corresponde a la cavitación [23, 24]. En la Sección 2.3, se plantea que existen válvulas que pueden trabajar con altos niveles de cavitación y ruido, esto significa que los niveles de ruido aceptables no son producto de una limitación técnica sino que existen por la seguridad de los trabajadores de la planta. En consecuencia, el nivel de ruido permitido varía según el tiempo de operación y legislación local de donde se encuentra la planta.

La Tabla 2.4, muestra los niveles de ruido ponderados para jornadas de 8 horas para tres legislaciones distintas. Es importante revisar las leyes locales dado que esto puede afectar en la decisión de si la válvula requiere aislación adicional o sobre la elección de la válvula misma. El valor exacto del nivel aceptable se verá afectado por la frecuencia de uso de una válvula, los métodos de cálculo y medición de ruido que establezca cada ley.

Tabla 2.4: Niveles de presión sonora continua equivalente máximos (dB(A)) para una jornada de 8 horas, según normativa [26–28].

Normativa	Nivel de Ruido Máximo
OSHA 1910.95 (EE.UU.)	90 dB(A)
Directiva 2003/10/EC (Europa)	87 dB(A)
Decreto 594, art 70 (Chile)	85dB(A)

2.4.2. Predicción de Ruido

El ruido es un factor influyente dentro de la evaluación de una válvula de control, principalmente por la seguridad de los trabajadores, dado que las normas de seguridad definen el máximo nivel de ruido permitido. Existen dos estándares importantes al momento de predecir el ruido que emitirá una válvula: IEC 60534-8-2:2011 que establece como se debe medir el ruido y IEC 60534-8-4:2015 estandariza el método de predicción de ruido. Este último estándar tiene las siguientes limitaciones [25]:

1. Solo es válido para flujo incompresible.
2. Solo está validado en válvulas de diámetros nominales de 15 a 300 mm y utilizando agua como fluido.
3. La predicción corresponde al nivel de ruido generado en la cañería 1 metro aguas abajo de la válvula y el oyente se encuentra a 1 metro de la cañería. Además, se asume que es un ambiente libre de otras fuentes de ruido.
4. La cañería aguas abajo se asume ideal y recta.
5. Tiene un error de $\pm 5 \text{ dB}(A)$

Frente a estas limitaciones, no se debe olvidar que el fin de esta predicción es referencial y no puede ser considerada exacta.

2.5. Curvas Características Inherente e Instalada

El coeficiente de flujo de una válvula no es una constante sino que varía según la apertura de la válvula, es precisamente este comportamiento lo que permite regular el caudal que pasa en una cañería. La relación entre la apertura y coeficiente de flujo se llama característica inherente, y se encuentra regulada por los estándares IEC 60534-2-4:2009 y ANSI/ISA-75.11.01-2013. [10, 11, 30, 31]. Además, los estándares definen los siguientes términos:

- **Carrera** (*Travel*): corresponde al desplazamiento del obturador desde la posición de cierre máximo.
- **Carrera Nominal** (*Rated Travel*): es el desplazamiento del obturador desde la posición de cierre hasta la posición de apertura máxima de la válvula, es decir, 100% abierta.
- **Carrera Relativa** (*h*): razón entre la carrera y la carrera nominal de la válvula. Para efectos prácticos, es la proporción de apertura en escala de 0 a 1.

- **Coeficiente de Flujo Nominal** (C_{rated} , $C_{v,rated}$ o $K_{v,rated}$): es el coeficiente de flujo a carrera nominal, también conocido como capacidad de la válvula dado que es el coeficiente de flujo máximo de la válvula.
- **Característica Inherente** (*Inherent Characteristic*): es la relación entre el caudal y la carrera de la válvula cuando la caída presión es constante para todas las aperturas. Por lo tanto, es equivalente a la curva de coeficiente de flujo de la válvula en función de la apertura.
- **Característica Instalada** (*Installed Characteristic*): es la relación entre el caudal y la apertura con presiones instaladas. La presión instalada es la presión en función del caudal del sistema donde se instalará la válvula.

Existen tres características inherentes típicas, la Figura 2.16 muestra estas características inherentes típicas para válvulas de control [30, 31].

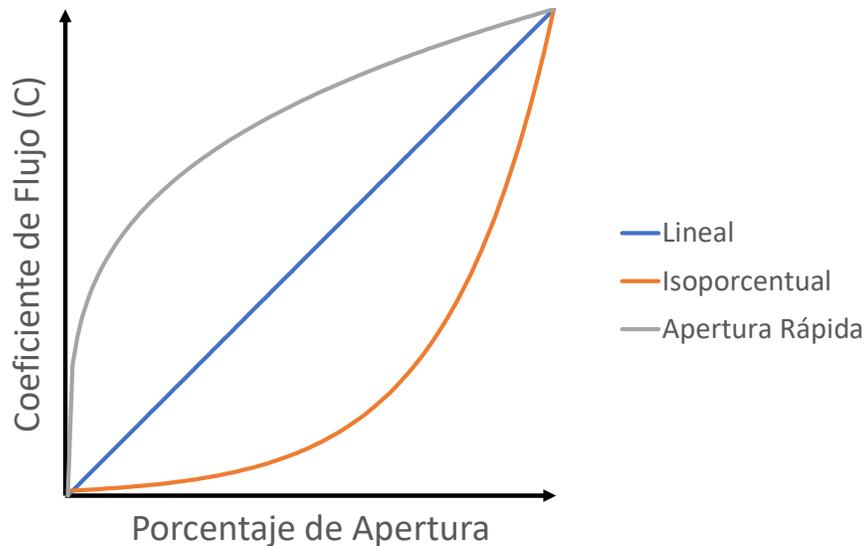


Figura 2.16: Características inherentes típicas para válvulas de control [5].

Los fabricantes pueden expresar la característica inherente de una válvula de 2 formas [30, 31]:

- **Gráfica:** esta forma consta de un gráfico del coeficiente de flujo en función de la apertura. También es posible encontrarlos en función del coeficiente de flujo normalizado por el cuadrado del diámetro nominal de la válvula.
- **Tabulada:** en este caso el fabricante muestra una tabla del coeficiente de flujo para 10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 50 %, 60 %, 70 %, 80 %, 90 % y 100 % de apertura.

Es importante destacar que no solo el valor del coeficiente de flujo cambia con la apertura, sino que también los valores F_L , F_d , σ_i , σ_c , σ_{mv} , σ_{mr} , xF_z varían con h . Estos valores pueden encontrarse presentados de la misma manera que los coeficientes de flujo, sin embargo, los fabricantes no siempre acostumbran publicar estos últimos parámetros para sus válvulas.

La curva característica instalada es la más importante de una válvula de control, dado que la evaluación del desempeño de la válvula en un sistema de cañerías se hace a partir de esta característica. Es deseable que esta curva sea lineal, ya que de esta manera el resto de los componentes del lazo de control asociados a la válvula también podrán ser lineales, en caso contrario, deberá compensarse por la no linealidad de la característica instalada [5–8].

La curva característica inherente permite obtener la curva característica instalada, siempre y cuando se conozcan las presiones instaladas, estas son las presiones que experimenta la válvula en el sitio donde será colocada. La Figura 2.17 contiene un ejemplo de como se comportan las pérdidas de presión a lo largo de un sistema de cañerías. En este sistema hay una bomba, un estanque, elementos fijos y una válvula de control. Los elementos fijos no pueden cambiar sus características hidráulicas y la bomba puede variar su presión pero no de forma significativa. Como indica la Figura mientras más bajo sea el flujo, mayor tiene que ser la pérdida de presión a través de la válvula, y mientras más alto sea el flujo, menor será la presión a través de la válvula [5, 6, 8, 32].

Como es posible inferir, las presiones a través de la válvula varían según el sistema de cañerías, dado que su valor exacto depende de la geometría y las presiones conocidas del sistema (Figura 2.17). Luego, la presión en función del flujo no depende de la válvula, esto significa que dos válvulas con diferentes características inherentes tendrán aperturas distintas bajo las mismas presiones instaladas [5, 32].

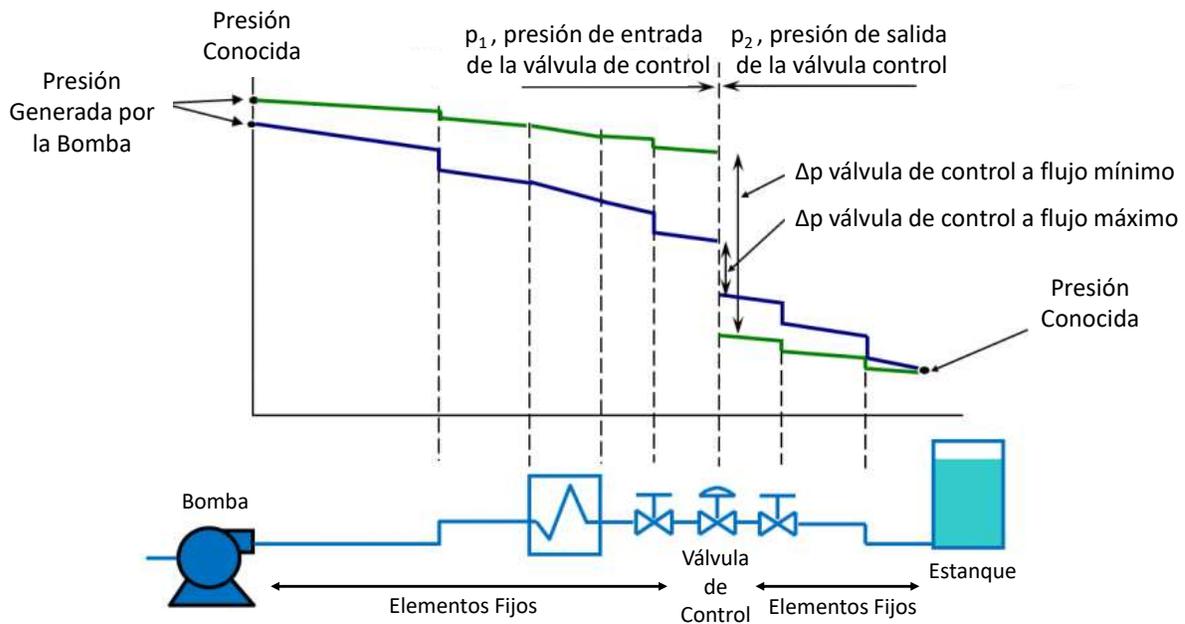


Figura 2.17: Pérdidas de presión a lo largo de un sistema de cañerías [32].

2.6. Lista de Estándares y Normas

Existen varios estándares y normas relacionados directamente con la selección de válvulas de control, de los cuales se presenta una lista no limitada a:

- IEC 60534-1:2023 y ANSI/ISA-75.05.01-2019, definen la terminología asociada a válvulas de control [10, 11].
- IEC 60534-2-1:2011 y ANSI/ISA-75.01.01-2012, establecen las ecuaciones de dimensionamiento bajo condiciones instaladas [19, 20].
- IEC 60534-2-3:2015 y ANSI/ISA-75.02.01-2008, indica los procedimientos de prueba de capacidad y obtención de los parámetros de las válvulas de control [22, 33].
- IEC 60534-2-4:2009 y ANSI/ISA-75.11.01-2013, regulan las características inherentes y los rangos de apertura para válvulas de control [30, 31].
- ISA-TR75.23-1995, es una recomendación técnica para la evaluación de cavitación en válvulas de control [23].
- IEC 60534-7:2010, ISA-20-1981 e ISA-20.00.03-2001, ofrecen modelos de hojas de datos y recomendaciones generales sobre la información mínima necesaria para especificar las características de una válvula de control y su servicio [34–36].
- IEC 60534-8-2:2011, establece el procedimiento con que debe medirse el ruido generado por flujo incompresible a través de una válvula de control [24].
- IEC 60534-8-4:2015, regula el método con que se realizan predicciones del ruido emitido por flujo incompresible a través de una válvula de control [25].
- Decreto 594, Art. 70, OSHA 1910.19, Directiva 2003/10/EC e ISO 1999:2013 son legislaciones y estándares que definen los niveles de ruido permitidos y los tiempos de exposición máximos para Chile, Estados Unidos y Europa respectivamente. [26–29].
- ISO 6708:1995, establece los diámetros nominales recomendados para sistemas de cañerías en unidades métricas [37].
- ASME B36.10-2022, ASME B36.19-2022, ASTM D1785-21a, ASTM D3035-22, establece los diámetros externos e internos de las cañerías según el grosor de las paredes dado un diámetro nominal (schedule) para varios materiales [38–41].
- ASME/ANSI B16.5-2020, define los límites de presión y temperatura, materiales, dimensiones de conexiones de cañerías con *flanges* [42].

2.7. Estado del Arte

2.7.1. Herramientas de Software Existentes

Dentro del mercado existen varias alternativas de software para dimensionar válvulas de control, estos programas logran simular con suficiente precisión el comportamiento de las válvulas dados ciertos datos de proceso. Algunos ejemplos son: Alpha-I, ValSize 10, Habonim Valve Sizer, Industrial Valve Sizing Software, Nelprof, donde estas herramientas, como muchas otras, si bien cumplen la labor de dimensionamiento de manera satisfactoria, son desarrolladas por fabricantes de válvulas, por lo tanto, solo puede modelar el comportamiento de las válvulas que el fabricante ofrece [43–47]. Además, esta situación tampoco facilita la posibilidad de comparar el desempeño de las válvulas en una misma plataforma, siendo esta la mayor complicación cuando se disponen de varias ofertas de válvulas realizadas por distintos proveedores.

Sin embargo, existe un programa denominado CONVAL desarrollado por FIRST Software, el cual es una herramienta en línea desarrollada por una institución que no es fabricante de válvulas y tienen una extensa base de datos con gran parte de las válvulas ofrecidas en el mercado [48]. Además, está pensada desde un punto de vista de empresas de ingeniería e ingeniería de control, sin embargo, esta herramienta es de pago y está pensada en la industria del petróleo y gas, por lo tanto ofrece al menos 25 módulos que permiten calcular no solo válvulas sino que también otros elementos. Sin embargo, los proyectos que la empresa Hatch emprende a través de su oficina en Santiago no podrían aprovechar el potencial que ofrecen estos 25 módulos.

Otra alternativa de software son los programas de simulación de fluidos como lo es *AFT Fathom* desarrollado por *Applied Flow Technology* [49]. Esta herramienta es usada actualmente por la empresa Hatch para hacer las memorias de cálculo asociadas a la disciplina de Cañerías. Este software permite que una curva de C_v en función de la apertura de la válvula sea ingresada por el usuario, mas no calcula esta curva. Y dado que es un programa especializado en fluidos incompresibles resulta difícil de aprender y enseñar a personas que se dedican principalmente al área de control y automatización, lo cual tampoco es óptimo.

2.7.2. Desarrollo de Herramientas y Sistemas Similares

El desarrollo de herramientas de software y procedimientos para selección de válvulas no es algo que pueda ser planteado como una idea nueva, ya que existen múltiples desarrollos que tratan de dar solución a este problema. Sin embargo, las alternativas encontradas presentan algunas limitaciones cuando se contrastan con los objetivos de este trabajo de título y los requerimientos de la empresa.

Cabe destacar un programa de software desarrollado por la Pontificia Universidad Bolivariana en Colombia [50]. Este software estima una curva característica instalada a partir de datos de proceso dados y ofrece una técnica para obtener parámetros relevantes al dimensionamiento de válvulas. Sin embargo, esta aplicación no toma en cuenta factores como el tipo de válvula o la ganancia instalada y sus cálculos son a partir de un flujo de operación. Por lo tanto, no puede obtener la característica instalada en sistemas especiales, por ejemplo, donde la bomba impulsora aguas arriba de la válvula mantenga la presión constante.

Existen propuestas de procedimientos de selección de válvulas, por ejemplo, una metodología para selección de válvulas de control para proyectos de optimización de utilización de agua, a partir de un caso de estudio de una mina subterránea [51]. En particular, la propuesta se limita solo a un fluido, es decir, no considera el impacto del tipo de fluido en la decisión al momento de seleccionar una válvula.

Existe otra metodología que considera distintos tipos de fluidos, incluso no limitándose a fluidos limpios, sino que se incluyen pulpas [52]. Sin embargo, esta metodología está enmarcada en la industria papelera, esto significa que no considera algunos tipos de válvulas, dado que por su naturaleza no son aptas para esta industria. Además, no considera algunas características de los fluidos usados en plantas de procesos asociadas a la minería.

Un desarrollo relevante, es la selección cognitiva de válvulas de cierre rápido, la cual plantea una estrategia de integración de inteligencia artificial al momento de seleccionar válvulas [53]. Sin embargo, son válvulas de cierre rápido, no siendo válvulas de control reguladoras, producto de esto se dejan fuera de los criterios de decisión varios elementos importantes para el control del proceso.

Capítulo 3

Procedimiento de Selección de Válvulas de Control Reguladoras

3.1. Obtención de Información

Disponer de la información necesaria es el primer requerimiento para tomar una buena decisión. En el caso de las válvulas de control reguladoras la obtención de información es una tarea amplia y compleja, ya que se requiere contar con información de múltiples naturalezas y requiere la revisión de una cantidad no menor de documentos. Por otro lado, se requiere que la persona encargada de la elección de las válvulas de control tenga la suficiente experiencia y conocimientos para asegurar que los datos sean válidos y congruentes entre sí, porque de lo contrario el funcionamiento del sistema de control completo podría verse comprometido.

3.1.1. Información Mínima Requerida

Según los estándares ANSI/ISA-75.01.01-2012 y IEC 60534-2-1:2011, se requiere un mínimo de valores numéricos para realizar el dimensionamiento. Sin embargo, la información requerida no se encuentra limitada a parámetros numéricos, sino que también a información cualitativa clasificable en los siguientes grupos [19, 20]:

- Información de servicio.
- Características del fluido.
- Información de la cañería.
- Datos para dimensionamiento.

Para obtener estos datos es requerido revisar múltiples documentos, además, no toda la información se encuentra en contenida en la disciplina de Control y Automatización, siendo requerido consultar documentos generados por otras disciplinas.

Los documentos más importantes son el Diagrama de Flujo de Proceso (PFD) y el Diagrama de Cañerías e Instrumentación (P&ID) [54]. Para encontrar el resto de información se puede utilizar el Criterio de Diseño de Cañerías, Listado de Líneas y la Memoria de Cálculo de Bombas correspondiente, todos estos documentos son desarrollados por la disciplina de Cañerías.

Con respecto a la Memoria de Cálculo de Bombas, la disciplina de Cañerías coloca en el anexo de estas memorias los resultados exportados directamente de *AFT Fathom*. El anexo B muestra una captura de un reporte de *AFT Fathom* y recuadros que destacan donde se encuentran los valores de interés.

La siguiente lista contiene entregables de ingeniería que la empresa Hatch acostumbra realizar en los proyectos, estos son utilizados para encontrar la información necesaria para seleccionar y dimensionar las válvulas de control:

- **Documentos mínimos requeridos:**

- PFD, P&ID, Listado de Líneas, Listado de Instrumentos.
- Criterio General de Diseño de Procesos, Criterio de Diseño de Cañerías.
- Memoria de Cálculo de Bombas para el sistema de cañerías asociado a la válvula.

- **Documentos Útiles:**

- Especificación Técnica de Materiales de Cañerías.
- Condiciones del Sitio.

3.1.2. Obtención de Datos

3.1.2.1. Información del Servicio

El servicio es el rol que cumple una válvula dentro de una planta, esta información usualmente se encuentra en el PFD con el nombre del fluido, su servicio dentro de la planta y la etiqueta del flujo en el diagrama. Si se revisa el P&ID, se puede extraer la información sobre la etiqueta de la cañería y de la válvula, donde la información buscada es:

- **Descripción de Servicio:** descripción del flujo en PFD.
- **Fluido de Proceso:** nombre del fluido en PFD.
- **Tag de Línea:** etiqueta asignada a la cañería en P&ID y/o Listado de Líneas.
- **Tag de Válvula:** etiqueta asignada a la válvula en P&ID y/o Listado de Instrumentos.

3.1.2.2. Características del Fluido

Según sus características es posible clasificar los fluidos en las siguientes categorías no excluyentes [5]:

- **Limpio:** fluido sin contenido sólido y poco viscoso.
- **Corrosivo:** fluido que genera desgaste por efecto químico.
- **Abrasivo:** fluido que genera desgaste por efecto de roce mecánico.
- **Tóxico:** fluido que genera daño en el caso de entrar en contacto directo con humanos.
- **Pulpa:** también se conocen como *slurries*, es una mezcla de líquido (generalmente agua) con alta proporción de sólidos insolubles, se caracterizan por su viscosidad muy alta.

Dentro de la información preparada por la disciplina de Procesos, el PFD contiene información relevante como el porcentaje de sólidos en el fluido, si no lleva sólidos puede considerarse no abrasivo. Por su lado, el Criterio General de Diseño de Procesos entrega información sobre los fluidos con los cuales trabajará la válvula, por ejemplo, indicando la presencia de sales en algunos fluidos del proceso, los cuales pueden considerarse corrosivos.

Por el lado de los documentos preparados por la disciplina de Cañerías: el Criterio de Diseño de Cañerías, la Especificación Técnica de Materiales de Cañerías y las Memorias de Cálculo de Bombas cuentan con información sobre la caracterización del fluido. En particular, una Memoria de Cálculo de Bombas trae información sobre el modelamiento del fluido, por ejemplo, si el fluido es una pulpa o el fluido no se considera incompresible.

3.1.2.3. Información de Cañería

Corresponde a la información sobre la línea donde se va a instalar la válvula, esta está disponible en los P&ID y el Listado de Líneas. La información debe ser suficiente para saber los diámetros interiores de la cañería aguas arriba y aguas abajo de la válvula [37–41].

- Diámetro nominal y schedule de la cañería a la entrada de la válvula.
- Diámetro nominal y schedule de la cañería a la salida de la válvula.
- Clase ANSI y material de las cañerías.

3.1.2.4. Datos de Dimensionamiento

Los estándares IEC 60534-7:2010, ISA-20-1981, ISA TR20.00.01-2007, establecen que para hacer una especificación de una válvula de control reguladora es recomendado contar con al menos 3 puntos de operación distintos de la presión de corte ($Q = 0$), los cuales son: flujo máximo, normal y mínimo de operación. A continuación, se enumeran los datos requeridos para cada punto de operación [34–36]:

1. **Flujo volumétrico (Q) o flujo másico (W):** pueden ser volumétricos o másicos y se relacionan entre sí por la densidad. Puesto que el sistema está limitado solo a fluidos incompresibles se puede asumir que el flujo másico cumple con la Ecuación 3.1. De todas formas, se prefiere que los datos sean presentados como flujo volumétrico, porque las ecuaciones de los estándares IEC 60534-2-1:2011 y ANSI/ISA 75.01.01-2012 usan este tipo de flujo para fluidos incompresibles [19, 20].

$$W = \rho_1 Q \quad (3.1)$$

Para obtener los tres flujos requeridos se utiliza principalmente el PFD, este documento contiene al menos 2 tipos de flujo: nominal y diseño. La asignación de los flujos requeridos se puede realizar de la siguiente manera:

- Q_{nor} : corresponde al flujo nominal o normal de operación. En algunas ocasiones, el PFD contiene varios escenarios de operación de la planta, cada uno con flujo nominal distinto, si se produce esta situación es importante consultar con el equipo de Procesos y averiguar cual es el escenario más probable.
- Q_{max} : corresponde al flujo de diseño máximo.

- Q_{min} : corresponde al flujo mínimo de operación. Los PFD incluyen un flujo mínimo de diseño, sin embargo, **este no es el flujo mínimo de operación**. En ocasiones, la Memoria de Cálculo de Bombas menciona que los fluidos tienen velocidades mínimas, esto puede ser usado para establecer un flujo mínimo de operación. En caso que este dato no haya sido especificado se recomienda definir el flujo mínimo como un tercio del nominal.

2. **Presión de entrada (p_1), presión de salida (p_2) y/o caída de presión (Δp) instaladas:** existen dos formas de obtener las presiones instaladas de un proceso, las cuales tienen diferentes características:

- **Experimental**, es decir, medir directamente las presiones para los flujos requeridos en la línea donde se planea instalar la válvula de control reguladora. Solo es posible usar este método sobre líneas existentes y debería ser el método preferido dado que es el más preciso para obtener las presiones instaladas. Por su naturaleza, las presiones obtenidas en este método son manométricas. De optar por este método deben usarse los procedimientos de los estándares IEC 60534-2-1:2011 y ANSI/ISA 75.01.01-2012 [22, 33].
- **Simulación**, consiste en obtener las presiones mediante el modelamiento del sistema y posterior simulación de los caudales. Dada la complejidad de este problema, el modelamiento está a cargo de la disciplina de Cañerías y utilizan software especializados. En el caso de la empresa Hatch, se utiliza el software *AFT Fathom*, que presenta la opción de mostrar los resultados como presión absoluta o presión manométrica [49]. El anexo C explica en mayor detalle la presentación de resultados de *AFT Fathom*.

Luego, la presentación de los datos debe ser de la siguiente manera:

- p_1 : la presión de entrada siempre debe ser presentada, además, se debe indicar si es presión manométrica o absoluta. De preferencia se recomienda presentarla siempre como presión absoluta, dado que para alturas superiores a 1.000 m.s.n.m la presión atmosférica es inferior a 0,9 bar [56].

El valor de la presión atmosférica del sitio se puede encontrar en la Memoria de Cálculo de Bombas o el documento de Condiciones del Sitio, si esto no es posible, se puede estimar a partir de la altura sobre el nivel del mar y la ecuación barométrica [56].

- p_2 : si se decide presentar la presión de salida, se debe explicitar si es absoluta o manométrica.
- Δp : dado que es un diferencial, no hace distinción entre presión absoluta o manométrica.

3. **Temperatura del fluido a la entrada (T_1):** corresponde a la temperatura del fluido. Su valor es posible encontrarlo en el PFD o la Memoria de Cálculo de Bombas, este corresponde a la temperatura de diseño de Cañerías.

4. **Densidad del fluido** (ρ_1) **o Gravedad Específica** ($\frac{\rho_1}{\rho_0}$):

- **Densidad:** si se presenta como densidad es importante mencionar las unidades. Su valor se puede obtener directamente del PFD, en algunos casos la densidad no está de manera explícita. En ese caso la Memoria de Cálculo de Bombas muestra la densidad en su sección de parámetros de diseño. De no contar con ninguna de ambas fuentes, se puede estimar dividiendo el flujo másico en el volumétrico y si se trata de un fluido puro, es posible estimar la densidad a partir de fórmulas como la aproximación de Boussinesq [57].
- **Gravedad Específica:** es la densidad del fluido dividida en la densidad del agua a $15^\circ C$ ($\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$) de acuerdo a los estándares IEC 60534-2-1:2011 y ANSI/ISA 75.01.01-2012 [19, 20].

5. **Presión de Vapor** (p_v): se puede obtener de las Memorias de Cálculo de Bombas o en el reporte del modelo de *AFT Fathom*, este valor siempre se presenta como presión absoluta. Si se trata de un fluido puro, la presión de vapor puede estimarse a partir de la temperatura utilizando la ecuación de Antoine [15].

6. **Presión Crítica** (p_c): se debe buscar en tablas de propiedades termodinámicas, dado que no suele encontrarse en otros documentos. Porque en muchos proyectos, este dato solo es requerido para el cálculo de las válvulas de control. Si se trata de una mezcla es posible asumir que la presión crítica de la mezcla es igual a la del fluido base [16, 17].

7. **Viscosidad** (μ) **o Viscosidad Cinemática** (ν):

- **Viscosidad o Viscosidad Dinámica** (μ): comúnmente se mide en centiPoise (cP). Este valor se puede encontrar en las memorias de Cálculo de Bombas, sin embargo, de no estar disponible y si se trata de algún fluido puro, es posible estimar su viscosidad a partir de la temperatura utilizando la Ecuación de Andrade [55].
- **Viscosidad Cinemática** (ν): comúnmente se mide en centiStokes (cSt) y es la viscosidad dividida en la densidad del fluido.

3.1.3. Revisión de Congruencia

La decisión de que válvula se utilizará para un proceso determinado, está sujeta a la calidad de los datos que se utilicen. Por lo tanto es importante asegurarse que los datos cumplan al menos con ciertas condiciones, para esto se recomienda realizar los siguientes chequeos:

- **Información de Servicio:** revisar que los PFD, P&ID, Listado de Instrumentos y Listado de Líneas sean congruentes entre sí.
- **Caracterización del Fluido:**
 1. Tiene que tener al menos una característica asignada.
 2. Si el fluido es limpio, no puede tener otra característica.
 3. Siempre consultar a la disciplina de Cañerías o Procesos si el fluido es tóxico en el caso que no sea evidente.
 4. Si el porcentaje de sólidos es distinto de 0, se puede considerar abrasivo.

5. Sí la cañería es de algún material plástico, confirmar que el fluido es corrosivo.

• **Diámetro Nominal de Cañería:** verificar en el Listado de Líneas y P&ID.

• **Datos para Dimensionamiento:**

– **Flujos:** deben cumplir con la condición de la Ecuación 3.2, para flujo másico es análogo.

$$Q_{max} > Q_{nor} > Q_{min} > 0 \quad (3.2)$$

– **Presiones de entrada y salida instaladas:** deben cumplir las siguientes condiciones:

◦ El diferencial debe decrecer con el flujo (Ecuación 3.3).

$$\Delta p_{Q_{corte}} > \Delta p_{Q_{min}} > \Delta p_{Q_{nor}} > \Delta p_{Q_{max}} \quad (3.3)$$

◦ Debe haber suficiente información para determinar presiones absolutas de entrada y salida.

– **Temperatura:** si el proceso no regula temperatura o la planta no tiene procesos donde se inyecte calor de manera intencional, debería ser una temperatura ambiental dentro del rango especificado en las Condiciones del Sitio.

– **Densidad:** si el fluido tiene algún sólido disuelto, su densidad no puede ser menor a la densidad del líquido base [13]. Se recomienda utilizar los valores entregados en el PFD o la Memoria de Cálculo de Bombas.

– **Presión de vapor y presión crítica:** estos valores deben ser similares del líquido base de la mezcla [13].

– **Viscosidad:** la viscosidad debe ser similar al líquido base de la mezcla [13].

3.1.4. Cálculo de Curvas de Proceso

Una vez confirmados que los datos de proceso son congruentes, es posible estimar algunos valores para poder realizar un análisis integral de las condiciones de operación de la válvula. En esta etapa, se obtienen las siguientes curvas:

1. **Curvas de Presión Instalada del Proceso:** es la relación entre las presiones y los flujos requeridos por el proceso, estas curvas se obtienen a partir de los puntos de operación entregados y su naturaleza es estimada. No existe una forma estándar de obtención de estas curvas, sin embargo, las curvas de presión requeridas pueden ser obtenidas de acuerdo al método explicitado en el anexo D [19, 20]. Las curvas obtenidas tienen la forma de la expresión de la Ecuación 3.4, donde a_1 , a_2 , b_1 , b_2 , c_1 y c_2 son números reales [58].

$$\begin{aligned} p_1(Q) &= a_1 * Q^2 + b_1 * Q + c_1 \\ p_2(Q) &= a_2 * Q^2 + b_2 * Q + c_2 \end{aligned} \quad (3.4)$$

2. **Coefficiente de Flujo Requerido en Función del Flujo:** dado que se dispone de la relación $\Delta p(Q)$, es posible estimar el Coeficiente de Flujo requerido por el proceso. Si se utiliza el modelo de flujo de la Ecuación 2.8, se asume que no hay flujo obstruido y $F_P = 1$, se obtiene que para el proceso el coeficiente de flujo requerido vendrá dado por la Ecuación 3.5.

$$C = \frac{Q}{N_1} \sqrt{\frac{\rho_1/\rho_0}{\Delta p(Q)}} \quad (3.5)$$

3. **Índice de Cavitación de Proceso en Función del Flujo ($\sigma(Q)$):** de acuerdo al estándar ISA-RP75.23, se define un índice de cavitación de proceso como la Ecuación 3.6.

$$\sigma(Q) = \frac{p_1(Q) - p_v}{p_1(Q) - p_2(Q)} \quad (3.6)$$

3.1.5. Presentación de los Datos de Proceso

Debido a la cantidad de información y datos que deben ser especificados para una válvula de control, los datos deben presentarse de manera ordenada. La Tabla 3.1 muestra un ejemplo de una tabla ordenada con el formato IEC.

Tabla 3.1: Ejemplo de tabla de datos en formato IEC 60534-7:2010 [34].

Tag de Válvula				
Tag de Cañería				
Nivel de Ruido Permitido				dB(A)
Cañería Aguas Arriba	Diám.		Sch.	
Cañería Aguas Abajo	Diám.		Sch.	
Clase ANSI Cañerías		Material		
Fluido de Proceso				
Características Especiales del Fluido:				
Caudal Q	Min.	Norm.	Max.	Unidad
Presión de Entrada p_1				
Presión de Salida p_2				
Temperatura T_1				
Densidad ρ_1				
Presión de Vapor p_v				
Presión Crítica p_c				
Viscosidad (Dinámica μ /Cinemática ν)				
Coeficiente de Flujo Requerido (C_v/K_v)				

La industria a desarrollado formatos para poder garantizar que la información sea transmitida de forma eficiente. Existen dos formatos principales:

- **Formas de Especificación ISA:** El estándar ISA-20-1981, posee un modelo de hoja de datos para válvulas de control donde una hoja contiene todos los campos de información de la válvula. El estándar ISA TR20.00.01-2007 contiene una hoja de datos exclusiva para condiciones de operación para válvulas de control [35, 36].
- **Forma de Especificación IEC:** El estándar IEC 60534-7:2010, también tiene un modelo de hoja de datos que es más similar a lo propuesto en ISA-20-1981 [34, 35].

3.2. Selección del Tipo de Válvula

La selección del tipo de válvula consta de un proceso de descarte, dado que algunas características del fluido producen que ciertos tipos de válvulas puedan no ser aptos para la aplicación. Además, el estándar ISA-TR75.23-1995 recomienda que determinar el tipo de válvula es lo primero que hay que realizar después de obtener los datos de proceso. Sin embargo, el estándar no establece los criterios ni como se debe tomar esta decisión [23].

3.2.1. Criterio por Función Operativa

Este criterio considera si el tipo de control es *on/off* o regulatorio, dado que la geometría del obturador y asiento de la válvula establece las limitaciones de la misma.

Válvulas para Control *On/Off*

Las válvulas que se consideran aptas para control *on/off* son las siguientes [5, 6, 12]:

- **Diafragma.**
- ***Pinch.***
- **Globo:** idealmente con característica inherente de apertura rápida.
- **Bola:** idealmente sin caracterización o tipo *full-bore*.
- **Mariposa.**
- ***Plug.***
- **Rotatoria Excéntrica.**
- **Compuerta.**

Válvulas para Control Regulatorio

Las válvulas consideradas aptas para control regulatorio son [5, 6, 12]:

- **Diafragma.**
- ***Pinch.***
- **Globo.**

- Bola.
- Bola Segmentada.
- Mariposa.
- Rotatoria Excéntrica.

3.2.2. Criterio por Tamaño de Línea

Si bien el mercado ofrece todos los tipos de válvulas en todos los tamaños posibles, la minería en Chile ha desarrollado prácticas comunes y criterios basados en sus experiencias y necesidades propias. Producto de esta situación sobre todo para líneas de gran diámetro y para aplicaciones donde no se necesita una regulación de gran precisión, generalmente, se consideran condiciones económicas sobre las condiciones técnicas. A continuación se detalla el tipo de válvula que se recomienda usar según el tamaño de la línea [5, 6, 12]:

- Las válvulas globo se utilizan en líneas de hasta 4 pulgadas o 100 mm.
- Las válvulas de bola, bola segmentada, rotatorias excéntricas y *plug* se utilizan en líneas entre 3 y 6 pulgadas (80 y 150 mm).
- Las válvulas mariposa se usan en líneas a partir de 6 pulgadas o 150 mm.

En el caso de las válvulas de tipo diafragma, *pinch* y compuerta, el criterio de tamaño es más laxo dado que se usan para manejar fluidos con características complejas, como son los fluidos viscosos o con sólidos en suspensión.

3.2.3. Criterio por Características del Fluido

Las características del fluido determinan los tipos de válvulas que se pueden usar [5, 12]:

- **Limpio:** se recomienda usar válvulas globo, bola, bola segmentada o mariposa, dado que estas ofrecen las mejores características con respecto a regulación, sellado y manejo de presión.
- **Tóxico:** para los servicios tóxicos se recomienda usar válvulas de diafragma y *pinch*. También, se puede usar válvulas globo pero debe tener un sello de fuelle en el vástago del actuador.
- **Corrosivo:** para este tipo de servicio, se puede usar cualquier tipo de válvula, a excepción de válvulas mariposa. Se requiere que las superficies que entran en contacto con el fluido sean inertes al líquido.
- **Abrasivo:** se recomienda usar válvulas de tipo diafragma, *pinch*, *plug*, rotatoria excéntrica (con geometría interna especial) y compuerta. Además, es requerido que los materiales sean lo suficientemente resistentes.
- **Pulpa:** se recomienda el uso de válvulas diafragma (debe ser paso total), *pinch*, *plug*, compuerta, bola (debe ser *full-bore*) y mariposa (si la línea tiene un diámetro de 12 pulgadas o más).

3.2.4. Criterio por Presión y Temperatura de Operación

Las válvulas tienen rangos de presión y temperatura máximos, dependientes del fabricante y modelo de la válvula. Sin embargo, existen tendencias generales que se pueden usar para determinar el tipo de válvula [5, 12]:

- Las válvulas globo son las más robustas dado que pueden trabajar en sistemas clase ANSI 2500 y rangos de temperaturas entre -200 y 540 °C.
- Las válvulas de diafragma y *pinch* solo pueden trabajar en sistemas clase ANSI 150 y con temperaturas entre -40 y 150 °C. Siendo las más frágiles en este aspecto.
- Las válvulas rotatorias, que no sean mariposa, pueden trabajar en sistemas clase ANSI 600 y donde el rango de temperatura sea entre -200 y 400 °C.
- Las válvulas mariposa pueden ser hasta clase ANSI 300 y operar con temperaturas entre -50 y 250 °C si son de asiento metálico.

3.2.5. Criterio por Condiciones de Cavitación y *Flashing*

Ninguna válvula debería operar bajo condiciones de cavitación o *flashing*, sin embargo, se pueden tomar medidas para disminuir estas condiciones.

Si no es posible tomar medidas que disminuyan la probabilidad de cavitación o *flashing* en la válvula, las válvulas tipo globo son las que tienen mejor desempeño en estas condiciones [5]. Por lo tanto, si el σ de proceso es menor a 2 en algún punto de operación se recomienda que la válvula sea globo, siempre y cuando, la caracterización del fluido, el tamaño de la línea y las condiciones económicas lo permitan [5, 23].

3.2.6. Decisión del Tipo de Válvula

Los criterios presentados anteriormente reducen la cantidad de tipos de válvulas a elegir para un conjunto de condiciones de operación, sin embargo, es altamente probable que después de aplicar estos criterios queden varias alternativas. Por lo tanto, se requiere tomar una decisión.

Una alternativa para decidir el tipo de válvula, es usar el costo, siendo este criterio muy razonable y generalmente recomendado. Sin perjuicio de lo anterior, se debe considerar la experiencia en proyectos anteriores, si el cliente tiene recomendaciones o la misma experiencia de los ingenieros que conforman el equipo de trabajo. La consideración de experiencias anteriores es muy importante dado que existen muchos fluidos que son particularmente complejos de manejar dada sus características.

La Decisión del Tipo de Válvula es clave dentro de este procedimiento, dado que garantiza que la válvula pueda controlar el proceso y no se vea expuesta a daños excesivos.

3.3. Dimensionamiento de la Válvula

Una vez determinado el tipo de válvula, se debe dimensionar la válvula, esto quiere decir que se debe encontrar el diámetro nominal más conveniente, este paso es importante ya que permite obtener la relación entre el flujo y la apertura bajo condiciones instaladas [23]. Esta etapa es clave para facilitar la selección de actuadores y la programación de los controladores.

3.3.1. Consideraciones sobre el Tamaño de la Válvula

Los diámetros que puede tener una válvula vienen dados por estándar (Tabla 3.2), donde DN es diámetro nominal en milímetros y NPS son diámetros en pulgadas. La norma ISO 6708 entrega una lista de diámetros nominales recomendados, mientras estándares ASME y ASTM son los encargados de establecer las dimensiones de los diámetros internos y externos de cañerías para diferentes materiales [37–41].

Tabla 3.2: Tabla de conversión de tamaños estándar en pulgadas (NPS) y tamaños estándar en mm (DN) [37–41].

NPS (inch)	3/8	1/2	3/4	1	1 1/4	1 1/2	2	2 1/2	3	4
DN (mm)	10	15	20	25	32	40	50	65	80	100
NPS (inch)	4	5	6	8	10	12	10	12	14	16
DN (mm)	100	125	150	200	250	300	250	300	350	400

Es importante tener algunas consideraciones sobre los tamaños que puede tomar una válvula, dado que el dimensionamiento es lo que permite integrar la dimensión hidráulica y la dimensión de control:

- Una válvula no puede tener un diámetro nominal mayor al de la cañería donde está instalada [5, 13].
- No es recomendable que el diámetro nominal de una válvula sea menor a la mitad del diámetro de la línea. Esto es porque las cañerías se diseñan con velocidades de fluido máximas, afín de minimizar el desgaste y maximizar el flujo, por lo tanto, la instalación de los adaptadores requeridos puede exceder esos límites [5, 13].
- Descartar todos los diámetros de válvulas cuyo coeficiente de flujo máximo ($C_{v,rated}$, $K_{v,rated}$ o coeficiente de flujo al 100 %) sea menor o igual al coeficiente de flujo requerido por el flujo máximo [5, 6, 8].

3.3.2. Obtención de Curvas Instaladas

Para poder obtener la curva instalada de una válvula, se debe elegir una válvula modelo, es decir, un modelo de válvula acorde a lo determinado en la fase de selección. Además, si el tipo de válvula lo permite y si se encuentran publicadas, buscar válvulas que tengan una característica inherente de forma similar a la curva de coeficiente de flujo requerido, una de las curvas de proceso calculadas al final de la etapa de Obtención de Información.

Si se decide calcular por medios propios, la curva característica instalada siempre debe ser obtenida en concordancia a los estándares ANSI/ISA-75.01.01-2012 y IEC 60534-2-1:2011. Otra alternativa, es utilizar los softwares ofrecidos por proveedores de válvulas, prestando especial atención a que las válvulas usadas como modelo sean lo más similar a lo requerido, tanto su característica inherente y el tipo de válvula.

3.3.3. Criterio de Apertura de la Válvula

Las válvulas no tienen el mismo comportamiento en toda su carrera, por lo tanto existe un criterio para la apertura de la válvula, donde la apertura al flujo mínimo esté cercana al 20 % y la apertura al flujo máximo sea cercana a 80 % [5–9]. Este criterio se expresa a través de la Ecuación 3.7.

$$20\% \lesssim \text{Apertura } Q_{min} < \text{Apertura } Q_{max} \lesssim 80\% \quad (3.7)$$

Este criterio solo entregará buenos resultados en válvulas cuya característica inherente sea isoporcentual o lineal. Las válvulas con característica inherente de apertura rápida no pueden completar este criterio de forma satisfactoria, esto es particularmente cierto para válvulas de diafragma y *pinch*.

3.3.4. Criterio de Ganancia Instalada de Válvula

La ganancia instalada de válvula se define como la relación entre el aumento de apertura y el aumento de flujo bajo condiciones instaladas. Su definición matemática se encuentra en la Ecuación 3.8 donde h es la carrera y $q(h)$ es el caudal en función de la carrera normalizado con respecto al caudal cuando la válvula está 100 % abierta [58].

$$G(h) = \frac{\Delta q(h)}{\Delta h} \quad (3.8)$$

La ganancia es de especial interés entre los flujos requeridos Q_{min} y Q_{max} , dado que corresponde al rango de operación de la válvula. Sobre la ganancia se recomienda tener las siguientes consideraciones [58]:

- La ganancia debe ser lo más constante posible y parecerse a 1 en el rango de operación.
- La relación entre la ganancia máxima (G_{max}) y mínima (G_{min}) en el rango de operación cumpla con la relación del Ecuación 3.9

$$\frac{G_{max}}{G_{min}} < 2,0 \quad (3.9)$$

- La ganancia en el rango de operación no sea menor a 0,5 ni mayor a 3.

3.3.5. Revisión de Condiciones Especiales y Niveles de Ruido

Si se dispone de una curva $\sigma_i(h)$ o $\sigma_{mr}(h)$ de la válvula, se permite un análisis directo de cavitación usando el estándar ISA RP75.23-1995, sin embargo, estos datos no siempre se encuentran disponibles.

El nivel de ruido es importante dado que si la predicción de ruido excede el nivel máximo permitido por la ley, se deben buscar soluciones de mitigación. A continuación, se indican algunos cursos de acción [5]:

- Elegir una válvula con múltiples caminos internos, para que la caída de presión sea en pasos graduales.
- Colocar dos válvulas en serie.
- Colocar una placa con orificio aguas abajo de la válvula.
- Usar aislante acústico para las cañerías.

El ruido predicho mediante el estándar IEC 60534-8-4:2015 puede ser indicador que la válvula es muy pequeña y puede ser una confirmación que no presentará cavitación o *flashing* si el nivel de ruido es bajo ($< 70 \text{ dB}(A)$) [6].

3.3.6. Reserva de Flujo

Se llama reserva de flujo a la relación entre el flujo de operación máximo (Q_{max}) y el flujo cuando la válvula está 100 % abierta ($Q_{100\%}$). Esta reserva de flujo se calcula mediante la expresión de la Ecuación 3.10 y se recomienda que sea mayor al 15 % [21, 44].

$$\text{Reserva de Flujo} = \frac{Q_{100\%} - Q_{max}}{Q_{max}} * 100\% \quad (3.10)$$

3.3.7. Velocidad del Fluido

La disciplina de Cañerías cuenta con criterios de velocidad del fluido, luego es importante consultar si una reducción del diámetro es posible. Dado que instalar válvulas de diámetro menor puede aumentar el desgaste de esa sección de la cañería o exceder las velocidades máximas de diseño.

En el caso que no sea posible reducir el diámetro nominal de la válvula a lo requerido, existen válvulas con internos reducidos (*reduced trim*), donde el coeficiente de flujo nominal ($C_{rated}, C_{v,rated}, K_{v,rated}$) de la válvula se parece a una válvula de menor diámetro [5].

3.3.8. Elección del Diámetro Nominal de la Válvula

Una vez aplicados los distintos criterios a la curvas características instaladas calculadas, se escoge aquella que cumpla con la mayoría de los criterios, estableciendo así el diámetro nominal. Así, la característica instalada quedará definida para las siguientes etapas.

3.3.9. Selección y Dimensionamiento de Actuadores, Controladores y Accesorios

Una vez definido el tipo y tamaño de la válvula, se debe establecer el tipo de actuador y posicionador. Esta elección se merece un procedimiento propio, pero se escapa de los alcances del trabajo de título. De todas maneras, los actuadores se clasifican en 3 tipos principales [5, 6, 8]:

- **Actuadores Neumáticos:** utilizan aire comprimido para ejercer la fuerza para abrir o cerrar la válvula
 - **Diafragma y Muelle:** es un actuador neumático que utiliza la presión del aire, un diafragma y un resorte para mover el vástago del actuador (Figura 2.6). Se caracterizan por ser considerados de bajo costo, simples y confiables, sin embargo, no tienen mucha potencia, tienen capacidad de sellado limitada y tienen velocidades de operación lentas.
 - **Pistón:** la presión neumática es ejercida dentro de un cilindro, el cual tiene un pistón. Este tipo de actuador puede ejercer mucha fuerza y es relativamente rápido.
- **Actuadores Eléctricos:** este tipo de actuadores no requieren una fuente de presión neumática o un conversor de señal eléctrica en neumática (I/P). Pueden ejercer mucha fuerza, sin embargo, tienen un costo mayor a sus contra-partes neumáticas. Su uso generalmente se recomienda en zonas donde no se dispone de aire para instrumentación o no hay suficientes válvulas para justificar un sistema de compresores.
- **Actuadores Hidráulicos:** usualmente son de pistón y se utilizan en aplicaciones donde se requiere mucha fuerza para accionar la válvula.

Por otra parte, existen actuadores como los de cremallera y piñón, los cuales constan de un actuador lineal, donde el movimiento lineal es transformado en rotacional con un mecanismo de cremallera y piñón.

No hay que olvidar que los actuadores requieren que se especifique su reacción ante una falla, siendo posible que se cierren, abran o que mantengan su posición, esto debe ser discutido con los equipos de Procesos y Cañerías. Además, es importante chequear las prestaciones de otros elementos como puede ser el posicionador, dado que el mercado ofrece alternativas con posicionadores que permiten que la válvula cambie su característica, puesto que el posicionador puede ser no lineal [5].

La elección del actuador, posicionador y otros accesorios es muy importante para el desempeño del lazo de control completo.

3.3.10. Memoria de Cálculo de Válvulas de Control

Una vez considerados estos factores se debe redactar la memoria de cálculo, dejando registro de los valores encontrados, las razones de la selección de la válvula, su actuador y accesorios. Con esta información es posible realizar las hojas de datos para así poder solicitar propuestas de proveedores.

3.4. Comparación de Opciones

Este es el paso final, puesto que se tiene la memoria de cálculo y las respectivas hojas de datos, es posible solicitar ofertas a los proveedores que dispongan de las válvulas de control requeridas. Dado que en esta etapa se cuenta con una memoria de cálculo de válvulas de control, es posible comparar las ofertas recibidas ante una misma “vara”.

3.4.1. Envío de Información a Proveedores

Es importante enviar la información relevante al proveedor, que en este caso sería enviarle una tabla resumen como la Tabla 3.1 o las hojas de datos de las válvulas de control, para que el proveedor pueda hacer una oferta. No hay que olvidar que la calidad de las ofertas que se reciban quedarán acotadas a la calidad de la información enviada.

3.4.2. Recepción de Propuestas de Proveedores

Es necesario asegurarse que los datos de las propuestas recibidas estén bien ingresados y que los resultados entregados por los proveedores no sean muy distintos a los de la memoria de cálculo. En el caso que estos no coincidan se puede volver a solicitar la propuesta o descartarla según el criterio del equipo de trabajo de Control y Automatización. Esta etapa actúa como control, para que las propuestas que sean evaluadas y/o presentadas al cliente cumplan con un estándar de calidad mínimo.

3.4.3. Selección de Oferta

Una vez electas las propuestas para comparar desde el punto de vista técnico, es importante considerar el aspecto económico de la decisión dado que este último es de suma importancia en el costo del proyecto y costos de operación. La tarea de elegir un proveedor puede quedar a cargo el cliente y este puede utilizar sus propios parámetros, en otros casos, la empresa Hatch puede quedar a cargo de la decisión, según sea la estructura de proyecto.

Sin embargo, en ambos casos se recomienda que se realice una comparación entre las prestaciones técnicas y la propuesta económica de los proveedores. Los detalles de esta comparación, no son contemplados en el alcance de este trabajo de título. De todas maneras, se recomienda desarrollar algún indicador que facilite la comparación entre los aspectos económicos y técnicos de las propuestas.

Capítulo 4

Caso de Estudio

A fin de ilustrar los pasos del procedimiento de selección detallado en el capítulo 3, se utilizará un caso de estudio, a partir de los datos de una memoria de cálculo de válvulas de control real para un proyecto de optimización de una planta recuperadora de litio. Además, este caso de estudio no solo sirve como ejemplo sino que como validación preliminar del procedimiento.

4.1. Obtención de Datos

Con respecto a la información de servicio, se trata de un flujo secundario, esto quiere decir que este flujo estará presente la mayor parte del tiempo pero no es crítico. El flujo se bifurca aguas abajo de la válvula a un chute donde entra la bischofita sólida y a un molino de bischofita. El fluido se denomina “Solución de Litio” en el PFD, las etiquetas (*tags*) de la línea y la válvula se extraen del P&ID.

La Memoria de Cálculo de Bombas y el Listado de Cañerías indican que las cañerías son de acero inoxidable TP316L Sch. 40S y el fluido es clasificado como una salmuera, por lo tanto, es prudente considerarlo corrosivo. Por su lado, el PFD indica que el fluido tiene sólidos en suspensión, esto significa que el fluido es abrasivo. La simulación realizada por la disciplina de Cañerías indica que el fluido tiene una viscosidad de 3 centiPoise, por lo tanto, no es una pulpa.

Los valores de los flujos, densidad y temperatura del fluido se obtuvieron a partir del PFD, mientras las presiones de entrada y salida se obtuvieron mediante simulación en *AFT Fathom*. El PFD solo incluye los flujos nominales y los flujos de diseño, por su lado, la Memoria de Cálculo de Bombas no menciona que el fluido requiera una velocidad mínima, frente esta situación, el flujo mínimo de operación se asume como un tercio del nominal. La presión de vapor usada en la simulación corresponde a la del agua.

Para estimar la presión atmosférica, la elevación del sitio se aproximó a 2300 metros sobre el nivel del mar, porque la Memoria de Cálculo de Bombas indica que las cotas del sistema de cañerías asociado a esta válvula son 2.303,5 y 2.316,5 m.s.n.m.

Todos los datos fueron ingresados al prototipo de herramienta de software, donde se determinó que los flujos y los diferenciales de presión cumplen con los criterios de congruencia. El resumen de los datos de procesos se encuentran en la Tabla 4.1 y los gráficos de procesos se encuentran en la Figura 4.1.

Tabla 4.1: Tabla resumen de los datos de proceso de la válvula. Los datos fueron analizados por el prototipo de aplicación. Y la estructura de la Tabla corresponde al formato IEC 60534-7:2010.

Tag de Válvula	FV-0001			
Tag de Cañería	4"-LCLL-0001-IN2A2S1-NI			
Nivel de Ruido Permitido	85			dB(A)
Cañería Aguas Arriba	Diám.	4 inch	Sch	40S
Cañería Aguas Abajo	Diám.	4 inch	Sch	40S
Clase ANSI Cañerías	150	Material		Acero Inoxidable TP 316L
Fluido de Proceso	Solución de Litio			
Características Especiales del Fluido	Abrasivo, Corrosivo			
Caudal Q	Min.	Norm.	Max.	Unidad
	23,09	69,26	83,11	m^3/h
Presión de Entrada p_1	6,65	5,68	5,32	barA
Presión de Salida p_2	3,83	3,92	3,96	barA
Temperatura T_1	20	20	20	°C
Densidad ρ_1	1,35	1,35	1,35	T/m^3
Presión de Vapor p_v	0,02	0,02	0,02	bar
Presión Crítica p_c	220,05			bar
Viscosidad Cinemática ν	4,05	4,05	4,05	cSt
Coefficiente de Flujo Requerido C_v	18	70	96	$USgpm/\sqrt{psi}$

Las presiones de la Tabla 4.1 y la Figura 4.1.a muestran que las presiones de entrada y salida de la válvula son considerablemente más altas que la presión atmosférica y la de vapor, por lo tanto, es probable que no presente problemas con respecto a condiciones especiales.

A partir de la Figura 4.1.b y la Tabla 4.1 se puede ver que la válvula requiere un $C_{v, rated}$ mayor a 96 y para lograr una característica instalada lineal, se requiere una válvula con una característica inherente isoporcentual dada la forma de la curva de C_v requerido.

Por su parte, los datos de la Tabla 4.1 y la Figura 4.1.c señalan que la válvula no operará en condiciones donde la cavitación sea altamente probable porque σ del proceso es mayor que dos para todos los flujos de operación, por lo tanto queda completamente descartada la posibilidad de *flashing* pero existencia de cavitación dependerá de la válvula en particular.

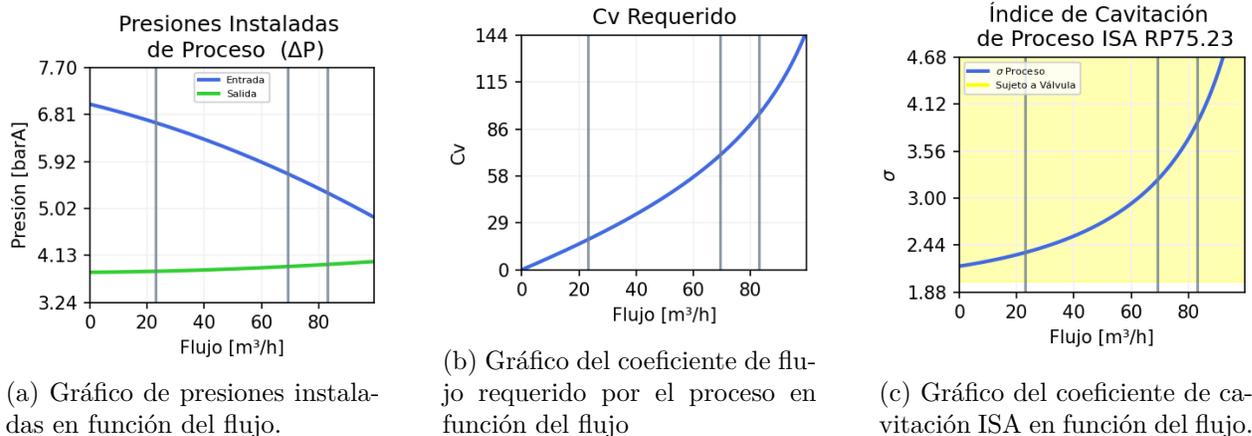


Figura 4.1: Gráficos de procesos obtenidos por el prototipo de herramienta de software.

4.2. Selección del Tipo de Válvula

Los criterios de selección fueron programados en el prototipo de la herramienta de software indicando que la mejor opción es una válvula tipo diafragma. La Figura 4.2 muestra el resultado de la aplicación de los criterios de selección expresados en el capítulo 3, donde se indica que los factores influyentes en la selección fueron: que es una válvula de control reguladora, el tamaño de la cañería y que es un fluido abrasivo y corrosivo.

Puesto que es una válvula de diafragma, se puede anticipar que el dimensionamiento será más difícil, porque este tipo de válvulas tienen una característica inherente de apertura rápida, lo cual no cumple con la forma indicada en el gráfico de la Figura 4.1.b.



Figura 4.2: Captura de la pantalla de selección del cuerpo de válvula del prototipo de herramienta de software.

4.3. Dimensionamiento

El diámetro de la cañería es de 4", significa que los diámetros nominales recomendados para esta válvula son 2", 2 1/2", 3" y 4". De todas maneras, si se toma como referencia el modelo de válvula de diafragma de *Schubert & Salzer* modelo 7069, se puede ver que solo las válvulas de 3 y 4 pulgadas cumplen con el requerimiento de coeficiente de flujo nominal ($C_{v,rated}$) para este servicio [59].

Dado que no se alcanzó a programar la obtención de la característica instalada en el prototipo de herramienta de software, se utilizó el software ValSize 10 para encontrar esta curva [44]. Las Figuras 4.3 y 4.4 y la Tabla 4.2 muestran los valores obtenidos para las válvulas de los dos diámetros nominales posibles, cabe destacar que ninguna de las dos válvulas ofrece una ganancia instalada constante dado que las válvulas de diafragma tienen característica inherente de apertura rápida y la curva de coeficiente de flujo requerido (Figura 4.1.b) indica que el proceso requiere una característica inherente isoporcentual.

El gráfico de ganancia (Figura 4.4) muestra que la válvula de 3 pulgadas tiene una curva con menos pendiente y esto es confirmado por la característica instalada, dado que la diferencia de la apertura entre el flujo mínimo y el máximo es mayor para la válvula de 3" (Tabla 4.2). Por otra parte, la variación de ganancia (G_{max}/G_{min}) es menor y más cerca del ideal para la válvula de 4", además, esta válvula no excede los límites de ganancia recomendados en su rango de operación.

Con respecto a las condiciones especiales, todos los niveles de ruido se encuentran dentro de la norma. Este fabricante solo tiene publicados los coeficientes de flujo para sus válvulas de diafragma, por lo tanto no es posible realizar una evaluación de la cavitación utilizando el índice σ . Sin embargo, los niveles de ruido son menores de 70 dB(A) y el software del fabricante no levanta alertas al respecto, por lo tanto, es poco probable que se produzcan cavitaciones al interior de la válvula. De todas maneras, la válvula de 4" genera menos ruido en el flujo máximo, disminuyendo aún más la posibilidad de cavitación para esta válvula.

Hasta ahora, por criterio de rango de apertura la válvula ideal es de 3 pulgadas, pero el criterio de ganancia corresponde a la válvula de 4". Si se considera que las válvulas de diafragma son de apertura rápida y su coeficiente de flujo no varía mucho a partir de 70 % de apertura, como acusa la ganancia del flujo máximo de la válvula de 3". Esta válvula cuenta con una reserva de flujo demasiado pequeña, lo cual está lejos de ser óptimo.

Por lo tanto, se escoge la válvula de 4" dado que ofrece más holgura con respecto al flujo máximo, genera menos ruido y cumple de mejor manera el criterio de ganancia.

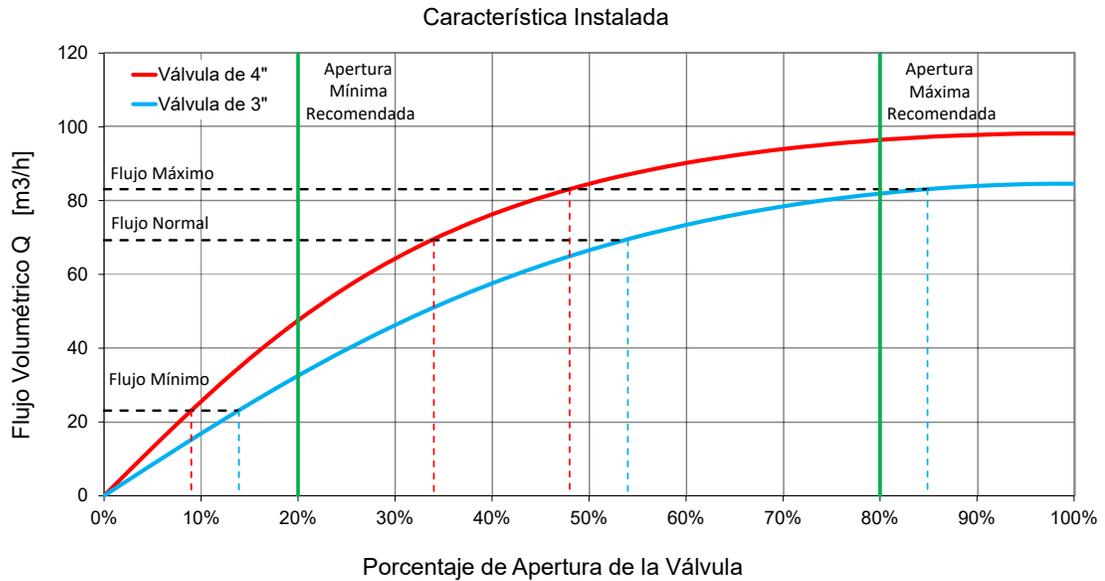


Figura 4.3: Curva característica instalada de válvula dos válvulas diafragma *Schubert & Salzer* modelo 7069 con la presiones del proceso. Característica instalada obtenida con Valsize 10 [44].

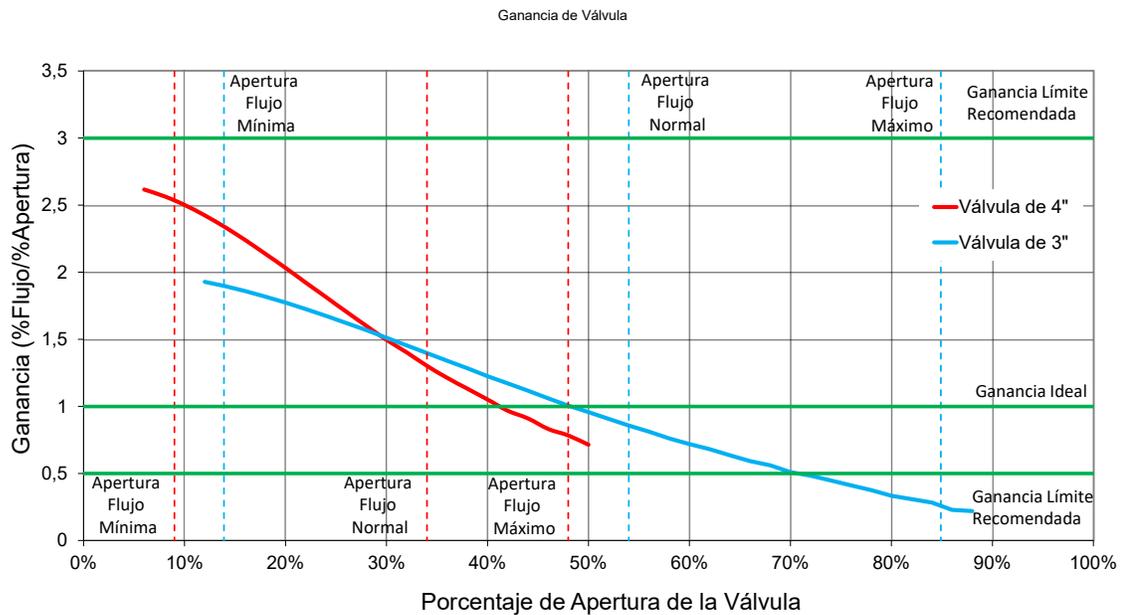


Figura 4.4: Curva de ganancia instalada para los rangos de operación de dos válvulas diafragma *Schubert & Salzer* modelo 7069 con la presiones del proceso, calculada a partir de la curva característica instalada.

Tabla 4.2: Tabla con parámetros relevantes para la evaluación de la curva característica de la válvula.

Diámetro	4"			3"			Unidades
Flujo	Mín.	Nor.	Max.	Mín.	Nor.	Max.	-
Apertura	9	35	48	14	55	85	%
Nivel de Ruido	49	53	54	49	55	67	dB(A)
Cavitación	No	No	No	No	No	No	-
Ganancia	2,53	1,30	0,78	1,90	1,83	0,25	-
G_{max}/G_{min}	3,27			8,31			-
Flujo al 100 %	134,0			86,4			m^3/h
Reserva de Flujo	61,8			3,91			%

4.4. Comparación de Ofertas

Este paso consiste en revisar las propuestas de los proveedores y sus cálculos entregados como respaldo. Es importante asegurar que los datos de las propuestas sean los correctos y coincidan con lo solicitado, que de no coincidir, se puede pedir al proveedor que revise la información. El fin de esta etapa es asegurarse que todas las propuestas que vayan a ser evaluadas cumplan con los requerimientos técnicos mínimos.

Para este caso en particular, hay que considerar que el entorno de la válvula es una planta recuperadora de litio en un salar. Este tipo de ambiente es altamente corrosivo, por lo tanto, se requiere prestar atención a la empaquetadura de la válvula y sus accesorios. Por ejemplo, que los materiales sean anti-corrosivos y es relevante consultar al proveedor su experiencia en este tipo de ambientes.

4.5. Comparación con Memoria de Cálculo de Válvulas de Control Existente

La memoria de cálculo realizada para este proyecto arrojó que la válvula que debía utilizarse era una válvula de diafragma de 4" y determinó que el rango de apertura es aceptable, puesto que se trata de un flujo secundario. Por su lado, el procedimiento llegó a la misma conclusión sobre el tipo y tamaño de válvula. Con respecto a las aperturas, se siguió el criterio de ganancia, dado que habían otros factores que eran concordantes con este criterio, como la reserva de flujo.

Con respecto al prototipo de herramienta de software, este permitió realizar la revisión preliminar de los datos, obtener las curvas de proceso y aplicó los criterios de selección del tipo de válvula de forma automática. En este último aspecto, llegó a la misma conclusión de la memoria de cálculo, de todas formas, presentó 3 alternativas, pero colocó la válvula de diafragma como primera opción.

Capítulo 5

Conclusiones

5.1. Propuesta de Valor

El trabajo expuesto en la presente memoria, propone su valor en dos elementos: procedimiento y herramienta de software.

El procedimiento representa una síntesis de la información disponible sobre válvulas de control reguladoras, esta síntesis fue delimitada a la realidad de la empresa Hatch en su oficinas en Santiago de Chile. La realización de esta memoria significa que toda la información relevante se encuentra compilada en un solo documento, disminuyendo la curva de aprendizaje para aquellas personas que se enfrenten por primera vez a la tarea de realizar una memoria de cálculo de válvulas de control reguladoras. Además, este procedimiento cuenta con una propuesta de materialización a través de una herramienta de software, simplificando la aplicación del mismo.

El software está pensado desde el punto de vista de ingeniería, siendo sus funcionalidades diferenciadoras: el análisis de los datos de proceso, selección de cuerpo de válvulas y la inclusión de la altura del sitio como factor para calcular las presiones absolutas de forma automática. Además, su potencial implementación evitará la adquisición de módulos de cálculo los cuales no serán utilizados ni presenta una limitación por pago de licencias.

5.2. Trabajo Futuro

La herramienta por si misma tiene mucho potencial de desarrollo y escalabilidad, de todas formas, el siguiente paso es su desarrollo informático y ampliación de las bases de datos más allá de su estado demostrativo. Esta primera implementación debe ser acotada a los alcances del trabajo de título, es decir, fluidos incompresibles en la minería del cobre y del litio.

El siguiente paso dentro del trabajo teórico corresponde a la selección de actuadores y otros accesorios de una válvula de control reguladora. Paralelamente, se puede extender el trabajo a fluidos compresibles. La inclusión y desarrollo de otros criterios de selección puede ser explorada para permitir una mejor selección, se destaca la exploración de un criterio económico-técnico para la selección de ofertas.

5.3. Cumplimiento de los Objetivos

Con respecto a los objetivos específicos del trabajo de título, estos se consideran mayormente logrados. En primer lugar, se logró realizar la investigación de forma exitosa puesto que se logró demarcar un marco teórico y normativo, para permitir desarrollar un procedimiento para elegir válvulas reguladoras de flujo.

Sobre el procedimiento se puede asegurar que permite sistematizar y ordenar la aplicación de criterios técnicos al momento de seleccionar válvulas de control. Esta situación fue expuesta en el capítulo 4, donde la utilización de los pasos presentados en el capítulo 3 y a partir de los mismos datos, se llegó a las mismas conclusiones que una memoria de cálculo de válvulas de control utilizada en un proyecto real, ofreciendo una validación preliminar del procedimiento.

Por el lado del prototipo de aplicación, su estado de desarrollo permite ver que facilita la aplicación del procedimiento y asiste en la generación de información para las memorias de cálculo. En el caso de estudio, la aplicación permitió obtener las curvas de procesos y realizó la selección del tipo de válvula de forma automática, esta última no se limitó a una sola opción, sino que entregó una lista de posibles opciones, permitiendo incluir factores como experiencia o preferencias del usuario o cliente.

Lo anterior permite considerar que los 3 primeros objetivos específicos fueron cumplidos. Sin embargo, el cuarto objetivo solo fue cumplido de manera parcial dado que la documentación generada no es la suficiente para que un equipo de programación realice la implementación final de la herramienta de software.

Sin embargo, a pesar de que uno de los objetivos específicos no se cumplieron en su totalidad, el objetivo general del trabajo de título se considera cumplido, puesto que se lograron sentar las bases teóricas e informáticas para desarrollar un sistema de selección de válvulas de control reguladoras para plantas de procesos.

Bibliografía

- [1] ICMM *Role of Mining in National Economies: Mining Contribution Index*, Londres: International Council in Mining and Metals, 2012. [En línea] Disponible en: <https://www.icmm.com/en-gb/research/social-performance/2022/role-of-mining-in-national-economies>. Accedido: 12 de octubre del 2023.
- [2] A. Mular, D. Halbe., D. Barrat, *Mineral Processing Plant Design, Practice, and Control*, Littleton, Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME), 2002, pp. 3-12.
- [3] D. Gransberg, M. Loulakis y G. Gad, “Variations on Design-Build Project Delivery” en *Engineer’s Project Delivery Method Primer - Uniform Definitions and Case Studies*. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers, 2022, pp. 241-258.
- [4] E. Merrow, “Project Definition: Getting the Front End Right” en *Industrial Megaprojects - Concepts, Strategies, and Practices for Success*, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2011, pp. 199-251
- [5] N. Battikha. *Condensed Handbook of Measurement and Control*, 4ta ed. Research Triangle Park, North Carolina: International Society of Automation, 2017.
- [6] B. Nesbitt, *Handbook of Valves and Actuators - Valves Manual International*, Jordan Hill, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2007.
- [7] H. Wade, *Basic and Advanced Regulatory Control - System Design and Application*, 2da ed. Research Triangle Park, North Carolina: International Society of Automation, 2004.
- [8] *Guía de Válvulas de Control*, 5ta ed. Emerson Automation Solutions, Marshalltown, Iowa. 2019. [En línea] Disponible en <https://www.emerson.com/documents/automation/gu%C3%ADa-de-v%C3%A1lvulas-de%C2%A0control-control-valve-handbook-spanish-es-5459932.pdf>, Accedido: 29 de junio 2023.
- [9] T. Hughes, *Measurement and Control Basics*, 5ta ed. Research Triangle Park, North Carolina: International Society of Automation, 2015.
- [10] *Industrial-process control valves - Part 1: Control valve terminology and general considerations*, IEC 60534-1, International Electrotechnical Commission, Ginebra, Suiza, 2023.
- [11] *Control Valve Terminology*, ANSI/ISA-75.05.01, International Society of Automation, Research Triangle Park, North Carolina, 2019.
- [12] P. Smith y R. Zappem, *Valve Selection Handbook: Engineering Fundamentals for Selecting the Right Valve Design for Every Industrial Flow Application*, 5ta ed. Burlington, Massachusetts: Gulf Professional Publishing, 2003
- [13] C. Georgantopoulou, G. Georgantopoulos, *Fluid Mechanics in Channel, Pipe and Aerodynamic Design Geometries 1*, ISTE Ltd and John Wiley & Sons, 2018.

- [14] Center for Chemical Process Safety, “Stagnation Pressure and Non-recoverable Pressure Loss” en *Guidelines for Pressure Relief and Effluent Handling Systems*, 2da ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2017, p. 121.
- [15] C. Yaws, *Yaws’ Handbook of Antoine Coefficients for Vapor Pressure*, 2 ed., New York: Knovel Corporation, Accedido: 4 de Julio 2023. [En línea] Disponible en: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpYHACVPEH/yaws-handbook-antoine/yaws-handbook-antoine>
- [16] C. Schaschke, *A Dictionary of Chemical Engineering (Oxford Quick Reference)*, Oxford, Reino Unido, Oxford Oxford University Press. 2014, p.87
- [17] C. Yaws, *Yaws’ Critical Property Data for Chemical Engineers and Chemists*, Norwich, New York: Knovel Corporation. [En línea] Disponible en: <https://app.knovel.com/s.v?259sbp9X>, Accedido: 1 de agosto 2023.
- [18] THINKTANK, “What is Flashing in Control Valves?”, www.cncontrolvalve.com. <https://cncontrolvalve.com/what-is-flashing-in-control-valves/> Accedido: 22 de noviembre de 2023.
- [19] *Industrial-process control valves - Part 2-1: Flow capacity - Sizing equations for fluid flow under installed conditions*, IEC 60534-2-1, International Electrotechnical Commission, Ginebra, Suiza, 2015.
- [20] *Industrial-Process Control Valves—Part 2-1: Flow capacity - Sizing equations for fluid flow under installed conditions*, ANSI/ISA-75.01.01, International Society of Automation, Research Triangle Park, North Carolina, 2012.
- [21] *Flow Control Manual* 6ta. ed. Neles Finland Oy, Vantaa, Finland, 2022. [En línea] Disponible en: https://www.valmet.com/globalassets/sharepoint/imported/flowcontrol_manual.pdf, Accedido: 3 de agosto 2023.
- [22] *Industrial-process control valves - Part 2-3: Flow capacity - Test procedures*, IEC 60534-2-3, International Electrotechnical Commission, Ginebra, Suiza, 2015.
- [23] *Considerations for Evaluating Control Valve Cavitation*, ISA-RP75.23, International Society of Automation, Research Triangle Park, North Carolina, 1995.
- [24] *Industrial-process control valves - Part 8-2: Noise considerations - Laboratory measurement of noise generated by hydrodynamic flow through control valves*, IEC 60534-8-2, International Electrotechnical Commission, Ginebra, Suiza, 2011.
- [25] *Industrial-process control valves - Part 8-4: Noise considerations - Prediction of noise generated by hydrodynamic flow*, IEC 60534-8-4, International Electrotechnical Commission, Ginebra, Suiza, 2015.
- [26] Ministerio de Salud, *Decreto 594*, Santiago, Chile: Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2000. [En Línea] Disponible en: <https://bcn.cl/3epk1>, Accedido: 22 de agosto del 2023.
- [27] *Occupational noise exposure*, OSHA 1910.95, Occupational Safety and Health Administration, Washington, DC. 2008.
- [28] Parlamento Europeo, *Directiva 2003/10/EC*, Estrasburgo, Francia: Oficina de Publicaciones de la Union Europeo, 2019. [En Línea] Disponible en: <http://data.europa.eu/eli/dir/2003/10/2019-07-26>, Accedido: 23 de noviembre del 2023.
- [29] *Acoustics: Estimation of noise-induced hearing loss*, ISO 1999, International Organiza-

- tion for Standardization, Ginebra, Suiza, 2013.
- [30] *Industrial-process control valves - Part 2-4: Flow capacity - Inherent flow characteristics and rangeability* IEC 60534-2-4, International Electrotechnical Commission, Ginebra, Suiza, 2009.
 - [31] *Inherent Flow Characteristic and Rangeability of Control Valves*, ISA-75.11.01, International Society of Automation, Research Triangle Park, North Carolina, 2013.
 - [32] J. Monsen, “Determining the Pressure Drop to be Used in a Control Valve Sizing Calculation”. valin.com. <https://www.valin.com/resources/whitepapers/determining-pressure-drop-be-used-control-valve-sizing-calculation> Accedido: 22 de mayo de 2023.
 - [33] *Control Valve Capacity Test Procedures*, ANSI/ISA-75.02.01, International Society of Automation, Research Triangle Park, North Carolina, 2008.
 - [34] *Industrial-process control valves - Part 7: Control valve data sheet*, IEC 60534-7, International Electrotechnical Commission, Ginebra, Suiza, 2010.
 - [35] *Specification Forms for Process Measurement and Control Instruments, Primary Elements, and Control Valves*, ISA-20, International Society of Automation, Research Triangle Park, North Carolina, 1981.
 - [36] *Specification Forms for Process Measurement and Control Instruments Part 1: General Considerations*, ISA TR20.00.01, International Society of Automation, Research Triangle Park, North Carolina, 2011.
 - [37] *Pipework components: Definition and selection of DN (nominal size)*, ISO 6708, International Organization for Standardization, Ginebra, Suiza, 1995.
 - [38] *Welded and Seamless Wrought Steel Pipe*, ASME B36.10, American Society of Mechanical Engineers, Two Park Avenue, New York, 2022.
 - [39] *Welded and Seamless Wrought Stainless Steel Pipe*, ASME B36.19, American Society of Mechanical Engineers, Two Park Avenue, New York, 2022.
 - [40] *Standard Specification for Poly(Vinyl Chloride) (PVC) Plastic Pipe, Schedules 40, 80, and 120*, ASTM D1785-21a, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, 2021.
 - [41] *Standard Specification for Polyethylene (PE) Plastic Pipe (DR-PR) Based on Controlled Outside Diameter*, ASTM D3035-22, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, 2022.
 - [42] *Pipe Flanges and Flanged Fittings: NPS 1/2 through NPS 24, Metric/Inch Standard*, ASME B16.5, American Society of Mechanical Engineers, Two Park Avenue, New York, 2020.
 - [43] DeZurik, “Programs”, dezurik.com. <https://www.dezurik.com/programs/> Accedido: 31 de mayo de 2023.
 - [44] Schubert & Salzer, “Software - ValSize”, controlsystems.schubert-salzer.com. <https://controlsystems.schubert-salzer.com/en/download/software-valsizer> Accedido: 31 de mayo de 2023.
 - [45] Habonim, “Control Valve Sizer (HVS)”, habonim.com. <https://habonim.com/control-valve-sizer-hvs/> Accedido: 31 de mayo de 2023.
 - [46] KOSO Kent Introl, “Industrial Valve Sizing Software”, kentintrol.com. <https://kentintr>

- ol.com/valve-sizing-software/ Accedido: 31 de mayo de 2023.
- [47] Valmet, “NelProf”, nelprof.neles.com. <https://nelprof.neles.com/> Accedido: 31 de mayo de 2023.
- [48] First Software, “CONVAL”, conval.de. <https://conval.de/en> Accedido: 10 de julio de 2023.
- [49] Applied Flow Technology, “AFT Fathom TM12”, www.aft.com. <https://www.aft.com/products/fathom> Accedido: 31 de mayo de 2023.
- [50] A. Borrego, F. Castrillon, R. Vásquez, “Software de dimensionamiento y predicción de la característica instalada para válvulas de control” presentado XXI Congreso Interamericano de Ingeniería Química, Lima, Perú, 24 al 27 de abril, 2005. Paper No. 1.3.04. [En línea] Disponible en https://www.ciiq.org/varios/peru_2005/Trabajos/I/3/1.3.04.pdf, Accedido: 19 de junio de 2023
- [51] W. Booyesen, J. van Rensburg and E. Mathews, “Selection of control valves on water optimisation projects” en *2011 Proceedings of the 8th Conference on the Industrial and Commercial Use of Energy*, Cape Town, South Africa, 2011, pp. 53-58.
- [52] M. Barker and H. Penner, “Control valve sizing and selection in pulp and paper - getting it right” en *2016 IEEE Pulp, Paper & Forest Industries Conference (PPFIC)*, Austin, TX, USA, 2016, pp. 114-123, doi: 10.1109/PPIC.2016.7523475.
- [53] G. Polanco, “Cognitive selection strategy for rapid closing valves” en *2014 5th IEEE Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom)*, Vietri sul Mare, Italy, 2014, pp. 543-548, doi: 10.1109/CogInfoCom.2014.7020516.
- [54] F. Meier y C. Meier, *Instrumentation and Control Systems Documentation*, 2da ed, Research Triangle Park, North Carolina: International Society of Automation, 2011.
- [55] C. Yaws, *Yaws’ Critical Property Data for Chemical Engineers and Chemists*, Norwich, New York: Knovel Corporation. [En línea] Disponible en: <https://app.knovel.com/s.v?259sbp9X>, Accedido: 1 de agosto 2023.
- [56] H. Reiss “The Barometric Formula” en *Methods of Thermodynamics*, Mineola, New York: Dover Publications Inc, 1997, pp 184-185.
- [57] R. Johnson, “Boussinesq Approximation” en *Handbook of Fluid Dynamics*, 2da ed. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2016.
- [58] J. Monsen, *An Insider’s Guide to Installed Gain as a Control Valve Sizing Criterion*, Flow Control Network Magazine, vol. XXI, no 5, pp. 22-25, Mayo. 2015. [En línea] Disponible en: <https://www.valin.com/sites/default/files/asset/document/FC%20Mag%20-%20Installed%20Gain.pdf>, Accedido: 29 de junio 2023.
- [59] Schuber & Salzer “Type 7069 – Diaphragm valve”, controlsystems.schubert-salzer.com. <https://controlsystems.schubert-salzer.com/en/products/pinch-and-diaphragm-valves/types/p/type-7069>. Accedido: 11 de diciembre 2023.
- [60] J. Monsen, “Installed Gain as a Control Valve Sizing Criterion”, valin.com. <https://www.valin.com/resources/whitepapers/installed-gain-control-valve-sizing-criterion>, Accedido: 16 de mayo 2023.
- [61] DeZurik, “Programs”, dezurik.com. <https://www.dezurik.com/programs/> Accedido: 31 de mayo de 2023.

Anexo A

Cálculo del Factor de Corrección por Número de Reynolds

Para poder calcular el factor de corrección por número de Reynolds F_R , se requiere distinguir entre dos estilos de internos (*trim* style): completo y reducido. Según sea el caso, se calcula el valor de la constante n acordeamente (Ecuación A.1), los valores de N_2 , N_{18} y N_{32} se encuentran en la Tabla A.1 [19].

$$\begin{aligned} \text{Estilo Completo} &\Leftrightarrow C_{rated}/(d^2 N_{18}) \geq 0,016 \Rightarrow n = N_2/\left(\frac{C}{d^2}\right)^2 \\ \text{Estilo Reducido} &\Leftrightarrow C_{rated}/(d^2 N_{18}) < 0,016 \Rightarrow n = 1 + N_{32}\left(\frac{C}{d^2}\right)^{2/3} \end{aligned} \quad (\text{A.1})$$

Tabla A.1: Valores de las constantes numéricas N_2 , N_{18} y N_{32} [19].

Constante	Coeficiente de Flujo C		Unidad Diámetro Nominal de Válvula (d)
	K_v	C_v	
N_2	$1,60 \cdot 10^{-3}$	$2,14 \cdot 10^{-3}$	<i>mm</i>
N_{18}	$8,65 \cdot 10^{-1}$	1	<i>mm</i>
N_{32}	$1,40 \cdot 10^2$	$1,27 \cdot 10^2$	<i>mm</i>

Finalmente, se calcula el factor de corrección por número de Reynolds (F_R) de acuerdo a la Ecuación A.2

$$F_R = \begin{cases} \min \left\{ \frac{0,026}{F_L} \sqrt{n Re_v}, 1 \right\} & \text{si } Re_v < 10 \\ \min \left\{ 1 + \left(\frac{0,33 F_L^{1/2}}{n^{1/4}} \right) \log_{10} \left(\frac{Re_v}{10000} \right), \frac{0,026}{F_L} \sqrt{n Re_v}, 1 \right\} & \text{si } 10 \leq Re_v < 10000 \end{cases} \quad (\text{A.2})$$

Anexo B

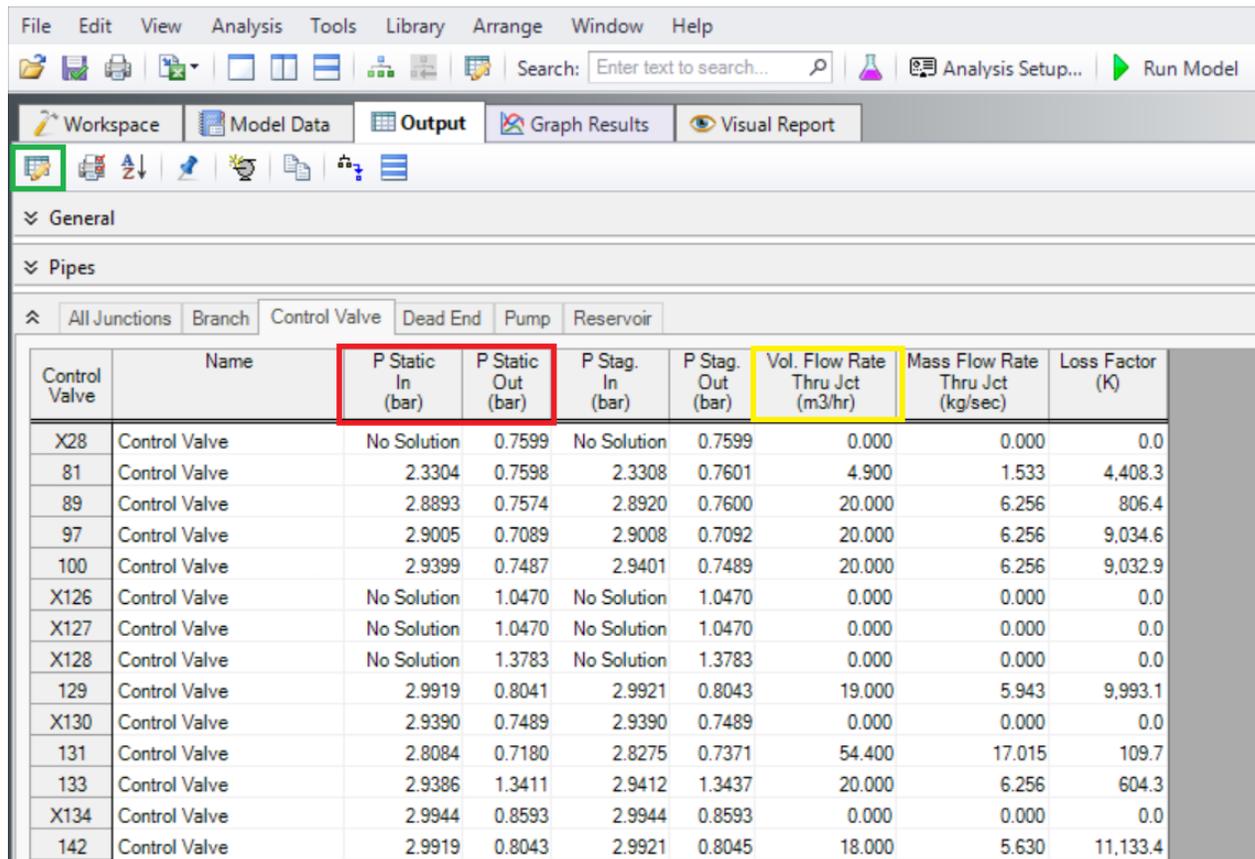
Reporte de Resultados Exportado de *AFT Fathom*

AFT Fathom 12 (Output) 5/1/2023 Page 1	AFT Fathom Model	
<p><u>Model Reference Information</u></p> <p><u>General</u></p> <p>Title: AFT Fathom Model Analysis run on: 5/1/2023 11:19:22 AM Application version: AFT Fathom Version 12 (2021.11.05) Input File: Scenario: Output File:</p> <p>Execution Time= 0.28 seconds Total Number Of Head/Pressure Iterations= 0 Total Number Of Flow Iterations= 2 Total Number Of Temperature Iterations= 0 Number Of Pipes= 54 Number Of Junctions= 55 Matrix Method= Gaussian Elimination</p> <p>Pressure/Head Tolerance= 0.0001 relative change Flow Rate Tolerance= 0.0001 relative change Temperature Tolerance= 0.0001 relative change Flow Relaxation= (Automatic) Pressure Relaxation= (Automatic)</p> <p>Constant Fluid Property Model Fluid Library: User Specified Fluid= Salmuera Density= 1126 kg/m3 Viscosity= 5 centipoise Vapor Pressure= 0.02 bar Viscosity Model= Newtonian</p> <p>Apply laminar and non-Newtonian correction to: Pipe Fittings & Losses, Junction K factors, Junction Special Losses, Junction Polynomials Corrections applied to the following junctions: Branch, Reservoir, Assigned Flow, Assigned Pressure, Area Change, Bend, Tee or Wye, Spray Discharge, Relief Valve</p> <p>Ambient Pressure (constant)= 0.75 atm Gravitational Acceleration= 1 g Turbulent Flow Above Reynolds Number= 4000 Laminar Flow Below Reynolds Number= 2300 Total Inflow= 275.1 m3/hr</p> <p>Total Outflow= 275.1 m3/hr Maximum Static Pressure is 2.839 bar at Pipe 2 Inlet Minimum Static Pressure is 0.6303 bar at Pipe 1 Outlet</p> <p><u>Warnings</u></p> <p>TreeList</p> <p><u>Pump Summary</u></p>		

Figura B.1: Captura del informe de resultados exportado de ATF Fathom, correspondiente a la primera hoja del mismo. Los rectángulos muestran donde se puede encontrar algunos valores de interés.

Anexo C

Pantalla de Resultados *ATF Fathom*



Control Valve	Name	P Static In (bar)	P Static Out (bar)	P Stag. In (bar)	P Stag. Out (bar)	Vol. Flow Rate Thru Jct (m3/hr)	Mass Flow Rate Thru Jct (kg/sec)	Loss Factor (K)
X28	Control Valve	No Solution	0.7599	No Solution	0.7599	0.000	0.000	0.0
81	Control Valve	2.3304	0.7598	2.3308	0.7601	4.900	1.533	4,408.3
89	Control Valve	2.8893	0.7574	2.8920	0.7600	20.000	6.256	806.4
97	Control Valve	2.9005	0.7089	2.9008	0.7092	20.000	6.256	9,034.6
100	Control Valve	2.9399	0.7487	2.9401	0.7489	20.000	6.256	9,032.9
X126	Control Valve	No Solution	1.0470	No Solution	1.0470	0.000	0.000	0.0
X127	Control Valve	No Solution	1.0470	No Solution	1.0470	0.000	0.000	0.0
X128	Control Valve	No Solution	1.3783	No Solution	1.3783	0.000	0.000	0.0
129	Control Valve	2.9919	0.8041	2.9921	0.8043	19.000	5.943	9,993.1
X130	Control Valve	2.9390	0.7489	2.9390	0.7489	0.000	0.000	0.0
131	Control Valve	2.8084	0.7180	2.8275	0.7371	54.400	17.015	109.7
133	Control Valve	2.9386	1.3411	2.9412	1.3437	20.000	6.256	604.3
X134	Control Valve	2.9944	0.8593	2.9944	0.8593	0.000	0.000	0.0
142	Control Valve	2.9919	0.8043	2.9921	0.8045	18.000	5.630	11,133.4

Figura C.1: Pantalla de resultados para las válvulas de control de una simulación de *ATF Fathom*.

La figura C.1, muestra la pantalla de resultados del software *ATF Fathom*, particularmente, el apartado de válvulas de control. La imagen destaca los valores relevantes a la obtención de las presiones para un flujo de operación:

- **Rectángulo Rojo:** muestra las presiones estáticas (P Static) a la entrada (In) y la salida (Out) de la válvula. Entre paréntesis aparece la unidad de presión, que en el ejemplo es [bar] (presión absoluta). Si fuera una presión manométrica se indicaría la unidad de presión [barG].

- **Rectángulo Amarillo:** es la columna donde sale el flujo volumétrico a través de la válvula (*Vol. Flow Rate Thru Jct.*). Entre paréntesis se indica la unidad de flujo volumétrico, que en este caso es $[m^3/h]$.
- **Rectángulo Verde:** muestra el botón del menú de opciones de presentación de resultados. Si se presiona este botón, luego, se selecciona la pestaña *Display Parameters* y se presiona el botón *Junctions*, es posible configurar las unidades con que se despliegan los diferentes datos. Si se elige una unidad de presión que termine en “G” o “(g)” corresponde a una presión manométrica.

Dado que los sistemas de cañerías tienen varias válvulas de control siempre es requerido distinguir entre ellas dentro y fuera de la simulación. La primera columna corresponde al número de *Junction* que es el número único que se le asigna a cada ítem dentro de la simulación. La correlación entre el número de *Junction* y la etiqueta de la válvula dentro del proyecto puede presentarse directamente en la columna *Name* de la pantalla de resultados o como comentario en el diagrama de la pestaña *Workspace*. En caso que la etiqueta de la válvula esté en los comentarios del *Workspace*, las válvulas de control son verdes y tienen una letra J (por *Junction*) seguida por un número, que corresponde al número de la primera columna de la pantalla de resultados para válvulas de control.

Las válvulas de control que salen con una “X” en la primera columna, indica que se encuentran cerradas al momento de calcular las presiones. No se debe olvidar que esta pantalla de resultados corresponde a un punto de operación del sistema y que se requiere realizar varias simulaciones para obtener las presiones en los distintos puntos de operación.

Anexo D

Estimación de la Curva de Presión Instalada

Producto del principio de Bernoulli, la relación entre la presión estática varía con el cuadrado de la velocidad del fluido, que para fluidos incompresibles es directamente proporcional al caudal. Además, las pérdidas de presión son directamente proporcionales a la velocidad. Luego, la relación entre el caudal Q y la presión estática se modela como una curva parabólica con su máximo o mínimo en $Q = 0$ [13, 58]. Esto permite ajustar una curva cuadrática dependiente del flujo para modelar la presión, usando mínimos cuadrados (Ecuación D.1).

$$\begin{aligned} p_1(Q) &= a_1 * Q^2 + b_1 * Q + c_1 \quad \text{con } p_1 \geq 0 \\ p_2(Q) &= a_2 * Q^2 + b_2 * Q + c_2 \quad \text{con } p_2 \geq 0 \\ \Delta p(Q) &= p_1(Q) - p_2(Q) \end{aligned} \tag{D.1}$$

Los fabricantes Valmet y Valin asumen que b_1 y b_2 son 0 en sus programas de dimensionamiento, dejando que el ajuste de curva solo se realice sobre los parámetros a y c [21, 60]. Además, los programas anteriores y el software de DeZurik, Alpha-I, mencionan en sus manuales que sus cálculos son solo válidos para sistemas donde se cumplan las condiciones de la Ecuación D.2 [61].

$$\begin{aligned} p_{1,Q_{Corte}} &\geq p_{1,Q_{min}} \geq p_{1,Q_{nor}} \geq p_{1,Q_{max}} \\ p_{2,Q_{Corte}} &\leq p_{2,Q_{min}} \leq p_{2,Q_{nor}} \leq p_{2,Q_{max}} \end{aligned} \tag{D.2}$$

Si se compara este método con respecto a los resultados entregados directamente por *AFT Fathom* para varias válvulas, se obtiene un error menor del 0,5% en la estimación de las presiones para los flujos de operación. Sin embargo, presenta un error mayor al 28% en la predicción del flujo máximo a través de la línea sin válvula y el error de estimación de la presión de corte ($Q = 0$) es de alrededor del 2% comparado con los valores de *AFT Fathom*. Por otro lado, el error de estimación de los C_v requeridos es menor al 1% con respecto a los valores calculados con *AFT Fathom*, es importante destacar que las tolerancias permitidas en C_v son mayores al 10% bajo el estándar ANSI/ISA-75.11.01 [30, 31].

Si se admiten que los parámetros b_1 y b_2 sean distintos de 0 y se consideran las condiciones de la Ecuación D.2, el problema de ajuste de curva queda representado en la Ecuación D.3.

$$\begin{aligned}
p_1(Q) &= a_1 * Q^2 + b_1 * Q + c_1 \quad \text{con } a_1, b_1 \leq 0 \text{ y } c_1 \cdot p_1 \geq 0 \\
p_2(Q) &= a_2 * Q^2 + b_2 * Q + c_2 \quad \text{con } a_2, b_2, c_2, p_2 \geq 0 \\
\Delta p(Q) &= p_1(Q) - p_2(Q)
\end{aligned}
\tag{D.3}$$

Si la estimación se realiza con la expresión de la Ecuación D.3, el error de las presiones de los flujos de operación sigue siendo bajo 0,5%. Sin embargo, el error del flujo máximo es menor al 5%, el error de la estimación de la presión de corte es de 1,6% y el error de estimación del C_v para los flujos de operación es menor al 0,5% cuando se compara con los datos obtenidos en *AFT Fathom*.