

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL

MAESTRÍA EN INGENIERÍA EN CONTROL AUTOMÁTICO

TESIS DE MAESTRÍA

EVALUACIÓN POR SIMULACIÓN DE CONTROLADOR  
APLICADO A PROCESO DE SEPARACIÓN E IMPULSIÓN  
DE HIDROCARBUROS LÍQUIDOS

ARIEL EDGARDO AGNELLO

Director de Tesis: Mg. Ing. Ruben Domingo Bufanio

Codirector de Tesis: Mg. Ing. Gustavo Eduardo Monte

Plaza Huincul, Marzo 2021

**Agradecimientos:**

- Agradezco a mi familia de quienes recibo su contención y amor.
- A la Universidad Tecnológica Nacional por la formación que me dio.
- A la comunidad educativa de la Facultad Regional del Neuquén que me brindó esta gran oportunidad de formación.
- A mis docentes y colegas por su cordialidad y ayuda.
- A los alumnos con quienes transitamos el camino del conocimiento.
- A la colaboración y comprensión de Docentes y compañeros de la Maestría.
- A los profesores Ruben Bufanio y Gustavo Monte por la dedicación en este recorrido.

# ÍNDICE

<b>1. Introducción</b> .....	1
1.1. Objetivo del capítulo.....	1
1.2. Descripción de las instalaciones de estudio .....	1
1.3. Descripción del problema .....	3
1.4. Objetivos y propuestas de la Tesis de Maestría .....	4
1.5. Investigación Bibliográfica .....	4
1.5.1. Bibliografía utilizada para modelado de la planta .....	5
1.5.1.1. Bibliografía orientada a comprender el funcionamiento y características de los equipos de instalaciones Petroleras.....	5
1.5.1.2. Bibliografía orientada a entender la dinámica de los fluidos .....	6
1.5.1.3. Bibliografía orientada a entender técnicas de modelado .....	7
1.5.2. Bibliografía empleada para el diseño y simulación del controlador .....	8
1.5.2.1. Bibliografía orientada a entender el diseño y desarrollo de los controladores PID y controladores adaptivos. ....	8
1.6. Organización del Documento .....	9
<b>2. Planteo del modelo de la planta</b> .....	11
2.1. Objetivo del capítulo.....	11
2.2. Introducción al capítulo .....	11
2.3. Descripción general de la planta en estudio.....	12
2.4. Alcance de la planta a analizar.....	14
2.5. Esquema de la planta.....	16
2.6. Conclusión del capítulo.....	17
<b>3. Modelado de subsistemas</b> .....	19
3.1. Objetivo del capítulo.....	19
3.2. Introducción al capítulo .....	19
3.3. Modelo de la bomba centrífuga .....	19

3.3.1	Curva característica.....	20
3.3.2	Eficiencia de la bomba .....	21
3.3.3	Caracterización de la bomba a modelar .....	22
3.3.4	Elaboración del modelo matemático de la bomba centrífuga .....	22
3.3.5	Cálculo de la presión sobre la descarga de bomba y eficiencia.....	26
3.4.	Modelo de las válvulas de control .....	28
3.4.1	Característica inherente.....	29
3.4.2	Característica instalada .....	29
3.4.3	Cálculo de caudal por una válvula.....	29
3.5.	Conclusión del capítulo.....	34
3.6.	Recomendaciones del capítulo .....	35
<b>4.</b>	<b>Validación del modelo de planta .....</b>	<b>36</b>
4.1.	Objetivo del capítulo.....	36
4.2.	Introducción al capítulo .....	36
4.3.	Magnitudes medidas en la planta.....	37
4.4.	Recopilación de valores de la planta .....	38
4.5.	Criterio de validación .....	42
4.6.	Esquema de Simulink para la validación del modelo .....	43
4.7.	Comparación de resultados .....	44
4.8.	Conclusión del capítulo .....	46
4.9.	Recomendaciones del capítulo .....	47
<b>5.</b>	<b>Análisis del controlador actual de planta.....</b>	<b>48</b>
5.1.	Objetivos del capítulo .....	48
5.2.	Introducción al capítulo .....	48
5.3.	Descripción del sistema de control actual.....	48
5.4.	Condiciones de prueba .....	51
5.5.	Ajuste del controlador .....	52
5.6.	Análisis para diferentes formas de entrada.....	57

5.7. Análisis para diferentes valores de consigna de entrada .....	59
5.8. Conclusión del capítulo .....	61
5.9. Recomendaciones del capítulo .....	63
<b>6. Evaluación y propuesta de modificaciones en controlador de planta</b> .....	<b>64</b>
6.1. Objetivos del capítulo .....	64
6.2. Introducción al capítulo .....	64
6.3. Controlador de ganancia tabulada .....	64
6.4. Ajuste de sintonía y análisis de condiciones operativas.....	65
6.4.1 Ajuste de la sintonía para disminuir sobre impulsos de la respuesta .....	66
6.4.2 Ajuste de sintonía para mejorar en altas velocidades .....	67
6.5. Diseño del controlador de ganancias tabuladas.....	67
6.6. Simulación del controlador de ganancias tabuladas .....	69
6.7. Evaluación de controladores .....	72
6.8. Conclusión del capítulo .....	75
<b>7. Conclusiones</b> .....	<b>77</b>
7.1. Conclusiones generales.....	77
7.2. Recomendaciones.....	78
7.3. Trabajo futuro .....	78
<b>Anexo A:</b> Curvas características de la bomba FlowServe .....	<b>79</b>
<b>Anexo B:</b> Hojas de especificación válvulas de control .....	<b>81</b>
<b>Referencias:</b> .....	<b>83</b>

## **Resumen:**

En la producción de hidrocarburos líquidos, se extrae un flujo proveniente de pozos hidrocarburíferos que se concentra en instalaciones de superficie, llamadas baterías. En estas, se cuentan con bombas centrífugas que cumplen la funcionalidad de mantener, según consignas, un nivel de líquidos en los separadores de la planta, e impulsar la producción por el oleoducto hacia aquella denominada de tratamiento. Estas bombas son elementos críticos si se quiere lograr un desempeño óptimo de la batería, y requieren por lo tanto para su adecuado funcionamiento de un sistema de control que maximice su eficiencia energética.

En función de lo anterior indicado, en este trabajo se estudia, desarrolla, y valida un modelo de planta que incluya en un sistema de control, a la indicada bomba centrífuga, las válvulas de descarga y recirculación, necesarias para optimizar su estado de funcionamiento, esto es, mantener a la misma en un valor de eficiencia máximo según curvas de fabricante.

Con dicho modelo, establecido según parámetros reales de campo, y a través de simulaciones, se ensaya y evalúa el desempeño del sistema de control. Luego a través de los resultados obtenidos, se propone una mejora y para ello se diseña un controlador adaptivo, que según valores adquiridos incrementa el desempeño del controlador actual, brindando una innovadora propuesta, dado el ahorro energético entrega al sistema de batería, respecto al del escenario actual.

**Tablas:**

3.1. Características principales de la bomba centrífuga .....	22
4.1. Resultados índices RMS y MSE.....	46
5.1. Condiciones de proceso .....	52
5.2. Valor de eficiencia para diferentes condiciones medidos en el período 500 a 4000s. .....	61
6.1. Comparación entre controladores de eficiencia.....	73
6.2. Comparación entre controladores: Energía sobre el eje .....	75

## Figuras:

1.1 Esquema de batería típico .....	1
1.2 Esquema de batería sin tanque.....	2
1.3 Cuadro de clasificación Bibliográfica.....	5
2.1 P+ID Separador bifásico (líneas de líquidos).....	12
2.2 Esquema en bloques de la planta .....	17
3.1 Altura vs caudal aproximación con distintos órdenes de polinomios .....	24
3.2 Eficiencia vs caudal aproximación con distintos órdenes de polinomios.....	24
3.3 Diagrama en bloques de la bomba centrífuga.....	27
3.4 Caudal por válvula en función de la presión. Apertura total .....	33
3.5 Caudal por válvula de 4" en función de la presión. Distintas aperturas.....	33
3.6 Diagrama en bloques de válvula de control.....	35
4.1 Gráfica temporal de los datos de planta.....	41
4.2 Diagrama en bloques validación de planta.....	44
4.3 Gráfica temporal de salida real contra modelo .....	44
4.4 Error porcentual entre la variable simulada y la real .....	45
5.1 Esquema sistema de control .....	49
5.2 Esquema de bloques Simulink de rango partido .....	50
5.3 Diagrama en bloques para simulación sistema de control actual .....	53
5.4 Señal de prueba velocidad de bomba tipo escalón .....	55
5.5 Salida simulación controlador actual $G_p=5$ , $G_i=5$ , para entrada escalón.....	55
5.6 Salida simulación controlador actual $G_p=2$ , $G_i=2$ , para entrada escalón.....	56
5.7 Análisis señal de eficiencia simulación $G_p=2$ , $G_i=2$ , para entrada escalón.....	57
5.8 Señales de prueba de velocidad de bomba tipo rampa y parábola .....	58
5.9 Salida simulación controlador actual $G_p=5$ , $G_i=5$ , para entrada rampa y parábola .....	58
5.10 Salida simulación controlador actual $G_p=2$ , $G_i=2$ , para entrada rampa y parábola .....	60



5.11 Respuesta de la eficiencia de la bomba para distintas condiciones de proceso .....	62
6.1 Salida de eficiencia simulación controlador para $G_p=2$ y $G_i=2$ .....	66
6.2 Salida de eficiencia simulación controlador para $G_p=2$ y $G_i=1$ .....	67
6.3 Salida de eficiencia simulación controlador para $G_p=2$ y $G_i=0,2$ .....	68
6.4 Característica Lookup Table propuesta de ganancia integral respecto a velocidad de giro .....	69
6.5 Controlador de ganancia tabulada.....	70
6.6 Respuesta de la salida de eficiencia de controlador de ganancia tabuladas.....	70
6.7 Respuesta de las salidas del controlador de ganancias tabuladas .....	71
6.8 Estadística del controlador de ganancia tabulada .....	72
6.9 Potencia al freno para ambos controladores .....	74

## Símbolos y Abreviaturas:

CV	Variable controlada de controlador PID
FT	Transmisor de presión
Gd	Ganancia derivativa de un controlador PID
Gi	Ganancia integral de un controlador PID
Gp	Ganancia proporcional de un controlador PID
HMI	Interfase hombre máquina
IP	Convertidor presión - corriente
LCV	Válvula de control de nivel
LIC	Control indicador de nivel
LT	Transmisor de nivel
LTI	Lineal e invariante en el tiempo
MSE	Error cuadrático medio
PCV	Válvula de control de presión
PIC	Control indicador de presión
PID	Controlador proporcional, integral y derivativo
PLC	Controlador lógico programable
PT	Transmisor de presión
PV	Variable principal de controlador PID
RMS	Media cuadrática relativa
RPM	Revoluciones por minuto
SCADA	Supervisión, control y adquisición de datos
SP	Punto de establecimiento de controlador PID
VSD	Variador de velocidad

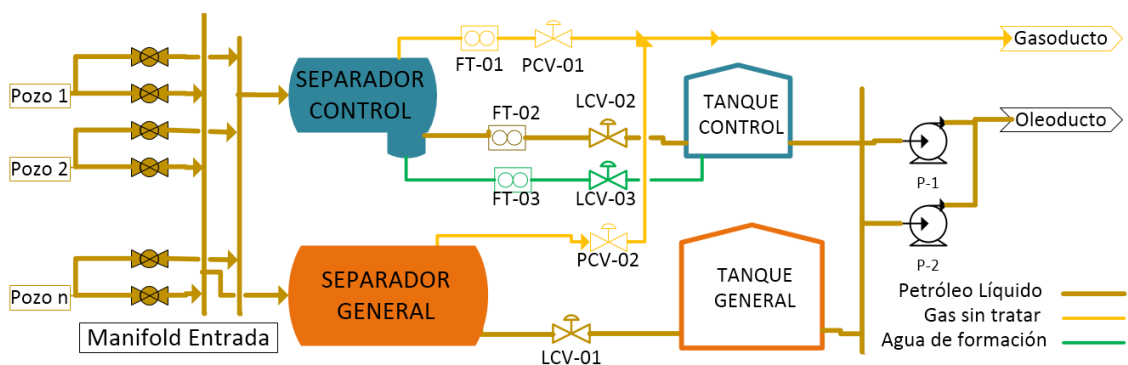
# CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Objetivo del capítulo

- Describir lo referente al desarrollo de la tesis de maestría, partiendo del planteo del problema a abordar, fijando objetivos y propuestas.
- Realizar un análisis de la bibliografía relevante indicando en forma pormenorizada su participación en cada etapa de este estudio.
- Informar, de manera resumida, el alcance de los capítulos del presente trabajo.

## 1.2 Descripción de las Instalaciones de estudio

En la producción de hidrocarburos líquidos, se extrae un flujo proveniente de pozos hidrocarburíferos que se concentran en instalaciones de superficie, llamadas baterías. En estas, el flujo es procesado primariamente con separadores [2], los cuales dividen la producción bruta en flujos de gas, petróleo líquido y agua. Los flujos de fase líquida son derivados a tanques que cumplen la función de contenedores provisorios y alimentadores de bombas impulsoras que conducen la producción hacia alguna planta de procesamiento de hidrocarburos como se muestra a través de figura 1.1.

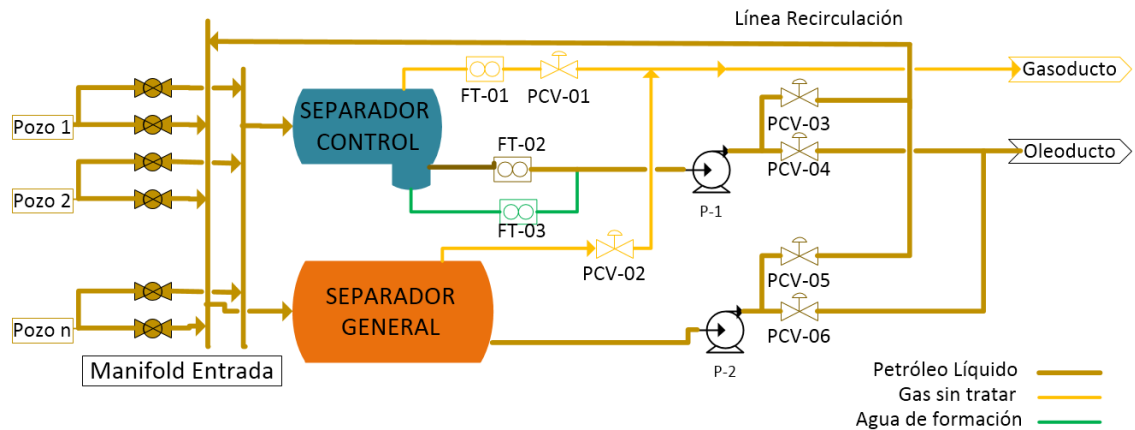


**Figura 1.1:** Esquema de batería típico.

En un yacimiento existen varias baterías como las descritas, distribuidas en el campo, que entregan su producción a las plantas de procesamiento de petróleo, agua y gas,

dependiendo de las características de este. Las baterías, como se muestra además en figura 1.2, pueden incluir o no la presencia de tanques, esto dependerá de la decisión de ingeniería de la empresa productora, la cual contempla aspectos económicos, políticos y medio ambientales.

En particular, trataremos la problemática del control en el proceso de separación, para baterías de producción hidrocarburíferas, en donde no se han empleado tanques de acopio para rebombeo.



**Figura 1.2:** Esquema de batería sin tanque.

Se destaca que el flujo que proviene de los pozos no es constante, ni en el caudal, ni en su composición o relación petróleo, agua y gas. Esto es debido a variaciones en el caudal propio de los pozos o por maniobras realizadas como apertura y cerrado de pozos desde el manifold de entrada a batería.

Toda batería cuenta con una línea de flujo principal donde se concentra la producción de los pozos que ingresa a la batería, y una línea de control, de menores dimensiones, donde se vincula un solo pozo, desde el manifold de válvulas de ingreso, el cual sirve para mediciones de control (medición de caudales de petróleo, agua y gas, por pozo). Estas dos líneas conducen la producción desde el manifold de ingreso hacia el separador general o el separador de control respectivamente [2].

Los equipos separadores son los encargados de separar el flujo de producción en flujo líquido (agua y petróleo) y flujo gaseoso, para los separadores bifásicos como el

separador general. En el caso del separador de control, el flujo se separa en flujo de petróleo, flujo de agua y flujo gaseoso, ya que se trata de un separador trifásico [2]. Para que estos separadores funcionen correctamente, se dispone de un control de nivel de líquidos, compuesto por sensor de nivel continuo, control de velocidad de bomba centrífuga y controlador PID.

La producción evacuada por las bombas centrífugas es canalizada hacia el oleoducto de salida de batería, por medio de una válvula de control de descarga, o recirculada hacia el manifold de ingreso a través de una válvula de recirculación. Estas válvulas operan como válvulas de control de presión en la descarga de la bomba, completando de esta manera las facilidades correspondientes a la batería (ver figura 1.2).

Las señales de instrumentos de campo, y de los elementos finales de control, son centralizados en un controlador PLC de última generación, el cual implementa toda la lógica de monitoreo y control supervisor de la batería.

### **1.3 Descripción del problema**

Tal como se plantea en el punto anterior, las bombas centrífugas cumplen un rol crucial en la operación de la batería. Estas deben mantener bajo control el nivel de líquidos de los separadores y, además, deben generar la presión necesaria para evacuar la producción al oleoducto de salida.

Por esta razón, se pone el foco sobre el control de las bombas centrífugas, utilizando variadores de velocidad (VSD) para el control de las RPM, y válvulas de descarga y recirculación para el control sobre la descarga de estas.

Se cuenta con información del desempeño de la bomba centrífuga utilizada, no solo en cuanto a su performance (altura / caudal), sino también sobre su eficiencia. Mantener a la bomba centrífuga dentro de su régimen de alta eficiencia, conlleva a un ahorro de energía y a minimizar su desgaste. Lo cual es de interés para la empresa productora [1],[2],[6], y [9].

Este trabajo propone investigar y desarrollar una estrategia superadora de controlar estas bombas centrífugas con el fin de mejorar sus índices de desempeño.

Actualmente, estas instalaciones cuentan con un control del tipo PID (Proporcional, Integral, Derivativo), cuya variable controlada es el nivel del separador y la variable de control manipulable son las RPM de la bomba centrífuga. Otro PID controla la presión de descarga de la bomba, de tal forma de mantener su operación dentro del área de mayor eficiencia, por medio de la apertura o cierre de las válvulas de descarga y recirculación.

#### **1.4 Objetivos y propuestas de la Tesis de Maestría**

El objetivo principal de este trabajo es encontrar una alternativa de controlador que maximice eficiencia y funcionalidad según las variables que intervienen sobre la operación de las bombas centrífugas, adecuado y factible de implementar en las instalaciones de las baterías petroleras, teniendo como alternativas el control actual más los disponibles en control automático moderno.

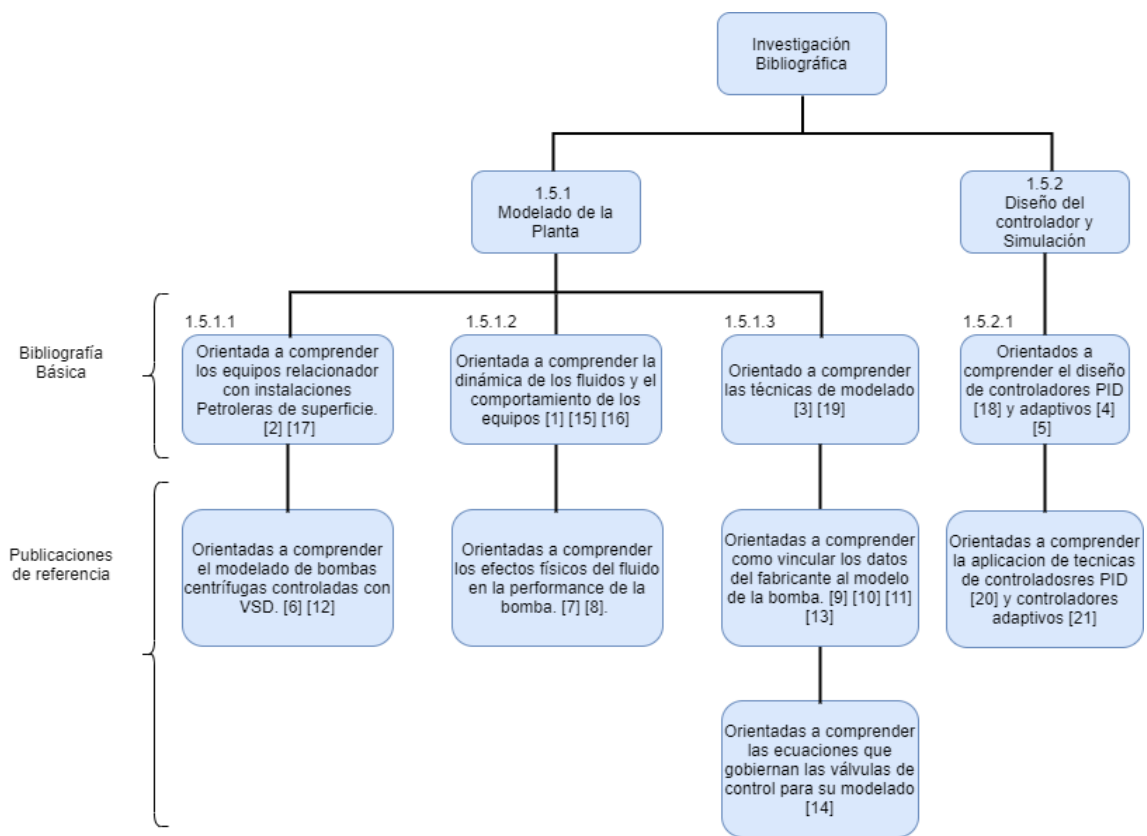
Además, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Realizar un modelo de la planta que incluya las características de la bomba centrífuga, válvulas de control, presiones y caudales de líneas. Este modelo será el entorno de prueba y evaluación de los controladores existente y a desarrollar.
- Estudiar y proponer un controlador usando técnicas de control adaptivo que actúe sobre la presión y mantenga a la bomba en zona de operación de alta eficiencia.
- Realizar un análisis comparativo, según índices de desempeño, de los controladores planteados en base a resultados de las simulaciones para condiciones dinámicas.

#### **1.5 Investigación Bibliográfica**

Los objetivos propuestos demandan el empleo de técnicas de control moderno, como el modelado, simulación, y controladores adaptivos. Durante el estudio del estado de arte,

sobre problemáticas similares, se destaca el empleo de modelos dinámicos de los equipos bajo estudio, diseño de controladores complejos, como controladores adaptativos, difusos, no lineales, etc., empleo de técnicas y sistemas computacionales para la simulación [6][7][8][9][10][11][12][13]. Luego de una búsqueda de trabajos publicados en diferentes sitios, se determina como pauta de investigación, planteo, y evaluación, la obtención para el caso de estudio de un modelo que logre determinar los parámetros de diseño de un controlador, que luego por modelado y simulación permita evaluar su desempeño frente a propuesta actual u otras.



**Figura 1.3:** Cuadro de clasificación Bibliográfica

### 1.5.1 Bibliografía utilizada para modelado de la planta

#### 1.5.1.1 Bibliografía orientada a comprender el funcionamiento y características de los equipos de instalaciones Petroleras.

Se recurrió a bibliografía para entender y enmarcar la planta en estudio desde una perspectiva formal, tanto en bibliografía relacionada con la producción de hidrocarburos

[17], como bibliografía relacionada con los equipos de proceso que se emplean en dicha industria [2]. Si bien no es el objeto de este trabajo la profundización en estos equipos desde la perspectiva de diseño y/o dimensionado, se requiere entender el funcionamiento de los equipos que intervienen y los elementos de instrumentación y control que actualmente se emplean.

En particular, de [2] se obtuvo información para entender las instalaciones de producción petrolera. En esta bibliografía se desarrollan los procesos de separación de fluidos y los equipos que intervienen, como los separadores de dos y tres fases. Si bien esta bibliografía se centra en el dimensionado de las instalaciones, también, se aboca a describir las necesidades de instrumentación y equipos de control. Con esta bibliografía, se pudo entender el diseño de la planta real, cuyo relevamiento fue usado en este trabajo, en cuanto a las dimensiones y equipamiento.

En [17] se describe también todo del proceso de producción de hidrocarburos, de lo cual extraemos lo relacionado con nuestra instalación de estudio, el cual se corresponde con la producción de hidrocarburos líquido. Obtenemos una descripción general de las instalaciones de superficie, cuál es su función y como se instrumenta, con lo cual nos permite relacionarlo con nuestra planta. También se hace una descripción de la tecnología empleada en los sistemas de control empleados, su procesamiento y la integración con sistemas HMI/SCADA.

Con la publicación [6] se analiza un caso donde también se modela una bomba centrífuga cuyo motor eléctrico está conectado a un VSD por lo que aplica las ecuaciones de afinidad utilizadas en este trabajo. En [12] se realiza el modelo de una bomba centrífuga donde también se incluye el sistema de control de presión de descarga a fin de mantener a esta en zona de operación de alta eficiencia.

#### **1.5.1.2 Bibliografía orientada a entender la dinámica de los fluidos**

Como el diseño de la planta está relacionada con el procesamiento de un fluido líquido, se empleó [1] para consulta de las relaciones matemáticas que aplican dichos fluidos, en particular a los fluidos incompresibles. Si bien se tratan de leyes físicas generales como



el principio de Bernoulli, la bibliografía muestra su aplicación para sistemas con bomba centrífuga.

Para modelar la bomba centrífuga, se recurrió a bibliografía en donde se pueda entender su funcionamiento y características [15]. De esta, se extrajeron definiciones importantes de la característica de las bombas centrífugas como las de caudal contra altura y eficiencia. En base a estas se pudo interpretar el material del fabricante para dimensionar y obtener un modelo adecuado de la bomba. También se presenta las ecuaciones de afinidad las cuales son de utilidad cuando se trabaja en conjunto con un variador de velocidad.

Para modelar las válvulas, en [16] se obtuvieron las relaciones que vinculan el caudal con la caída de presión y su apertura. también, se presenta la geometría de estas y cómo influyen en el caudal. En la planta real se han seleccionado un par de válvulas, cuyos datos de tamaño, tipo y materiales son especificados en una hoja de datos de la ingeniería de obra de la planta. Con estos datos, la bibliografía provee las relaciones de caudal a presión y apertura necesarias para su modelado.

Con la publicación [7] se obtuvo un ejemplo práctico del análisis del efecto producido sobre el fluido de la bomba centrífuga y en [8] un análisis de como las características de la bomba centrífuga se ven alterados por el tipo de fluido, en particular los del grupo de hidrocarburos.

#### **1.5.1.3 Bibliografía orientada a entender técnicas de modelado**

El trabajo de modelado es complejo y suele tener marchas y contramarchas. En [3] y [19] se presentan diversos ejemplos de modelados de sistemas, desde sistemas dinámicos, estocásticos, lineales y alineales. Estas bibliografías nos introducen al proceso de modelado, principalmente de sistemas físicos. En [3] aporta un gran número de ejemplo donde se han modelado sistemas donde intervienen fluido líquido, de donde se han sacado ideas para el abordaje del presente trabajo, [19] aporta la forma de trabajar con datos medidos de la planta tanto para identificar sistemas como para validarlos. En particular nos apoyamos en la validación del modelo, para lo cual se deben procesar los

datos y analizar los resultados obtenidos. también aporta los criterios de aceptación de resultados.

En la publicación [9] se modela una bomba centrífuga con los datos de fábrica y se utiliza la ecuación de Bernoulli, tal como se realiza en este trabajo, para vincular la altura desarrollada por la bomba con la presión de succión y descarga.

De [10], [11] y [13] también se toman los datos provistos por el fabricante de la bomba para el ajuste de las ecuaciones usadas en el modelo a emplear. Los modelos empleados en estos trabajos difieren en función de la aplicación y el resultado a obtener.

En [14] contamos con un libro de “mano” para el dimensionado y mantenimiento de válvulas de control. Es una publicación realizada por uno de los más importantes fabricantes del sector, aportando información de desempeño y ecuaciones de las válvulas empleadas en la planta.

## **1.5.2 Bibliografía empleada para el diseño y simulación del controlador.**

### **1.5.2.1 Bibliografía orientada a entender el diseño y desarrollo de los controladores**

#### **PID y controladores adaptativos.**

Para el diseño y posterior análisis de desempeño de los controladores implementados en este trabajo, se emplearon técnicas explicadas en diferentes bibliografías como [4], [5] y [18].

La elección del controlador adaptivo demandó el estudio de dicha disciplina en [4] y [5]. Esta bibliografía aportó los criterios para la selección del controlador PID de ganancia tabulada. En [4] se entendió que tipo de planta demanda y justifica un controlador adaptivo y en [5] se presenta este tipo de controlador junto con diferentes técnicas de análisis y ajuste.

De [18] se obtuvieron importantes definiciones para aplicar o descartar técnicas de control, que criterios de ajuste emplear para el caso de aplicación y métodos para la evaluación de su desempeño. Esta bibliografía no se centra solo en control adaptivo, sino que tiene un enfoque práctico de aplicación para el conjunto de técnicas de control, por

lo que aportó también definiciones y técnicas empleadas en el proceso de validación de la planta desarrollada.

En la publicación [20] se obtuvo información práctica sobre técnicas de sintonía de los controladores PID y las condiciones para su aplicación.

En [21] se obtiene un ejemplo válido para la aplicación de controladores PID de ganancia tabulada aplicado a un sistema de control de posición.

## **1.6 Organización del Documento**

En base a lo planteado en el apartado anterior, se divide el trabajo en 7 capítulos y 2 apéndices, siendo el desarrollo u objetivo alcanzado en cada uno de ellos el siguiente:

- Capítulo 1: Introducción

Muestra una situación general del estudio, justificando y fundamentando el trabajo, los resultados que se pretenden obtener, planteando una alternativa de mejora sobre el controlador empleado actualmente.

Da detalle de objetivos y propuestas de la tesis de maestría, indicado bibliografía empleada y organización de esta.

- Capítulo 2: Planteo del Modelo de la planta

En este capítulo se hace una descripción general de la planta a modelar y las relaciones útiles a los fines del proyecto. En base a esta definición, se establecen bloques o partes fundamentales, los cuales serán abordados por separado. De esta forma, se determina la estructura general de la planta a modelar.

- Capítulo 3: Modelado de subsistemas

Se describen las características físicas de los equipos a modelar usando la información proporcionada por el fabricante. Con las relaciones matemáticas que vinculan a los equipos, a través de las magnitudes físicas intervinientes, se establece la estructura de los bloques de estos equipos, quedando el modelo de planta determinado.

- Capítulo 4: Validación del modelo

Se plantea la estrategia para validar el modelo obtenido. Para ello se procesa la información provista por la planta real, y se la compara con la del modelo obtenido.

- Capítulo 5: Controlador actual

Usando el modelo desarrollado se evalúa el desempeño del controlador actual, para ello se plantean las condiciones de procesos necesarias.

- Capítulo 6: Rediseño del controlador

En base a resultados se establecen las pautas de mejoras a lograr sobre el controlador analizado. Siguiendo las características deseadas, o especificaciones de funcionamiento, se selecciona la técnica de control adaptivo adecuada a la aplicación, se la diseña y desarrolla.

Se realizan pruebas de simulación de funcionamiento en condiciones análogas a las que se somete al controlador actual y se comparan desempeños.

- Capítulo 7: Conclusiones

Se realiza un sumario de los resultados obtenidos tanto del modelo como de los controlados analizados.

- Apéndice A: Curvas características de la bomba.

Gráficas y tablas de las características operativas de la bomba centrífuga a modelar provista por el fabricante.

- Apéndice B: Hojas de especificación ISA de las válvulas de control.

Planillas de especificación de las válvulas de control empleadas, de las cuales se obtienen los parámetros de dimensiones usados en el modelado

# CAPÍTULO 2

## PLANTEO DEL MODELO DE LA PLANTA

### 2.1 Objetivo del capítulo

- Descripción general de la planta a modelar.
- Determinar las relaciones útiles a los fines del proyecto.
- Establecer las partes a modelar.

### 2.2 Introducción al capítulo

Modelar un sistema físico es desglosar sus propiedades en subsistemas cuyos comportamientos sean conocidos. Significa que se utilizan en general las leyes de la naturaleza para describirlos, [3][19].

Nuestra planta de estudio la consideramos fundamentalmente determinista. Llamamos determinista a un modelo que funciona con una relación exacta entre variables medibles y derivadas, y se expresa sin incertidumbre. Por lo que para las mismas entradas o condiciones iniciales producirán invariablemente las mismas salidas o resultados, no contemplándose la existencia de azar, o incertidumbre en el proceso [3].

El modelo será del tipo estático, que se caracteriza por una serie de variables que cambian con el tiempo (posición de los cuerpos, flujos, presiones, etc.), y hay enlaces directos e instantáneos entre estas variables. En un primer momento no podemos afirmar que el sistema dependa de valores o estados anteriores para conferirle la característica de sistema dinámico [3].

Se utilizarán expresiones y análisis en tiempo continuo. Las relaciones matemáticas por encontrar son de esta naturaleza, pero en la práctica las señales de interés se obtienen en forma muestreada, es decir, como resultado de una medición en tiempos discretos.

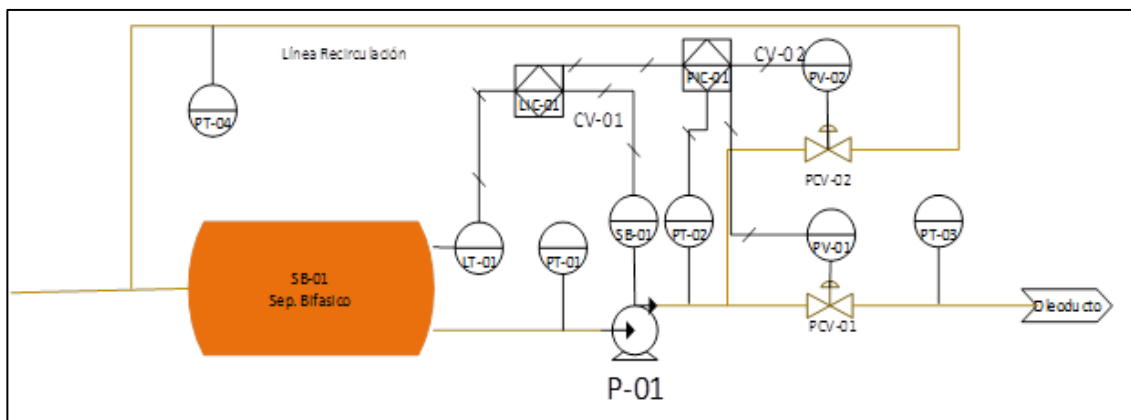
En este tipo de planta, se pueden encontrar fenómenos físicos concentrados (como la acción de estrangulación de una válvula), y distribuidos (pérdida de presión en el flujo en la cañería). Sin embargo, esta planta fue diseñada en función de apreciar los

fenómenos generados por los equipos en forma concentrada, en lugar de distribuida, lo cual es premisa de todo diseño de proceso [2]. De esta forma, nos enfocaremos en la descripción de los primeros.

A continuación, se analiza cómo construir un modelo matemático a partir del conocimiento de los mecanismos básicos que gobiernan a un sistema. Utilizaremos el término modelado físico, ya que parte de un conocimiento de dicha índole relevante en el ejemplo considerado. Más allá de lo anterior los principios a discutir son útiles para la mayoría de los modelos.

### 2.3 Descripción general de la planta en estudio

A continuación, se ilustra en un esquema símil P+ID la planta a modelar:



**Figura 2.1:** P+ID Separador Bifásico (líneas de líquidos)

Donde:

PT-01: Presión succión de bomba.

PT-02: Presión descarga de bomba.

PT-03: Presión de oleoducto.

PT-04: Presión de recirculación (medido en manifold entrada al separador).

LT-01: Nivel líquidos separador.

P-01: Bomba centrífuga descarga de líquidos del separador.

PCV-01: Válvula de control de presión descarga a oleoducto.

PCV-02: Válvula de control de presión descarga a recirculación.

LIC-01: Control de nivel de líquidos separador.

PIC-01: Control de presión descarga de bomba.

SB-01 se trata de un separador bifásico, el cual es el encargado de separar gas de líquido del fluido que ingresa a la batería. Esta separación ocurre cuando el flujo reduce su presión fomentando la gasificación de los productos más livianos del hidrocarburo, y por medio de la reducción de la velocidad del fluido, por el aumento de la sección. Están contruidos con una envolvente cilíndrica, en donde se disponen de elementos internos, como tabiques para atrapar y acumular los líquidos, los cuales se asientan en la parte inferior del cilindro por acción gravitatoria. Este equipo cuenta con varias conexiones, donde los más importantes son el ingreso de flujo, la salida de gas y la salida del flujo líquido. También se disponen de conexiones secundarias para la instalación de instrumentos de indicación local como remota y elementos de seguridad como válvulas de alivio y discos de ruptura [3]. En la figura 2.1 solo se han esquematizado los flujos de líquidos para simplificar su lectura.

En el esquema también se pueden apreciar los siguientes equipos que serán modelados por separado: La bomba centrífuga P-01 y las válvulas de control PCV-01 y PCV-02. La válvula PCV-01 es la válvula de mayor dimensión (4") y es la que controla la descarga del producto hacia el oleoducto. La válvula de control PCV-02 es de 2" y descarga la salida de la bomba hacia la recirculación.

El propósito de estas válvulas, en el proceso, es la de controlar la presión sobre la descarga de la bomba. Para esto existe el lazo de control PIC-01, donde en base a las RPM solicitada a la bomba y la presión medida sobre la descarga, acciona las válvulas de control. La salida del control PIC-01 es del tipo rango partido [1] [14], en donde desde 0-50% se acciona la carrera de la válvula PCV-01 y para las salidas de 51 a 100% se acciona la carrera de la válvula PCV-02. Es decir, con ambas válvulas estranguladas, estamos ante la condición de caudal cero para la bomba y esta presentaría la máxima presión de descarga. A medida que la válvula PCV-01 abre, permite el pasaje de flujo hacia el oleoducto. El control buscará fijar una presión de descarga según las entradas de RPM y presión medida, de tal modo de que si se requiere bajar la presión abrirá aún más la

válvula PCV-01. Una vez que la válvula PCV-01 está totalmente abierta, es posible que el controlador PCV-01 requiera bajar aún más la presión sobre la descarga, para esto comenzará a abrir la válvula PCV-02, haciendo recircular fluido hacia una presión más baja en el sistema.

El modelado de la planta se realiza mediante la interacción de los elementos físicos, los cuales han sido analizados por separado. Esta interacción se realiza por medio de las variables físicas que las vinculan las cuales suelen ser magnitudes medibles a través de transductores (instrumentos de campo), y por lo tanto conocidas.

La selección de estas interacciones se realizó en función de las variables de proceso que manipulan, y del propósito de estos equipos en la planta. Por ejemplo, la bomba centrífuga produce la impulsión de un fluido cuando gira a una cierta velocidad y desarrolla una determinada presión en la descarga; para las válvulas, la diferencial de presión y la apertura de la misma permite un pasaje de cierta cantidad de caudal.

#### **2.4 Alcance de la planta a analizar**

El trabajo consiste en mantener a la bomba centrífuga en un punto de operación de elevada eficiencia dentro del proceso. Para ello se utilizan las válvulas de control de presión PCV-01 y PCV-02. Para encontrar el modelo que nos permita lograr este objetivo, debemos establecer que incluir en él y que dejar afuera. Esta decisión no es simple y demanda avanzar con una decisión y muchas veces su replanteo y comenzar de nuevo [3].

En general se establece que el modelo debe incluir todos los elementos que afecten el elemento a controlar. Para nuestro caso, serían todas las variables y equipos que afecten el estado de la bomba. Este estado está afectado por el caudal y las presiones presentes en los dos puertos (entrada y salida de la bomba). Con este indicio, sabemos que el caudal de la bomba se ve afectado por el accionar de las válvulas de control PCV-01 y PCV-02. Estas válvulas, a su vez pueden ajustar el caudal por estrangulamiento, pero su característica se ve afectada por la presión entre sus puertos. Es de destacar que la presión de descarga de la bomba es la misma que la presión en las entradas de las



válvulas (PT-02), por lo que esta variable será resultado de la interacción de los tres equipos (bomba y válvulas). Por otro lado, las presiones a la descarga de las válvulas afectarán el funcionamiento de estas para el control de caudal, por lo que también serán incluidos en nuestro modelo (PT-03 y PT-04). Estas presiones corresponden a la presión de oleoducto y presión de recirculación, las cuales están fijadas por otras infraestructuras de las instalaciones, las cuales serán consideradas como fuentes de perturbaciones a nuestra planta.

La presión de succión de la bomba (PT-01) también influye en su funcionamiento. Sin embargo, esta variable se verá afectada por las características constructivas de la instalación (diámetro de conexión y de la tubería, distancia entre separador y bomba). En los datos recogidos de la planta real, que se analizarán en los siguientes capítulos, se ve que la presión del separador no se relaciona con la presión de succión de la bomba, por lo que mantendrá este como una variable de entrada al modelo, a fin de ingresar valores acordes con los registrados en la planta real.

De esta forma se ha dejado de lado el control de nivel del separador, ya que solo determina las RPM a la que deberá mantener a la bomba. Sin embargo, se usarán estas RPM como dato y magnitud de entrada a fin de determinar en qué régimen está operando la bomba.

Equipos para modelar:

- P-01: Bomba centrífuga descarga de líquidos del separador.
- PCV-01: Válvula de control de presión descarga a oleoducto.
- PCV-02: Válvula de control de presión descarga a recirculación.

Las magnitudes que intervienen en este control serán:

- PT-01: Presión succión de bomba.
- PT-02: Presión descarga de bomba.
- PT-03: Presión de oleoducto.
- PT-04: Presión de recirculación (medido en manifold entrada al separador).
- Caudal por la bomba centrífuga

- Caudal por la válvula de descarga a oleoducto
- Caudal por la válvula de recirculación.
- Velocidad de giro de la bomba.

Controles:

- PIC-01: Control de presión descarga de bomba.

## 2.5 Esquema de la planta

A continuación, se presenta el esquema general de la planta implementado en bloques de SimuLink® generales que serán desarrollados en detalle en el próximo capítulo.

Tal como se estableció en el apartado anterior, se modelará la bomba centrífuga, de la que nos interesa establecer la presión de salida y su eficiencia. Para esto deberemos conocer el caudal, la velocidad de giro y la presión de succión. El detalle de estas relaciones se analizará en el siguiente capítulo. El caudal por la bomba será el mismo caudal que pasará por ambas válvulas de control.

Para determinar el caudal por las válvulas, deberemos saber su apertura y las presiones presentes en sus puertos. De esta forma se vincula la suma del caudal por cada válvula y este caudal será ingresado al modelo de la bomba centrífuga, previo paso por un retardo unitario (bloque  $Z^{-1}$ ) necesario para que el software pueda resolver este lazo.

Otra relación importante es la de presión de descarga de la bomba, la cual influye en la operación de las válvulas. Esta presión es establecida por la bomba centrífuga y es una variable de entrada para ambas válvulas.

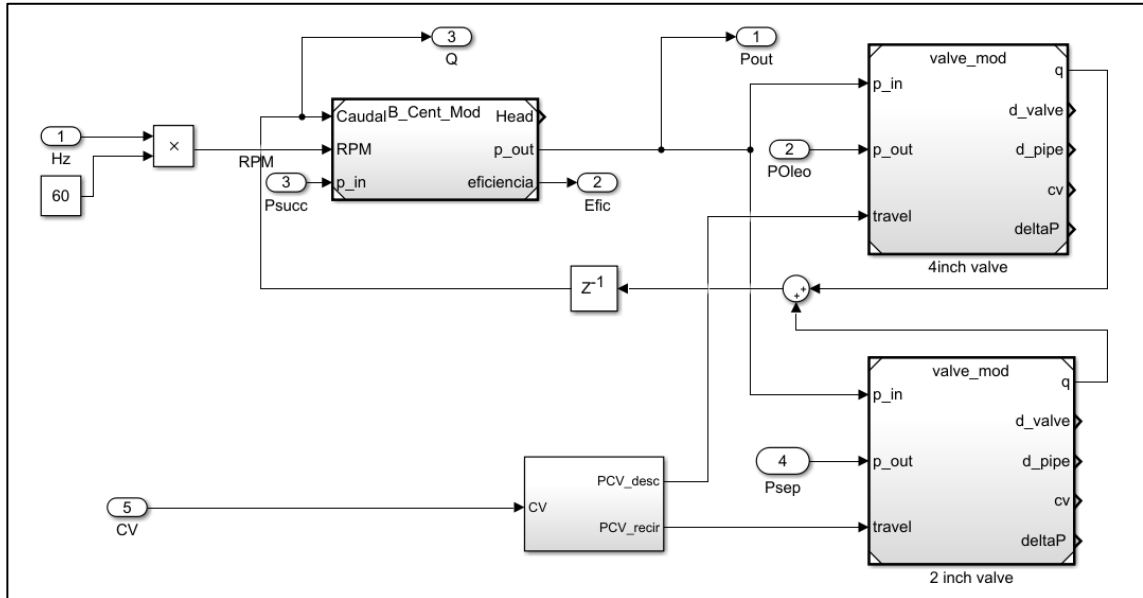
Este esquema de SimuLink® es un subsistema que presenta cinco entradas y tres salidas:

Entradas:

- 1.- Hz: Entrada de velocidad en [Hz]
- 2.- Poleo: Presión de oleoducto [Bar]
- 3.- Psucc: Presión de succión de bomba [Bar]
- 4.- Psep: Presión de separador (recirculación) [Bar]
- 5.- CV: Comando de válvulas (consigna de apertura)

Salidas:

- 1.- Pout: Presión de descarga de bomba [Bar]
- 2.- Efic: Eficiencia de la bomba [%]
- 3.- Q: Caudal de la bomba [m3/h]



**Figura 2.2:** Esquema en bloques de la planta.

Cabe aclarar que la eficiencia y el caudal de la bomba no son medidos en la planta por lo que serán parámetros inferidos. La planta no cuenta con un sensor de caudal, por lo que esta variable será calculada por el modelo en función de los resultados presentados por los bloques de válvulas. La eficiencia es un parámetro que especifica el fabricante, por medio de una curva en función del caudal de impulsión. Conociendo el caudal por la bomba, se calculará la eficiencia de esta.

Existe un subsistema más, el cual se encarga de desarrollar el rango partido en el que actúan las válvulas. A este bloque ingresa el comando de apertura del 0 a 100%, dando como resultado dos señales que accionan en cada válvula.

## 2.6 Conclusión del Capítulo

Se han reconocido las interacciones de la planta que intervienen dentro del control de la bomba centrífuga, y declarado las partes y equipos como subsistemas. A través de

estas condiciones, en el siguiente capítulo, se tomarán dichos subsistemas y modelarán convenientemente por separado.

# CAPÍTULO 3

## MODELADO DE SUBSISTEMAS

### 3.1 Objetivo del capítulo

- Describir las características físicas de las partes a modelar a través de la información proporcionada por el fabricante de estas.
- Plantear las relaciones matemáticas que vinculan los subsistemas a través de las magnitudes físicas intervinientes.
- Plantear el conjunto de relaciones que describa el comportamiento de la planta.

### 3.2 Introducción al capítulo

En el capítulo anterior se estableció el modelo general de planta y se identificaron subsistemas principales para el estudio.

A continuación, se analizan cada uno de ellos y se obtienen los modelos matemáticos que serán incluidos en sendos bloques de SimuLink® a fin de ser utilizados para el modelado de la planta.

### 3.3 Modelo de la bomba centrífuga

Las bombas centrífugas son dispositivos donde se transfiere energía mecánica al líquido por medio de una fuerza centrífuga [1] [15]. Se hace rotar el eje en donde un impulsor adecuado hace que el líquido sea forzado a viajar radialmente mientras absorbe energía, cuya entrada proviene de la transferida a un eje que luego es transformada en cinética. A su vez parte de esta energía mecánica se transforma en energía térmica (interna) y se manifiesta como una merma del rendimiento o ineficiencia mecánica.

Si se mantiene una presión de succión suficiente, el flujo de líquido será continuo y se moverá hacia el “ojo” del impulsor al mismo ritmo que se impulsa hacia el exterior. Una vez que el líquido llega al extremo del impulsor, su energía cinética debe transformarse en energía de presión estática, de tal manera que se minimice la conversión de energía mecánica a energía interna; lo cual generalmente se hace guiando cuidadosamente el

líquido con difusores o paletas. El propósito de la guía es reducir la velocidad de la corriente y permitir que la energía cinética se convierta en energía de presión [1].

La limitación física impuesta sobre el caudal de una bomba centrífuga se relaciona con la máxima velocidad en la “punta” del impulsor. Pero todo diseño de impulsor está limitado, para evitar cavitación, a una máxima velocidad en dicho extremo [1]. Las limitaciones físicas de este tipo de impulsores se tratan en [1], [15], y en particular para aplicaciones viscosas en [17].

Las características generales de las bombas centrífugas son:

- Caudal libre de pulsaciones.
- Diseño mecánico que permita una mayor capacidad, por lo general, en alturas más bajas que las bombas de desplazamiento positivo.
- Rendimiento aceptable en un amplio rango de presiones y capacidades.
- Control, mientras se considere el sobrecalentamiento, a través del estrangulamiento de la descarga.

### **3.3.1 Curva característica**

La curva característica de una bomba centrífuga es una herramienta muy útil dada la información que contiene, [1]. Sobre el eje de abscisa de la curva se presenta por lo general el caudal volumétrico en alguna unidad representativa, (galones por minutos, metros cúbicos por hora, etc.) y una variedad de variables o índices de desempeño sobre las ordenadas, las cuales con sus respectivas unidades pueden ser la altura, eficiencia, potencia al freno o potencia en el eje.

Las principales curvas de interés son las de altura/caudal y la de eficiencia/caudal, figura 3.1. y 3.2 respectivamente. La curva de altura es relativamente suave y decrece continuamente desde el corte hasta el caudal máximo. La curva de eficiencia comienza en cero, se curva hacia el 70% de eficiencia y luego desciende bruscamente hacia valores de eficiencia nulas. Luego la curva de la cabeza representa la energía por unidad de masa que la bomba puede transferir al fluido a un caudal dado.

La curva de eficiencia se puede usar para calcular la energía extra por unidad de masa que debe ser transferida al eje por el motor por encima de la que se transfiere al fluido [1]. La división de la altura a un dado caudal, por la eficiencia fraccional al mismo caudal, proporciona la energía que el motor debe suministrar a la bomba. La diferencia entre los dos números de energía representa las irreversibilidades (solo dentro de la bomba), según la cantidad de energía mecánica convertida a energía interna y luego a flujo de energía térmica.

Un tercer factor es que, aunque una bomba centrífuga podría aceptar condiciones de caudal cero sin aumento repentino, la baja eficiencia redundaría en un probable sobrecalentamiento del fluido. Cuando el sobrecalentamiento o la sobrecarga pueden ser un problema, se utilizan sistemas de control de flujo mínimo que recirculan a este a la succión, a veces a través de un enfriador [1].

La curva de potencia del freno es simplemente la potencia expresada en potencia equivalente, la cual se aplicará al eje para mantener un caudal y una "cabeza" planificadas. El requerimiento de potencia aumenta con el incremento de la tasa de flujo y la altura mínima. Una parte de la potencia del eje se transmitirá al fluido, el resto calentará al mismo o cualquier líquido de enfriamiento o lavado y, en última instancia, el medio ambiente.

Luego la potencia transmitida al fluido es igual a la potencia del eje (potencia de "freno") multiplicada por la eficacia de la bomba. La bomba tiene su propia clasificación de eficiencia, que está separada y se distingue de la del motor. Las dos eficiencias (motor y bomba) deben multiplicarse para obtener la eficiencia total [1].

### **3.3.2 Eficiencia de la bomba**

La eficiencia de una máquina indica su capacidad de convertir una forma de energía en otra. La eficiencia de la bomba es usualmente expresada como el cociente entre la potencia de salida (potencia del fluido) a la potencia de entrada (potencia sobre el eje), [1]. La eficiencia tiene importancia económica, porque un valor reducido implica que se pierde energía en forma de calor en las inmediateces en vez de usarse para realizar el

trabajo. Además, una bomba con alta temperatura implica mayor tarea de mantenimiento por posibles fallas, por ejemplo, en los rodamientos principales.

El fabricante de la bomba no suele ser el fabricante del motor, se debe tener en cuenta que la eficiencia de la bomba no tiene que ver con la del motor, aunque en conjunto lógico brindan la eficiencia total de dicha unidad y ambas deberían ser contempladas.

### 3.3.3 Caracterización de la bomba a modelar

Según el apéndice A, se muestran las curvas características de la bomba industrial a emplear, la cual es del fabricante FlowServe modelo 3HPX17A.

**Tabla 3.1:** Características principales de la bomba centrífuga

Características Principales	
Industria:	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gas y Petróleo</li> <li>- Agua</li> </ul>
Sector:	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Refinado</li> <li>- Exploración y producción</li> </ul>
Estándar:	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ISO 13709</li> <li>- API 610</li> </ul>
Parámetros operativos:	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Caudal hasta 171.28m<sup>3</sup>/h</li> <li>- Altura hasta 215.58m</li> <li>- Presión hasta 80bar</li> <li>- Temperatura de -160°C a 450°C</li> </ul>
Conexiones:	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bridado 3"</li> </ul>
Cuerpo (impeller)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 17"</li> </ul>

### 3.3.4 Elaboración del modelo matemático de la bomba centrífuga.

Con la intención de lograr el modelo matemático que mejor represente a la bomba centrífuga, y a través de tabla 3.1, empleando la herramienta de MatLab® Polyfit, se ajusta su característica a una curva polinómica para las variables de altura y eficiencia de la bomba en función del caudal. Para ello se utiliza el código 3.1 indicado más abajo, con



el cual se obtienen las gráficas de las figuras 3.1 y 3.2, (Aproximación a la curva característica para distintos órdenes de polinomios).

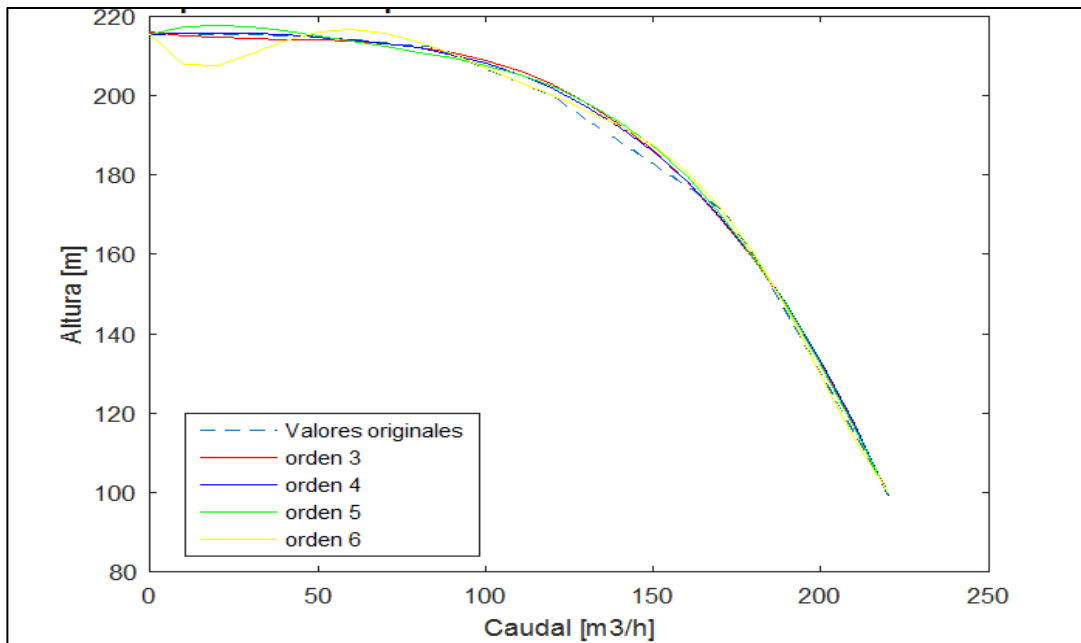
En la línea 6, se carga una matriz “data” con los datos de Caudal (medido en m<sup>3</sup>/h), altura (en metros), eficiencia (en porcentaje) y potencia al freno (en cv), los cuales fueron obtenidos de las especificaciones técnicas del anexo A.

En las líneas 15 a 18, se realiza el ajuste de polinomio de ordenes 3, 4, 5 y 6 de la curva altura contra caudal, usando la función polyfit. En las líneas 19 a 23 se evalúan, de acuerdo con especificaciones de la bomba, estos polinomios para caudales desde cero a 220 m<sup>3</sup>/h, usando la función polyval. Luego las líneas 24 a 31 generan la gráfica de la figura 3.1 de altura de bomba contra caudal.

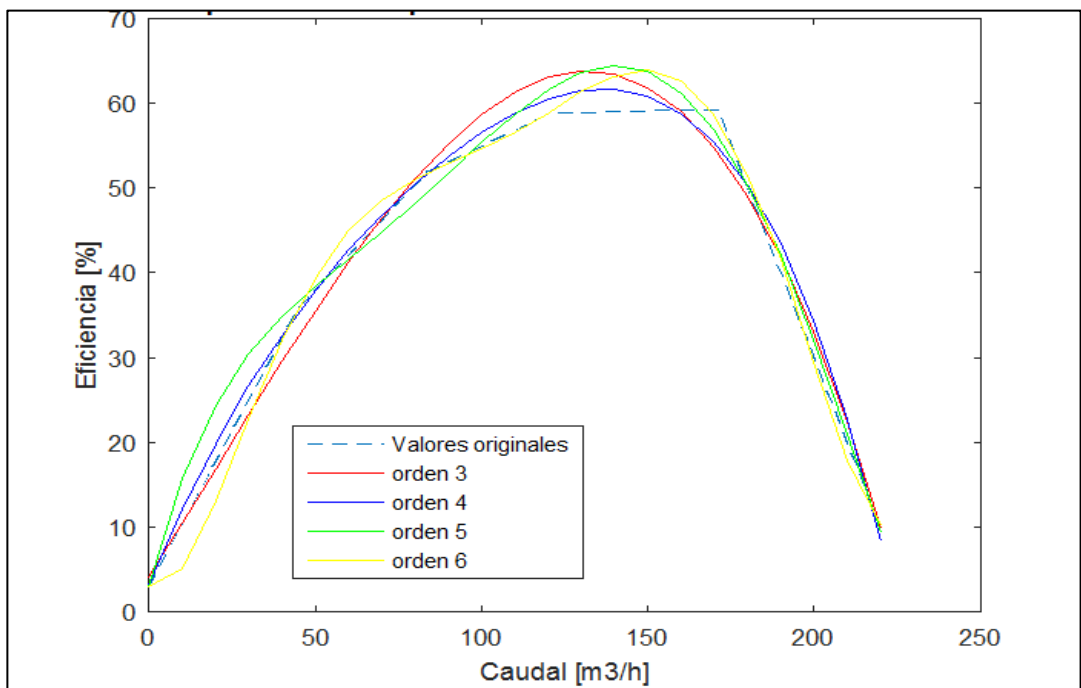
En las líneas 33 a 37, también con la función polyfit, se realiza el ajuste de polinomio de ordenes 3, 4, 5 y 6 de la curva de eficiencia contra caudal. En las líneas 38 a 41, con misma función, se evalúan estos polinomios para mismos caudales anteriores. Las líneas 42 a 49 generan por último la gráfica de la figura 3.2 de eficiencia de la bomba contra caudal.

La elección del grado del polinomio, a ajustar, se realiza en función de la observación de la curva resultante para valores intermedios a los provistos. Se sabe que la curva de altura-caudal es de pendiente “suave” desde caudal cero y decreciente para caudales positivos. Usando el código 3.1, se observa que a polinomios de ordenes altos (5, 6, 7,...) el error disminuye para los valores provistos, pero presenta máximos y/o mínimos entre valores. Se opta por lo tanto por definir el orden 4 para la curva de altura, ver figura 3.1, cuyos coeficientes del polinomio son:

```
[-4.167775643976468e-08,3.044943810519232e-07,-5.442542244714608e-04,0.018222376866846,2.156011214470973e+02]
```



**Figura 3.1:** Altura vs caudal aproximación con distintos órdenes de polinomios.



**Figura 3.2:** Eficiencia vs caudal aproximación con distintos órdenes de polinomios.

```

1 % Curvas de la bomba centrifuga Flowserve 3HPX17A
2 % para 2975RPM
3 % (Q,H,n,Pb) Caudal(m3/h), Altura(m), Eficiencia(%), Potencia de freno(cv)
4 % 20/03/2019 Agrego valores a la curva provista para evitar desvio al
5 % infinito de las curvas extrapoladas para otras velocidades
6 data = [0 ,215.58 ,3 ,74.67;
7 44.66 ,215.07 ,35.71 ,99.62;
8 83.66 ,212.45 ,51.9 ,126.84;
9 119.77 ,199.98 ,58.72 ,151.08;
10 171.28 ,170.88 ,59.26 ,182.92;
11 180 ,160 ,50 ,190;
12 200 ,130 ,30 ,190;
13 220 ,100 ,10 ,190];
14 % Funcion polinomial ajustada para Altura H
15 pH=polyfit(data(:,1,:),data(:,2,:),3);
16 pH2=polyfit(data(:,1,:),data(:,2,:),4); %Elegido
17 pH3=polyfit(data(:,1,:),data(:,2,:),5);
18 pH4=polyfit(data(:,1,:),data(:,2,:),6);
19 xQ=0:10:220;
20 yH=polyval(pH,xQ);
21 yH2=polyval(pH2,xQ);
22 yH3=polyval(pH3,xQ);
23 yH4=polyval(pH4,xQ);
24 % Grafica 1, aproximaciones de diferente ordenes
25 figure(1);
26 plot(data(:,1,:),data(:,2,:), '--', xQ, yH, 'r', xQ, yH2, 'b', xQ, yH3, 'g'...
27 , xQ, yH4, 'y');
28 title('Aproximaciones para distintos ordenes - Curva Caracteristica');
29 xlabel('Caudal [m3/h]');
30 ylabel('Altura [m]');
31 legend('Valores originales','orden 3','orden 4','orden 5','orden 6');
32
33 % Funcion polinomial ajustada para eficiencia
34 pef=polyfit(data(:,1,:),data(:,3,:),3);
35 pef2=polyfit(data(:,1,:),data(:,3,:),4);
36 pef3=polyfit(data(:,1,:),data(:,3,:),5);
37 pef4=polyfit(data(:,1,:),data(:,3,:),6); %Elegido
38 yEf=polyval(pef,xQ);
39 yEf2=polyval(pef2,xQ);
40 yEf3=polyval(pef3,xQ);
41 yEf4=polyval(pef4,xQ);
42 % Grafica 1, aproximaciones de diferente ordenes
43 figure(2);
44 plot(data(:,1,:),data(:,3,:), '--', xQ, yEf, 'r', xQ, yEf2, 'b', xQ, yEf3, 'g'...
45 , xQ, yEf4, 'y');
46 title('Aproximaciones para distintos ordenes - Curva Eficiencia');
47 xlabel('Caudal [m3/h]');
48 ylabel('Eficiencia [%]');
49 legend('Valores originales','orden 3','orden 4','orden 5','orden 6');

```

**Código 3.1:** B\_Cent\_Ident3.m, aproximación polinomial ajustada a los valores empíricos provistos por el fabricante de la bomba

Para la eficiencia se procede de igual manera, pero se observa que para el orden seis, se obtiene una curva que se ajusta mejor a los datos provistos. Los coeficientes del polinomio obtenidos son:

[6.559346570231193e-11,-4.324605560010840e-08,1.061119338047032e-05,-0.001197994307682,0.058124046465481,-0.258153094531717,2.997407551537409]

El fabricante provee estos datos para diferentes RPM del eje. Fácilmente estos valores se verifican usando las ecuaciones de Afinidad, [6], [9], [10].

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (3.1)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad (3.2)$$

Donde:

$N_1$  y  $N_2$ : Corresponde a la velocidad de la bomba, expresada en RPM

$Q_1$  y  $Q_2$ : Son el caudal que impulsa la bomba para las velocidades de rotación correspondientes.

$H_1$  y  $H_2$ : Son la altura, expresada en metros.

Estas ecuaciones de afinidad serán empleadas para obtener los parámetros de caudal y altura desarrollado por la bomba a diferentes revoluciones de esta.

### 3.3.5 Cálculo de la presión sobre la descarga de bomba y eficiencia.

La diferencia de presión sobre la bomba (presión en la descarga menos la presión sobre succión) es directamente proporcional a la altura que despliega. En el modelo a plantear interesa encontrar esta presión de descarga, por lo que se obtiene esta relación para el sistema en estudio.

Dada la ecuación de Bernoulli, [1]:

$$H = \frac{p_d - p_s}{\rho g} + \frac{v_d^2 - v_s^2}{2g} + Z_d - Z_s \quad (3.3)$$

Donde:

$H$ : Altura total.

$p_d$  y  $p_s$ : Presiones de descarga y succión respectivamente.

$g$ : Aceleración de la gravedad.

$\rho$ : La densidad del fluido.

$v_d$  y  $v_s$ : Las velocidades en la descarga y succión respectivamente.

$z_d$  y  $z_s$ : Representan la elevación de los puntos de descarga y succión, con respecto al plano de referencia, respectivamente.

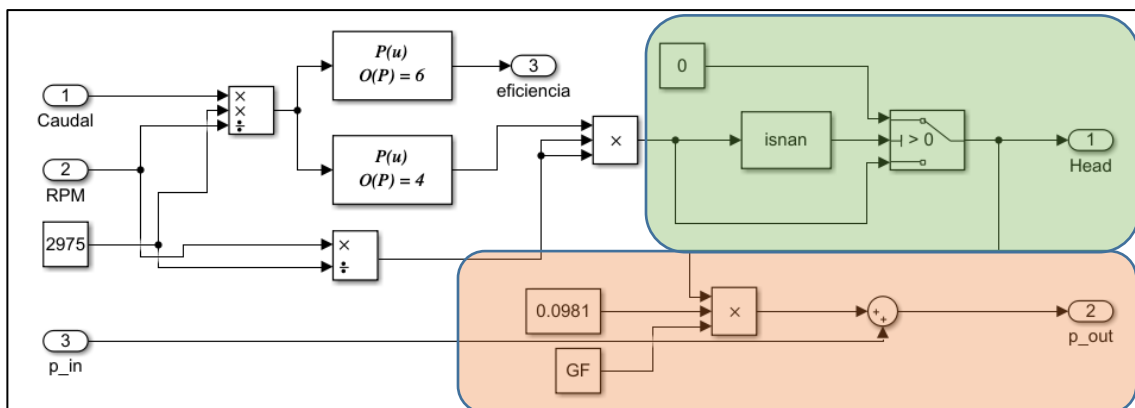
Dado que la diferencia de altura entre las tomas de succión y descarga de la bomba es despreciable, y que la velocidad de acceso y descarga son iguales, nos queda según ecuación 3.3:

$$p_d = \rho g H + P_s \quad (3.4)$$

Expresando la densidad en gravedad específica [SG], la aceleración de la gravedad en [m/s<sup>2</sup>], la altura en [m] y las presiones en [bar] nos queda:

$$p_d = 0.0981 SG H + P_s \quad (3.5)$$

De esta manera se construye un bloque de función en SimuLink® el cual tiene como parámetro de entras las RPM en el eje, la presión sobre la succión de la bomba, y el caudal; luego como salidas, la presión de descarga y la eficiencia. A continuación, se muestra el diagrama del modelo de la bomba y una descripción de sus partes.



**Figura 3.3:** Diagrama en bloques de la bomba centrífuga.

Con borde en color azul se resaltan los dos bloques con los polinomios encontrados en la sección anterior. En color naranja se resalta el cálculo de la presión de salida en

función de la altura en metros. Para este cálculo se deberá definir el parámetro GF que es la gravedad específica del líquido a impulsar.

En verde se destaca bloques que no generan cálculo alguno y proporciona una salida de cero si el valor de la altura no queda determinad (Not a number). Esto previene que se produzcan errores de cálculos en lazos que empleen este bloque.

El resto de los bloques generan el cálculo del régimen de funcionamiento de la bomba para diferentes RPM corregido por las ecuaciones de afinidad 3.1 y 3.2.

### **3.4 Modelo de las válvulas de control**

El elemento final de control “más común” para los procesos industriales es la válvula de control. La válvula de control manipula el flujo líquido (o gaseoso) para mantener las variables de proceso lo más cercano al punto de operación deseado [1],[2]. Nos referimos a las válvulas de control, en general, al conjunto que consiste típicamente en un cuerpo de válvula, las partes internas, un actuador para proporcionar la fuerza motriz para operar la válvula y una variedad de accesorios adicionales, que pueden incluir posicionadores, transductores, reguladores de presión de suministro, operadores manuales, amortiguadores o interruptores de límite, [14], [16].

En la planta de estudio, se emplean un par de válvulas de control aguas debajo de la bomba centrífuga, las cuales proporcionan control sobre la presión en la descarga de la bomba (presión aguas arriba de las válvulas), por medio del estrangulamiento de su descarga (válvula de descarga hacia oleoducto) o recirculación de flujo hacia la entrada (ver figura 2.1).

Para la descarga de la bomba se emplea una válvula de control del tipo “globo”, cuerpo de 4”, y para la recirculación otra de 2”, ambas de jaula guiada con vástago balanceado. Los actuadores son del tipo neumático, de diafragma y resorte, falla abre. La operación de estas se realiza mediante un electro posicionador y sus características inherentes son lineales.

Las características completas de estas válvulas se adjuntan en las especificaciones ISA del anexo B.

### 3.4.1 Característica inherente

Es la relación entre el coeficiente de flujo ( $C_v$  o  $K$ ) y el porcentaje de apertura de la válvula, cuando esta pasa desde la posición cerrada al recorrido nominal con una caída de presión constante a través de esta. Normalmente estas características se representan en una curva, donde el eje horizontal está etiquetado en porcentaje de recorrido y el eje vertical como porcentaje de flujo (o  $C_v$ ). Debido a que el flujo de la válvula es una función tanto del recorrido de esta como de su caída de presión, la realización de pruebas de características de flujo a una caída de presión constante, proporcionan una forma sistemática de comparar un diseño respecto de otro [1], [14] y [16].

Las características típicas de las válvulas conducidas de esta manera se denominan lineal, porcentaje igual, y apertura rápida. Tal como podemos ver en las hojas de especificación (ver apéndice B), las válvulas a modelar están caracterizadas como lineales.

### 3.4.2 Característica instalada

Es la relación entre el coeficiente de flujo ( $C_v$  o  $K$ ) y el porcentaje de apertura de la válvula cuando esta pasa desde la posición cerrada al recorrido nominal, teniendo en cuenta la caída de presión a través de la válvula ya que esta se ve influenciada por las diferentes condiciones del proceso [14], [16].

### 3.4.3 Cálculo de caudal por una válvula

El caudal  $q$  en una válvula [14] se calcula como:

$$q = C_v N_1 F_P \sqrt{\frac{P_{out} - P_{in}}{G_F}} \quad (3.6)$$

Donde:

$N_1$ : Constantes de proporcionalidad. Usamos  $N_1=0.865$  para caudales expresados en [m<sup>3</sup>/h] y presiones en [bar].

$P_{out}$ : Presión a la salida de la válvula en [bar].

$P_{in}$ : Presión en la entrada de la válvula en [bar].

$G_F$ : Gravedad específica (sin unidades). Cociente entre las densidades del fluido respecto a la densidad del agua.

$C_v$ : Coeficiente de caudal. Constante relacionada con la geometría de la válvula, para una posición determinada y bajo una condición específica. Para el caso, representa el caudal en galones por minuto [GPM], de agua a 60°F que pasa por la válvula cuando se encuentra sometida a una caída de presión de 1PSI.

$F_p$ : Factor de geometría del piping. Tiene en cuenta pérdidas de presión debido a accesorios y juntas en las tuberías, como codos, reducciones, que están conectados en dicha válvula. En nuestro caso deberemos tenerlo en cuenta para el modelo de ambas válvulas ya que están montadas sobre reducciones.

El factor de geometría  $F_p$ , se calcula para los dos tamaños de válvulas que se utilizan en la planta:

$$F_p = \left[ 1 + \frac{\sum K}{N_2} \left( \frac{C_v}{d^2} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (3.7)$$

Donde:

$N_2$ : Constante de proporcionalidad.  $N_2=0.00214$  para dimensiones expresadas en milímetros [mm].

$d$ : Tamaño nominal de la válvula.

$\sum K$ : Suma de coeficientes de pérdidas de velocidad debido a reducciones en piping. Para reducciones instaladas en la entrada y salida:

$$\sum K = 1.5 \left( 1 - \frac{d^2}{D^2} \right)^2 \quad (3.8)$$

Donde:

$D$ : Diámetro del piping en [mm].



Con estas ecuaciones se desarrolla en MatLab® el código 3.2 de más abajo, del cual a su vez se obtuvieron las figuras 3.4 y 3.5. En estas gráficas se puede apreciar la relación que existe entre presión y caudal en la escala de valores de operación de la planta. Como podemos apreciar de las ecuaciones y su gráfica, no son relaciones lineales. Cabe pensar si es posible un modelo de comportamiento lineal o linealizado sobre un punto de operación de la planta. Pero lo anterior, lamentablemente, no se puede garantizar, ya sea por la falta de estabilidad del sistema, o debido a la variabilidad en el flujo de producción de petróleo.

Estas válvulas fueron diseñadas para mantener a la bomba centrífuga en régimen operativo, y se espera que regulen haciendo uso de un margen de apertura amplio, por lo tanto es lógico obtener un modelo de planta no lineal.

```

1   %Fluido:
2   GF=0.850;      %Densidad relativa
3   P1=4:0.5:20;  % Presión entrada 20bar
4   P2=4;         % Presión salida 4bar.
5   %Proporcionalidad
6   N1=0.865;     % q=[m3/h] p=[bar]
7   N2=0.00214;  % d=[mm]
8   % válvula de recirculación
9   % Piping diámetro nominal 4", válvula conexiones diámetro nominal 2"
10  % Tamaño d 1 7/8" = 47.625mm. Piping 2" D interno=52.50mm
11  % CV requerido 16.559 carrera 80%. CV válvula seleccionada 21
12  d2_valve=47.625;
13  d4_pipe=52.5;
14  cv_2=21;
15  sumK_2=1.5*(1-d2_valve^2/d4_pipe^2)^2;
16  %Factor por reducciones en entrada y salida
17  Fp_2=(sqrt(1+sumK_2/N2*cv_2/d2_valve^2))^-1;
18  q_2=N1*Fp_2*cv_2*sqrt((P1-P2)/GF);
19  % válvula de descarga
20  % Piping diámetro nominal 6", válvula conexiones diámetro nominal 4"
21  % Tamaño d 2 7/8" = 73.025mm. Piping 6" D interno=154.05mm
22  % CV requerido 34.882 carrera 49%. CV válvula seleccionada 69
23  d4_valve=73.025;
24  d6_pipe=154.05;
25  cv_4=69;
26  sumK_4=1.5*(1-d4_valve^2/d6_pipe^2)^2;
27  %Factor por reducciones en entrada y salida
28  Fp_4=(sqrt(1+sumK_4/N2*cv_4/d4_valve^2))^-1;
29  q_4=N1*Fp_4*cv_4*sqrt((P1-P2)/GF);

```

```

30 % Parametrizado caudal/presión para distintas aperturas de válvula
31 % Uso válvula de descarga 4"
32 - x=0:0.2:1;
33 - q_4_2=x(2)*N1*Fp_4*cv_4*sqrt((P1-P2)/GF);
34 - q_4_4=x(3)*N1*Fp_4*cv_4*sqrt((P1-P2)/GF);
35 - q_4_6=x(4)*N1*Fp_4*cv_4*sqrt((P1-P2)/GF);
36 - q_4_8=x(5)*N1*Fp_4*cv_4*sqrt((P1-P2)/GF);
37 %Gráficos de resultados
38 - figure(1);
39 - plot(P1,q_2,'r',P1,q_4,'g');
40 - title('Caudal por valvula en funcion de la presion. Apertura total');
41 - xlabel('Presion ingreso de valvula [bar]@ presion de descarga ctte.=4bar');
42 - ylabel('Caudal por la valvula [m3/h]');
43 - legend('Caudal valvula 2" ','Caudal valvula 4" ');
44 - figure(2);
45 - plot(P1,q_4_2,'r',P1,q_4_4,'g',P1,q_4_6,'b',P1,q_4_8,'y',P1,q_4,'k');
46 - title('Caudal por valvula 4" en funcion de la presion. Dist. aperturas');
47 - xlabel('Presion ingreso de valvula [bar]@ presion de descarga ctte.=4bar');
48 - ylabel('Caudal por la valvula [m3/h]');
49 - legend('X=0.2 (mínima)', 'X=0.4', 'X=0.6', 'X=0.8', 'X=1 (máxima)');

```

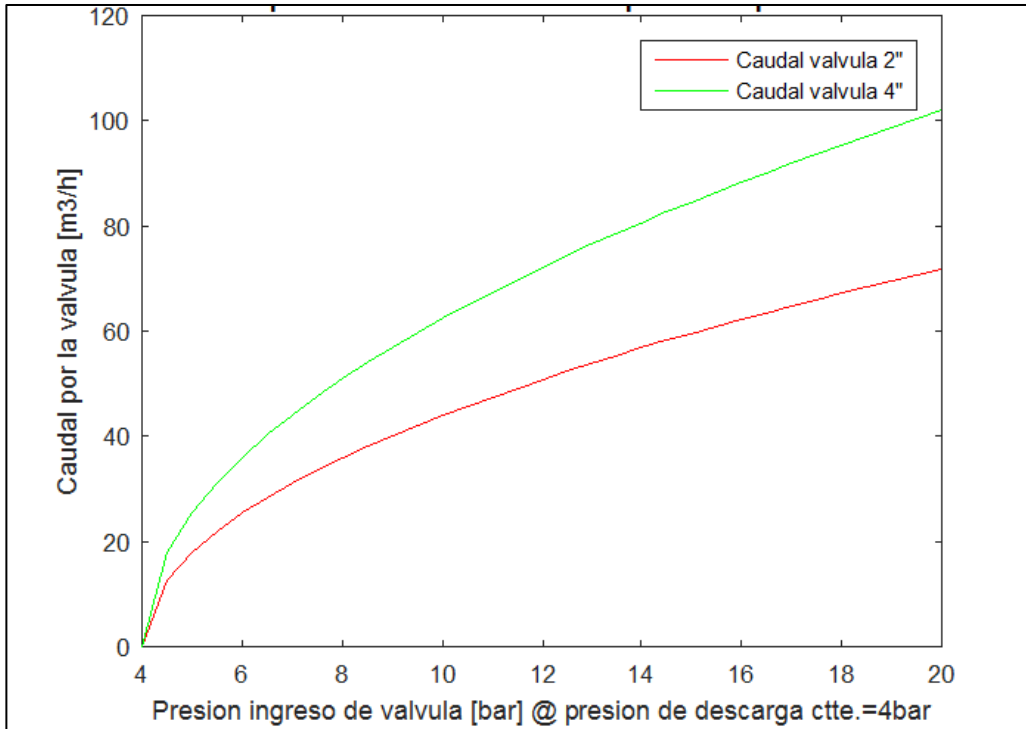
**Código 3.2:** valve3.m. Análisis de caudal por la válvulas.

De acuerdo a lo anterior, en la primera parte del código 3.2, se definen las propiedades del fluido por la válvula. Estas propiedades son la densidad relativa, la presión de entrada y la presión de salida (líneas 1 a 4). Para la presión de entrada se define un vector con valores que van de 4 a 20 Bar (línea 3).

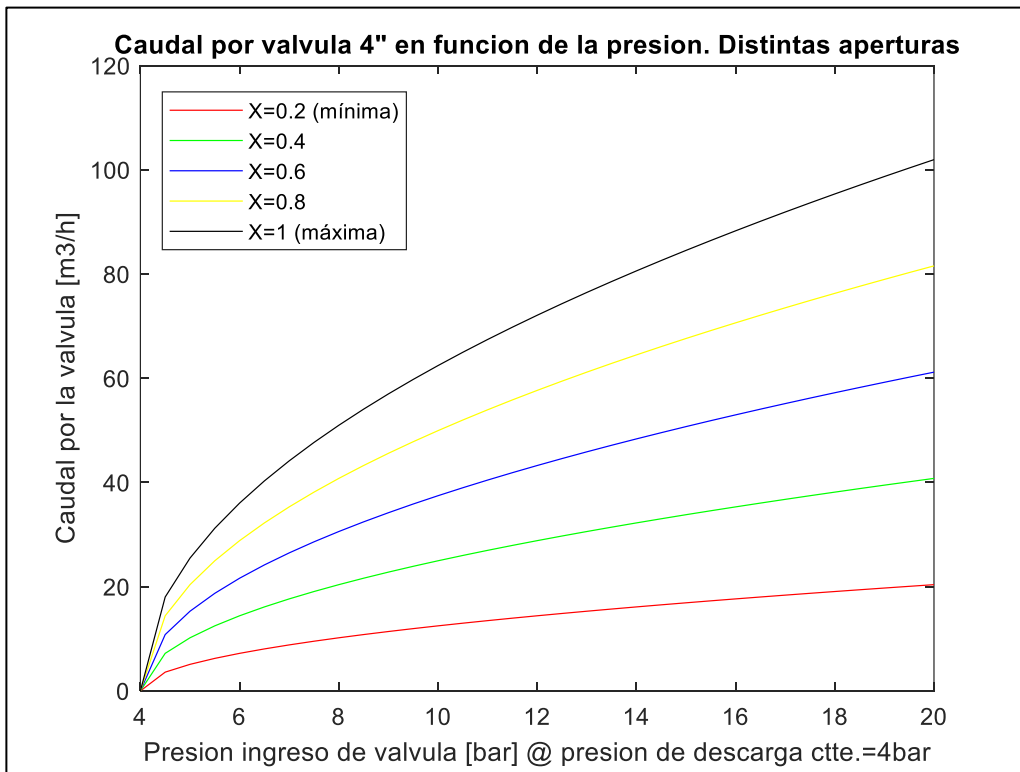
Las líneas 6 y 7 definen las constantes de proporcionalidad N1 y N2 presentes en las ecuaciones 3.6 y 3.7.

En las líneas 8 a 18, se desarrollan las ecuaciones 3.6, 3.7 y 3.8 para las dimensiones de la válvula de recirculación. Los valores de diámetros de la válvula y de la tubería están expresados en milímetros. Los valores de diámetros y Cv son obtenidos de las hojas de especificaciones del anexo B. De igual manera, en las líneas 19 a 29, se desarrollan las mismas ecuaciones, pero en este caso, para la válvula de descarga.

Luego entre las líneas 30 a 36 se calcula el caudal por la válvula de descarga para diferentes presiones de entrada, y se realiza una segunda parametrización según la apertura de esta (variable x).



**Figura 3.4:** Caudal por válvula en función de la presión. Apertura Total



**Figura 3.5:** Caudal por válvula de 4" en función de la presión. Distintas aperturas.

Por último, las líneas 37 a 49 generan los gráficos para las figuras 3.4 y 3.5. La figura 3.5 muestra la relación de caudal por la válvula en función de la presión de entrada y para diferentes aperturas de esta, sea  $X=0$  para válvula cerrada y  $X=1$  para válvula completamente abierta. Podemos concluir que este elemento del sistema no solo presentará un comportamiento a lineal, sino que también una saturación por la imposibilidad física de presentar una apertura mayor o menor a sus límites.

Tomando el código desarrollado, se construye en Simulink un diagrama de bloques de función, el cual tiene como parámetro de entradas la apertura, la presión a la válvula (entrada y salida), y como respuesta su caudal.

Se crea un bloque de válvula parametrizable, esto es, que se pueda reutilizar el mismo según las características de la válvula a simular, ya que las dos empleadas en la planta de estudio son similares, pero de diferente tamaño.

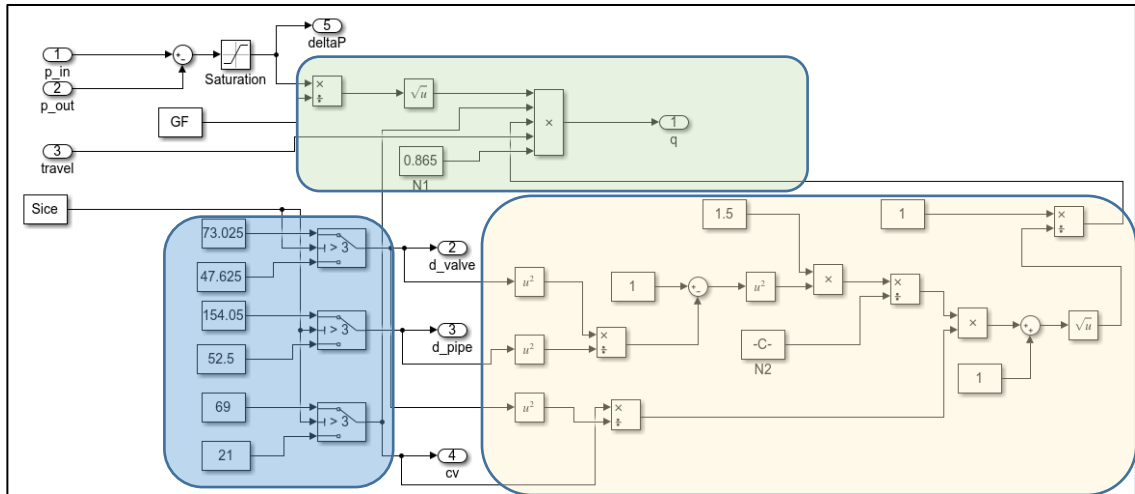
De figura 3.6, en azul se destacan los bloques que seleccionan las constantes usadas en las ecuaciones de la válvula, según su tamaño, que se ingresa con el parámetro "Size", el cual puede ser 2 o 4 para una válvula de 2" y 4" respectivamente. Con esta selección, se establecen las constantes que definen la característica de la válvula como el  $C_v$ , diámetro de cañería y diámetro del cuerpo.

Luego en amarillo los bloques para el cálculo de  $F_p$ , y por último en verde los bloques para el cálculo de caudal.

### **3.5 Conclusión del capítulo**

A partir de las ecuaciones matemáticas que relacionan las magnitudes físicas intervinientes, se obtuvieron los modelos de los subsistemas principales que manifiestan el comportamiento de la bomba centrífuga. Este conjunto de ecuaciones es implementado, previa codificación, en bloques de SimuLink® para luego emplearlos en el modelo de la planta.

En el próximo capítulo, empleando información recopilada de la planta real, se realizará la validación del modelo.



**Figura 3.6:** Diagrama en bloques de válvula de control.

### 3.6 Recomendaciones del capítulo

Los modelos matemáticos son obtenidos por relaciones que aplican en los equipos de campo, en estudio, actualmente operando en la planta real, y han sido ajustados por constantes y valores en base a información provista por el fabricante o proveedores. Para su uso, por lo tanto, se deberán tener en cuenta los rangos operativos y especificaciones para los cuales fueron diseñados.

# CAPÍTULO 4

## VALIDACIÓN DEL MODELO DE PLANTA

### 4.1 Objetivo del capítulo

- Validar el modelo de planta obtenido según capítulos anteriores.
- Procesar la información de la planta real provista para ser utilizada por el software de modelado y simulación.
- Comparar la información de la simulación con aquella de la planta real, a fin de examinar su validez.

### 4.2 Introducción al capítulo

En el capítulo anterior se obtuvo un modelo de planta basado en las relaciones matemáticas que aplican según las partes que la componen. El siguiente paso es validar este modelo.

Validar un modelo consiste en principio verificar si las condiciones impuestas al mismo, lo más próximas a las reales especificadas, reflejan un comportamiento similar al de aquel usado como “patrón”, y pueda ser aceptado, por lo tanto, para el uso que se le pretende dar [3], [19]. En nuestro caso, desarrollamos un modelo de planta que permita determinar los parámetros de la bomba centrífuga.

Un modelo no termina de ser útil hasta que su validez no haya sido testeada y establecida. Usar resultados de simulación de un modelo no validado podría ser peor que adivinar en base al uso del sentido común [3]. Sin embargo, un modelo no es una descripción exacta de un sistema, por lo que no demandamos que nuestro modelo sea “exacto”. Los modelos son obtenidos para brindar ayuda en el propósito para el cual han sido desarrollados, y entendemos que su validación nos dará la confianza suficiente para su empleo. Por lo tanto, se busca validar el modelo en función de que sea útil para evaluar diferentes controladores para las condiciones de proceso usuales en la que opera la planta [19].

Existen diferentes estrategias para validar un modelo, por ejemplo, si el sistema es lineal e invariante en el tiempo (LTI), se podrían emplear técnicas en el dominio de la frecuencia, pero para modelos no lineales, es preferible emplear el dominio del tiempo [18], el cual es usado en este trabajo.

El modelo a validar será sometido a los valores registrados por los instrumentos de la planta real. Una condición importante de validación es lograr que la respuesta siga la registrada en la planta real con el menor desvío posible, más detalle de dicho procedimiento se puede encontrar en [12], donde se realiza una validación similar a la que se emplea más adelante.

#### **4.3 Magnitudes medidas en la planta.**

La planta bajo estudio forma parte de las instalaciones de una batería de producción hidrocarburífera, para lo cual se cuenta con la infraestructura de instrumentos de campo, PLC y sistema HMI/SCADA, donde este último registra (almacena información en base de datos) los valores de variables (magnitudes físicas y variables del sistema). Se hace uso de esta información para la validación del modelo desarrollado.

A continuación, se listan las magnitudes disponibles por el sistema SCADA.

- lic\_cv: Salida del control de nivel PID
- lic\_sp: Valor de set point control de nivel PID
- lic\_op: Valor de salida opcional del control de nivel PID
- LIT\_agua: Nivel de agua del separador
- PIT\_separador: Presión en el separador
- PIT\_succión: Presión en succión de bomba
- PIC\_sp: Setpoint control de presión PID
- PIC\_op: Salida opcional del control de presión PID
- PIC\_descarga: Presión de descarga de bomba
- PY\_descarga: Apertura válvula PCV de descarga a oleoducto
- PIT\_oleoducto: Presión de oleoducto
- Freq: Frecuencia comando a bomba.

Cabe aclarar que no todas las variables anteriores serán necesarias de usar para este caso de estudio, pero están disponibles en caso de necesidad. Por otro lado, este conjunto de variables es registrado por el SCADA cada 15 segundos.

#### 4.4 Recopilación de valores de la planta.

En el siguiente script de MatLab®, como código 4.1, se generan las estructuras “time series” y “iddata” para ser usados en SimuLink®. Se disponen de 6885 muestras tomadas cada 15 segundos, dando una ventana de muestras de 28 horas y fracción.

```

1      %Importar los datos de la base del archivo excel
2 -   [num,txt,row]=xlsread('Datos_Scada.xlsx',1,'B5:P464');
3      % La primer columna es de tiempo pero el formato no es compatible.
4      % Sabemos que la uestra es cada 15 segundos. 459 muestras cada 15 sg
5 -   tiempo_muestra=0:15:6870;
6      % Transponer matriz de datos
7 -   num=num';
8
9      % Extraccion de variables de la planta para identificacion
10 -  PIT_separador(:,2)=fliplr(num(6,1:459))';
11 -  PIT_separador(:,1)=tiempo_muestra;
12 -  PIT_succion(:,2)=fliplr(num(7,1:459))';
13 -  PIT_succion(:,1)=tiempo_muestra;
14 -  PIC_op(:,2)=fliplr(num(9,1:459))';
15 -  PIC_op(:,1)=tiempo_muestra;
16 -  PIC_descarga(:,2)=fliplr(num(10,1:459))';
17 -  PIC_descarga(:,1)=tiempo_muestra;
18 -  FREQ_bomba(:,2)=fliplr(num(15,1:459))';
19 -  FREQ_bomba(:,1)=tiempo_muestra;
20 -  PIT_oleoducto(:,2)=fliplr(num(12,1:459))';
21 -  PIT_oleoducto(:,1)=tiempo_muestra;
22
23      % Matriz de salidas
24 -  sal(:,1)=PIC_descarga(:,2);
25      % Matriz de entradas
26 -  ent(:,1)=FREQ_bomba(:,2);
27 -  ent(:,2)=PIC_op(:,2);
28 -  ent(:,3)=PIT_oleoducto(:,2);
29 -  ent(:,4)=PIT_separador(:,2);
30 -  ent(:,5)=PIT_succion(:,2);
31      % Estructura de datos para identificacion
32 -  data_est=iddata([sal],[ent],15);
33      %
34 -  data_est.OutputName={'P. Descarga'};
35 -  data_est.InputName={'Consigna Velocidad','Consigna pres.',...
36 -  'P. oleoducto','P. separador','P. succion'};
37 -  data_est.TimeUnit='seconds';
38 -  data_est.OutputUnit={'bar'};
39 -  data_est.InputUnit={'-', '-', 'bar', 'bar', 'bar'};

```



```

40 % Gracias de las variables
41 - figure(1);
42 - plot(PIC_descarga);
43 - title('Presion descarga de bomba');
44 - xlabel('segundos');
45 - ylabel('Barg');
46 %legend('vel viento m/s','pst*100');
47 - figure(2);
48 - plot(Freq);
49 - ylim([30 55]);
50 - title('Frecuencia consigna de velocidad');
51 - xlabel('segundos');
52 - ylabel('Hz');
53
54 - figure(3);
55 - plot(PIC_op);
56 - title('Consigna de presion');
57 - xlabel('segundos');
58 - ylabel('%');
59
60 - figure(4);
61 - plot(PIT_oleoducto);
62 - title('Presion Oleoducto');
63 - xlabel('segundos');
64 - ylabel('Barg');
65
66 - figure(5);
67 - plot(PIT_separador);
68 - title('Presion Separador');
69 - xlabel('segundos');
70 - ylabel('Barg');
71
72 - figure(6);
73 - plot(PIT_succion);
74 - title('Presion Succion de bomba');
75 - xlabel('segundos');
76 - ylabel('Barg');
77 - ylim([-0.2 0]);

```

#### **Código 4.1** Datos planta Real

Descripción Código 4.1:

Importar datos de planilla Excel a estructuras Time Series e iddata de Matlab. En la línea 2 se importan los datos desde un archivo Excel, el cual es el archivo provisto del SCADA con los valores de las variables capturadas. Se usa la función xlsread, dejando en la matriz “num” todos los valores numéricos presentes en la planilla original.

La línea 5 genera un vector de tiempo de 6870 segundos con saltos de 15 segundos.

En las líneas 10 a 21 se generan las matrices individuales para las variables de interés y se eligieron etiquetas para el reconocimiento de estas. Estas matrices contienen dos vectores, uno de tiempos y uno de valores de la magnitud física.

También es útil disponer de estas variables en formato "iddata", el cual se empleará más adelante en esquemas de Simulink, por lo que en las líneas 23 a 39 se conforma esta estructura junto con las etiquetas de descripción y unidades.

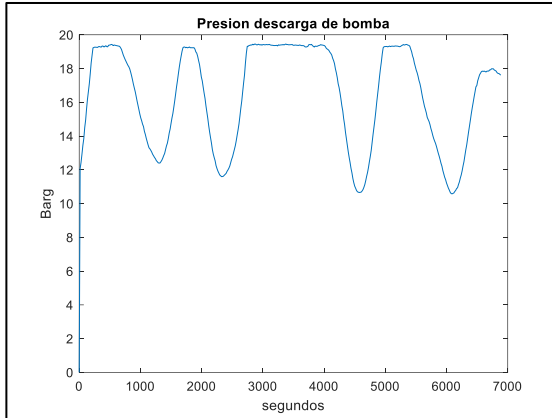
Por último, entre las líneas 40 a 77 se generan las gráficas de figura 4.1 donde se presentan cada una de las variables.

En la gráfica figura 4.1 a), podemos ver la variable "P. Descarga", la cual corresponde al tag "PIC\_Descarga" y es a la medición de la presión de descarga de la bomba centrífuga, en unidades de  $\text{kg}/\text{cm}^2$ . Se observa en esta gráfica que la magnitud varía entre 10 y  $20\text{kg}/\text{cm}^2$ , indicando que dentro de la ventana de tiempos medido la bomba ha cambiado de régimen de bombeo, lo cual es necesario para la validación. Dicho de otra forma, si las muestras obtenidas de la planta real, no presenta cambios significativos, difícilmente podremos asegurar que el modelo represente correctamente el comportamiento de la planta en otras condiciones de proceso.

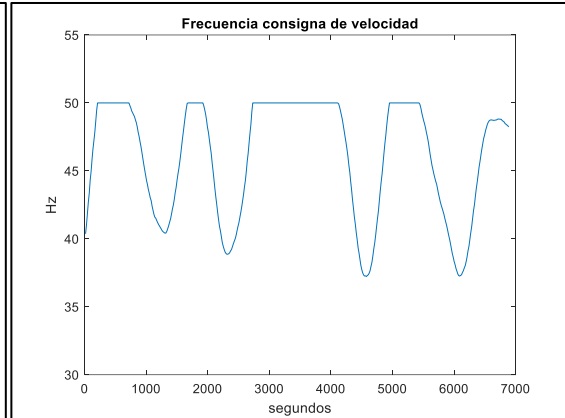
Variable "Consigna de velocidad", corresponde al tag "FREQ", que es la frecuencia comando de la bomba (fig 4.1 b). Esta señal es enviada al VSD que controla el motor de la bomba, cuyos valores pueden variar entre 35 a 50Hz. Como podemos ver en esta gráfica, durante el período de tiempo de las muestras, la bomba transita por varias velocidades.

Variable "Consigna pres." corresponde al tag "PIC\_op", el cual es el valor comando de las válvulas PCV de control. Este valor es porcentual (0 a 100%), y por medio de un bloque de rango partido se obtienen las señales de apertura de descarga y de recirculación de la válvula (fig 4.1 c).

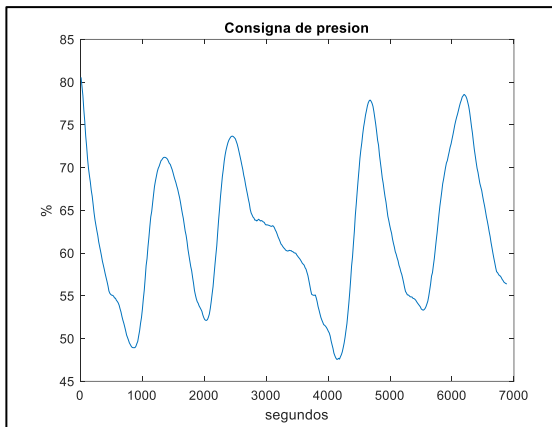
Variable "P. oleoducto" corresponde al tag "PIT\_oleoduto", el cual mide la presión sobre el oleoducto, aguas debajo de la válvula de descarga. Esta magnitud está medida en  $\text{kg}/\text{cm}^2$  (fig 4.1 d).



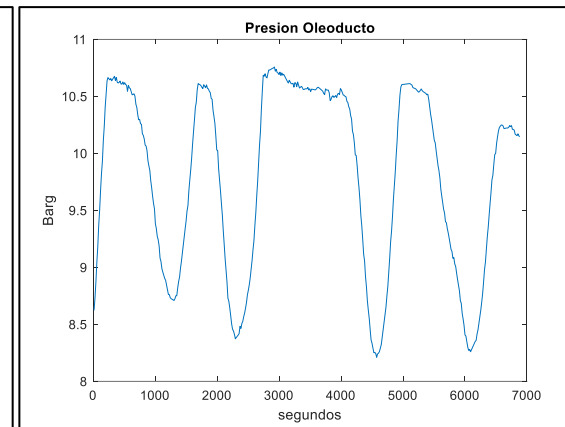
a) Presión descarga de bomba



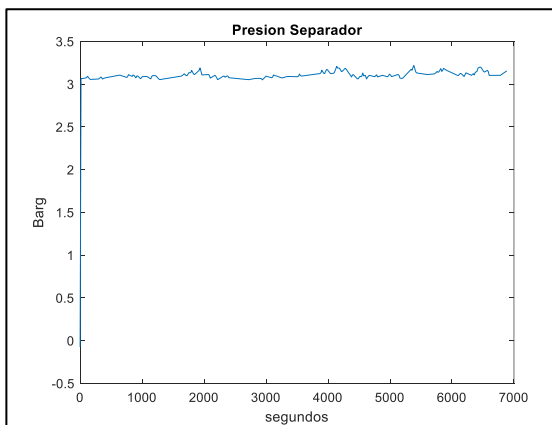
b) Frecuencia consigna de velocidad



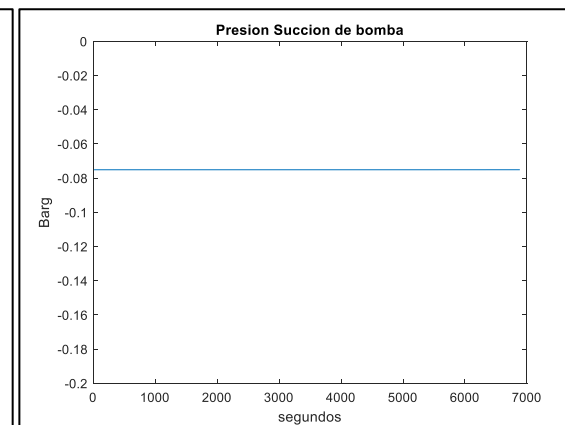
c) Consigna de presión



d) Presión de oleoducto



e) Presión de separador



f) Presión de succión de bomba

**Figura 4.1:** Gráfica temporal de los datos de planta.

Variable “P. separador” corresponde al tag “PIT\_separador”, el cual mide la presión sobre el separador, la cual esta agua debajo de la válvula de recirculación. Esta magnitud esta medida en kg/cm<sup>2</sup> (fig 4.1 e).

Variable “P. succión” corresponde al tag “PIT\_succion”, el cual mide la presión sobre la succión de la bomba centrífuga. Esta magnitud esta medida en kg/cm<sup>2</sup>. Como podemos apreciar, es la única magnitud que no presenta variaciones sobre los cambios de régimen de la bomba, sin embargo, se mantendrá por su intervención en el modelo obtenido (fig 4.1 f).

#### **4.5 Criterio de validación.**

En el punto anterior se graficaron cinco señales de entrada y una salida, las cuales coinciden con las entradas y salida del modelo de planta encontrado. De esta forma, el modelo será alimentado por las señales de planta reales y la salida del modelo será comparado con la variable medida. Por lo tanto, se evaluará el modelo, excitado con variables medidas sobre la planta real.

Este criterio empleado de validación es utilizado en procedimientos de modelado e identificación [3], [12], [18] y [19]. Con estas técnicas se realiza el procedimiento de identificación por medio de un set de variables y luego se recomienda realizar la validación con otro diferente. Para este estudio se realiza el proceso de verificación usando todo el set de datos que se provee.

En primera instancia, se puede hacer una verificación cualitativa [3] [19], esto es, comprar visualmente las dos respuestas, tanto de la planta real como del modelo, para realizar un juicio si el modelo es capaz de reproducir una salida similar para las mismas condiciones de entrada. Para ello en este caso, se empleará el set de datos obtenidos del SCADA.

Luego, se realizará un análisis cuantitativo, a través del análisis de la performance [3]. Parra ello se usan dos índices, RMS (Media cuadrática relativa), y MSE (Error cuadrático medio), definidos como:

$$RMS_i = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (Y_{ri}(k) - Y_{mi}(k))^2}{\sum_{k=1}^N Y_{ri}(k)^2}}; i = 1, 2, \dots \quad (4.1)$$

$$MSE_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (Y_{ri}(k) - Y_{mi}(k))^2; i = 1, 2, \dots \quad (4.2)$$

Donde:

*i*: Representa a las variables que se comparan, en nuestro caso es solo una.

*k*: Corresponde a las muestras.

*Y<sub>ri</sub>*: Los valores de la variable real.

*Y<sub>mi</sub>*: Los valores del modelo.

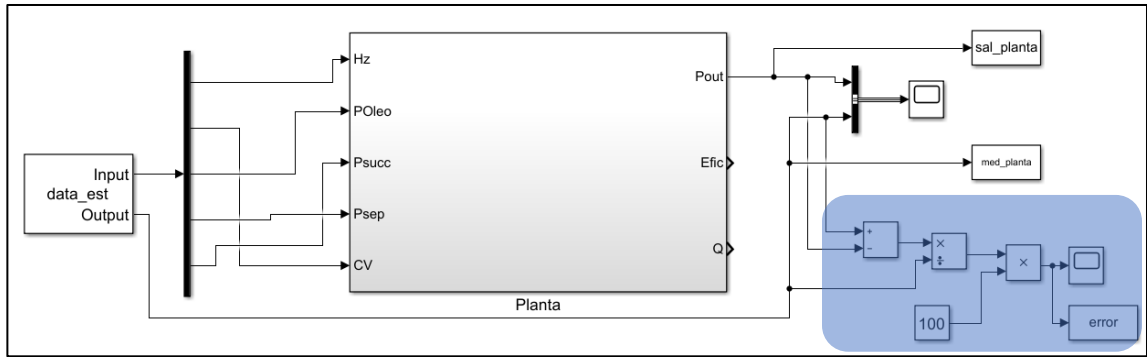
Un valor menor a 1 para el índice RMS es un indicador de que el modelo es adecuado [19].

#### 4.6 Esquema de Simulink para la validación del modelo.

El esquema presentado en la siguiente figura 4.2 se emplea para la validación del modelo desarrollado. El bloque “Planta” contiene los bloques desarrollados en el capítulo 3 y se puede ver su composición en la figura 2.2. Las entradas y salidas de este bloque son las establecidas en la sección 2.5.

El bloque “data\_est” consiste en un bloque “iddata source” el cual se vincula con la estructura de datos generado con el programa 4.1. De este bloque se alimentará el bloque planta, de tal forma de comparar la salida del bloque planta con el valor medido. El modelo de planta desarrollado presenta como una de las salidas la presión en la descarga de la bomba (“Pout”), como esta magnitud fue registrada por el SCADA, se realiza la comparación de ambas.

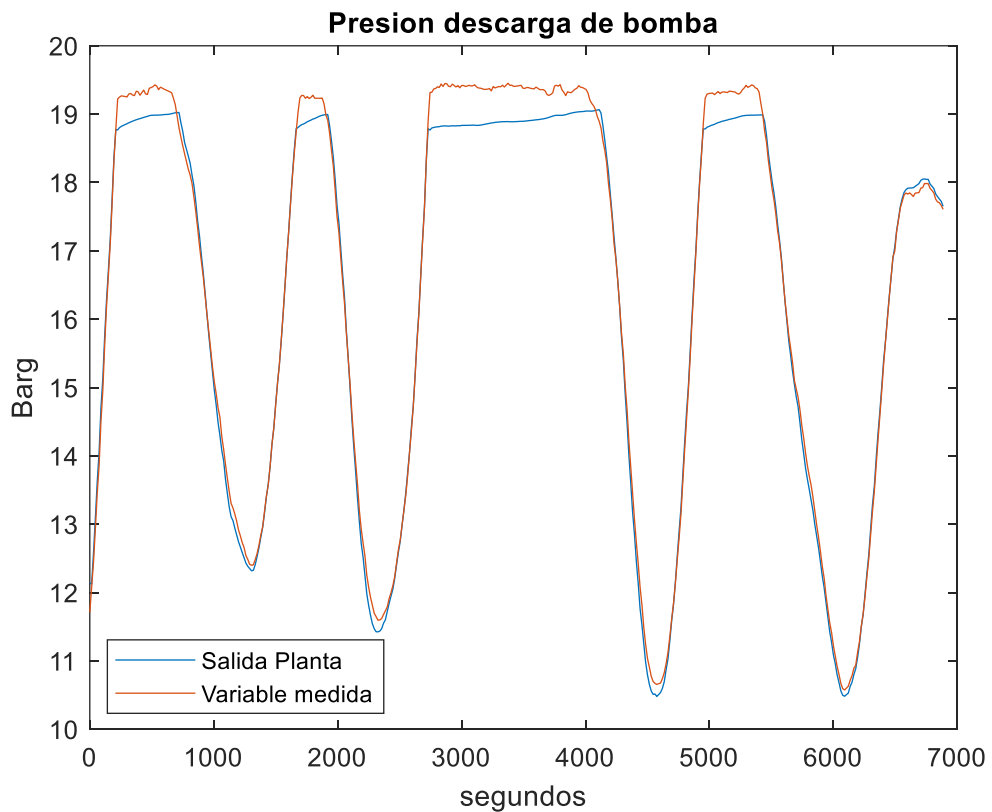
Del esquema se obtienen dos gráficos, uno con las señales de presión en descarga de la bomba, tanto la obtenida por el modelo como la procedente del SCADA. Por otro lado, se calcula el error porcentual por muestra, el cual se adquiere con los bloques destacados en color azul y luego se lo grafica aparte.



**Figura 4.2:** Diagrama en bloques validación de planta.

#### 4.7 Comparación de resultados.

La siguiente gráfica, de figura 4.3, muestra en azul la traza de la presión de descarga de bomba obtenida del modelo y en rojo la resultante de la planta real. Se observa que la respuesta se acerca en gran medida a los datos reales.



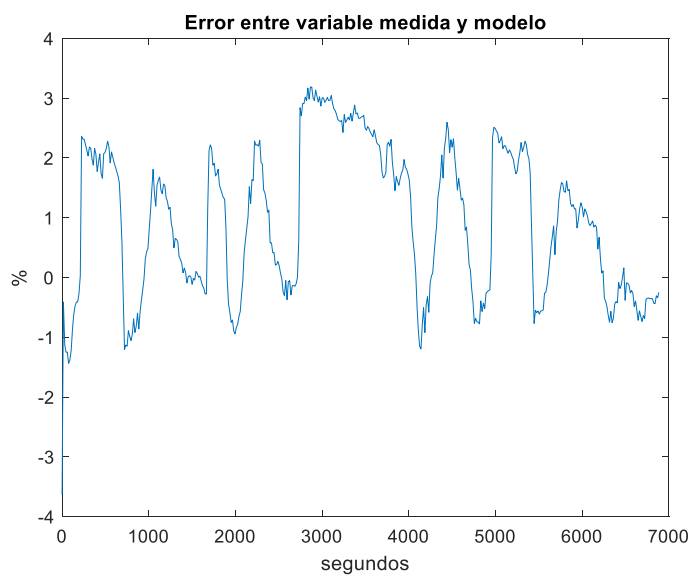
**Figura 4.3:** Grafica temporal de salida real contra modelo

Por simple inspección de esta gráfica (análisis cualitativo), podemos afirmar que nuestro modelo es capaz de reproducir, sobre la variable de salida “presión de descarga”, en general, las mismas variaciones que las registradas por la planta real, esto lógico cuando es estimulado con las mismas señales de entrada. Es decir, cuando se consideran “las mismas variaciones”, referido a que el modelo presenta incrementos, decrementos y mantenimientos de valores en los mismos instantes en los que lo presenta la planta real. Además, cabe aclarar, los valores han sido presentados en la misma escala, por lo que también se asemejan en cuanto a las magnitudes obtenidas por el modelo y los registrados por la planta real.

Otra forma de comparar la diferencia entre la señal obtenida por el modelo con respecto a lo medido en la planta real, es por cálculo del error puntual. En la figura 4.2, que corresponde al esquema de SimuLink con el cual se obtuvieron las gráficas de la figura 4.3, se destaca en azul un conjunto de bloques que realizan la siguiente operación (4.3).

$$e\% = \frac{\text{valor real} - \text{valor modelo}}{\text{valor real}} * 100\% \quad (4.3)$$

Con la cual se obtiene el error porcentual muestra a muestra. Luego con la herramienta de graficacion, se obtiene la figura 4.4 donde se observa como resultado un error comparativo menor al 4% para todas las muestras.



**Figura 4.4:** Error porcentual entre la variable simulada y la real

Por otro lado, se planteó en el apartado 4.5 un criterio cuantitativo, de evaluación, con el cálculo de dos índices (ver ecuaciones 4.1 y 4.2). Para realizar este procedimiento se desarrolla con Matlab el siguiente código 4.1.

```

1 - dif=med_planta.Data-sal_planta.Data;
2 - dif_2=dif.^2;
3 - sum_dif=sum(dif_2);
4 - Yr=med_planta.Data.^2;
5 - sum_Yr=sum(Yr);
6 - RMS=sqrt(sum_dif/sum_Yr);
7 - MSE=sum_dif/460;

```

**Código 4.1:** Calculo de los índices RMS y MSE.

Con este código se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 4.1:** Resultados índices RMS y MSE

<b>RMS</b> <b>(Media cuadrática relativa)</b>	<b>MSE</b> <b>(Error cuadrático medio),</b>
<b>0.0170</b>	<b>0.0813</b>

En base a los resultados anteriores se puede afirmar que el modelo encontrado se comporta como el de la planta real ya que su error porcentual y los índices RMS y MSE arrojan valores aceptables [3] [19].

#### **4.8 Conclusión del capítulo**

Se logra desarrollar y obtener un modelo de planta que se comporte de manera adecuada respecto al sistema real o de campo, esto se valida según cálculo de errores porcentuales, para un periodo de prueba de 28hs, empleando para ello recomendaciones y procedimientos descritos en bibliografías y trabajos similares [3] [18] y [12]. De esta manera se cuenta con una herramienta de análisis útil para evaluar el posible comportamiento de la planta, con el objetivo de analizar y desarrollar una nueva propuesta o sistema de control.



Indicado lo anterior, en el próximo capítulo se utiliza el modelo hallado para evaluar el comportamiento del sistema de control actualmente en operación.

#### **4.9 Recomendaciones del capítulo**

El modelo de la planta ha sido validado para condiciones de operación medidos en la ventana de tiempo provisto. Si bien por experiencia este tipo de instalaciones no presenta grandes variaciones en las condiciones de operación, cabe aclarar se desconoce su valides para condiciones extremas de tuberías despresurizadas o de cambios de fase en cañerías, lo cual sería de un futuro análisis que esta fuera del alcance de este trabajo.

# CAPÍTULO 5

## ANÁLISIS DEL CONTROLADOR ACTUAL DE PLANTA

### 5.1 Objetivos del capítulo

- Reproducir con simulación el esquema de control actual de la planta.
- Plantear las condiciones de prueba se someterá al sistema.
- Obtener la respuesta del sistema y analizar su resultado.

### 5.2 Introducción al capítulo

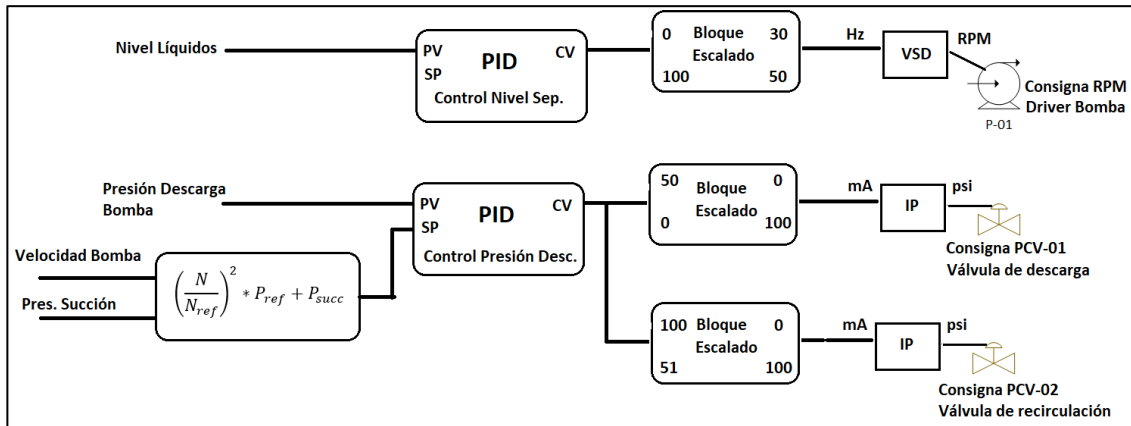
En el capítulo anterior se validó un modelo de la planta real, y en este se comenzará a analizar su comportamiento con el control actualmente implementado. Se pretende encontrar la respuesta del sistema con este, a fin de evaluar modificaciones que posibiliten mejorar su desempeño.

### 5.3 Descripción del sistema de control actual

Actualmente el sistema de control que opera en la planta real cuenta con dos controles de lazo PID, el primero es el encargado de controlar el nivel de líquidos del separador bifásico, para lo cual se establece un nivel de set point de operación, y con ello se manipulan las RPM del motor de la bomba centrífuga. Donde para un error positivo ( $PV - SP > 0$ ) se requerirá mayor velocidad para lograr un caudal de descarga mayor y viceversa. El segundo controlador PID es el encargado de ajustar la presión en la descarga de la bomba centrífuga, manipulando para ello la apertura de las válvulas de descarga a oleoducto y la de recirculación, a través de un esquema de rango partido. En la siguiente figura 5.1 se esquematiza este sistema de control.

En esta figura, se representan los principales bloques que conforman el control de la bomba. El control de las revoluciones de la bomba lo realiza el bloque PID superior, en base al nivel de líquidos del separador (variable de proceso PV). La variable controlada

(CV) pasa por un “bloque de escalado” de forma tal de poder comandar el VSD correctamente.



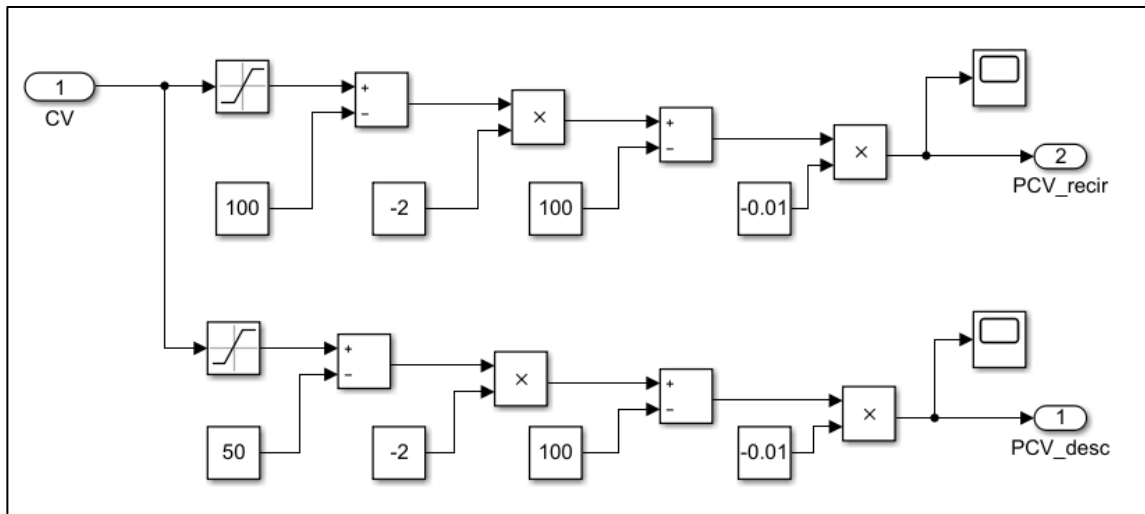
**Figura 5.1:** Esquema sistema de control

Uno de los objetivos de este estudio es lograr que la bomba centrífuga opere en condiciones de alta eficiencia, y siendo que el nivel del separador no forma parte del modelo de planta desarrollado, tal como se explica en el apartado 2.4, y validado en los capítulos anteriores. Por lo tanto, dejando el control de nivel de lado, nos avocaremos a evaluar el de la presión de descarga de la bomba.

El control de presión de descarga está implementado con un bloque PID, cuya consigna (valor CV) es procesado por un par de bloques adicionales, los cuales generan las señales para la apertura de válvulas por medio de un esquema de rango partido (ver figura 5.2), por lo que para un valor de CV entre los valores 0 a 50%, se tendrá todo el recorrido de apertura de la válvula de descarga a oleoducto, y para valores de CV entre 51 a 100%, todo el rango de recorrido de la válvula de recirculación. De esta forma se partirá, de una condición de estrangulamiento total para CV=0, con ambas válvulas cerradas. Este bloque de control de rango partido está incluido en el bloque de modelo de planta (ver figura 2.2).

A medida que el control requiera bajar la presión en la descarga, ya que en condición de estrangulamiento el caudal es cero y la presión en descarga es máxima, ver figura 3.1; y que el PV sea mayor al SP, la salida CV empezará a aumentar y de esta forma a abrir la válvula de descarga a oleoducto. Si esta condición de error positivo persiste, el CV

seguirá aumentando, y cuando llegue al valor de 50% la válvula de descarga a oleoducto estará totalmente abierta. En caso de requerir presiones menores (persiste el error positivo entre PV y SP), el valor de CV seguirá aumentando y comenzará a abrir la válvula de recirculación, hasta el caso extremo en que CV llega a 100% y ambas válvulas estén totalmente abiertas.



**Figura 5.2:** Esquema de bloques Simulink de rango partido

En la sección 3.3 se analizó en detalle el comportamiento de la bomba centrífuga para obtener su modelo matemático. Se analizó en particular la relación entre eficiencia y caudal para una velocidad de giro dado. De esta manera, se puede encontrar un valor de altura o de presión de descarga que permita obtener una eficiencia adecuada (mayor al 50%). Sin embargo, esta presión cambiará para otras velocidades de giro (ver tablas A.1 Anexo A). De manera que el set point del controlador PID de presión de descarga no puede ser un valor fijo, sino que dependerá del régimen de velocidad a la que se encuentra la bomba.

A través de la tabla A.1 del Anexo A se obtiene, para una velocidad de 2975 RPM y una altura de 199.98 mts, las condiciones para una eficiencia del 58,72%. Para obtener la misma eficiencia a otra velocidad, podemos usar las relaciones de afinidad presentadas en la sección 3.3.4, ecuación 3.2.

$$H_{obj} = \left( \frac{N}{N_{ref}} \right)^2 * H_{ref} \quad (5.1)$$

Donde:

$H_{obj}$ : Altura objetivo en [mts], para la cual a  $N$  revoluciones se obtiene la misma eficiencia que para la condición  $N_{ref}$  y  $H_{ref}$ .

Reemplazando altura por presión, empleando la ecuación 3.5, obtenemos:

$$P_{obj} = 0,0981 * SG * H_{obj} + P_{succ} \quad (5.2)$$

Para un  $SG = 0.9685$  el cual corresponde a la densidad relativa del petróleo del yacimiento,  $H_{obj} = 199.98$ mts (dato tabla A.1) y una presión de succión  $P_{succ}$  nula, obtenemos  $P_{obj}$  de  $19 \text{kg/cm}^2$ .

Reemplazando la velocidad expresada en RPM por frecuencia, expresada en Hz, ya que es la unidad en el VSD:

$$N_{[Hz]} = N_{[RPM]} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ sg}} \quad (5.3)$$

Por lo que la expresión que establece la presión objetivo, en función de la velocidad de la bomba y la presión de succión se obtiene de 5.1:

$$P_{obj} = \left( \frac{N}{N_{ref}} \right)^2 * P_{ref} + P_{succ} = \left( \frac{N_{[Hz]}}{50} \right)^2 * 19 + P_{succ} \quad (5.4)$$

La cual es la expresión empleada para modificar el set point del controlador de presión de descarga de bomba, para mantener una eficiencia del 58% en diferentes regímenes de velocidades de giro. Este cálculo se incluye en las figuras 5.1 y se resalta en color naranja en el esquema de Simulink de la figura 5.3.

#### 5.4 Condiciones de prueba

El modelo de la planta cuenta con varias entradas. Las cuales corresponden a valores de variables de proceso. En el capítulo 4, se validó el modelo de la planta, por medio de un conjunto de valores recopilados de una instalación real (ver sección 4.4). Para evaluar el controlador descrito en la sección anterior, que acciona sobre dos de las cinco entradas

del modelo, se deberá tomar una decisión de compromiso sobre que valores serán ingresados en las entradas restantes. Estas entradas son: la presión de oleoducto, presión de separador y presión de succión de bomba. En primer lugar, para el ajuste del controlador, se establecerán valores constantes y de magnitud igual al promedio de los valores registrados en la planta real, con lo que se impone una condición de proceso real para la planta simulada. Estos valores se introducen como constantes en el esquema Simulink con el cual se realizaron las pruebas (ver figura 5.3), mismo permitirá analizar la capacidad de ajuste ante diferentes perturbaciones.

**Tabla 5.1:** Condiciones de proceso

Variable	Valor	Unidades
Presion oleoducto	9	Kg/cm <sup>2</sup>
Presion separador	3,2	Kg/cm <sup>2</sup>
Presion succion de bomba	0	Kg/cm <sup>2</sup>

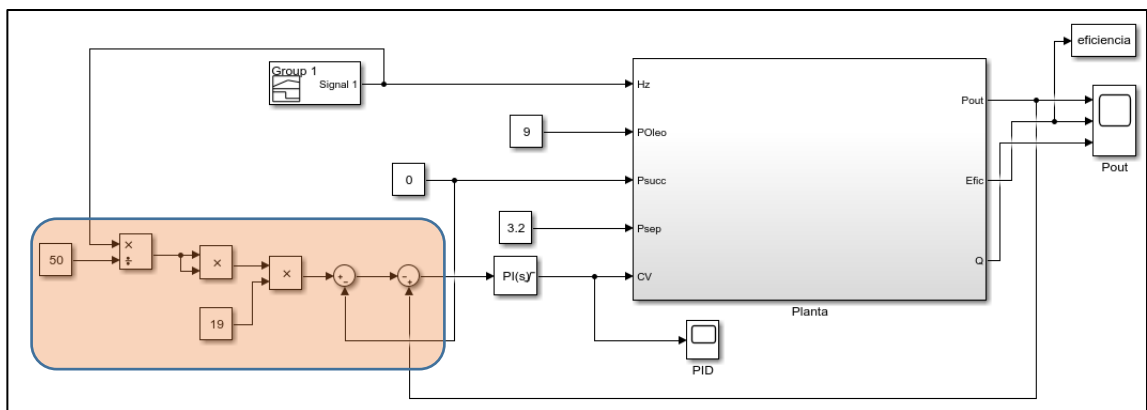
Para la variable velocidad de giro, se elije como señal de entrada la forma escalón. Esta forma es ampliamente usada para el ajuste de controles PID ya que permite caracterizar procesos gracias al analisis de su respuesta [18]. Para la evaluación del comportamiento del control de presión se establecen distintos escalones, para bajas, medias y altas velocidades (en la figura 5.4, se observa la señal de prueba de velocidad). Con esta señal, se realiza el ajuste del controlador (seccion 5.5) y luego se prueba para cambios de velocidad de giro con otras formas de señal, como rampa y parábola (seccion 5.6).

### 5.5 Ajuste del controlador

En la bibliografía básica de diseño de sistemas de control, [18], [20], se presentan diferentes técnicas para la sintonía de lazos de control cuando se emplean controladores PID y no se cuenta con un modelo de función transferencia, en donde se pueda aplicar métodos de asignación de polos y ceros entre otros. Para los sistemas donde no se cuenta con los datos dinámicos de la planta, se podría aplicar los metodos presentados

por Ziegler-Nichols o derivados, que por mas que sean antiguos se siguen utilizando. Estos métodos estan basados en, realizar alguna acción en la planta, ya sea a lazo abierto o a lazo cerrado, y de esta manera obtener por medición parámetros que permitan lograr los valores de sintonía que provean un desempeño adecuado, como un buen seguimiento de set point, y/o rechazo a cambios de carga. Para seleccionar la técnica a aplicar, debemos primero determinar si es posible aplicar un método de sintonia de lazo cerrado o de lazo abierto. En los casos de los métodos de sintonia de lazo cerrado [20], se destacan las siguientes limitaciones:

- No se pueden aplicar en los procesos en donde la respuesta a lazo abierto es inestable. En el caso de nuestro modelo, no podemos asegurar la estabilidad en forma analítica, por no tratarse de un modelo dinámico implementado con funciones de transferencias ni espacio de estados. En cuanto a la afirmacion de que si el modelo es estable para lazo abierto, por lo dicho, se deberá probar con simulaciones [20].
- Algunos procesos simples, no presentan ganancia limite, como los procesos de primer orden y los de segundo orden sin tiempo muerto. Por las mismas razones del apartado anterior, no podemos asegurar estas condiciones en nuestro sistema.



**Figura 5.3:** Diagrama en bloques para simulación sistema de control actual.

Para el caso de los métodos de sintonia de lazo abierto, se requiere la medición de la respuesta ante un escalón de entrada [20], de los parámetros en el punto de máxima

pendiente. Para nuestro modelo, no fue posible replicar estas condiciones ni obtener una respuesta acorde para encontrar dicho punto. En la bibliografía se presentan curvas de reacción típicas donde se pueden obtener los parámetros necesarios, pero nuestro modelo no presenta este tipo de curva.

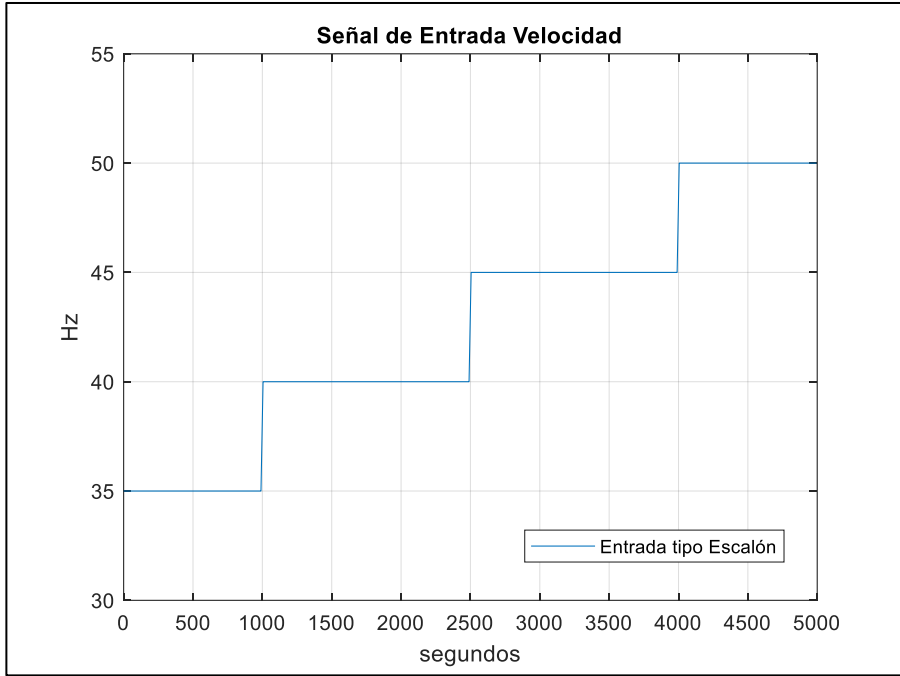
Según las condiciones establecidas en el apartado anterior, se realiza la simulación del sistema con valores de sintonía del lazo en operación real actual, los cuales son: Ganancia proporcional ( $G_p$ ) de 5, ganancia integral ( $G_i$ ) de 5 y sin ganancia derivativa. Estos valores fueron ingresados en el controlador real en el momento de la puesta en marcha del sistema, elegidos por el personal afectado, en función de la información que se disponía y experiencia previa, adoptando dicha combinación como la más adecuada. Con ellos los resultados obtenidos muestran, que el sistema se torna inestable para la transición entre 40 y 45Hz como se observa en la figura 5.5.

Este comportamiento inestable ocurre cuando el controlador llega a un valor de CV máximo y luego cambia abruptamente a un valor mínimo. Debido a que se configuró la salida de CV para valores comprendidos entre 0 a 100, se comporta como niveles de saturación. Este tipo de ajuste es típico de controladores, y evita además que la parte integradora siga acumulando (anti windup). Se entiende como comportamiento inestable cuando la salida diverge sin límites a partir de un estado de equilibrio [18], como se puede en la figura 5.5 a partir del segundo 2500. Dicho comportamiento se manifiesta para otras condiciones del proceso, como para una presión de oleoducto de  $8\text{kg/cm}^2$ , lo cual indica que principalmente ocurren por los valores implementados de sintonía del control PID.

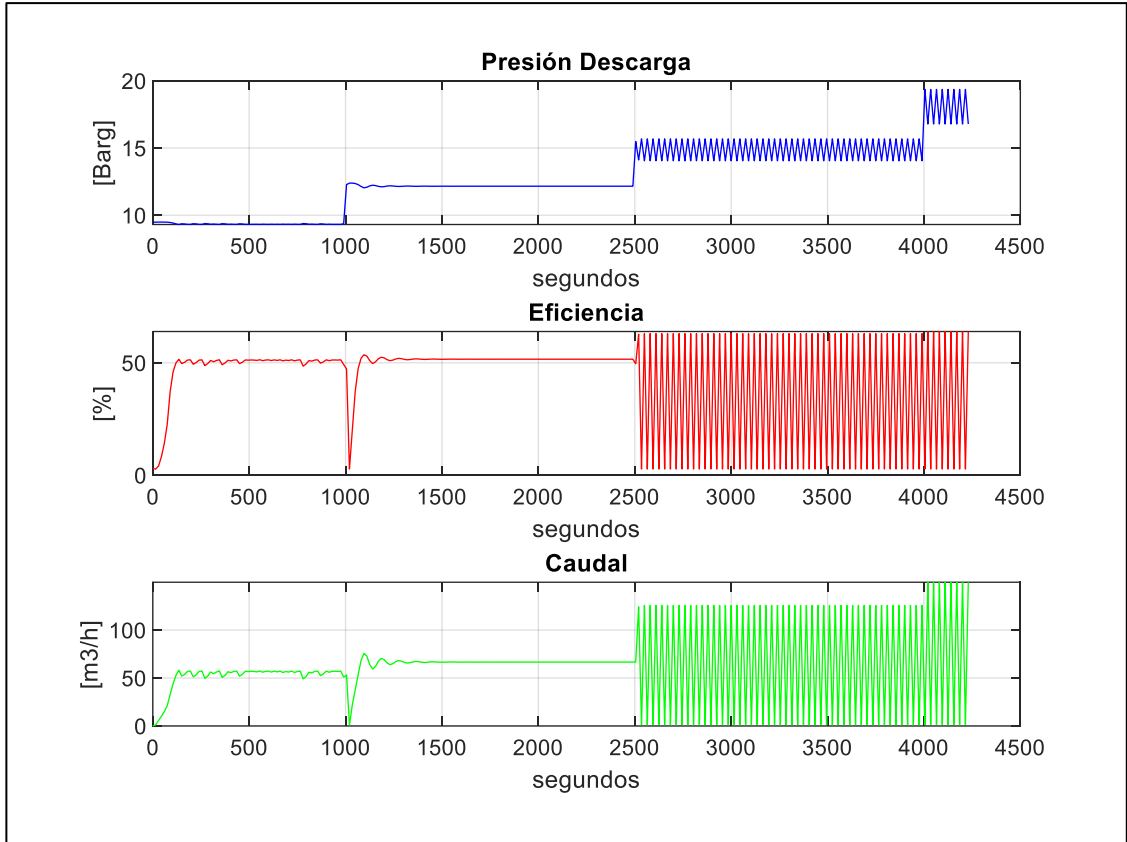
En base a lo expuesto, se reajustan los valores de sintonía, por prueba y error, hasta encontrar un comportamiento estable de la variable controlada.

En la gráfica de figura 5.6, se observa un comportamiento estable para todas las transiciones de velocidades, la cual se logra para valores de sintonía de  $G_p=2$  y  $G_i=2$ , esto es, la salida llega a un nuevo valor (estado de equilibrio) luego de un tiempo acotado (transitorio), [18].

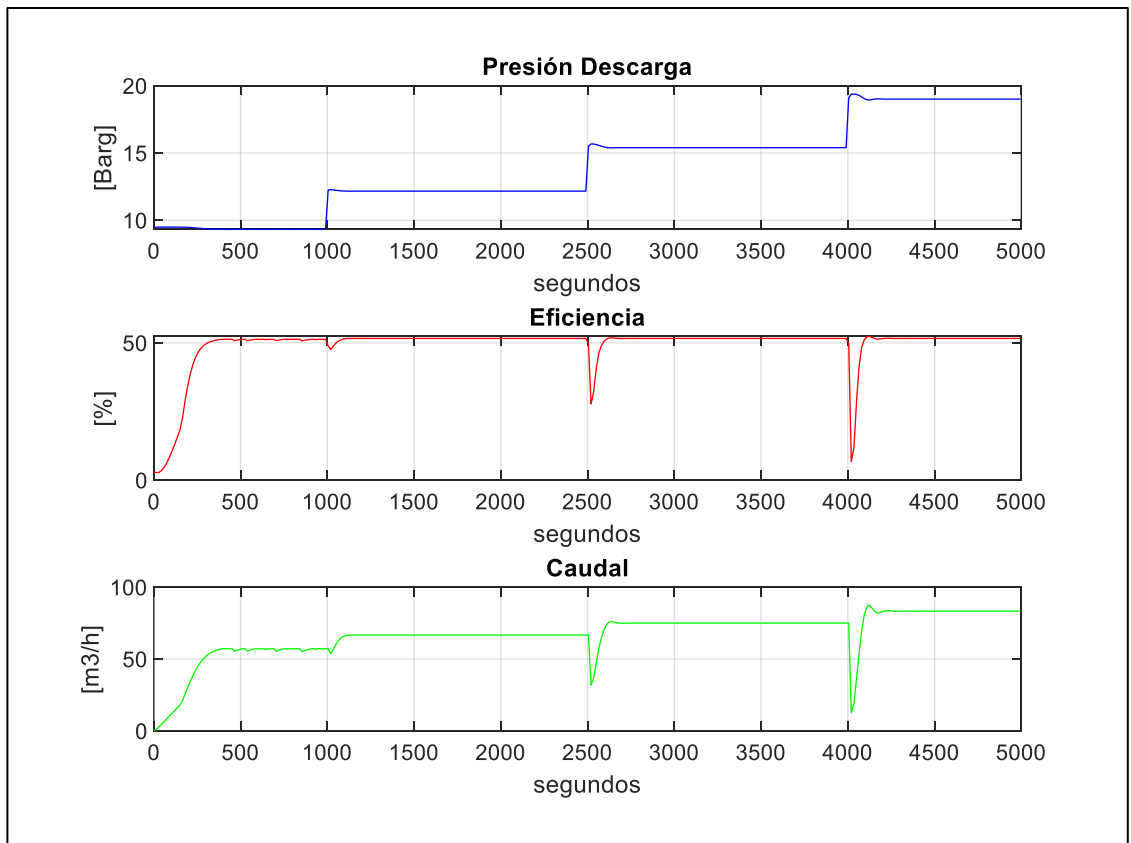




**Figura 5.4:** Señal de prueba velocidad de bomba tipo escalón



**Figura 5.5:** Salida simulación controlador actual  $G_p=5$ ,  $G_i=5$ , para entrada escalón



**Figura 5.6:** Salida simulación controlador actual  $G_p=2$ ,  $G_i=2$ , para entrada escalón

Luego la gráfica de eficiencia se observa con valores relativamente constantes aproximadamente alrededor del 50%, salvo en las cercanías de las transiciones donde cae notoriamente su valor debido al ajuste de la condición de la bomba que establece una menor eficiencia.

La estadística del valor de eficiencia se resume en la siguiente figura 5.7, obtenida con la herramienta “mediciones”, que forma parte de “time scope”. De estas mediciones, nos reservaremos en particular las mediciones de valor medio (mean), la mediana (median) y el valor cuadrático medio (RMS), los cuales serán utilizados en la sección 6.7 para la comparación con otro diseño de controlador.

Signal Statistics		
	Value	Time
Max	5.229e+01	4110.000
Min	2.746e+00	15.000
Peak to Peak	4.955e+01	
Mean	4.930e+01	
Median	5.160e+01	
RMS	5.005e+01	

**Figura 5.7:** Análisis de la señal de eficiencia: simulación  $G_p=2$ ,  $G_i=2$ , para entrada escalón.

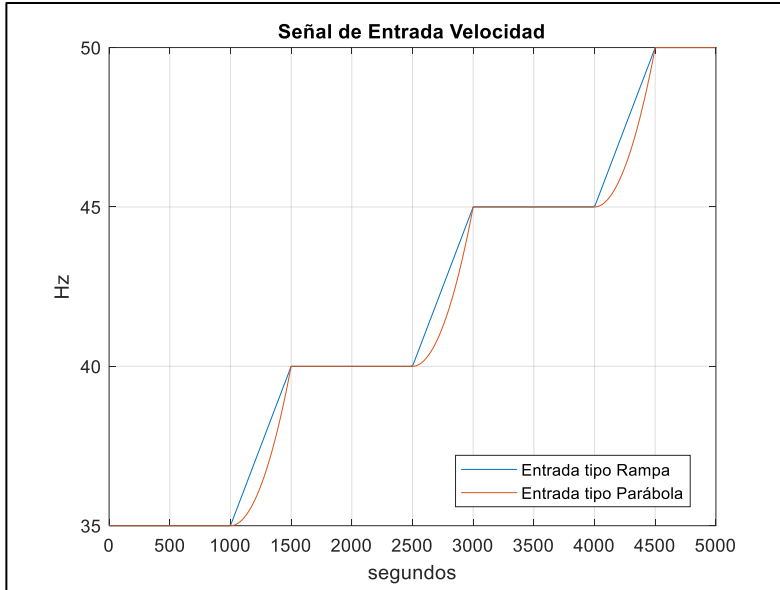
### 5.6 Análisis para diferentes formas de entrada.

Con la sintonía encontrada en la sección anterior, se procede a probar el sistema con dos formas de onda de entrada diferente de velocidad, a fin de asegurar que el sistema siga respondiendo adecuadamente, esto es, que no se inestabilice o presente salidas saturadas de la variable de control.

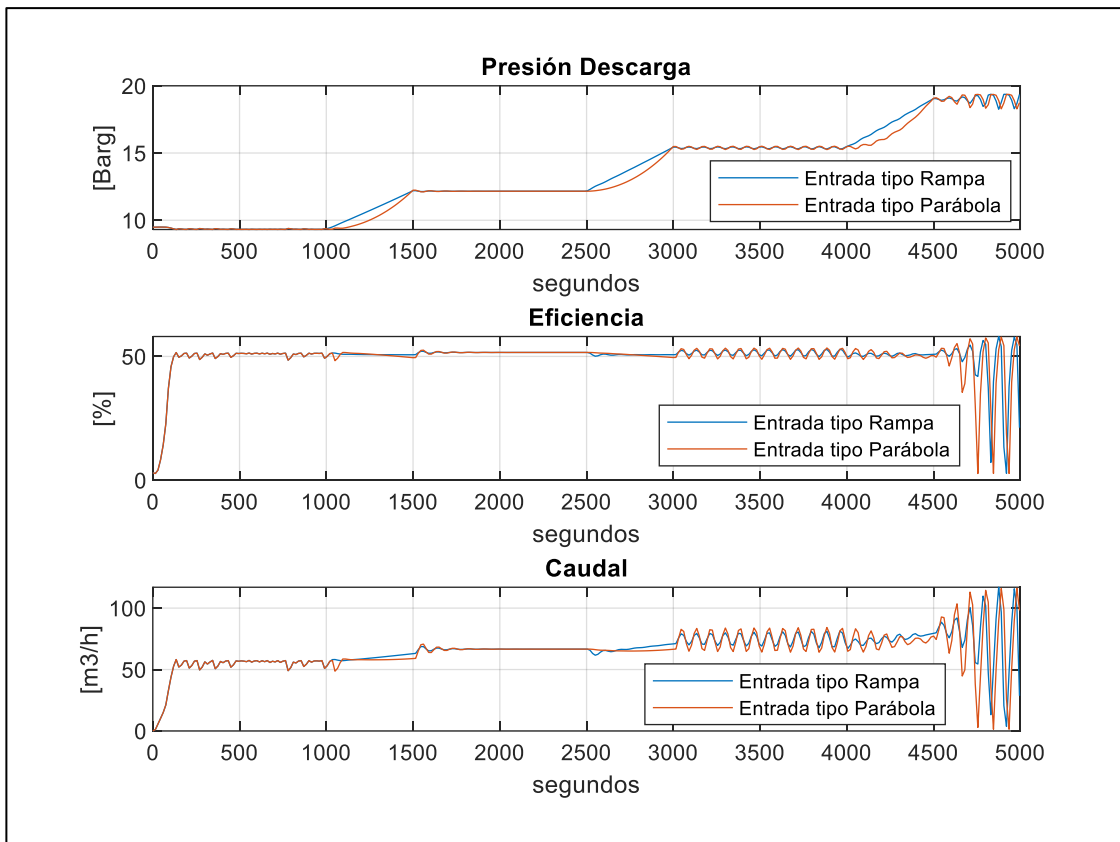
La primera forma de señal es del tipo rampa, cuya variación es lineal con el tiempo, la cual se ha definido para tres niveles diferentes (35, 40 y 45 Hz) con un tiempo de 500 segundos. Esto nos permite simular cambios paulatinos de velocidad suaves (a diferencia de los aplicados en la sección anterior), lo cual se condice más con las condiciones de proceso deseadas (ver figura 5.8 trazo azul).

De forma similar, se genera una segunda señal tipo parábola, cuya variación es cuadrática con el tiempo, y también es definida para tres niveles diferentes y con un tiempo de acción de 500 segundos (ver figura 5.8 trazo rojo).

En la sección 5.5, se comprobó que los valores de sintonía aplicados sobre la planta real ( $G_p=5$  y  $G_i=5$ ) provocan una respuesta inestable para una señal escalón. Para las señales tipo rampa y parábola, se verifica que las oscilaciones siguen estando presentes tal como se observa en la figura 5.9. Sin embargo, estas oscilaciones se dan en los tiempos donde la entrada no cambia de valor y en los tiempos comprendidos entre los 3000 a 4000 segundos y 4500 a 5000 segundos.



**Figura 5.8:** Señales de prueba velocidad de bomba tipo rampa y parábola



**Figura 5.9:** Salida simulación controlador actual  $G_p=5$ ,  $G_i=5$ , para entrada rampa y parábola.

De esta observación se concluye que:

- Durante la acción de rampa o parábola, la salida del sistema (Presión de descarga, eficiencia y caudal) presenta una acción estable acotada (ver tiempos entre 1000s a 1500s, 2500s a 3000s, y 4000s a 4500s).
- Los cambios abruptos de velocidad (ya sea la acción de un escalón o la finalización de una rampa o parábola) genera oscilaciones en la salida, las cuales infieren inestabilidad en regímenes de velocidades altos.

Para los valores de sintonía en donde se encontró una respuesta estable en la sección 5.5 ( $G_p=2$  y  $G_i=2$ ), los resultados para las entradas de rampa y parábola fueron también estables. Además, se observaron respuestas suaves ante las transiciones y un mantenimiento de la eficiencia más acorde a lo pretendido, es decir, la eficiencia permanece prácticamente constante ante las variaciones del régimen de velocidades del motor (ver figura 5.10).

De esta forma, se concluye que la forma de señal más exigente para el sistema es el escalón, y será el empleado para el análisis de mejoras en el sistema de control.

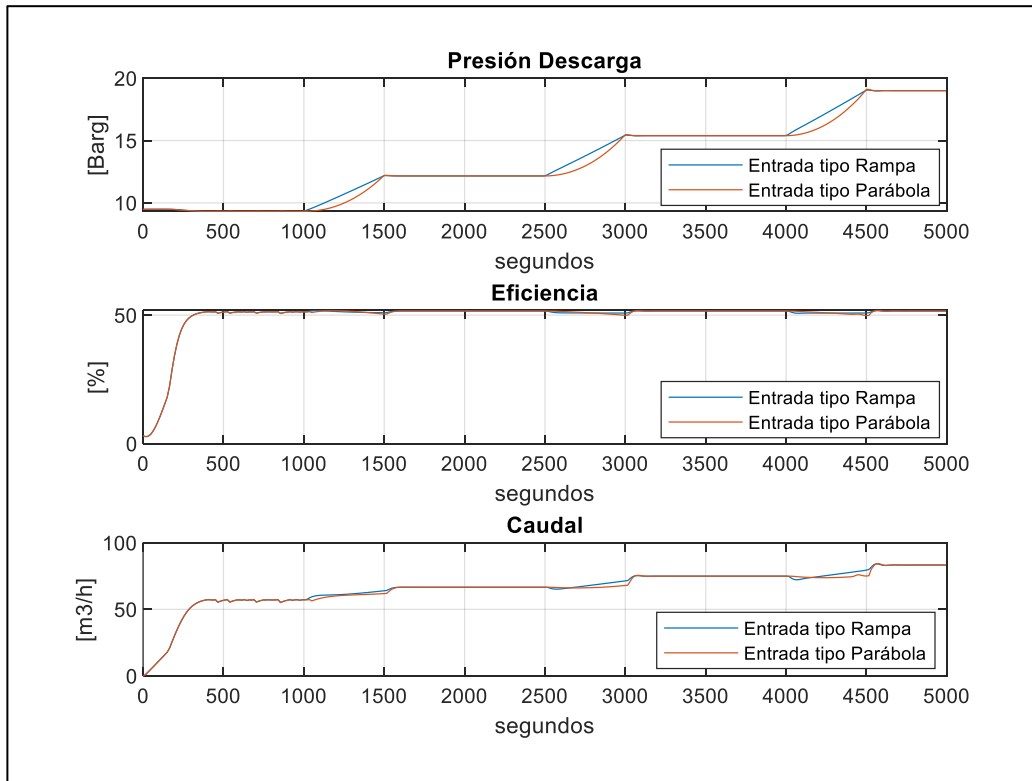
### **5.7 Análisis para diferentes valores de consignas de entrada.**

En la sección anterior, se encontró un valor de sintonía para las condiciones planteadas en la tabla 5.1. A continuación, se analiza el funcionamiento para otros valores de proceso a fin de determinar el comportamiento del control cuando se presentan variaciones en las entradas de proceso restantes (ya que en las secciones anteriores solo se simuló cambios en la entrada de velocidad de bomba).

Condición 1: Se establece una condición de proceso constante, en donde la velocidad de giro se mantiene en 45Hz, presiones de oleoducto en 9kg/cm<sup>2</sup>, de succión en 0kg/cm<sup>2</sup>, y de separador en 3,2kg/cm<sup>2</sup>. Cabe aclarar estos valores se eligen en función de las condiciones de proceso normales encontradas en la planta real.

Condición 2: Se realiza un salto abrupto de la presión de oleoducto de 7.5kg/cm<sup>2</sup> a 9kg/cm<sup>2</sup>, para  $t=1500s$ , con los demás parámetros constantes. Lo cual simula una

perturbación posible en el oleoducto debido a otros aportes de petróleo de otras instalaciones.



**Figura 5.10:** Salida simulación controlador actual  $G_p=2$ ,  $G_i=2$ , para entrada rampa y parábola

Condición 3: Se realiza un salto abrupto de presión en succión de la bomba de  $-0.1$  a  $0 \text{ kg/cm}^2$  para  $t=2500\text{s}$ , con los demás parámetros constantes. Esto simula un cambio de la presión de succión, el cual está definido por los parámetros de caudal y diámetros de tubería.

Condición 4: Se realiza un salto abrupto de presión en separador de  $3 \text{ kg/cm}^2$  a  $4.5 \text{ kg/cm}^2$  para  $t=3500\text{s}$ , con los demás parámetros constantes. Esto simula un cambio de presión en separador, el cual se puede dar por cambios en los caudales aportados por los pozos del yacimiento.

Las consignas anteriores se simularon en condiciones de proceso en donde se genera un cambio abrupto de una de las entradas por vez, de manera de observar la capacidad del sistema de controlar dichas acciones de perturbación. En particular, interesa que efecto

tienen estos cambios en la eficiencia de la bomba, ya que en general, se requiere que durante el tiempo en que el sistema de control este ajustando, esta no caiga, y además en dicho caso se logre recuperar rápidamente.

**Tabla 5.2:** Valor de eficiencia para diferentes condiciones medidos en el período 500sg a 4000sg.

	Condición 1	Condición 2	Condición 3	Condición 4
Valor máximo	51.6 %	51.73 %	51.58 %	51.61 %
Valor mínimo	51.6 %	49.95 %	44.24 %	51.43 %
Valor medio	51.6 %	51.6 %	47.33 %	51.59 %
Valor RMS	51.6 %	51.58 %	47.47 %	51.59 %

Los valores registrados en la tabla fueron tomados usando la herramienta “Signal Statistics” de trazador de curvas del Simulink y se tomó una porción de tiempo entre 500 segundos a 4000 segundos, dejando afuera del grafico el momento inicial en el cual el sistema entra en régimen permanente con los valores de proceso.

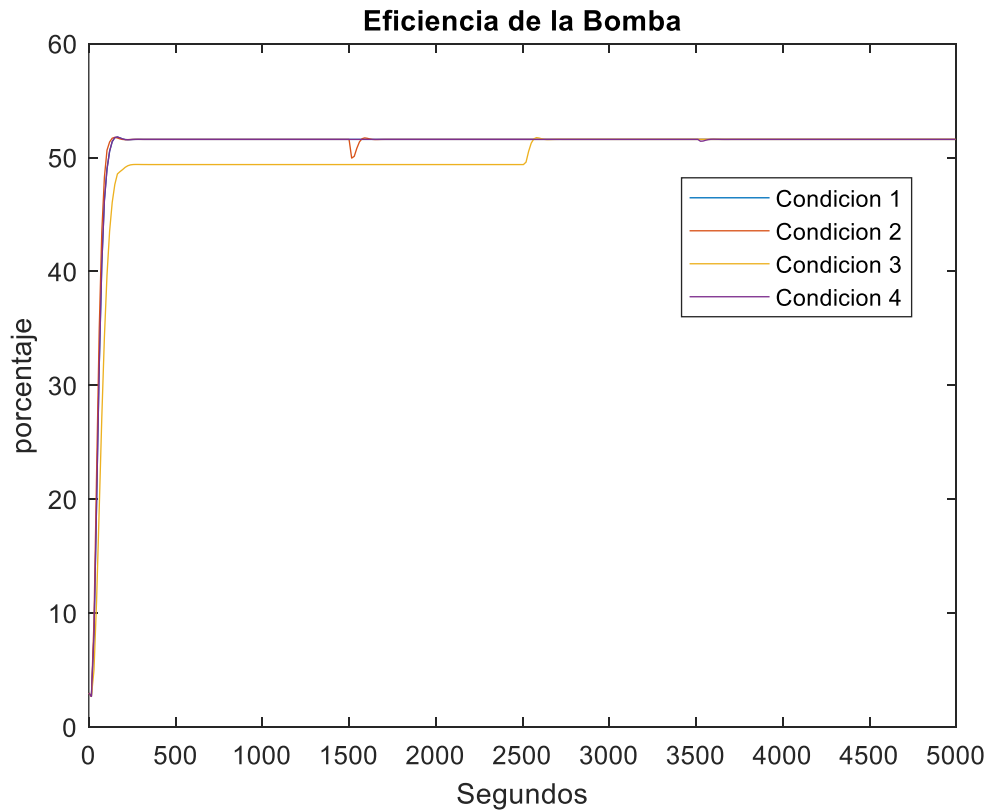
Para las condiciones 1, 2, y 4, no se observa una caída del rendimiento notorio, luego en el caso de la condición 3 el sistema presenta una eficiencia menor para la presión de succión inicial, pero tal como se muestra en el valor máximo, este se normaliza al llegar a la presión de succión final.

En la figura 5.11 se pueden ver los resultados de las pruebas, graficadas para su mejor comparación y evaluación.

### **5.8 Conclusión del capítulo**

A través de las simulaciones del sistema de control actual, para las condiciones impuestas, se observa que el sistema es capaz de mantener una eficiencia con media del orden de 52%. El valor de sintonía fue alterado debido a las inestabilidades observadas para los valores originales de campo. Cabe destacar sobre esto último, que la planta real

es incapaz de generar cambios de escalón en la velocidad del motor, ya sea porque es la señal de salida del control de nivel del separador no genera cambios abruptos, y que el VSD tampoco puede generar este tipo de cambios. Sin embargo, a los fines de análisis, se optó por este tipo de señal para excitar todos los modos posibles del sistema.



**Figura 5.11:** Respuesta de la eficiencia de la bomba para distintas condiciones de proceso.

Se estudió también la capacidad del sistema de control en seguir la consigna ante cambios en los otros parámetros de entrada, lo cual se concluye que para variaciones de estos dentro de valores razonables del proceso, no se presenta una merma en la eficiencia de la bomba.

En el próximo capítulo se estudiará la mejora a implementar al control, con el fin de incrementar su desempeño en función de la eficiencia.



## 5.9 Recomendaciones del capítulo

El control implementado actualmente presenta un comportamiento adecuado para los valores de sintonía que han sido establecidos. La eficiencia cae en cambios abruptos de velocidad, los cuales podrían ser limitados alterando la configuración del VSD, o acotando el *rate of change* de la salida del lazo del control de nivel.

Los otros parámetros del sistema también provocan cambios en la eficiencia de la bomba, pero el sistema de control implementado es capaz de mantener la eficiencia de la bomba en valores adecuados, siempre y cuando estas cambien dentro de los valores lógicos del proceso real.

# CAPÍTULO 6

## EVALUACIÓN Y PROPUESTA DE MODIFICACIONES EN CONTROLADOR DE PLANTA

### 6.1 Objetivos del capítulo

- Propuesta de mejora para el controlador actual de planta real.
- Definir y desarrollar el tipo de controlador a implementar.
- Realizar pruebas de simulación y evaluar resultados.

### 6.2 Introducción al capítulo

En el capítulo anterior se simuló un esquema de control, actualmente utilizado en la planta real, cuyos resultados muestran que puede mantener en general el sistema en una eficiencia aceptable, sin embargo, los valores de sintonía del lazo actual parecen generar inestabilidad para transiciones de velocidad abruptas en valores altos de esta. Se nota además que la eficiencia de la bomba cae en los momentos de cambio de la velocidad y estos dependen del régimen de velocidad, es decir su caída es dependiente del valor de velocidad.

En función de lo expresado, a continuación, se estudia y propone mejoras sobre el controlador actual, se evalúan diferentes valores de sintonía y se los vincula con el régimen de velocidad de la bomba. De esta forma, se implementa un controlador del tipo “Ganancia Tabulada”, “Ganancia Programada” o “Ganancia Adaptiva” según las condiciones de trabajo, en la que se encuentre el sistema. Como ejemplo de esto se puede citar el control de paso de pala o pitch de los aerogeneradores de potencia, donde las ganancias de los controladores cambian de acuerdo con la zona de carga total que se encuentre el sistema, en función de la velocidad del viento [21].

### 6.3 Control por ganancia tabulada

El control adaptivo cubre un conjunto de técnicas que proveen una forma sistemática para el ajuste automático de un controlador en tiempo real, lo cual permite mantener o

lograr un nivel de control deseado del sistema, cuando los parámetros de la dinámica de la planta no se conocen, varían en el tiempo o son alineales, como es en este caso de estudio [4] [5].

En muchas situaciones se conoce la forma en que la dinámica del proceso cambia con respecto a las condiciones de trabajo, donde una fuente de esto pueden ser las alinealidades inherentes, producto además de las diferentes especificaciones se plantean dentro del proceso.

Es posible, entonces, cambiar los parámetros del controlador por medio del monitoreo de las condiciones de proceso. Este concepto se llama “ganancia tabulada”, ya que el esquema era originalmente usado únicamente para adecuar los cambios de la ganancia de proceso. Ganancia tabulada es un tipo especial de realimentación, donde a un controlador lineal sus parámetros son modificados de manera programada en función de las condiciones operativas. Actualmente, gracias a los controladores digitales, esta técnica puede ser convenientemente implementada [5].

#### **6.4 Ajuste de sintonía y análisis de condiciones operativas.**

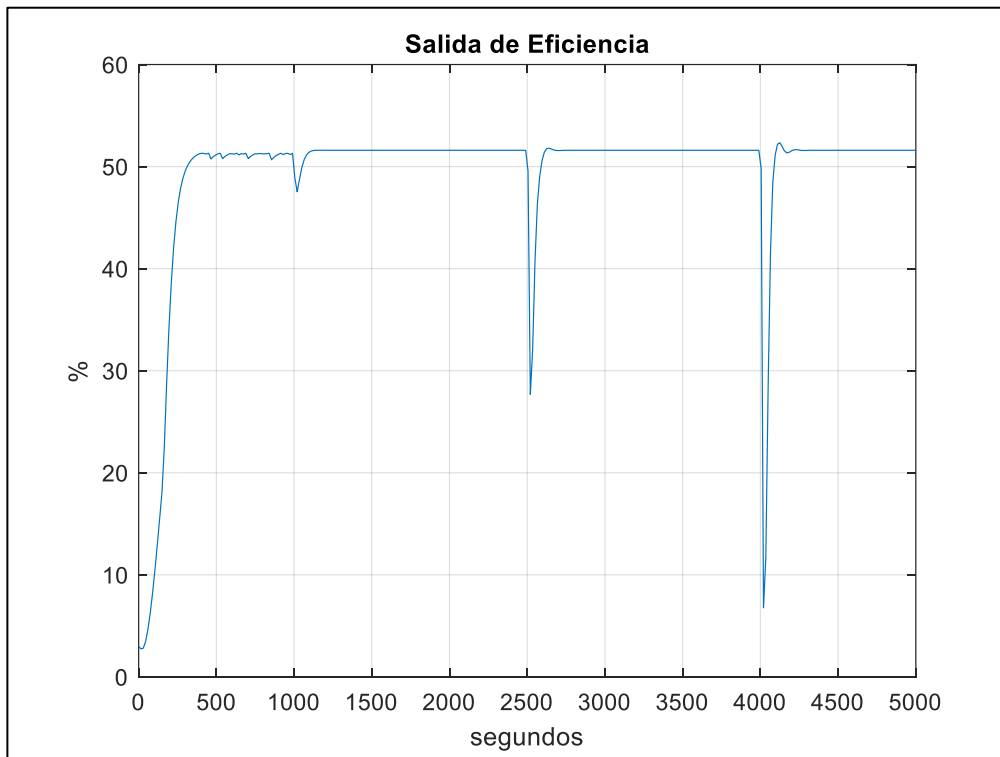
A través del esquema presentado en el capítulo 5, se analizó su desempeño para diferentes valores de sintonía con el objetivo de lograr una mejora en la eficiencia de la bomba, y “encaminarlo” dentro de una condición operativa que permita construir un controlador de ganancia tabulada.

Dada la característica no lineal del modelo, se ha verificado, como se verá a continuación que el comportamiento del sistema con el controlador es dependiente del régimen en que se encuentra, en particular esto ocurre en función de la velocidad de giro de la bomba. Por este motivo, se prepara una señal de prueba para dicha variable, en donde se generan tres saltos escalonados ascendentes, para tres regímenes de la bomba, comprendidos en el rango normal de operación. La figura 5.4 muestra esta señal con la que se trabajará en este capítulo, la cual ya se ha empleado en el capítulo anterior.

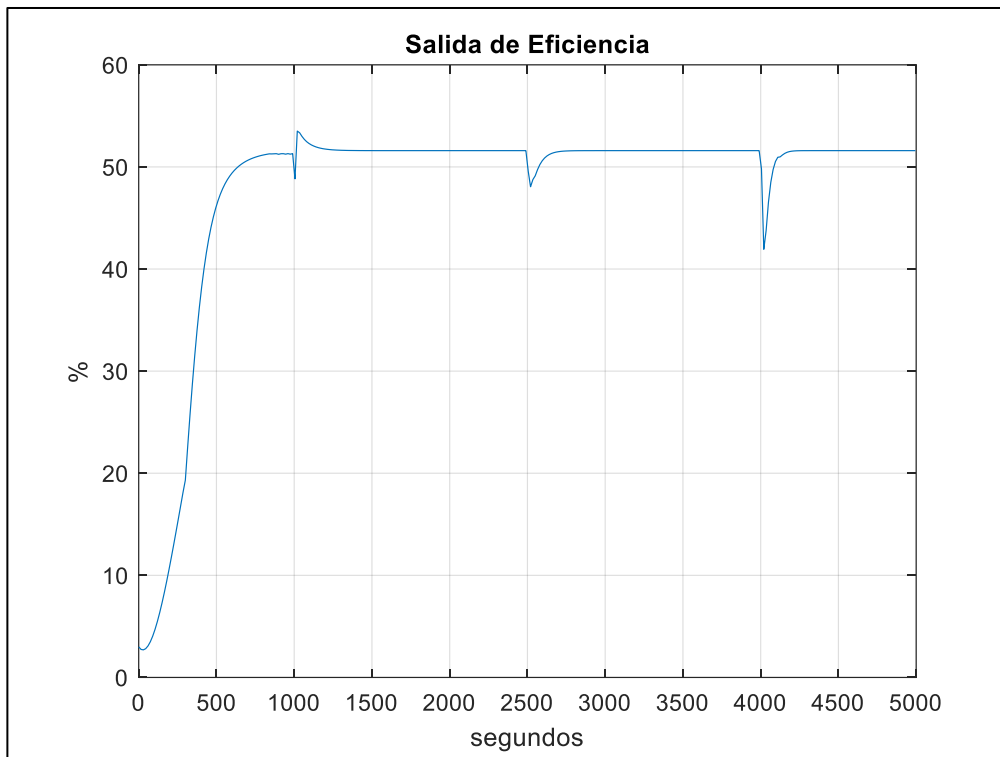
#### 6.4.1 Ajuste de la sintonía para disminuir sobre impulsos de la respuesta.

Con la sintonía encontrada en el capítulo anterior ( $G_p=2$  y  $G_i=2$ ) se observa un sistema estabilizado para todo el rango de valores de velocidad de giro de la bomba, pero para saltos abruptos de la velocidad la eficiencia muestra caídas pronunciadas (ver figura 6. 1 en los instantes de tiempo 1000 s, 2500 s y 4000 s).

Por lo tanto, es razonable buscar valores de ganancia tal que evidencien una reducción en estas caídas, o sea, que no caiga la eficiencia en forma abrupta, y a la vez produzcan una respuesta rápida en los parámetros de salida. De esta forma, según prueba y evaluación, para valores de sintonía  $G_p=2$  y  $G_i=1$ , se observa una importante mejora en la eficiencia, ya que este parámetro no cae como en el caso anterior, lo cual es muy notorio a bajas velocidades (ver figura 6.2). En este gráfico se observa un mantenimiento de la eficiencia con respecto a la respuesta de la sintonía anterior.



**Figura 6.1:** Salida de eficiencia simulación controlador para  $G_p=2$  y  $G_i=2$



**Figura 6.2:** Salida de eficiencia simulación controlador para  $G_p=2$  y  $G_i=1$

#### 6.4.2 Ajuste de sintonía para mejorar en altas velocidades.

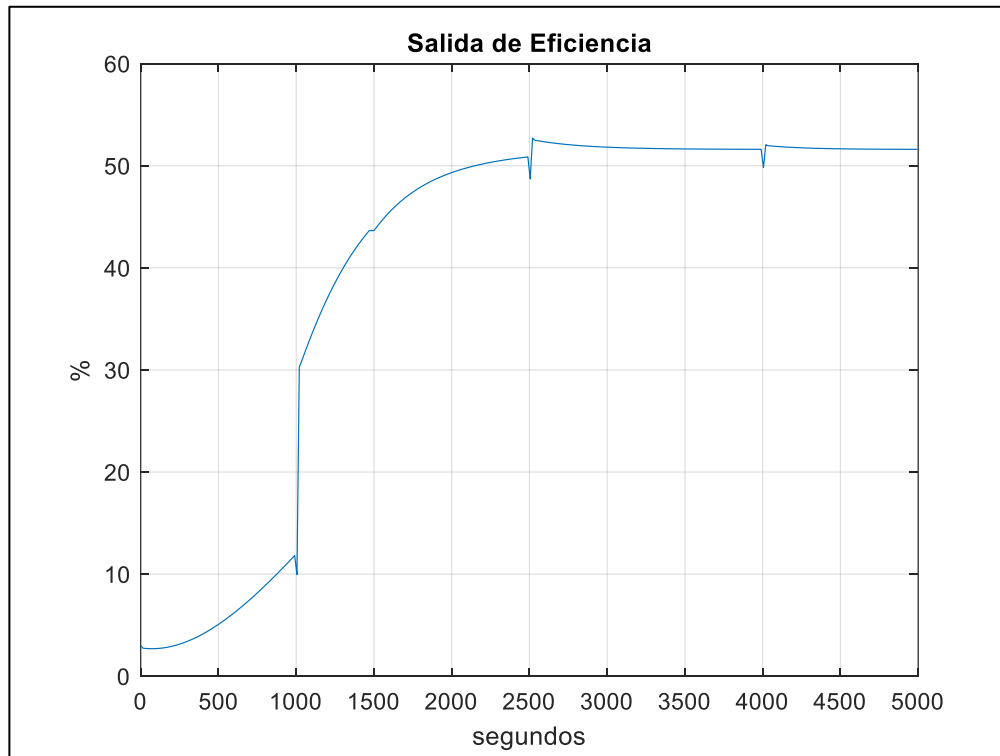
En la sección anterior se encontró un valor de sintonía que disminuye fuertemente la caída de la eficiencia de la bomba para bajas velocidades de giro. Se ha investigado que si se continúa disminuyendo la ganancia integral sigue bajando la amplitud de la caída en la eficiencia, pero esto degrada el desempeño para las velocidades inferiores, ya que aumenta considerablemente el tiempo de establecimiento, lo cual se puede observar en la siguiente figura 6.3 para una sintonía de  $G_p=2$  y  $G_i=0,2$ .

Se observa por otro lado que la eficiencia permanece más constante para los últimos dos cambios de la velocidad de la bomba (40 a 50Hz), pero perjudica su desempeño para la transición de 35Hz a 40Hz.

#### 6.5 Diseño del controlador de ganancias tabuladas

En las secciones anteriores, observamos que la mejor performance se obtiene para bajas velocidades (35 a 40 Hz) con una ganancia integral de 2, y para velocidades de 40 a 50Hz mejora el desempeño con una ganancia de 0,2. La ganancia proporcional no se ha

alterado, ya que solo incide en la estabilidad general del sistema (altas ganancias proporcionales provocan inestabilidad y bajas ganancias lentitud en la estabilización de las salidas [18]).



**Figura 6.3:** Salida de eficiencia simulación controlador para  $G_p=2$  y  $G_i=0,2$

De lo indicado anteriormente se llega a la conclusión de que es posible implementar un controlador de ganancia tabulada, donde la ganancia integral del controlador PID sea función lineal de la velocidad de giro de la bomba.

Se implementa en un bloque "Lookup table", con respuesta según figura 6.4, una relación lineal entre la velocidad de giro en Hz con el valor de ganancia integral. En función de lo anterior se lo dispone de acuerdo con modelo de figura 6.5.

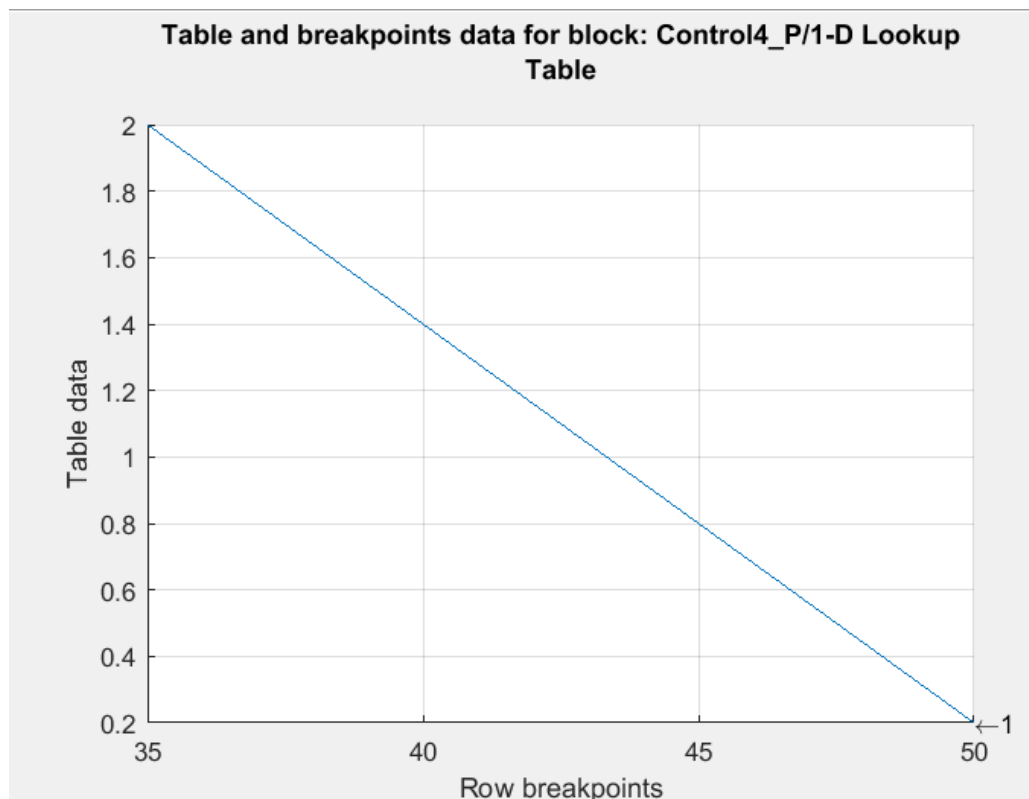
La diferencia con el controlador implementado en el capítulo 5, es que se accede a la entrada de ganancia integral del bloque PID, y este valor es ajustado utilizando como entrada la velocidad de la bomba al bloque "Lookup table" de MatLab®, donde se vincula la velocidad, referida a frecuencia en [Hz], con la ganancia, gracias a la relación encontrada. De esta forma, para bajas velocidades de giro (35 Hz) la ganancia integral es

de 2 procurando una respuesta como el de la figura 6.1 para el intervalo de tiempo entre 0 a 1000 segundos. Luego para velocidades altas (50 Hz) la ganancia integral es de 0.2 dando una respuesta como el de la figura 6.3 para el intervalo de tiempo entre 4000 a 5000 segundos.

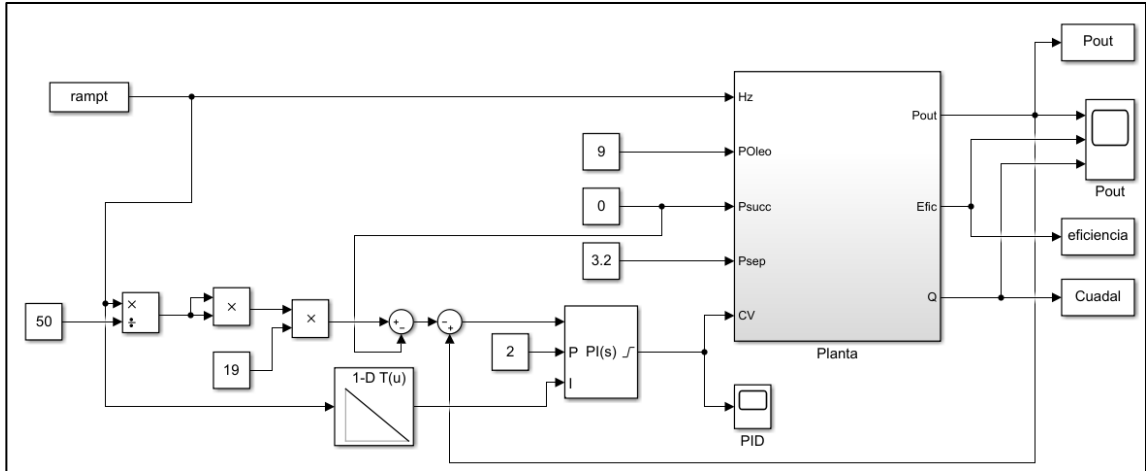
### 6.6 Simulación del controlador de ganancias tabuladas

A través del controlador implementado en figura 6.5, y para una entrada de escalón como el de la figura 5.4, se obtienen las respuestas de más abajo de figura 6.6, siendo las condiciones como las utilizadas en las secciones anteriores.

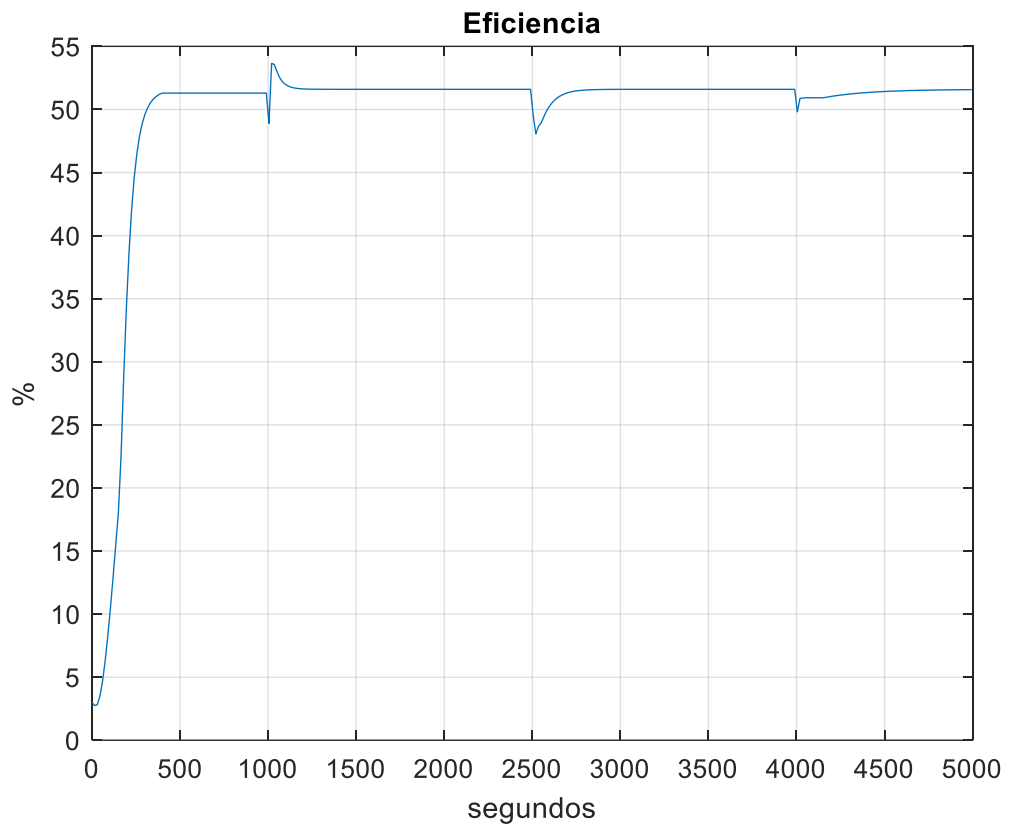
Como se puede ver en la figura 6.6 donde se muestra únicamente la salida de eficiencia, esta llega rápidamente al valor buscado, y luego permanece con un valor adecuado (elevado) a pesar de los saltos abruptos de la velocidad de la bomba.



**Figura 6.4:** Característica Lookup Table propuesta de ganancia integral respecto a velocidad de giro.

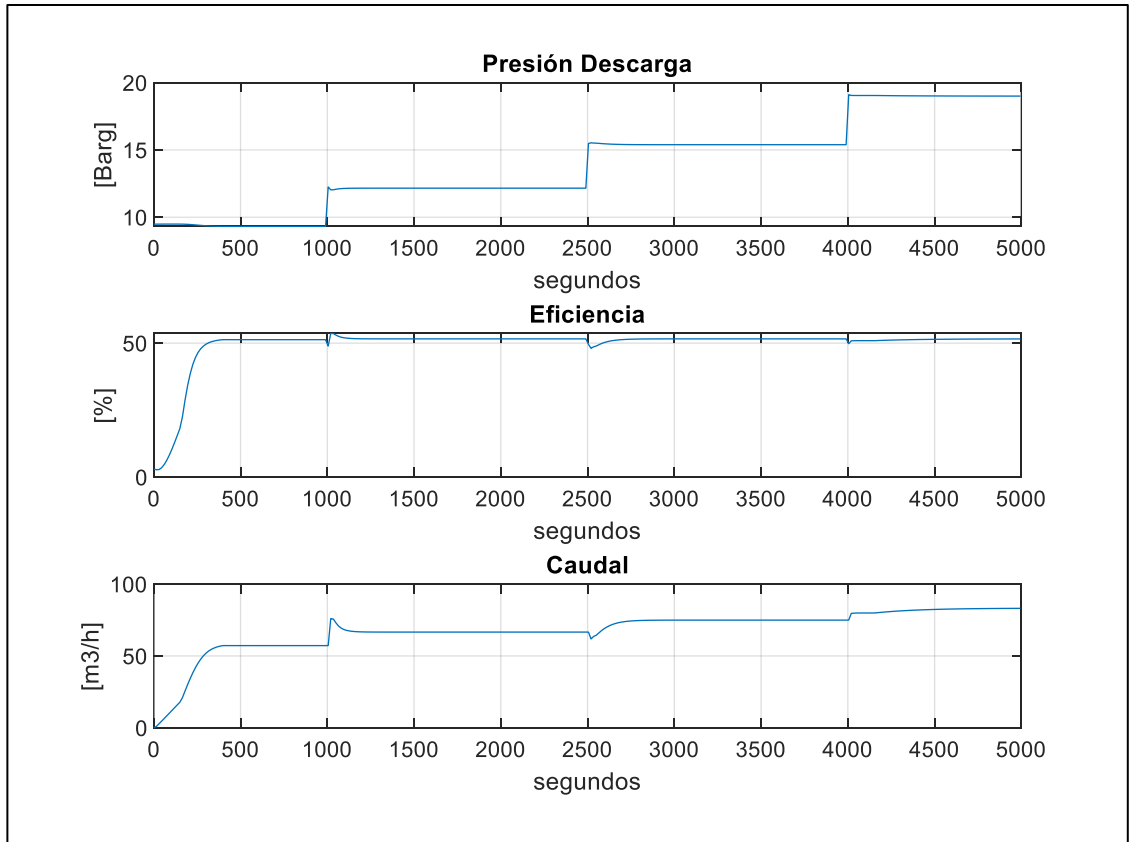


**Figura 6.5:** Controlador de ganancia tabulada



**Figura 6.6:** Respuesta de la salida de eficiencia del controlador de ganancias tabuladas





**Figura 6.7:** Respuesta de las salidas del controlador de ganancias tabuladas

En la figura 6.7, se pueden ver las tres salidas del modelo (Presión de descarga, eficiencia y caudal) de la cual también se aprecia un comportamiento sin oscilaciones (lo cual se puede observar comparando con la respuesta del controlador del capítulo 5, figura 5.6). En particular, la gráfica de caudal presenta en los saltos de velocidad una transición más suave, lo cual es beneficioso a la hora de evitar problemas mecánicos en tuberías y juntas del sistema.

Por otro lado, se obtuvo la estadística de la eficiencia que se observa en la figura 6.8., obtenida con la herramienta “mediciones”, que forma parte de “time scope”. Tal como se realiza con el control evaluado en el capítulo 5 (ver sección 5.5), reservaremos los valores de media (mean), mediana (median) y valor medio cuadrático (RMS) para su comparación en la sección 6.7.

Signal Statistics		
	Value	Time
Max	5.526e+01	1020.000
Min	4.890e+01	1005.000
Peak to Peak	6.367e+00	
Mean	5.159e+01	
Median	5.160e+01	
RMS	5.159e+01	

**Figura 6.8:** Estadística del controlador de ganancia tabulada

### 6.7 Evaluación de controladores

En base a los resultados obtenidos entre los controladores implementados, se realizará una comparación de desempeño entre ambos. Este desempeño es el análisis de la eficiencia de la bomba medida durante el tiempo en que el controlador debe ajustarse ante cambios en el régimen de velocidad de giro. Como el valor de eficiencia no es constante en el tiempo, nos interesará saber si permanece alto (valor esperado de eficiencia), para esto se cuenta para una mejor evaluación con las mediciones de su valor medio, mediana, y eficaz.

- Comportamiento en cuanto a variaciones en la eficiencia:

**Tabla 6.1:** Comparación entre controladores de eficiencia

Indicador	Control actual	Control ganancia tabulada	Diferencia [%]
Medio(mean)	50,193	51,59	+2.70
Mediana (median)	51,596	51,60	0.02
Eficaz (RMS)	50,632	51,59	+1.86

Cabe de esperar que la mediana de la eficiencia es igual para ambos controladores, ya que es el valor “del medio” de la señal. Las fluctuaciones en la eficiencia debido a los cambios de velocidad de la bomba se ven reflejados en las mediciones de media (o promedio) y valor eficaz. Si la eficiencia fuera un valor contante, no habría diferencia entre estos tres indicadores. En esta comparación se observa una leve mejora (del orden

de 1.86%) en el indicador de valor eficaz, lo cual muestra una mejora en la dispersión de los valores de la eficiencia en torno a la media.

Como se describió en la sección 3.3.2, la eficiencia de la bomba es la relación entre la potencia del fluido con respecto a la potencia sobre el eje. Un valor más alto de eficiencia significa que se deberá entregar menor potencia al eje para realizar el mismo trabajo. De esta relación queda excluidas la eficiencia eléctrica del motor y del variador de velocidad (VSD). Se ha utilizado la eficiencia como factor de mérito para el diseño del controlador, sin embargo, también se compara el desempeño de los controladores, según la potencia requerida sobre el eje (potencia al freno), ya que este indicador integrado en el tiempo entrega el consumo energético de la bomba.

La potencia al freno [1], depende tanto de la eficiencia como del caudal y la altura, tal como indica la siguiente ecuación:

$$P_f = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta} \quad (6.1)$$

Donde:

$P_f$  : Potencia al freno (medido en W)

$\rho$ : La densidad del fluido (medido en kg/m<sup>3</sup>)

$g$ : Aceleración de la gravedad (medido en m/s<sup>2</sup>)

$Q$ : Caudal (medido en m<sup>3</sup>/s)

$H$  : Altura total (medido en m)

$\eta$ : Eficiencia de la bomba (sin unidades)

Con las simulaciones realizadas para los dos controladores, se cuenta con los valores de caudal y eficiencia necesarios para determinar en forma instantánea la potencia al freno.

En la ecuación 6.1 requiere el valor de altura,  $H$ , que se relaciona con la presión de descarga de la bomba por medio de la ecuación 3.5. Despejando de esta última la altura y reemplazando en 6.1, resulta:

$$P_f = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot (P_d - P_s)}{\eta \cdot 0.0981 \cdot SG} \cong \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot P_d}{\eta \cdot 0.0981 \cdot SG} \quad (6.2)$$

Donde:

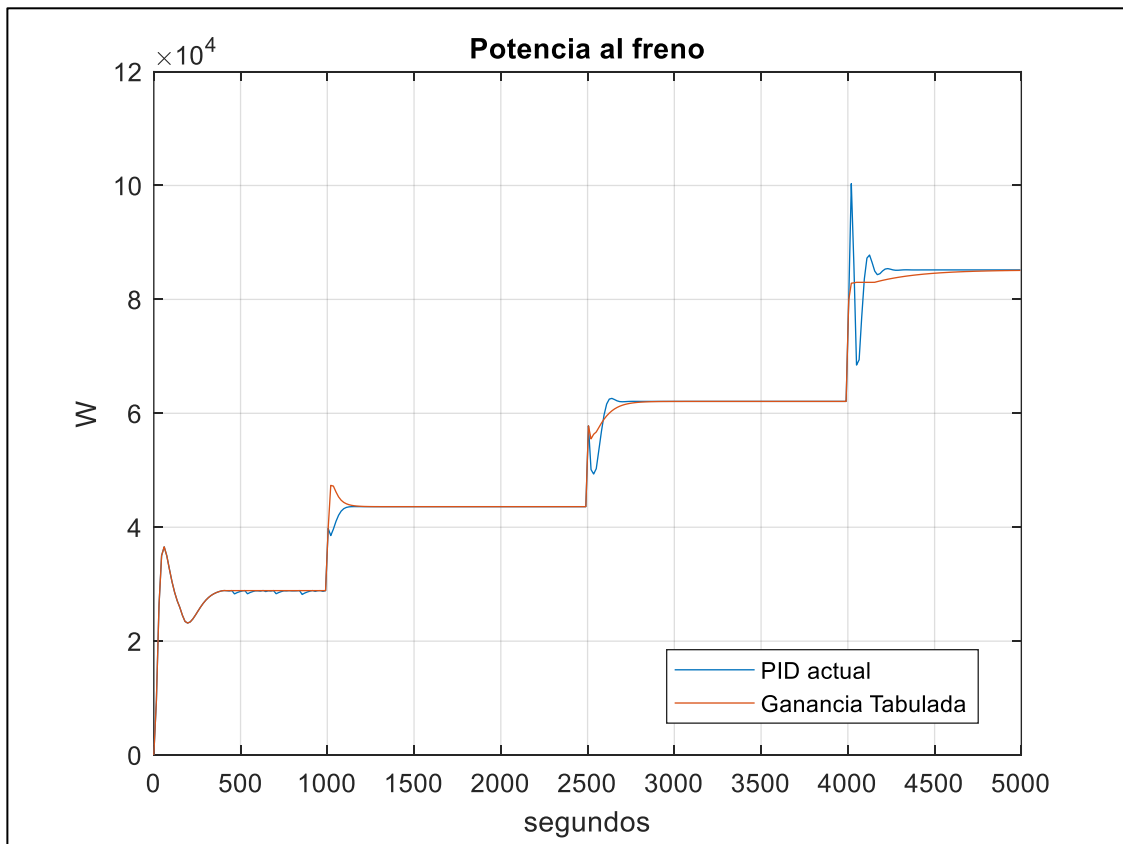
$p_d$  y  $p_s$ : Presiones de descarga y succión respectivamente (medido en bar)

$SG$ : Gravedad específica (sin unidades).

Reemplazando el valor de la aceleración de la gravedad, la densidad utilizada, cambiando las unidades de caudal (de  $m^3/h$  a  $m^3/s$ ) y la eficiencia (de % a valores de 0 a 1), nos queda:

$$P_f = \frac{2777,78 \cdot Q \cdot P_d}{\eta} \quad (6.3)$$

Con el código 6.1 de MatLab se obtiene las potencias al freno para las mismas condiciones de operación planteadas en la sección 6.3. En la figura 6.9 se grafican estas potencias tanto para el control PID presentado en el capítulo 5 como para el encontrado en la sección 6.5.



**Figura 6.9:** Potencia al freno para ambos controladores.

En el código 6.1 también se calcula la energía según estas potencias, encontrándose los siguientes resultados:

**Tabla 6.2:** Comparación entre controladores: Energía sobre el eje.

Indicador	Control actual	Control ganancia tabulada	Diferencia
Energía [kWh] @ 5000segundos	15039	15012	27 (0,18%)

Con estos resultados, podemos ver que el ahorro, con respecto a la potencia al freno, es del 0.18% entre ambos controladores. Si bien este ahorro se obtuvo para una demanda en la entrada planteada en 6.4, se puede extrapolar este ahorro a un año, ya que se supone que la bomba operará modificando su velocidad en el rango planteado por la señal de prueba. De esta forma, el ahorro de energía estimado en un año puede llegar a:

$$Energía [kWh] = 27 * \frac{31.536.000 \frac{s}{año}}{5000} = 170.294 \cong 170 MWh$$

(6.4)

- Complejidad en la implementación del controlador

En general los PLC modernos cuentan con bloques de control PID, donde se permite alterar los valores de ganancia en tiempo real, lo cual no significa una modificación mayor en la implementación del controlador. Con esto, se puede implementar este tipo de control sin mayores complicaciones en el código del PLC. Por lo general, los PLC de última generación, cuentan con bloques de programa similares a los utilizados en la figura 6.5.

## 6.8 Conclusión del Capítulo

Con el diseño de un controlador de ganancia tabulada se pudo observar una mejora de desempeño del sistema, que se evidencia en mantener la eficiencia de la bomba centrífuga en valores óptimos. Aunque en apariencia mínima respecto a la del

controlador implementado, redonda en un ahorro de energía del 0.18%, y mayor tiempo entre mantenimientos, como se destacó en el planteo de esta tesis. Además, el hardware de control utilizado en planta permite la implementación de este controlador.

```
1 % Calculo de la potencia al freno
2 % Se requieren los vectores producidos en Simulink:
3 % Caudal1, eficiencia1, Pout1 del controlador PID capitulo 5
4 % Caudal2, eficiencia2, Pout2 del controlador PID capitulo 6
5 % tout es un vector con los tiempos para cada muestra en segundos
6 % Se consideran densidad 900kg/m3
7 % gravedad 9.81m/s2
8 % Potencia al freno en W
9 - POT1=2777.78*Caudal1.data.*Pout1.data./eficiencia1.data;
10 - POT2=2777.78*Caudal2.data.*Pout2.data./eficiencia2.data;
11 % Energía en kWh
12 - Ener1=sum(POT1.*tout)/3600/1000;
13 - Ener2=sum(POT2.*tout)/3600/1000;
14 % Graficas
15 - figure(1)
16 - plot (tout,POT1,tout,POT2)
17 - title('Potencia al freno');
18 - xlabel('segundos');
19 - ylabel('W');
20 - legend('PID actual','Ganancia Tabulada');
21 - grid on;
```

**Código 6.1:** capitulo6.m, cálculo de potencia y energía al freno.

Resta como trabajo futuro implementar y evaluar en campo lo desarrollado, donde en conjunto con la empresa operadora de las instalaciones se deberá analizar si esta mejora es suficiente para proponer cambios en la programación del controlador del sistema.

# CAPÍTULO 7

## CONCLUSIONES

### 7.1 Conclusiones Generales

Las Bombas centrífugas son ampliamente usadas para la impulsión de la producción petrolera en las instalaciones de superficie, comúnmente denominadas “baterías petroleras”. Estas bombas requieren de una especial atención en cuanto a su control, en principal respecto a su velocidad de giro como de su presión de descarga, ya que influyen notoriamente en la eficiencia energética de esta. Mantener esta eficiencia en valores óptimos según hoja de datos del fabricante, implica no solo minimizar el consumo energético con el consiguiente ahorro, sino también lograr lo propio con los costos de mantenimiento.

Mejorar el desempeño del control de presión en la descarga de la bomba es un camino de asegurar una alta eficiencia, sin embargo, ello no se puede lograr en forma directa o sencilla en campo. Para ello se debe recurrir a un modelo que estime su eficiencia y por consiguiente se ha planteado y elaborado en este trabajo.

En base a lo anterior, utilizando información provista por los fabricantes de equipos (bomba centrífuga, válvulas de control) se desarrolla un modelo de planta para la simulación del sistema de control. Este modelo es validado empleando datos de la planta real registrados en a través de su SCADA.

Utilizando el modelo anterior, se simula el controlador empleado actualmente y se desarrolla luego, como alternativa de mejora, un control de ganancia tabulada. Se compara por último el desempeño de ambos controles, observando según resultados un incremento de la eficiencia con el uso de la nueva propuesta, que se traduce en un ahorro energético y menor mantenimiento.

## **7.2 Recomendaciones**

La elaboración de modelos de planta debe analizar y contemplar su posible naturaleza alineal, y las saturaciones presentes en los elementos finales de control. La decisión de aplicar técnicas de linealización debe estar sujeta al conocimiento de la operación real de la planta.

El modelo desarrollado, aunque busca una adopción generalizada en su uso, puede en esta instancia asegurar beneficios de la bomba y la planta estudiada según especificaciones reales de campo. La utilización de este en otras instalaciones similares debería contemplar realizar nuevos cálculos, verificaciones y ajustes, empleando para ello nuevas especificaciones del fabricante e ingeniería acordes al caso.

## **7.3 Trabajo Futuro**

Queda como trabajo pendiente la implementación del controlador propuesto, desarrollado en el capítulo 6, en la instalación real, y luego monitorear a través del sistema de adquisición de datos el consumo energético, para su posterior comparación con la situación primitiva. Para ello los controladores VSD cuentan con indicación de potencia la cual puede ser recopilada por el sistema SCADA.

Cabe aclarar que, por condiciones operativas, al momento no es posible actuar sobre el sistema de control de la planta petrolera. Dada su envergadura, protocolos técnicos y de seguridad, requieren de un previo y profundo estudio de la propuesta de mejora elaborada en este trabajo, que con el suficiente tiempo el grupo de ingeniería de planta analizará y evaluará la conveniencia de su prueba y posible adopción.



# ANEXO A

Curvas características de la bomba marca FlowServe modelo 3HPX17A de cuyo manual se extraen las siguientes curvas características:

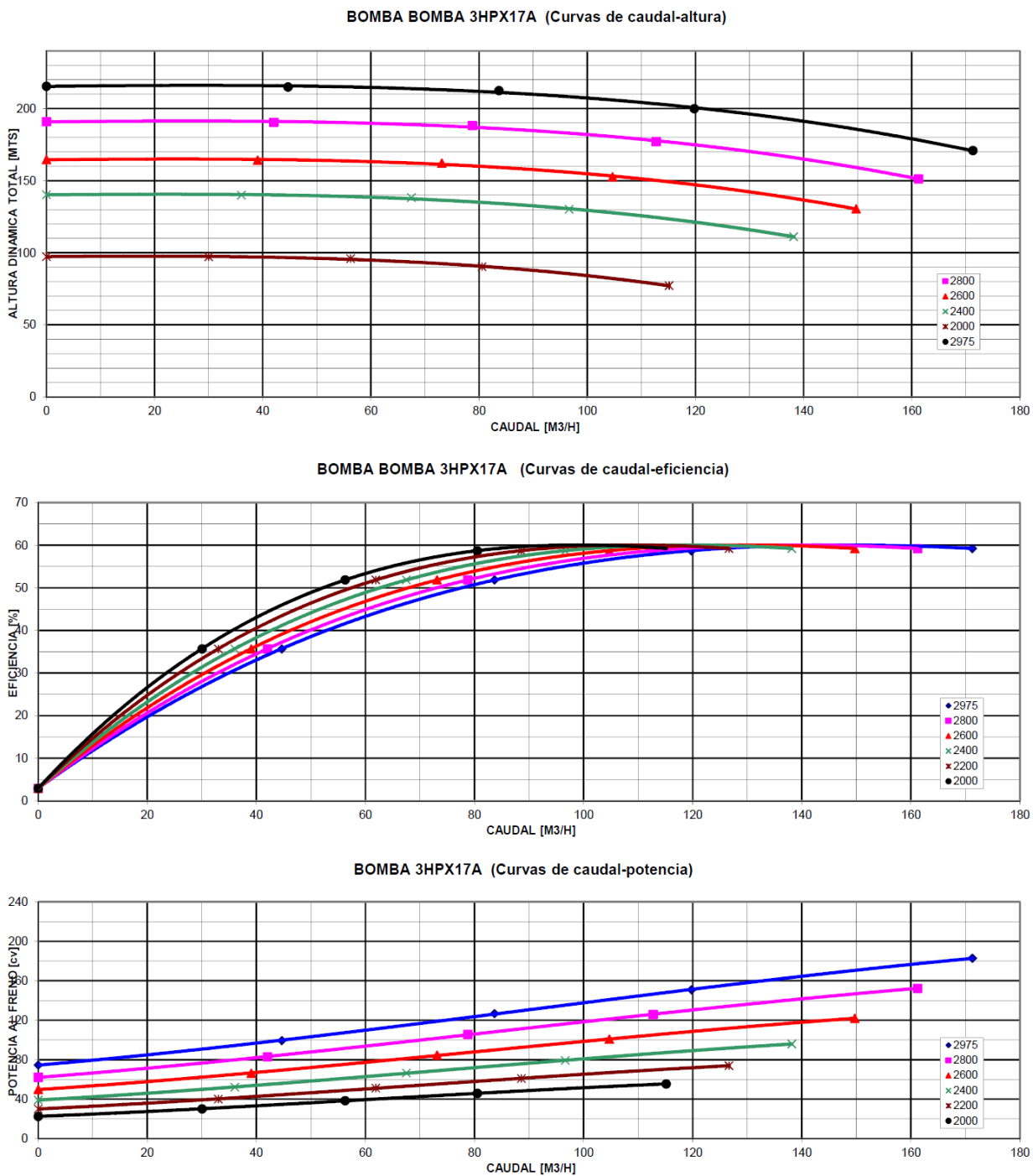


Figura A.1: Curvas características de la bomba 3HPX17A

Estas curvas son graficadas en base a la siguiente información tabulada:

<b>DATOS DEL ENSAYO BOMBA 3HPX17A NS 12AB0738</b>				
<b>rpm</b>	<b>CAUDAL[m3/h]</b>	<b>ALTURA[mts]</b>	<b>EFICIENCIA[%]</b>	<b>POTENCIA AL FRENO[cv]</b>
<b>2975</b>	<b>171.28</b>	<b>170.88</b>	<b>59.26</b>	<b>182.92</b>
<b>2975</b>	<b>119.77</b>	<b>199.98</b>	<b>58.72</b>	<b>151.08</b>
<b>2975</b>	<b>83.66</b>	<b>212.45</b>	<b>51.90</b>	<b>126.84</b>
<b>2975</b>	<b>44.66</b>	<b>215.07</b>	<b>35.71</b>	<b>99.62</b>
<b>2975</b>	<b>0.00</b>	<b>215.58</b>	<b>3.00</b>	<b>74.67</b>
<b>DATOS PROCESADOS A DIFERENTES RPM</b>				
<b>2975</b>	171.28	170.88	59.26	182.92
2975	119.77	199.98	58.72	151.08
2975	83.66	212.45	51.90	126.84
2975	44.66	215.07	35.71	99.62
2975	0.00	215.58	3.00	74.67
<b>2800</b>	161.20	151.37	59.26	152.50
2800	112.72	177.14	58.72	125.96
2800	78.74	188.19	51.90	105.75
2800	42.03	190.51	35.71	83.05
2800	0.00	190.96	3.00	62.25
<b>2600</b>	149.69	130.52	59.26	122.10
2600	104.67	152.74	58.72	100.85
2600	73.11	162.27	51.90	84.67
2600	39.03	164.27	35.71	66.50
2600	0.00	164.66	3.00	49.84
<b>2400</b>	138.18	111.21	59.26	96.04
2400	96.62	130.15	58.72	79.32
2400	67.49	138.26	51.90	66.59
2400	36.03	139.97	35.71	52.30
2400	0.00	140.30	3.00	39.20
<b>2200</b>	126.66	93.45	59.26	73.97
2200	88.57	109.36	58.72	61.10
2200	61.87	116.18	51.90	51.29
2200	33.03	117.61	35.71	40.29
2200	0.00	117.89	3.00	30.20
			<b>0.00</b>	
<b>2000</b>	115.15	77.23	59.26	55.58
2000	80.52	90.38	58.72	45.90
2000	56.24	96.02	51.90	38.54
2000	30.02	97.20	35.71	30.27
2000	0.00	97.43	3.00	22.69

**Tabla A.1:** Datos de ensayo bomba centrífuga 3HPX17A

# ANEXO B

## HOJAS DE ESPECIFICACIÓN VÁLVULAS DE CONTROL

### VÁLVULA DE CONTROL - ESPECIFICACIÓN TÉCNICA

PROYECTO: <b>Proyecto Integral Aguada Toledo / Sierra Barrosa</b>		PAGINA: <b>3 DE 10</b>	
UNIDAD: <b>BATERIA AGUADA TOLEDO</b>		SPECIF.: <b></b>	
O.C.: <b></b>		TAG: <b>PV-070A</b>	
ITEMS: <b></b>		DIBUJO: <b></b>	
CONTRATO: <b></b>		SERVICIO: <b>Alivio de Presión de descarga de bomba BP-070</b>	
MARCA & MODELO: <b></b>			

CONDICIONES DE SERVICIO	1	FLUIDO: <b>PETROLEO</b>		PRESIÓN CRÍTICA (PC):			
	2	Caudal	Unidades	Caudal Máximo	Caudal Normal	Caudal Mínimo	Shut-Off
	3		m <sup>3</sup> /día	-	<b>60</b>	-	---
	4	Presión de entrada	kg/cm <sup>2</sup> (g)	-	<b>20</b>	-	---
	5	Presión de salida	kg/cm <sup>2</sup> (g)	-	<b>4</b>	-	---
	6	Temperatura de entrada	°C	-	<b>25</b>	-	---
	7	Peso Esp. / Grav. Esp. / Peso mol.		-	-	-	---
	8	Viscosidad / Rel. Calores esp.		-	-	-	---
	9	Presión de Vapor (Pv)	kg/cm <sup>2</sup> (a)	-	<b>0.031</b>	-	---
	10	Cv Requerido		-	<b>16.559</b>	-	---
	11	Carrera	%	-	<b>80</b>	-	---
	12	SPL Admitido / Previsto	dBA		<b>69.9</b>		---
13	Temperatura ambiente	°C	Mínima: <b>-10</b>	Máxima: <b>45</b>			

LINEA	13	Tamaño y Serie de la cañería	Entrada: <b>4" #300</b>	53	Tipo : <b>DIAFRAGMA Y RESORTE</b>	
	14		Salida: <b>4" #300</b>	54	Marca & Modelo : <b>TIPO 657</b>	
	15	Aislamiento de la cañería:	<b>NO</b>	55	Tamaño : <b>70</b>	Area efectiva:
	16	Tipo :	<b>GLOBO</b>	56	On / Off : <b>--</b>	Modulante <b>SI</b>
	17	Tamaño :	<b>2"</b>	57	Acción del resorte Abre / Cierra: <b>ABRE</b>	
	18		Serie ANSI: <b>#300</b>	58	Presión Máxima Admitida :	
	19	Máxima Presión / Temp.:	<b>49 Kg/cm2 / 38 °C</b>	59	Presión Mínima Requerida :	
	20	Marca & Modelo :	<b>GLOBO</b>	60	Presión de alimentación disponible:	
	21	Material cuerpo / bonete:	<b>ASTAM A-216</b>	61	Max.:	Min.:
	22	Material revest. / Φ int.:	<b>N/A</b>	62	Rango calibración banco: <b>3-9 PSIG</b>	
	23	Conexiones	Entrada: <b>2"</b>	63	Orientación del actuador: <b>VERTICAL</b>	
	24		Salida: <b>2"</b>	64	Tipo de volante manual: <b>N/A</b>	
25	Terminación cara brida:	<b>RF</b>	65	Falla de aire válvula: <b>ABRE</b>	Seteo:	
26	Extensiones / Material:	<b>N/A</b>	66	Gas/Aire de Instrumentos: <b>GAS INSTRUMENTOS</b>		
27	Dirección flujo:	<b>DOWN</b>	67	Señal de entrada: <b>4 - 20 mA</b>		
28	Tipo de bonete :	<b>Estándar</b>	68	Tipo : <b>ELECTROPOSICIONADOR</b>		
29	Lub. & Válvula aisl.:	<b>No</b>	69	Marca & Modelo: <b>A DEFINIR</b>		
30	Material empaquetadura:	<b>PTFE</b>	70	Con incr.de la señal la salida Inc / Dec : <b>INCR.</b>		
31	Tipo de empaquetadura:	<b>V-RING</b>	71	Manómetros: <b>SI</b>	By-Pass: <b>NO</b>	
32			72	Leva Caracteristic :		
33	Tipo :	<b>CAVIII 2STG</b>	73			
34	Tamaño :	<b>1 7/8"</b>	74	Tipo:	Cantidad:	
35	Característica :	<b>CAVIII 2/LIN</b>	75	Marca & Modelo :		
36	Balaceada / Desbalanceada :	<b>BALANCEADA</b>	76	Contactos / Rating:		
37	Rated	<b>21</b>	77	Puntos actuantes:		
38	Cv:	<b>FL 0.98</b>	78			
39	XT:	<b>0.676</b>	79	Marca & Modelo :	<b>FR67</b>	
40	TRIM N°	OBTURADOR	80	Presión de seteo :	<b>40 PSIG</b>	
41	1	Tipo 13 Cr 4) - 38 Cr	81	Filtro:	<b>SI</b>	
42	4	Tipo 316	82	Manómetro:	<b>SI</b>	
43	29	Tipo 316	83	Presión hidros.:	<b>SI</b>	
44		Tipo 316 - ENP 7)	84	Clase de pérdida ANSI/FCI:	<b>V</b>	
45		Tipo 316 / Hard Facing 5)	85			
46	37.1	17-4 PH - 40 Rc	86			
47		Cast CrCo - A 6				
48	101	Tipo 13 Cr - 40Rc				
49		Tipo 13 Cr 4) - 38Rc				
50						
51						
52						

38	Combinaciones especiales. -	Material Obturador: <b>AISI 316 C/STELITE 6</b>
39	Asientos Blandos	Material Jaula / Guía : <b>17-4 PH</b>
40	Material vástago :	<b>AISI 316</b>
41		
42	NEC Class:	Grupo: Div.:
43		
44		
45		
46		
47		
48		
49		
50		
51		
52		

53	Rev.	Fecha	Revisión	Orig	Aprobó
54	<b>DA</b>	<b>20/12/12</b>	<b>PARA APROBACION</b>	<b>C.R.C.</b>	<b>CIS</b>
55					
56					
57					
58					
59					
60					
61					
62					
63					
64					
65					
66					
67					
68					
69					
70					
71					
72					
73					
74					
75					
76					
77					
78					
79					
80					
81					
82					
83					
84					
85					
86					

**NOTA:**  
1 -

VÁLVULA DE CONTROL - ESPECIFICACIÓN TÉCNICA

PROYECTO: <b>Proyecto Integral Aguada Toledo / Sierra Barrosa</b>		PAGINA: 4 DE 10	
UNIDAD: <b>BATERIA AGUADA TOLEDO</b>		SPECIF.: <b>PV-070B</b>	
O.C.:		TAG: <b>PV-070B</b>	
ITEMS:		DIBUJO:	
CONTRATO:		SERVICIO: <b>Control de Presión de descarga de bomba BP-070</b>	
MARCA & MODELO:			

CONDICIONES DE SERVICIO	FLUIDO: <b>PETROLEO</b>	PRESIÓN CRÍTICA (PC):				
	Caudal	Unidades	Caudal Máximo	Caudal Normal	Caudal Mínimo	Shut-Off
		m <sup>3</sup> /día	-	<b>120</b>	-	---
	Presión de entrada	kg/cm <sup>2</sup> (g)	-	<b>20</b>	-	---
	Presión de salida	kg/cm <sup>2</sup> (g)	-	<b>4</b>	-	---
	Temperatura de entrada	°C	-	<b>25</b>	-	---
	Peso Esp./ Grav. Esp./ Peso mol.		-	-	-	---
	Viscosidad / Rel. Calores esp.		-	-	-	---
	Presión de Vapor (Pv)	kg/cm <sup>2</sup> (a)	-	<b>0.031</b>	-	---
	Cv Requerido		-	<b>34.882</b>	-	---
	Carrera	%	-	<b>49</b>	-	---
	SPL Admitido / Previsto	dBA		<b>75.7</b>		---
Temperatura ambiente	°C	Minima: <b>-10</b>	Máxima: <b>45</b>			

LINEA	Tamaño y Serie de la cañería	Entrada: <b>6" #300</b>	53	Tipo : <b>DIAFRAGMA Y RESORTE</b>	
	Salida: <b>6" #300</b>		54	Marca & Modelo : <b>TIPO 657</b>	
CUERPO Y BONETE	Aislamiento de la cañería	<b>NO</b>	55	Tamaño : <b>70</b> Area efectiva:	
	Tipo : <b>GLOBO</b>		56	On / Off -- Modulante <b>SI</b>	
	Tamaño : <b>4"</b> Serie ANSI: <b>#300</b>		57	Acción del resorte Abre / Cierra: <b>ABRE</b>	
	Máxima Presión / Temp.: <b>49 Kg/cm2 / 38 °C</b>		58	Presión Máxima Admitida :	
	Marca & Modelo : <b>GLOBO</b>		59	Presión Mínima Requerida :	
	Material cuerpo / bonete: <b>ASTAM A-216</b>		60	Presión de alimentación disponible:	
	Material revest./ Φ int.: <b>N/A</b>		61	Max.: Min.:	
	Conexiones	Entrada: <b>4"</b>	62	Rango calibración banco: <b>3-9 PSIG</b>	
	Salida: <b>4"</b>		63	Orientación del actuador: <b>VERTICAL</b>	
	Terminación cara brida: <b>RF</b>		64	Tipo de volante manual: <b>N/A</b>	
ACTUADOR	Extensiones / Material: <b>N/A</b>		65	Falla de aire válvula: <b>ABRE</b> Seteo:	
	Dirección flujo: <b>DOWN</b>		66	Gas/Aire de Instrumentos: <b>GAS INSTRUMENTOS</b>	
	Tipo de bonete : <b>Estándar</b>		67	Señal de entrada: <b>4 - 20 mA</b>	
	Lub. & Válvula aisl.: <b>No</b> Lub.: <b>No</b>		68	Tipo : <b>ELECTROPOSICIONADOR</b>	
	Material empaquetadura: <b>PTFE</b>		69	Marca & Modelo: <b>A DEFINIR</b>	
	Tipo de empaquetadura*: <b>V-RING</b>		70	Con incr.de la señal la salida Inc / Dec : <b>INCR.</b>	
			71	Manómetros: <b>SI</b> By-Pass: <b>NO</b>	
			72	Leva Caracteristic :	
			73	Tipo: Cantidad:	
			74	Marca & Modelo :	
INTERIOS (TRIM)	Tipo : <b>CAVIII 2STG</b>		75	Contactos / Rating:	
	Tamaño : <b>2 7/8"</b> Carrera asignada: <b>4"</b>		76	Puntos actuantes:	
	Característica : <b>CAVIII 2/LIN</b>		77		
	Balanceda / Desbalanceda : <b>BALANCEADA</b>		78	Marca & Modelo : <b>FR67</b>	
	Rated Cv: <b>69</b> FL. <b>0.98</b> XT: <b>0.716</b>		79	Presión de seteo : <b>40 PSIG</b>	
	TRIM N°	OBTURADOR	JAULA	ASIENTO	SELECC
	1	Tipo 13 Cr 4) - 38 Cr	17-4 PH - 40 Rc	Tipo 13 Cr 4) - 38 C	
	4	Tipo 316	17-4 PH - 40 Rc	Tipo 316	
	29	Tipo 316	Tipo 316 - ENP 7)	Tipo 316	
	37	Tipo 316 / Hard Facing 5)	17-4 PH - 40 Rc	Tipo 316 / Hard Facing 5)	
37.1			Cast CrCo - A 6		
101	Tipo 13 Cr 4) - 38Rc	Tipo 13 Cr - 40Rc	Tipo 13 Cr 4) - 38Rc		
ESPECIALES / ACCESORIOS			81	Filtro: <b>SI</b> Manómetro: <b>SI</b>	
			82		
			83	Presión hidros.: <b>SI</b>	
			84	Clase de pérdida ANSI/FCI: <b>V</b>	
			85		
			86		
				Rev. Fecha Revisión Orig Aprobó	
				<b>DA 20/12/12 PARA APROBACION C.R.C. CIS</b>	
38	Combinaciones especiales. -	Material Obturador: <b>AISI 416</b>			
39	Asientos Blandos	Material Jaula / Guía : <b>17-4 PH</b>			
40		Material Asiento: <b>AISI 416</b>			
41	Material vástago :	<b>AISI 316</b>			
42					
43	NEC Class:	Grupo:	Div.:		
44					
45					
46					
47					
48					
49					
50					
51					
52					

NOTA:  
1 -

## **Referencias**

- [1] Raymond Mulley, "Flow of Industrial Fluids – Theory and Equations". CRC Press, 2004. ISBN: 0-84932-767-9.
- [2] Ken Arnold, Maurice Stewart, "Surface Production Operations, Design of Oil Handling Systems and Facilities", Ed. Elsevier, Third Edition 2008. ISBN: 978-0-7506-7853-7.
- [3] Lennart Ljung, Torkel Glad, "Modeling of Dynamic System", Ed. PTR. Prentice Hall, First Edition 1994. ISBN: 0-13-597097-0.
- [4] Landau I.D., Lozano R. M'Saad M., Karimi A. "Adaptive Control, Algorithms, Analysis and Applications". Springer-Verlag London, 2011. ISBN: 978-1-4471-2663-8.
- [5] Astrom K.J., Bjorn W. "Adaptive Control". Dover Publications INC, Second Edition 1995, 2008. ISBN: 978-0-486-46278-3
- [6] Salih H.R., Abdulrazzaq A.A., Guzum B.D. "Dynamic Modeling of Pump Drive System utilizing Simulink/MatLab Program". IRJET Volume: 3 Issue: 1, jan-2016. ISSN:2395-0072.
- [7] Garcia J.J., Bermudez R., Barbosa J. "Modelado y simulación de una bomba centrífuga con motor monofásico en Simulink". Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, Vol 2, Num. 22, 2013. ISSN: 1692-7257
- [8] Shojaeefard M.H., Salimian Rizi B., Khalkhali A., Tahani M. "A new method to calculate centrifugal pump performance parameters for industrial oils". Journal of Applied fluids mechanics, Vol.: 8, No.: 4, 2014. ISSN: 1735-3572.
- [9] Attivissimo F., Di Febo M., Paganini P., di Mango G. "Model based control and diagnostic system for centrifugal pumps". IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring System Proceedings 2014. ISBN: 978-1-4799-49888-5
- [10] Gevorkov L., Vodovozov V., Lehtla T., Raud Z. "Hardware-in-the-Loop Simulator of a Flow Control System for Centrifugal Pumps". IEEE 10<sup>th</sup> International Conference on

Compatibility, Power Electronics and Power Engineering 2016. ISBN: 978-1-4676-7293-0.

[11] Caba S., Lepper M., Liu S. “Nonlinear Controller and Observer Design for Centrifugal Pumps”. IEEE Conference on Control Applications (CCA) 2016. ISBN: 978-1-5090-0755-4.

[12] Gevorkov L., Vodovozov V., Raud Z. “Simulation Study of the Pressure Control System for a Centrifugal Pump”. IEEE 57<sup>th</sup> International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University 2016. ISBN: 978-1-5090-3731-5.

[13] Wang Xv, Di Wei, Cheng Lei “Control for the Centrifugal Pump in the Simulation Platform of Power Plants”. IEEE International Conference on Industrial Informatics – Computing Technology, Intelligent Technology, Industrial Information Integration 2016. ISBN: 978-1-5090-3575-5.

[14] Emerson, “Control Valve Handbook”, Fisher Controls International LLC. 2017. <https://www.emerson.com/documents/automation/control-valve-handbook-en-3661206.pdf>

[15] Mackay, Ross “Practical Pumping Handbook”. Elsevier, 2011. ISBN 978-1-85617-410-7.

[16] Smith Peter; Zappe, R.W. “Valve Selection Handbook – Engineering Fundamentals for Selecting the Right Valve Design for Every Industrial Flow Application (5<sup>th</sup> Edition)”. Elsevier, 2006. ISBN 978-0-7506-7717-2.

[17] Havard, Devold “Oil and gas production handbook – An introduction to oil and gas production, transport, refining and petrochemical industry”. ABB, 2013. ISBN 978-82-997886-3-2

[18] Ellis, George. “Control System Design Guide. Using Your computer to understand and diagnose feedback controllers”. Elsevier. Fourth Edition, 2012. ISBN: 978-0-12-385920-4

[19] Hugues Garnier; Liuping Wang. “Identification of Continuous-time Models from Sampled Data”. Springer, 2008. ISBN 978-1-84800-160-2

[20] Shahrokhi M.; Zomorodi A. "Comparison of PID Controller Tuning Methods".  
Computer Science, 2012.  
[http://www.ie.tec.ac.cr/einteriano/analisis/clase/Zomorodi\\_Shahrokhi\\_PID\\_Tunning\\_Comparison.pdf](http://www.ie.tec.ac.cr/einteriano/analisis/clase/Zomorodi_Shahrokhi_PID_Tunning_Comparison.pdf)

[21] Bianchi, F., Battista H. & Mantz, R. (2007). *Wind Turbine Control Systems*. London: Springer-Verlag London Limited.