

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería en Electrónica



Diseño e implementación de un sistema hidráulico de presión constante.

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en
Electrónica con el grado académico de Licenciatura**

Diego Vargas Montero

Cartago, marzo del 2009

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
PROYECTO DE GRADUACIÓN
TRIBUNAL EVALUADOR

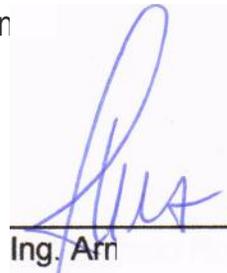
Proyecto de graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal



/Ing. Gabriela Ortiz León.

Profesora lectora



Ing. Arnulfo Coto.

Profesor asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica

Cartago, marzo del 2009

Declaración de autenticidad

Declaro que el presente proyecto de graduación fue realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

Asimismo, manifiesto que del material bibliográfico utilizado, indiqué las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el presente trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago, marzo del 2009



Diego Vargas Montero.

Céd: 1-1203-0577

Resumen

Automatización Avanzada S.A. fue contratada para implementar el control automático del sistema hidráulico que permitiera mantener la presión de la red de tuberías del Hotel Meliá Conchal en forma constante, con el fin de regular el flujo de agua en todos sus grifos.

El sistema hidráulico está compuesto principalmente de un mecanismo de bombeo desde un tanque de captación hasta las instalaciones del hotel.

El sistema de control automático fue implementado mediante un controlador lógico programable, en el cual se utilizó un controlador PD (Proporcional-Derivativo), capaz de regular la velocidad de las bombas y así obtener la presión establecida.

El propósito de este informe es describir el proceso de diseño para la implementación del sistema de control automático descrito, con detalle de los conceptos matemáticos en los que se fundamentó el diseño.

Algunos términos técnicos utilizados en este estudio son: Variador de frecuencia, controlador PD, lugar geométrico de las raíces, bomba centrífuga, PLC, HMI, SCADA y modelo matemático.

Summary

Automatización avanzada S.A. was hired to implement the automatic control of the hydraulic system that would allow keeping the pressure in all the pipeline of the hotel Meliá Conchal in a constant way, in order to regulate the water flow in all its faucets.

This hydraulic system is basically made up of a pump mechanism that goes from a captation tank to the hotel facilities.

The automatic control system was implemented through a logic programmable controller, in which a PD controller was used, capable to regulate the speed of the pumps in order to obtain pressure already set.

An automatic control stage was set up to regulate the water pump mechanism. This regulation allows a constant pressure on the hotel's piping, resulting in a constant liquid flow. That stage was installed through a programmable logical controller; which used a PD Controller (Proportional-Derivative) required to regulate the pumps speed; thus, to obtain the pressure already established.

This report aims to describe the design process for the installation of the automatic control system, emphasizing the mathematical concepts in which the design was based.

Key words: Adjustable Frequency Drive, PD Controller, centrifugal pump, PLC, HMI, SCADA, Mathematical Model.

ÍNDICE GENERAL

Capítulo I: Introducción	11
1.1 Entorno del proyecto y definición del problema existente.....	11
1.2 Enfoque de la Solución	12
Capítulo II: Meta y objetivos	13
2.1 Meta.....	13
2.2 Objetivo general.....	13
2.3 Objetivos específicos	13
Capítulo III: Marco teórico	14
3.1 Descripción del sistema a controlar.....	14
3.2 Antecedentes bibliográficos	15
3.2.1 Control de velocidad de los motores trifásicos de inducción.....	15
3.2.2 Diseño de controladores	18
3.3 Descripción de los principales conceptos matemáticos y electrónicos relacionados con la solución del problema	23
3.3.1 Especificaciones en el dominio del tiempo para una señal escalón. .	23
3.3.2 Relación entre la función de transferencia y las especificaciones en el dominio del tiempo para un sistema prototipo de segundo orden.....	25
3.3.3 Técnica del lugar geométrico de las raíces.....	31
Capítulo IV: Procedimiento metodológico.....	33
4.1 Reconocimiento y definición del problema	33
4.2 Obtención y análisis de información	33
4.3 Síntesis e implementación de la solución	34
4.4 Reevaluación y alternativas de solución.....	36
Capítulo V: Descripción detallada del planteamiento de la solución	37
5.1 Requerimientos y descripción del sistema de control automático.....	37
5.2 Descripción del hardware.....	39
5.2.1 Sistema mecánico e hidráulico	39
5.2.2 Sistema de control.....	39
5.3 Descripción del software	46
5.3.1 Programación del controlador lógico programable.....	46
5.3.2 Programación del panel de operador.....	53
Capítulo VI: Análisis de resultados	56
6.1 Resultados	56

6.1.1 Pantallas Panel de Operador.	56
6.1.2 Modelado de la planta.	58
6.1.3 Diseño del controlador	64
6.2 Análisis.	71
Capítulo VII: Conclusiones y recomendaciones	73
7.1 Conclusiones	73
7.2 Recomendaciones	74
Bibliografía	75
Apéndices	77
A.1 Glosario, abreviaturas y simbología	77
A.2 Información sobre la empresa/institución	80
A.2.1 Descripción de la empresa	80
A.2.2 Descripción del departamento o sección en la que se realizó el proyecto	81
A.3 Fotografías del gabinete de control.	82
A.4 Configuración del PLC y el Panel de operador.	84
Anexos	86
B1. Dimensiones de la bomba centrífuga utilizada	86
B2. Micrologix 1100 y Módulo mixto de I/O analógicas.	87
B3. Relé de control de nivel RM4-LG01	89
B4. Conexión típica del monitor de fase RM4-TA01	89
B5. PanelView 300 Micro	90
B6. Variador de frecuencia PowerFlex400	91
B7. Respuesta de la planta a una señal escalón en lb/p ²	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.	Diagrama de bloques de la solución realizada.	12
Figura 3.1.	Diagrama general del sistema por controlar.....	15
Figura 3.2.	Curva de operación típica de un motor de inducción.....	16
Figura 3.3.	Diagrama de bloques del controlador PD [6].....	20
Figura 3.4.	Respuestas en el tiempo del efecto del control derivativo. (a) Respuesta al escalón unitario. (b) Señal de error. (c) Tasa de tiempo de cambio de la señal de error. [6]	21
Figura 3.5.	Respuesta típica de un sistema de control ante una entrada escalón unitario. [6]....	24
Figura 3.6.	Sistema de control prototipo de segundo orden. [6].....	25
Figura 3.7.	Relación entre la localización de las raíces de la ecuación característica y ω_n, ξ, α y ω [6].....	27
Figura 3.8.	Tiempo de levantamiento normalizado contra ξ para el sistema prototipo de segundo orden [6].....	29
Figura 3.9.	Tiempo de asentamiento normalizado contra ξ para el sistema prototipo de segundo orden. [6].....	30
Figura 5.1.	Diagrama de bloques del sistema de control.....	40
Figura 5.2.	Sensor de presión Nautilus XMLF-010D2026. [12]	43
Figura 5.3.	Entorno de programación RSLogix500.....	47
Figura 5.4.	Diagrama de flujo del control de encendido/apagado de cada bomba.....	48
Figura 5.5.	Diagrama de flujo del control de velocidad de la bomba 1.....	50
Figura 5.6.	Diagrama de flujo del control automático de la bomba 2.....	52
Figura 5.7.	Entorno de programación del PanelBuilder32.....	53
Figura 5.8.	Diagrama de bloques de pantallas desarrolladas.....	54
Figura 6.1.	Pantalla principal.....	56
Figura 6.2.	Pantalla Control Automático.....	57
Figura 6.3.	Pantalla control manual.....	57
Figura 6.4.	Pantalla Monitoreo.....	58
Figura 6.5.	Pantalla configuración.....	58
Figura 6.6.	Respuesta de la planta a una señal escalón.....	59
Figura 6.7.	Simulación de la respuesta del modelo matemático a una señal escalón.....	63
Figura 6.8.	Lugar geométrico de las raíces.....	64
Figura 6.9.	Región donde se cumplen las nuevas especificaciones.....	66
Figura 6.10.	Lugar geométrico de la raíces del sistema compensado.....	67
Figura 6.11	Simulación de la respuesta a una señal escalón del sistema compensado.....	68
Figura 6.12	Respuesta a una señal escalón del sistema compensado (Normalizado).....	70
Figura A3.1.	Gabinete con equipos de control.....	82
Figura A3.2.	Gabinete de control. Vista frontal.....	83

Figura A4.1.	Propiedades del controlador.	84
Figura A4.2.	Configuración de entradas/salidas.	84
Figura A4.3.	Configuración del panel de operador.	85
Figura B1.1.	Dimensiones de la bomba centrífuga. [2].....	86
Figura B2.1.	PLC Micrologix 1100. Allen Bradley. [9a].....	87
Figura B2.2.	Módulo mixto de entradas/salidas analógicas 1762-IF2OF2. [9d]	88
Figura B3.1.	Relé de control de nivel RM4-LG01 y su conexión típica. [10].....	89
Figura B4.1.	Monitor de fase RM4-TA01 y conexión típica [11]	89
Figura B5.1.	PanelView 300 Micro. [9e]	90
Figura B5.2.	Esquema de pines del cable 1761-CBL-HM02. [9e]	90
Figura B6.1.	Diagrama de bloques del cableado de control del PowerFlex400. [9c].....	91
Figura B7.1.	Respuesta de la planta a una señal escalón en PSI.	92
Figura B7.2	Respuesta a una señal escalón del sistema compensado (Planta real) en PSI.	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5.1.	Sensor de presión Nautilus XMLF-010D2026.....	43
Tabla 5.2.	Lista de alarmas.	54
Tabla 6.1.	Resumen de especificaciones en el dominio del tiempo.	60
Tabla 6.2.	Resumen de especificaciones en el dominio del tiempo del modelo matemático.....	64
Tabla 6.3.	Resumen de especificaciones en el dominio del tiempo de la planta con el controlador implementado.	71
Tabla 6.4.	Comparación de especificaciones en el dominio del tiempo de la planta por utilizar y el modelo matemático obtenido.....	71
Tabla 6.5.	Comparación de especificaciones en el dominio del tiempo de la planta real y de la planta con el compensador implementado.	72
Tabla 6.6.	Comparación de especificaciones en el dominio del tiempo de la simulación de la planta compensada y de la planta real con el compensador implementado.....	72
Tabla B2.1	Características del hardware del Micrologix 1100.....	87
Tabla B2.2	Micrologix 1100 1763-L16AWA Alimentación e I/O empotrados.....	87
Tabla B2.3.	Módulo mixto I/O analógicas	88
Tabla B4.1.	Ajustes del monitor de fase RM4-TA01.....	90
Tabla B5.1.	Características del PanelView 300 Micro.....	90

Capítulo I: Introducción

En el presente capítulo se explica el problema existente, se reseña el contexto en el que se presenta y se plantea la importancia de resolverlo. Finalmente, se presenta la solución seleccionada.

1.1 Entorno del proyecto y definición del problema existente.

El hotel Meliá Conchal, situado en Santa Cruz de Guanacaste, tuvo la necesidad de ofrecer a sus clientes un flujo constante de agua en todos los grifos, por lo que implementó un sistema de bombeo que permite suministrar el agua necesaria a su red de tuberías. Sin embargo, este sistema de bombeo no contaba con un control que mantuviera la presión constante.

Debido a que la presión del agua cambia de acuerdo con la cantidad de grifos que se encuentren en uso, el flujo de agua a la salida no siempre es el mismo en todos los grifos del hotel, y esto provoca que en temporadas vacacionales altas, cuando se hace un mayor uso del agua, no se pueda suministrar este líquido de una forma regulada. O, por otro lado, que cuando la mayoría de grifos estén cerrados exista una presión de agua excesiva. Esta situación no le permite al hotel cumplir con sus políticas de satisfacción total y le impide alcanzar sus estándares de calidad.

Para resolver este problema se contrató a la empresa Automatización Avanzada S.A. (AASA), la cual se dedica a la automatización de procesos industriales para los diferentes tipos de industria y a atender necesidades de integración de sistemas, control e información, según sea necesario. Fue en esta empresa donde se desarrolló el proyecto.

1.2 Enfoque de la Solución

Para mantener la presión constante en la red de tuberías del hotel Meliá Conchal se hizo uso de dos bombas centrífugas, las cuales se abastecen de un tanque de captación subterráneo y bombean el agua al tanque de presión que suministra agua a la red de tuberías. La primera bomba se controló por medio de la variación de su frecuencia de alimentación, para lograr la velocidad que permite obtener la presión deseada, mientras que la segunda bomba se enciende de manera directa, en caso de que la primera bomba esté trabajando a su máxima capacidad y aun así no pueda mantener la presión requerida.

Se comienza a operar con la primera bomba y a medida que aumenta la demanda, automáticamente el sistema realiza la modulación del variador de frecuencia con base en la señal que proviene de un sensor de presión localizado en la tubería, para obtener la señal proporcional a la presión instantánea en la red.

Este sistema se controla por medio de un control en lazo cerrado con un regulador PD (Proporcional-Diferencial), de un controlador lógico programable, ya que este dispositivo presenta gran variedad de usos en este tipo de sistemas.

En la figura 1.1 se muestra el diagrama de bloques de la solución realizada:

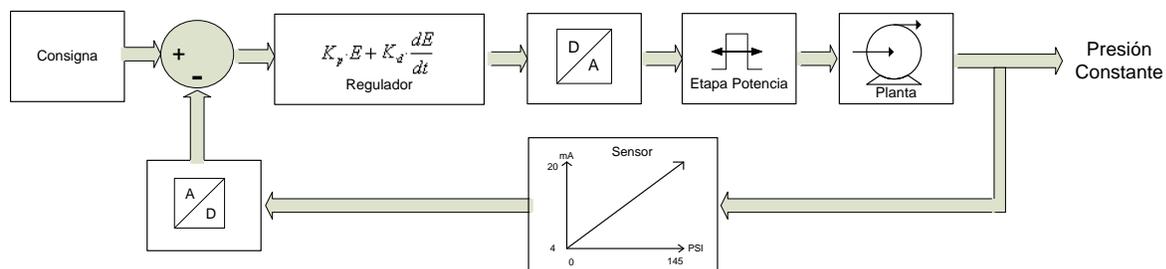


Figura 1.1. Diagrama de bloques de la solución realizada.

Capítulo II: Meta y objetivos

2.1 Meta

Proveer en el hotel Meliá Conchal un sistema que garantice el flujo constante de agua en todos los grifos que mantiene en uso.

2.2 Objetivo general

Implementar un sistema de control de los diferentes equipos electrónicos e hidráulicos que permitan mantener la presión del agua de forma constante, en relación con el valor ingresado por el operador del sistema.

2.3 Objetivos específicos

- Seleccionar e integrar los equipos electrónicos e hidráulicos que permitan tener un sistema para controlar la presión del agua, con una consigna en un rango de $4.22 \pm 2.11 \frac{kg}{cm^2}$, manteniendo una variación máxima de presión de $\pm 5\%$.
- Obtener el modelo matemático del sistema hidráulico por controlar, para que tenga una respuesta similar en 90% y para conocer el comportamiento de sus características dinámicas y estáticas.
- Implementar un compensador PD que permita regular las características dinámicas del sistema de control, necesarias para obtener un sistema estable.

Capítulo III: Marco teórico

En este capítulo se hace una descripción general del sistema de control, además se presenta la teoría en la cual se fundamentó la propuesta de solución del problema y se explican los conceptos y las relaciones matemáticas que se utilizaron en el diseño e implementación del sistema.

3.1 Descripción del sistema a controlar

Con el fin de suplir agua a cada grifo del hotel fue necesario construir un tanque subterráneo de captación de agua en el cual se pudiera almacenar la cantidad necesaria para abastecer al hotel. La capacidad de este tanque es de 500 m³ y la profundidad máxima de cinco metros.

Para el bombeo del agua se colocaron dos bombas centrífugas marca Cornell con una succión en 5 cm de diámetro, una descarga de 3,2 cm de diámetro y una potencia de 11 kW cada una.

El sistema cuenta con un tanque de presurización de 400 litros aproximadamente y tiene como objetivo disminuir la cantidad de arranques de la bomba cuando el sistema hidráulico presenta la mínima demanda. Las tuberías, tanto del tanque de captación hacia las bombas como de las bombas hacia la carga, son de 10 cm de diámetro. En la figura 3.1 se muestra un diagrama general del sistema hidráulico por controlar, donde se incluye el gabinete de control que será agregado.

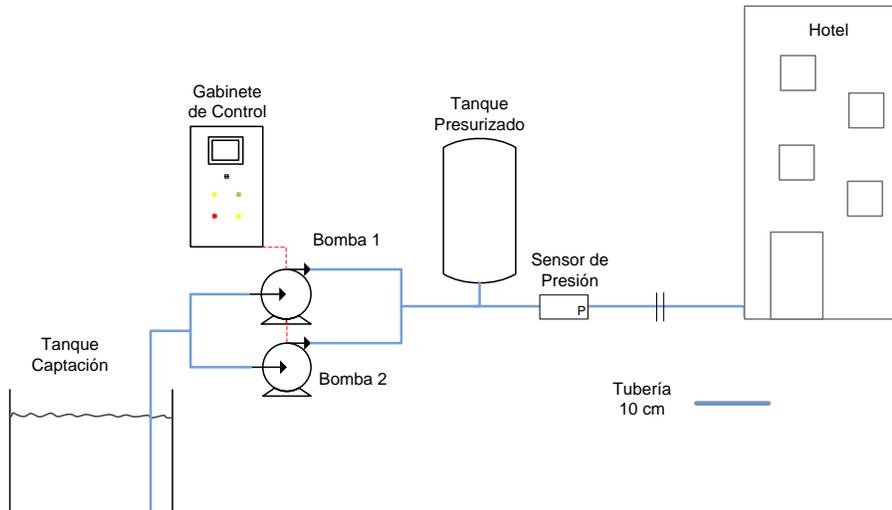


Figura 3.1. Diagrama general del sistema por controlar

3.2 Antecedentes bibliográficos

3.2.1 Control de velocidad de los motores trifásicos de inducción

De acuerdo con Elgueta [3], el motor de inducción es esencialmente de velocidad constante, cercana a la velocidad síncrona; no obstante, en muchas aplicaciones es necesario operar con diferentes velocidades o poder variarlas continuamente. A continuación se presentan las ecuaciones que rigen el torque y la velocidad de estas máquinas, para un mejor entendimiento del método de control de velocidad. Es importante recalcar que estas ecuaciones rigen para la zona de operación del motor de inducción que se presenta en la figura 3.2.

$$T = 3 \frac{R_r}{s \cdot \omega_s} \frac{V^2}{\left(R_e + \frac{R_r}{s}\right)^2 + L_{eq}^2 \cdot \omega_s^2} \quad (3.2.1)$$

$$\omega_r = (1 - s) \cdot \omega_s \quad (3.2.2)$$

$$\omega_s = \frac{\omega_{red}}{\frac{p}{2}} \quad (3.2.3)$$

en que:

R_r es la resistencia rotórica, R_e la resistencia del estator, L_{eq} la inductancia equivalente del rotor y el estator vista desde las terminales del estator, s el deslizamiento, p el número de polos, ω_{red} la frecuencia angular de alimentación, ω_s la velocidad angular sincrónica y ω_r la velocidad mecánica del rotor.

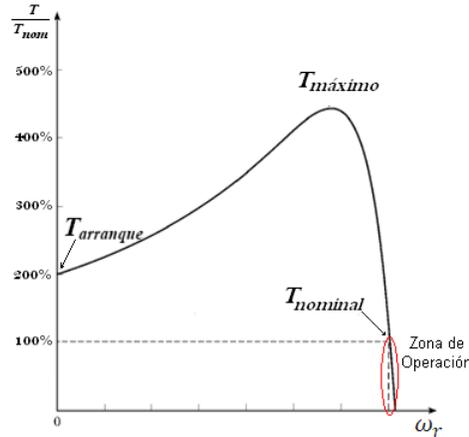


Figura 3.2. Curva de operación típica de un motor de inducción

Los siguientes métodos pueden ser utilizados para variar la velocidad del motor de inducción:

- Cambio del número de polos
- Variación del voltaje de alimentación
- Variación de la frecuencia de alimentación

A continuación se detalla el tercer método de control de velocidad.

Variación de la frecuencia de alimentación. Si se varía la frecuencia de alimentación de una máquina de inducción, según las ecuaciones 3.2.2 y 3.2.3, se puede variar la velocidad sincrónica de la máquina y, por medio de esta, la velocidad mecánica del motor. Este método de control se basa en la aplicación de una determinada frecuencia de alimentación de la máquina, para lograr una velocidad mecánica cercana a la deseada. Como normalmente los motores de inducción son de bajo deslizamiento (menor al 3%, para los motores utilizados), existe una relación directa entre velocidad y frecuencia aplicada.

Ahora, en una máquina de inducción alimentada desde una fuente trifásica senoidal se induce un flujo magnético que gira a velocidad síncrona. Este flujo induce en el estator una tensión que tiene la siguiente expresión:

$$E_e = 4 \cdot F_f \cdot f_s \cdot N_e \cdot \phi \cdot \zeta \quad (3.2.4)$$

en que:

E_e es el voltaje inducido en el estator, F_f Factor de forma (1.11 para tensión senoidal), f_s la frecuencia de las corrientes en el estator, N_e el número de vueltas de los enrollados, ϕ el flujo total en el entrehierro y ζ Factor de bobinado.

Si se despeja el flujo se obtiene:

$$\phi = \frac{E_e}{4 \cdot F_f \cdot f_s \cdot N_e \cdot \zeta} \approx k \frac{V}{f_s} \quad (3.2.5)$$

Y, si se desea mantener el flujo constante para evitar saturación magnética o utilizar el volumen máximo del paquete ferromagnético, se debe mantener la relación $\frac{V}{f_s}$ constante.

La ecuación de torque (3.2.1) se puede reescribir de la siguiente manera, si se toma en cuenta que el deslizamiento s es pequeño por lo que en el factor $\left(R_e + \frac{R_r}{s}\right)^2 \frac{R_r}{s}$ es mucho mayor a R_e .

$$T = 3 \frac{s \cdot R_r}{\omega_s} \frac{V^2}{R_r^2 + s^2 L_{eq}^2 \omega_s} = 3 \frac{V^2}{\omega_s^2} \frac{R_r \cdot \omega_r}{(R_r^2 + s^2 L_{eq}^2 \omega_s)} = \left(\frac{V}{\omega_s}\right)^2 \cdot K \cdot \omega_r \quad (3.2.6)$$

Como se puede observar en la ecuación 3.2.6, si se mantiene el flujo constante entonces, para deslizamientos pequeños, el torque es proporcional a la velocidad rotórica ω_r , en la zona en la que opera el motor de inducción según la figura 3.2.

De lo anterior se puede concluir que controlando ω_r se puede controlar la velocidad del motor.

3.2.2 Diseño de controladores

Según Kuo [6], el diseño del sistema de control requiere seguir los siguientes 3 pasos:

- Determinar qué debe hacer el sistema y saber cómo hacerlo.

Se debe de indicar qué debe hacer el sistema y cómo hacerlo. Por lo que se dan especificaciones de diseño que son únicas para cada aplicación en las que se incluyen relaciones de estabilidad relativa, el error en estado estable, la respuesta transitoria y las características de respuesta en frecuencia.

El diseño de sistemas de control lineales se puede realizar ya sea en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia. Por ejemplo, el error en estado estable generalmente se especifica con una entrada de escalón unitario, una entrada rampa o una entrada parábola. Otras especificaciones, como el sobrepaso máximo, tiempo de levantamiento y tiempo de asentamiento están definidas para una entrada de escalón unitario, por lo que se emplean para el diseño del dominio del tiempo.

Para sistemas prototipo de segundo orden existen relaciones analíticas simples entre estas especificaciones, en el dominio del tiempo y en la frecuencia. Sin embargo, para sistemas de orden superior la correlación entre las especificaciones entre el dominio del tiempo y la frecuencia son difíciles de establecer. En la mayoría de los casos las especificaciones en el dominio del tiempo detalladas anteriormente se emplean a menudo como la medida final del desempeño del sistema.

- Determinar cuál es la configuración del compensador de acuerdo con el proceso controlado.

El objetivo del controlador es hacer que las variables a controlar se comporten en la forma deseada, por lo que se debe determinar “la señal de control” para que todas las especificaciones de diseño sean satisfechas. Existen varios tipos de compensaciones, entre las cuales se encuentra la compensación en serie o en cascada. Esta es la configuración de sistema más comúnmente utilizada, la cual se conforma con el controlador colocado en serie con el proceso controlado.

El controlador PD aplica una señal al proceso que es una combinación proporcional y derivativa de la señal de actuación. Los cuales se pueden realizar y visualizar con facilidad en el dominio del tiempo aspecto por el cual estos controladores se diseñan comúnmente empleando métodos en el dominio del tiempo.

- Determinar los valores de los parámetros del compensador para alcanzar los objetivos del diseño.

Se ha establecido que se debe seleccionar el controlador más simple que cumpla con todas las especificaciones de diseño, ya que cuanto más complejo sea el controlador es más costoso y más difícil de diseñar. El diseño del controlador que se va a utilizar a menudo se basa en la experiencia del diseñador.

Después de elegir el controlador se deben determinar los valores de los parámetros propios del controlador. Por lo general el diseño del dominio del tiempo se basa fuertemente en el plano s y en el lugar geométrico de las raíces.

Controlador Proporcional-Derivativo (PD)

El controlador conformado por un amplificador simple con una ganancia constante K se conoce como controlador proporcional, debido a que la señal de control a la salida del controlador se relaciona con su entrada por medio de una constante proporcional. El controlador PD consta de un controlador proporcional sumado a la derivada de la señal de entrada. La figura 3.3 muestra el diagrama de bloques de un sistema de control realimentado que tiene un proceso prototipo de segundo orden con la función de transferencia:

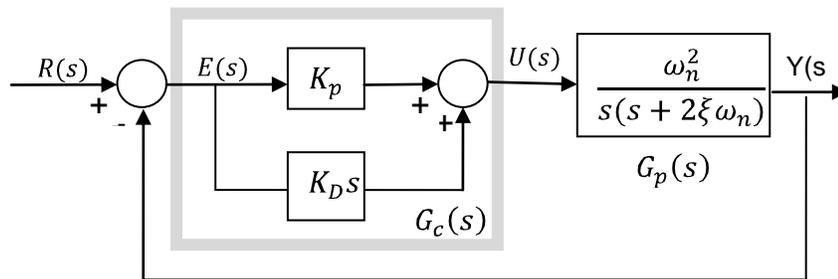


Figura 3.3. Diagrama de bloques del controlador PD [6]

La función de transferencia del controlador en serie es del tipo proporcional-derivativo (PD), como se muestra a continuación:

$$G_c(s) = K_p + K_D s = K_p \left(1 + \frac{K_D}{K_p} s\right) \quad (3.2.7)$$

Por lo tanto la señal de control aplicada al proceso es:

$$u(t) = K_p e(t) + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (3.2.8)$$

en la que K_p y K_D son las constantes proporcional y derivativa, respectivamente.

La función de transferencia de la trayectoria directa para un sistema prototipo de segundo orden sería:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{E(s)} = G_c(s)G_p(s) = \frac{\omega_n^2(K_p + K_D s)}{s(s + 2\xi\omega_n)} \quad (3.2.9)$$

Para una mejor interpretación de la respuesta transitoria de un sistema de control con una componente derivativa obsérvense las respuestas en el tiempo que se presentan en la figura 3.4. Un ejemplo de una respuesta al escalón unitario de un sistema estable con un control proporcional se muestra en la figura 3.4(a). Esta presenta un sobrepaso máximo relativamente grande y es un poco oscilatoria.

En la figura 3.4(b) se muestra la señal de error correspondiente, que es la diferencia entre la entrada escalón unitario y la salida $y(t)$. La derivada de la señal de error con respecto al tiempo se presenta en la figura 3.4(c).

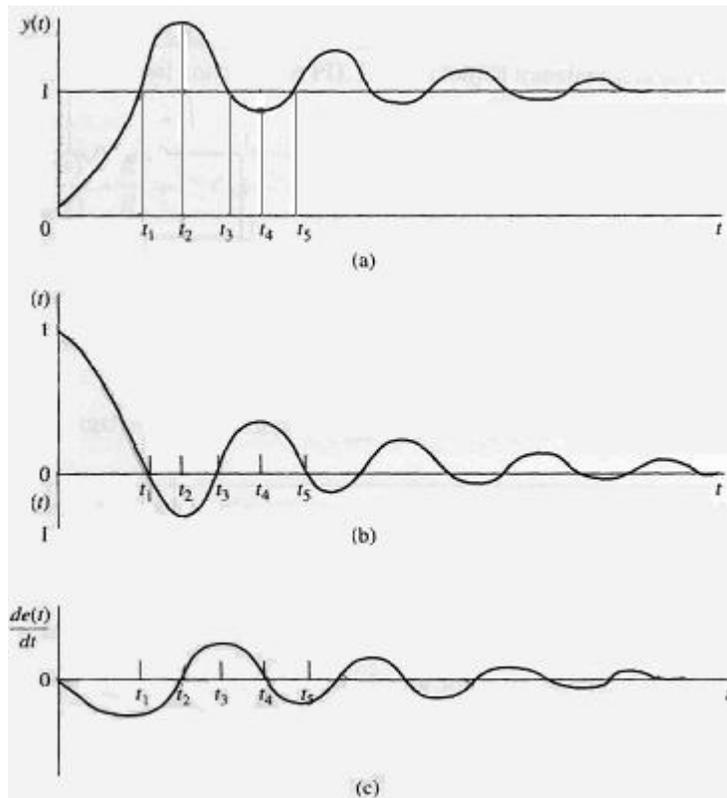


Figura 3.4. Respuestas en el tiempo del efecto del control derivativo. (a) Respuesta al escalón unitario. (b) Señal de error. (c) Tasa de tiempo de cambio de la señal de error. [6]

Del análisis de los gráficos anteriores, de acuerdo con los intervalos señalados, y con la finalidad de comprender el efecto del componente derivativo del controlador PD, se tiene lo siguiente:

El sobrepaso es producido por la señal de error positiva en el intervalo $0 < t < t_1$ ya que esta se incrementa muy rápidamente, además que la señal de error en el intervalo $t_1 < t < t_2$ no es suficiente para evitar el sobrepaso.

En la figura 3.4(c) se muestra la señal de la derivada del error con respecto al tiempo. En ella se puede observar que en el intervalo $t_1 < t < t_2$ tanto $e_{(t)}$ como $\frac{de(t)}{dt}$ son negativos por lo que sumadas logran disminuir el sobrepaso de la variable controlada, mientras que el intervalo $t_2 < t < t_3$ $e_{(t)}$ y $\frac{de(t)}{dt}$ tienen signos opuestos, por lo que la señal de error negativa que originalmente contribuye al sobrepaso negativo también se reduce.

De acuerdo con lo anterior los efectos del controlador PD resultarán en menores sobrepasos positivos y negativos en $y_{(t)}$. Según lo recalado por Kuo[6], otra forma de ver el control derivativo es que ya que $\frac{de(t)}{dt}$ representa la pendiente de $e_{(t)}$, el control PD es esencialmente un control anticipativo. Entonces, al conocer la pendiente el controlador puede anticipar la dirección del error y emplearla para controlar mejor el proceso. Normalmente, en sistemas lineales si la pendiente de $e_{(t)}$ o $y_{(t)}$ debida a la entrada escalón es grande, ocurrirá un sobrepaso alto. El control derivativo mide la pendiente instantánea de $e_{(t)}$ y predice el sobrepaso grande, por lo que hace un esfuerzo correctivo antes de que el sobrepaso excesivo ocurra.

3.3 Descripción de los principales conceptos matemáticos y electrónicos relacionados con la solución del problema

3.3.1 Especificaciones en el dominio del tiempo para una señal escalón.

Como explica Kuo [6], la fracción transitoria de la respuesta en el tiempo es aquella parte que tiende a cero cuando el tiempo crece. Esta respuesta transitoria de un sistema de control es importante debido a que tanto la amplitud como la duración del tiempo en la respuesta transitoria deben mantenerse dentro de los límites establecidos.

En los sistemas de control lineal las propiedades de la respuesta transitoria normalmente se dan ante una función al escalón como entrada. Tomando como referencia esta señal, a continuación se presentan los criterios de desempeño definidos por Kuo[6], y que son comúnmente utilizados para la caracterización de sistemas de control lineal en el dominio del tiempo:

- **Sobrepaso máximo.** *“Asumiendo que $y(t)$ es la respuesta del sistema a la entrada escalón, que $y_{m\acute{a}x}$ es el valor máximo de $y(t)$ y y_{ss} es el valor en estado estable”, entonces el sobrepaso máximo se puede definir como:*

$$M = \text{sobrepaso máximo} = y_{m\acute{a}x} - y_{ss} \quad (3.3.1)$$

A este parámetro se le denota con la letra M . Como porcentaje del valor final de la respuesta al escalón se tiene:

$$\%M = \frac{M}{y_{ss}} * 100 \quad (3.3.2)$$

- **Tiempo de retardo.** *“El tiempo de retardo t_d es el tiempo requerido para que la respuesta al escalón alcance 50% de su valor final.”*

- **Tiempo de levantamiento.** “El tiempo de levantamiento t_r se define como el tiempo requerido para que la respuesta al escalón se eleve de 10% a 90% de su valor final”.
- **Tiempo de asentamiento.** “El tiempo de asentamiento t_s se define como el tiempo requerido para que la respuesta al escalón disminuya y permanezca dentro de un porcentaje específico de su valor final y por lo general se utiliza 5%.”

Estas cuatro especificaciones definidas dan una medida directa de las características transitorias de un sistema de control en términos de la respuesta a la entrada escalón. En la figura 3.5 se muestra una respuesta típica de un sistema de control de segundo orden ante una entrada escalón. Como se puede apreciar, estas especificaciones de dominio en el tiempo se pueden medir con relativa facilidad.

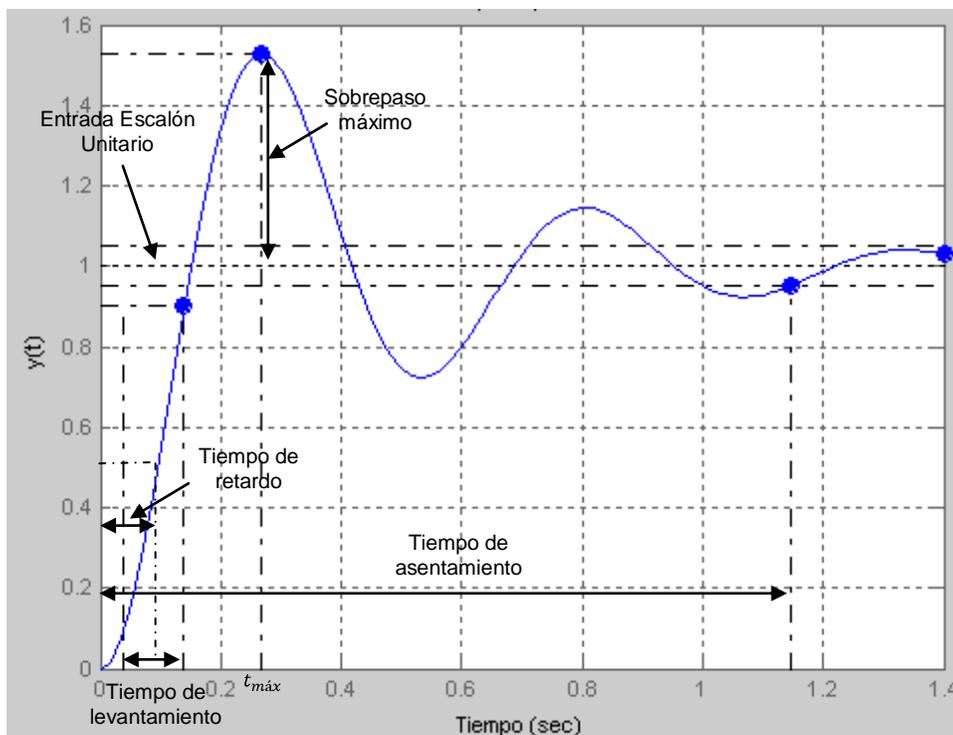


Figura 3.5. Respuesta típica de un sistema de control ante una entrada escalón unitario. [6]

3.3.2 Relación entre la función de transferencia y las especificaciones en el dominio del tiempo para un sistema prototipo de segundo orden.

En este apartado se describe la relación que existe entre la función de transferencia de un sistema prototipo de segundo orden y sus especificaciones en el dominio del tiempo, tomando como referencia el análisis de Kuo[6].

En la figura 3.6 se muestra el diagrama de bloques de un sistema de control de segundo orden con realimentación unitaria.

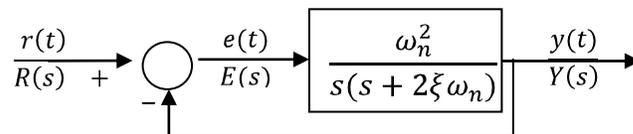


Figura 3.6. Sistema de control prototipo de segundo orden. [6]

La función de transferencia en lazo abierto del sistema es:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{E(s)} = \frac{\omega_n^2}{s(s+2\xi\omega_n)} \quad (3.3.3)$$

en que ξ y ω_n con son constantes reales. La función de transferencia en lazo cerrado del sistema es:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2+2\xi\omega_n s+\omega_n^2} \quad (3.3.4)$$

La ecuación característica del sistema prototipo de segundo orden se obtiene al igualar el denominador de la ecuación 3.3.4 a cero:

$$\Delta(s) = s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2 = 0 \quad (3.3.5)$$

Por lo tanto, el sistema de la figura 3.6 con las funciones de transferencia dadas en las ecuaciones 3.3.3 y 3.3.4 se definen como sistema prototipo de segundo orden. Para una entrada de función escalón unitario $R(s) = \frac{1}{s}$, la respuesta de salida del sistema se obtiene tomando la transformada inversa de Laplace de la transformada de salida.

$$Y(s) = \frac{\omega_n^2}{s(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (3.3.6)$$

Realizando la transformada de Laplace inversa, se obtiene:

$$y(t) = 1 - \frac{e^{-\xi\omega_n t}}{\sqrt{1-\xi^2}} \text{sen}(\omega_n \sqrt{1-\xi^2} t + \cos^{-1} \xi) \quad t \geq 0 \quad (3.3.7)$$

Las raíces de la ecuación característica del sistema mostrada en la ecuación 3.3.5. se pueden expresar como:

$$\begin{aligned} s_1, s_2 &= -\xi\omega_n \pm j\omega_n \sqrt{1-\xi^2} \\ &= -\alpha \pm j\omega \end{aligned} \quad (3.3.8)$$

en que:

$$\alpha = \xi\omega_n \quad (3.3.9)$$

y

$$\omega = \omega_n \sqrt{1-\xi^2} \quad (3.3.10)$$

De acuerdo con la ecuación 3.3.7 y 3.3.9, α es la constante que se multiplica por t en el término exponencial, por lo que α controla la velocidad de crecimiento o decaimiento de la respuesta al escalón unitario. Esto es, α controla el "amortiguamiento" del sistema y se conoce como factor de amortiguamiento, o constante de amortiguamiento.

Al parámetro ξ se le conoce como factor de amortiguamiento relativo y proviene de:

$$\xi = \text{factor de amortiguamiento relativo} = \frac{\alpha}{\omega_n} \quad (3.3.11)$$

El parámetro ω_n se define como la frecuencia natural no amortiguada. Como se observa en la ecuación 3.3.8, cuando $\xi = 0$ el amortiguamiento es cero, las raíces de la ecuación característica son imaginarias y la ecuación 3.3.7 muestra que la respuesta al escalón unitario es puramente senoidal, y ω_n es la frecuencia de la respuesta senoidal no amortiguada.

En la figura 3.7 se muestra la relación entre la localización de las raíces de la ecuación característica y ω_n, ξ, α y ω . Para las raíces de conjugación compleja se tiene:

ω_n Es la distancia radial de las raíces al origen del plano s.

α Es la parte real de las raíces.

ω Es la parte imaginaria de las raíces.

ξ Es el coseno del ángulo entre la línea radial de las raíces y el eje negativo cuando las raíces están en el semiplano izquierdo del plano s, o

$$\xi = \cos \theta \quad (3.3.12)$$

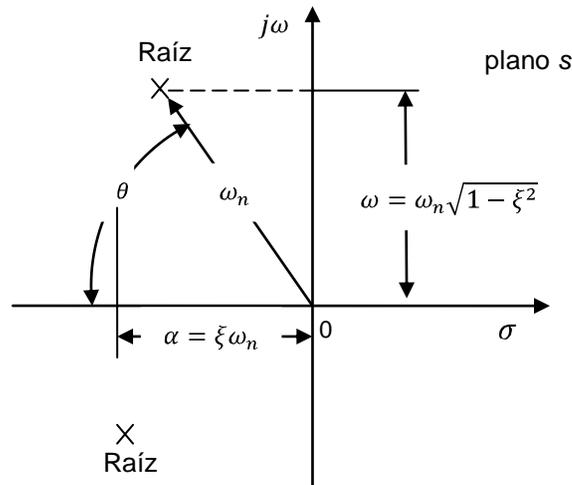


Figura 3.7. Relación entre la localización de las raíces de la ecuación característica y ω_n, ξ, α y ω [6]

Relación entre el factor de amortiguamiento relativo y el sobrepaso máximo

Se puede obtener tomando la derivada de la ecuación 3.3.7 con respecto a t e igualándola a cero.

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{\omega_n e^{-\xi \omega_n t}}{\sqrt{1-\xi^2}} [\xi \text{sen}(\omega t + \theta) - \sqrt{1-\xi^2} \text{cos}(\omega t + \theta)] \quad t \geq 0 \quad (3.3.14)$$

Simplificando la expresión anterior, se tiene:

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{\omega_n}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi \omega_n t} \text{sen} \omega_n \sqrt{1-\xi^2} t \quad t \geq 0 \quad (3.3.14)$$

Haciendo $\frac{dy(t)}{dt} = 0$ se obtienen las soluciones $t = \infty$ y

$$\omega_n \sqrt{1-\xi^2} t = n\pi \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (3.3.15)$$

en la cual se obtiene:

$$t = \frac{n\pi}{\omega_n \sqrt{1-\xi^2}} \quad n = 0,1,2, \dots \quad (3.3.16)$$

La solución en $t = \infty$ es el máximo de $y(t)$ solamente cuando $\xi > 1$. Para las respuestas a escalón unitario de un sistema estable con $0 < \xi < 1$, el primer sobrepaso es el sobrepaso máximo, por lo que $n = 1$ sería el tiempo correspondiente al sobrepaso máximo, esto es:

$$t_{max} = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\xi^2}} \quad (3.3.17)$$

Ahora, sustituyendo la ecuación 3.3.17 en la ecuación 3.3.7 se obtiene el valor del sobrepaso máximo M :

$$M = e^{-\frac{\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}} \quad (3.3.18)$$

El porcentaje de sobrepaso máximo es:

$$\%M = 100 \cdot e^{-\frac{\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}} \quad (3.3.19)$$

Debido a la complejidad en la determinación de las expresiones analíticas exactas del tiempo de levantamiento t_d , y el tiempo de asentamiento t_s , estas se determinan por medio de aproximaciones gráficas.

Relación entre la frecuencia natural no amortiguada y el tiempo de levantamiento

Para el tiempo de levantamiento t_r se graficó $\omega_n t_r$ *vs* ξ y se trazó la curva mediante una línea recta. Esto se muestra en la figura 3.8.

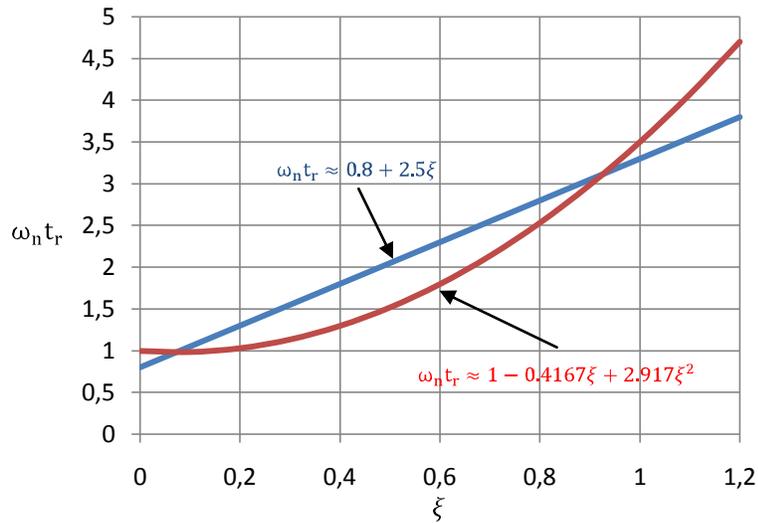


Figura 3.8. Tiempo de levantamiento normalizado contra ξ para el sistema prototipo de segundo orden [6]

El tiempo de levantamiento para el sistema prototipo de segundo orden se aproxima como:

$$t_r = \frac{0.8 + 2.5 \xi}{\omega_n} \quad 0 < \xi < 1 \quad (3.3.20)$$

Puede obtenerse una mejor aproximación utilizando una ecuación de segundo orden:

$$t_r \cong \frac{1 - 0.4167 \xi + 2.917 \xi^2}{\omega_n} \quad 0 < \xi < 1 \quad (3.3.21)$$

Relación entre la frecuencia natural no amortiguada y el tiempo de asentamiento

El tiempo de asentamiento presenta una discontinuidad en $\xi = 0.69$ ya que para este valor el sobreimpulso supera el 5% haciendo que el sistema tome mayor tiempo en estabilizarse. Para relacionar el tiempo de asentamiento t_s con la frecuencia natural no amortiguada, se graficó $\omega_n t_s$ vs ξ y se trazó la curva de aproximación tanto para $0 < \xi < 0.69$ como para $\xi > 0.69$. Esto se muestra en la figura 3.9.

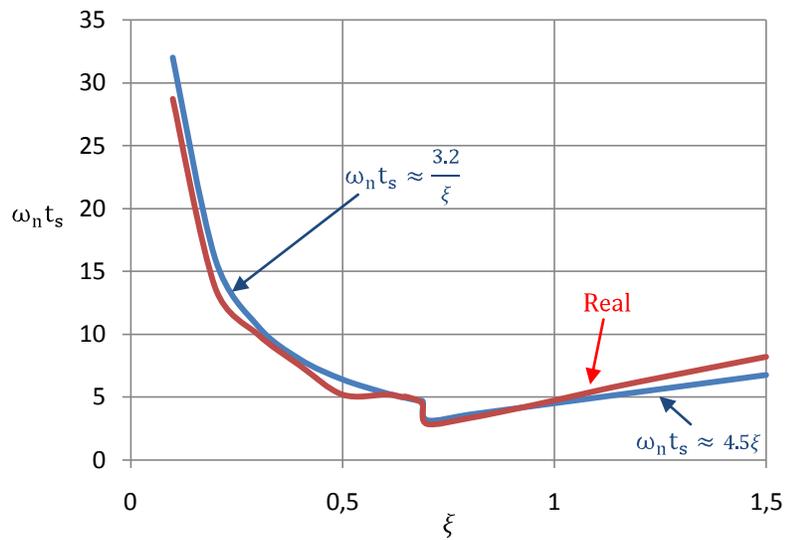


Figura 3.9. Tiempo de asentamiento normalizado contra ξ para el sistema prototipo de segundo orden. [6]

El tiempo de asentamiento para el sistema prototipo de segundo orden se aproxima por medio de las siguientes ecuaciones, dependiendo del valor de ξ :

$$t_s \cong \frac{3.2}{\xi \omega_n} \quad 0 < \xi < 0.69 \quad (3.3.22)$$

$$t_s \cong \frac{4.5\xi}{\omega_n} \quad \xi > 0.69 \quad (3.3.23)$$

3.3.3 Técnica del lugar geométrico de las raíces

La técnica del lugar geométrico de las raíces permite visualizar las trayectorias de las raíces de la ecuación característica cuando se hace variar un parámetro. Esta técnica es útil en los sistemas de control ya que le permite al diseñador controlar el desempeño dinámico del sistema mediante la adición de ceros y/o polos a la función de transferencia, ubicando las raíces del sistema con base a las condiciones de magnitud y ángulo.

Considerando la función de transferencia en lazo cerrado de un sistema de un solo lazo se obtiene:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1+G(s)H(s)} \quad (3.3.24)$$

Entonces, las raíces de la ecuación característica deben satisfacer:

$$G(s)H(s) = -1 \quad (3.3.25)$$

Ahora, suponiendo que $G(s)H(s)$ contiene un parámetro variable K como un factor multiplicativo, se determinarán las condiciones bajo las cuales la ecuación 3.3.25 se satisface. De acuerdo con la condición anterior:

$$G(s)H(s) = KG_1(s)H_1(s) \quad (3.3.26)$$

en que $G_1(s)H_1(s)$ no contiene el parámetro variable K . La ecuación 3.3.25 se escribe como:

$$G_1(s)H_1(s) = -\frac{1}{K} \quad (3.3.27)$$

Para satisfacer la ecuación 3.3.27, se deben cumplir simultáneamente las siguientes condiciones:

Condición de magnitud

$$|G_1(s)H_1(s)| = \frac{1}{|K|} \quad -\infty < K < \infty \quad (3.3.28)$$

Condiciones de ángulo

$$\begin{aligned} \angle G_1(s)H_1(s) &= (2i + 1)\pi \quad K \geq 0 \\ &= \text{múltiplos impares de } \pi \text{ radianes o } 180^\circ \end{aligned} \quad (3.3.29)$$

$$\begin{aligned} \angle G_1(s)H_1(s) &= 2i\pi \quad K \leq 0 \\ &= \text{múltiplos pares de } \pi \text{ radianes o } 180^\circ \end{aligned} \quad (3.3.30)$$

en que $i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ (cualquier entero)

Según indica Kuo [6], las condiciones establecidas anteriormente se utilizan en la construcción del lugar geométrico de las raíces, el cual es básicamente un problema gráfico, aunque algunas de sus propiedades se obtuvieron en forma analítica. La construcción gráfica del lugar geométrico de las raíces se basa en el conocimiento de los polos y ceros de la función de $G(s)H(s)$. Entonces al escribir $G(s)H(s)$ de la forma

$$G(s)H(s) = KG_1(s)H_1(s) = \frac{K(s+z_1)(s+z_2)\dots(s+z_m)}{(s+p_1)(s+p_2)\dots(s+p_n)} \quad (3.3.31)$$

donde los ceros y los polos de $G(s)H(s)$ son reales o en pares complejos conjugados.

Aplicando las condiciones de ángulo y magnitud se tiene

$$|G_1(s)H_1(s)| = \frac{\prod_{k=1}^m |s+z_k|}{\prod_{j=1}^n |s+p_j|} = \frac{1}{|K|} \quad -\infty < K < \infty \quad (3.3.32)$$

Para $0 \leq K < \infty$

$$\angle G_1(s)H_1(s) = \sum_{k=1}^m \angle(s+z_k) - \sum_{j=1}^n \angle(s+p_j) = (2i+1) \times 180^\circ \quad (3.3.33)$$

En palabras quiere decir que cualquier punto s_1 perteneciente al lugar geométrico de las raíces debe satisfacer la condición, enunciada por Kuo:

“La diferencia entre las sumas de los ángulos de los vectores dibujados desde los ceros y aquellos desde los polos de $G(s)H(s)$ a s_1 es un múltiplo impar de 180° ”.

Conociendo el lugar geométrico de las raíces, los valores de K a lo largo del lugar geométrico se pueden determinar, al escribir la ecuación 3.3.32, como:

$$|K| = \frac{\prod_{j=1}^n |s+p_j|}{\prod_{k=1}^m |s+z_k|} \quad (3.3.34)$$

El valor de K , en cualquier punto s_1 , sobre el lugar geométrico de las raíces, se obtiene al sustituir el valor de s_1 en la ecuación 3.3.34.

Capítulo IV: Procedimiento metodológico

En este capítulo se describe el procedimiento utilizado para la obtención y análisis de información que llevaron al desarrollo del modelo matemático y el método seguido en el diseño del controlador por implementar.

4.1 Reconocimiento y definición del problema

Un aspecto importante de mencionar en la solución del problema es que esta consta de dos etapas. La primera consiste en el diseño e implementación del sistema mecánico e hidráulico, el cual había sido preestablecido por los encargados de esta etapa. La segunda consiste en el diseño e implementación del sistema de control y en asignar los equipos necesarios para esto. En esta última etapa es a la que se orientaron los objetivos específicos.

El proceso de definición del problema consistió en la realización de reuniones con el ingeniero encargado de la coordinación del proyecto referente a la etapa de control automático, con lo cual se obtuvieron los requerimientos del sistema de control. Posteriormente se realizaron reuniones con el ingeniero a cargo de la etapa mecánica e hidráulica con lo que se obtuvieron las características y estado del sistema mecánico.

4.2 Obtención y análisis de información

Para obtener la información sobre el equipo de control por implementar se consultó a ingenieros de Automatización Avanzada S.A. con experiencia en el desarrollo de sistemas de control similares y se hizo referencia a documentación de sistemas desarrollados anteriormente, con lo cual se conformó una importante base de datos acerca de los equipos por utilizar y de los diagramas de conexión para este tipo de sistemas.

Por lo anterior se realizó una investigación en Internet sobre los equipos, teniendo en cuenta las especificaciones del sistema por controlar, con el fin de seleccionar el equipo que se ajuste a los requerimientos según un balance entre su costo y su desempeño.

En la etapa de diseño e implementación del control se realizaron pruebas de la planta por controlar por medio del equipo instalado. Para eso se estableció comunicación entre una computadora y el controlador lógico programable. Por medio del software RSview32 (SCADA) de Allen Bradley se generaron las señales de prueba necesarias para conocer el comportamiento del sistema en el dominio del tiempo, que permitiera desarrollar el modelo matemático del sistema, para posteriormente verificar el funcionamiento del controlador implementado.

4.3 Síntesis e implementación de la solución

La obtención del modelo matemático de la planta se basó en la respuesta a una entrada escalón a lazo abierto, con la cual se obtuvo el comportamiento del sistema en el dominio del tiempo con el método detallado en el apartado anterior. Del análisis de la respuesta obtenida se graficaron las especificaciones en el dominio del tiempo del sistema (figura 6.6). De acuerdo con la respuesta y las especificaciones manifiestas, se aproximó el comportamiento de la planta a un sistema prototipo de segundo orden. Con esto se procedió a analizar la función de transferencia de un sistema prototipo de segundo orden (en el dominio de la frecuencia) y de las especificaciones derivadas de la respuesta de la planta se obtuvieron los parámetros de su función de transferencia.

Con el fin de validar el modelo matemático de la planta se utilizó MATLAB y se obtuvo la respuesta en el dominio del tiempo del modelo matemático a una entrada escalón (figura 6.7). En el gráfico obtenido se indican las especificaciones en el dominio del tiempo. Estas especificaciones se compararon con las obtenidas en el sistema real a fin de verificar que el porcentaje de error del modelo matemático se encontrara dentro del rango establecido en los objetivos planteados.

Una vez obtenido el modelo matemático por medio de la señal a lazo abierto y debidamente validado, se procedió al diseñar el controlador por implementar. En el diseño de este controlador se utilizó la técnica del lugar geométrico de las raíces, por lo que se construyó este gráfico con la ayuda de la herramienta SISOTOOL de MATLAB (figura 6.8).

Según las especificaciones obtenidas de la planta, se dispuso mejorar las características dinámicas de la respuesta transitoria con el fin de tener un sistema más rápido (tiempo de levantamiento y tiempo de asentamiento menores), y con menos sobrepaso. Para esto se seleccionó la región del lugar geométrico de las raíces por donde deben pasar los polos dominantes, lo cual se muestra en la figura 6.9.

Una vez establecido el controlador por diseñar y el punto en el lugar geométrico de las raíces por donde deben pasar los polos dominantes, por medio de las condiciones de ángulo se calculó el ángulo por introducir y con esto la ubicación del cero por agregar, para hacer que el lugar geométrico de las raíces pase por el punto deseado. Una vez calculada la ubicación del cero, el valor de la ganancia proporcional se determinó mediante el empleo de la condición de magnitud.

Con el controlador diseñado se dibujó nuevamente el lugar geométrico de las raíces para verificar que efectivamente se haya logrado ubicar los polos dominantes en la región deseada (figura 6.10), y posteriormente se obtuvo la respuesta en el dominio del tiempo del modelo compensado para una entrada escalón, a fin de verificar que se haya alcanzado mejorar las características establecidas.

Por último se convierten los parámetros del controlador PD a los parámetros propios del bloque del controlador lógico programable y se implementan en él. Con el controlador debidamente programado se obtiene la respuesta del sistema real compensado para verificar que se logró compensar el sistema real y obtener la presión en el sistema de tuberías de acuerdo con la consigna ingresada. Esto se muestra en la figura 6.11.

4.4 Reevaluación y alternativas de solución

Una forma alternativa de modelar el sistema sería realizarlo de una forma analítica, en la cual se modele matemáticamente cada elemento mecánico del sistema por controlar y posteriormente se obtengan de forma experimental los parámetros de cada elemento modelado.

También como método alternativo para la sintonización de los parámetros del controlador se puede utilizar el método de Ziegler-Nichols, debido a que la planta por controlar es lo suficientemente estable. Una de las ventajas de este método es que la sintonía de los parámetros se realiza en un tiempo relativamente corto y sin necesidad de obtener el modelado matemático del sistema. No obstante, no siempre es efectivo y no se cuenta con la facilidad de poder controlar las características dinámicas del sistema como se hace en la técnica del lugar geométrico de las raíces.

Capítulo V: Descripción detallada del planteamiento de la solución

En este capítulo se presentan los requerimientos del sistema de control y se detallan los diagramas de bloques del hardware integrado y de los programas desarrollados.

5.1 Requerimientos y descripción del sistema de control automático

Para implantar el control del sistema hidráulico con el fin de mantener una presión constante se implementó, en un gabinete, el equipo necesario para el control y la protección del sistema, considerando las condiciones requeridas para el proyecto.

El sistema consta básicamente de un tablero de control con un variador de velocidad y un interruptor electromecánico de potencia (contactor), con los cuales se podrá controlar las bombas centrífugas y mantener la presión constante en el sistema, esto mediante la variación de la frecuencia de alimentación de una bomba; mientras que la otra bomba se encenderá directamente.

Por medio de indicadores lumínicos se representarán condiciones tales como el nivel correcto de tanque y la falla y operación de cada bomba.

El panel posee un selector de giro, el cual permitirá seleccionar tres diferentes modos operativos: automático, manual y sistema fuera de operación.

Modo Manual. Al colocar el selector en la posición manual una bomba se encenderá por medio del variador, con la velocidad que el operador haya seleccionado por medio de un teclado que se encontrará localizado en el dispositivo. La otra bomba se encenderá directamente por medio del interruptor electromecánico de potencia, hasta alcanzar la velocidad máxima. Si el nivel de agua en el tanque es inferior al rango establecido, el sistema se apagará por completo, independientemente del modo en el cual se encuentre, ya que se instaló protección mediante electrodos de nivel.

Modo Automático. Desde la pantalla de interfaz el operador ingresará el valor de presión que desea mantener constante (consigna) y, por medio del sistema de regulación PD implementado en un controlador lógico programable, realizará la modulación de velocidad del variador, basado en la señal que proviene de un sensor de presión localizado en la tubería. A medida que aumenta la demanda el sistema automáticamente incorpora el variador y modula la velocidad de la primera bomba. Si la demanda crece, el controlador lógico programable, por medio de un arranque directo, incorpora a la red la segunda bomba a máxima velocidad. Mientras tanto, el PLC enviará la señal de control al variador para modular la velocidad de la primera bomba, manteniendo la presión establecida.

Con la disminución en la demanda se apagará la bomba 2 procurando mantener la presión constante mediante la regulación de velocidad de la bomba 1.

Como medidas de protección se instaló un monitor de fase el cual realiza las siguientes funciones

- Pérdida y desbalance en fase (asimetría)
- Inversión de fase (secuencia)
- Protección contra bajo y alto voltaje.

En caso de fallo se deshabilitará la operación de las bombas y se indicará la falla en el panel de operador. También se instaló un supresor de transitorios en la red de alimentación para la protección del equipo de control.

5.2 Descripción del hardware

Para mantener la presión constante en la red de tuberías del hotel Meliá Conchal fue necesaria la implementación tanto de un sistema mecánico e hidráulico como de un sistema que lo controlara. Por lo tanto, este se dividió en las dos partes que se detallan a continuación:

5.2.1 Sistema mecánico e hidráulico

Tal y como se describió en la sección 3.1, el sistema hidráulico consiste en un tanque subterráneo de captación de agua con capacidad de 500 m³ y una profundidad máxima de cinco metros; dos bombas centrífugas marca Cornell con una succión en 5 cm de diámetro, una descarga en 3.2 cm de diámetro y una potencia de 11 kW cada una, y un tanque de presurización de 400 litros.

La implementación de esta primera parte fue realizada por el personal de Durman Esquivel, especializado en obras mecánicas e hidráulicas.

5.2.2 Sistema de control

En esta etapa se implementó el gabinete con los equipos de control, conforme a las especificaciones establecidas en la sección 5.1. En la figura 5.1 se muestra el diagrama de bloques del sistema de control.

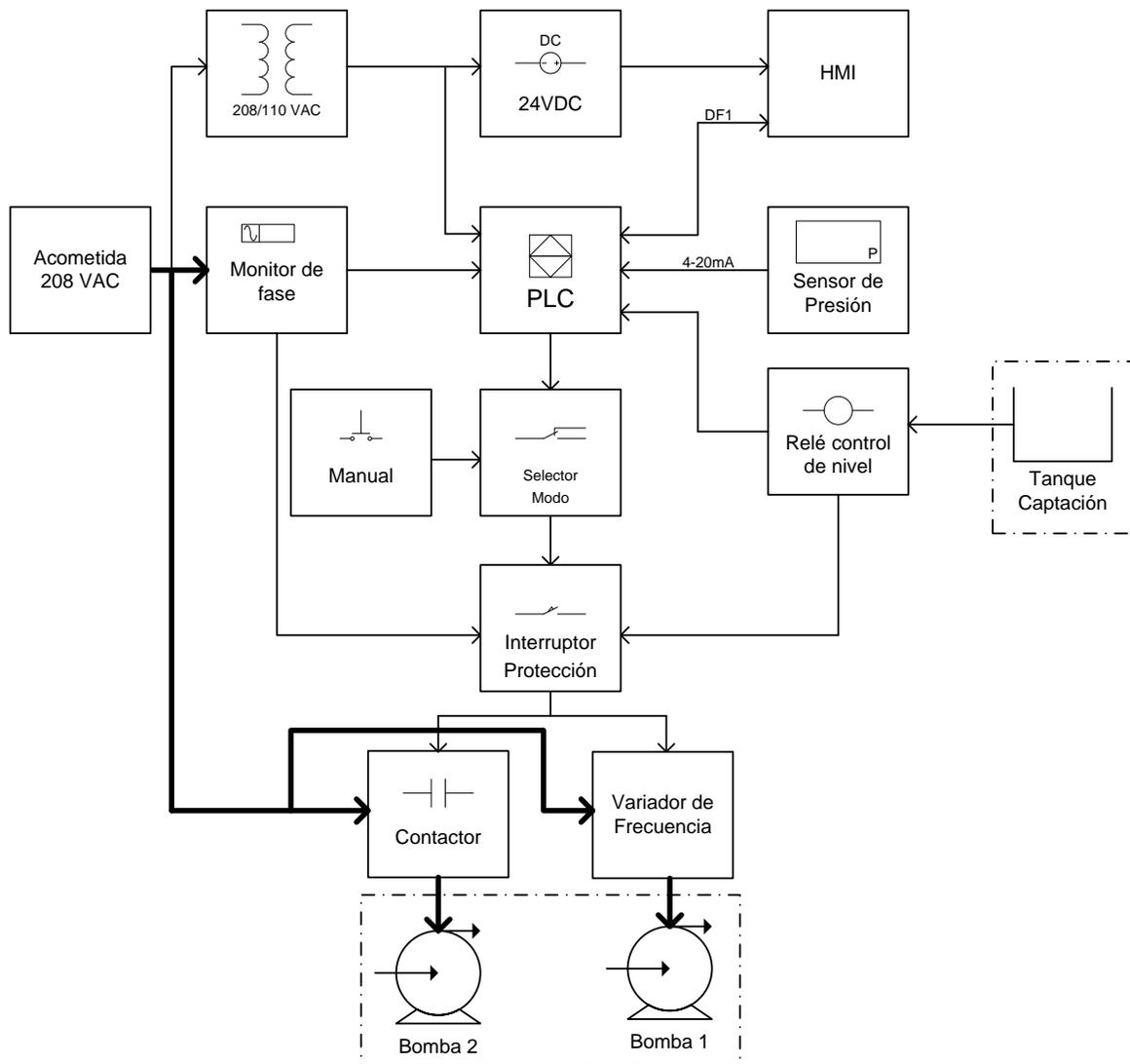


Figura 5.1. Diagrama de bloques del sistema de control.

Para cumplir con las medidas de seguridad establecidas se colocó un monitor de fase y un relé de control de nivel, los cuales interrumpen la señal de encendido de las bombas. Por medio del selector de modo se elige el modo de operación. En modo manual, las bombas se controlan por medio de botones de encendido y apagado, en modo automático las bombas las controla el PLC. En la figura A3.1 se apéndice, se muestra una fotografía del gabinete de control.

A continuación se detallan los equipos de mayor importancia.

- **Controlador lógico programable.**

Con base en la relación entre el costo y el desempeño se seleccionó el PLC Micrologix 1100 catálogo 1763-L16AWA de Allen Bradley. En la figura B2.1 se muestra un diagrama con las características físicas del controlador.

La lectura de la presión actual en la tubería y el control de la velocidad de la bomba 1 se realizaron por medio de señales analógicas de 4-20 mA, por lo que se le agregó un módulo mixto de dos entradas y dos salidas analógicas catálogo 1762-IF2OF2 el cual se muestra en la figura B2.2

El PLC Micrologix 1100 tiene implementado el protocolo DF1 (ver apéndice) y se programa con RSLogix 500, ambos desarrollados por Rockwell Automation.

- **Variador de frecuencia**

El variador de frecuencia seleccionado es un PowerFlex400 de Marca Allen Bradley, configurado para las especificaciones de potencia requeridas. El catálogo es 22C-B049A103, cuyo significado se amplía a continuación:

1-3	4	5	6-8	9	10	11	12
22C	-	B	049	A	1	0	3
Drive	Dash	Voltage Rating	Rating	Enclosure	HIM	Emission Class	Comm Slot
PowerFlex400		240VAC 3 ph	49 A. 15 HP	PanelMount	Fixed keypad	Not Filtered	RS-485

Este variador de frecuencia se seleccionó para satisfacer los requerimientos de la bomba centrífuga, cuya alimentación es trifásica a 240VAC y con una potencia 11kW.

La figura B6.1 de los anexos, contiene un diagrama del cableado de control del variador.

Este variador fue programado y cableado con los parámetros requeridos para realizar las siguientes funciones:

Se programó para operar de dos modos, manual y remoto seleccionables por medio de un selector de giro ubicado en el exterior del panel. En modo manual el encendido y el apagado se controlan desde dos botones en el exterior del panel, mientras que la referencia de la velocidad se ingresa desde el teclado del variador. En modo remoto el encendido y el apagado se controlan desde el PLC.

La entrada analógica 1 se programó para recibir una señal de 4-20 mA y también como referencia de velocidad cuando el variador se encontraba en control remoto. De este modo, en el modo remoto el PLC tiene pleno control del variador de frecuencia.

El relés de salida 1 se programó para que se activara cuando el variador suministra energía eléctrica a la bomba. El relé de salida 2 se programó para que se active cuando el variador presente alguna falla.

La frecuencia de alimentación de la bomba, es proporcional a la señal de 4-20mA recibida desde el PLC en modo remoto, o bien, es la frecuencia establecida en el teclado de control en modo manual. Así, dependiendo de la frecuencia de alimentación de la bomba, así será su velocidad, con lo que esta suministrará el flujo y la presión necesarios. El rango de frecuencia de alimentación se encuentra entre 30Hz y 60 Hz, porque en este caso se busca así una mejor eficiencia del sistema.

- **Sensor de presión**

El sensor de presión utilizado fue el Nautilus XMLF-010D2026 de marca Telemecanique, su rango de medición incluye el rango de presiones establecidas para el sistema y viene provisto de una salida de 4-20mA proporcional al rango de presión, la cual es una señal estándar industrial, factible de interpretar por el PLC. La presión del sistema se midió en la tubería de suministro de agua aproximadamente 4 m después del sistema de bombas. En la figura 5.2 se muestra el sensor de presión utilizado.



Figura 5.2. Sensor de presión Nautilus XMLF-010D2026. [12]

Tabla 5.1. Sensor de presión Nautilus XMLF-010D2026.

Característica	Descripción
Rango de Presión	0-10 kg/cm ²
Conexión eléctrica	DC
Salida	4-20 mA
Conexión de fluido	1/4 " NPTF (6,1mm)
Display	4 dígitos. Indica código de programación, parámetros o presión medida
LED 1	indicador de la unidad de presión seleccionada (Bar o PSI)
LED 2	Indicador del estado del interruptor de presión
Protección	Resistencia a sobrepresiones
Memoria	Memorización de los picos de presión

- **Relé de control de nivel**

Como medida de protección se utilizó un relé de control de nivel para detener el sistema de presión constante en caso de que el tanque de captación se encontrara vacío, para evitar que el sistema trabaje en vacío y esto cause que se derroche energía eléctrica. El relé utilizado fue el RM4L-G01F de marca Telemecanique. En la sección de anexos se muestra un diagrama con las conexiones de los electrodos y una imagen del relé.

- **Monitor de fase**

Como otra medida de seguridad se utilizó un monitor de fase que tiene como función detectar las siguientes fallas:

- Pérdida y desbalance en fase (asimetría)
- Inversión de fase (secuencia)
- Protección contra bajo y alta tensión.

El monitor de fase utilizado fue el RM4-TA01 de marca Telemecanique. En la figura B4.1 de los anexos, se muestra una imagen del monitor de fase y su conexión típica.

Cuando se presenta alguna de las fallas anteriormente mencionadas se abren los contactos del monitor de fase y se deshabilitan los equipos controlados, a la vez se despliega una advertencia en el panel de operador.

- **Panel de operador**

Para que el operador del sistema pueda tener el control de la presión se instaló un panel de operador o HMI con el fin de generar una interfaz gráfica en la que pueda ingresar los datos de referencia y visualizar el estado del sistema. Se seleccionó un PanelView 300 Micro de Allen Bradley, catálogo 2711-M3A18L1, debido a que este presenta las características para el control requerido con un costo no tan elevado.

Este panel de operador se comunica por el puerto de comunicación RS-232 por medio del protocolo de comunicación cerrado DF1, desarrollado por Rockwell Automation exclusivamente para sus productos. Este protocolo de comunicación también está implementado en el PLC utilizado, por lo cual para lograr la comunicación entre el PLC y el HMI se necesita configurar los puertos por utilizar, con los mismos parámetros. El PanelView 300 Micro se programa con el software PanelBuilder32 de Rockwell Automation.

En las figuras B5.1 y B5.2 se presenta un diagrama del PanelView 300 Micro y el esquema de pines del cable utilizado respectivamente

En el apéndice se puede observar una fotografía de la puerta del gabinete de control, en la que se muestra el montaje del panel de operador utilizado. Además, se señalan el selector de giro de modo de operación (manual, remoto o fuera de operación), las luces indicadoras del estado de las bombas y los botones de encendido/apagado manual.

5.3 Descripción del software

La programación del sistema de control de presión se puede dividir en dos partes, la primera de ellas es la lógica de control ejecutada por el controlador lógico programable, la cual se desarrolló en el programa RSLogix 500 de Rockwell Automation. Este software es de programación en escalera. Por otro lado, está la interfaz entre el usuario y el PLC, que se programó con el PanelBuilder32, también de Rockwell Automation. Este programa presenta un entorno gráfico en el que se construyen los elementos que controlarán el sistema presentado en una pantalla LCD.

5.3.1 Programación del controlador lógico programable.

Como se mencionó anteriormente, el PLC Micrologix 1100 se programa en RSLogix500, la cual es una programación tipo escalera. En la figura 5.3 se presenta el entorno de programación de este software.

Como se observa en la figura citada, en la sección izquierda se tiene un explorador del proyecto. En la sección de configuración de hardware se establecen las características físicas del PLC por utilizar, como por ejemplo el tipo de procesador utilizado, los módulos de entradas y salidas agregados, la configuración de estos y los protocolos de comunicación utilizados por el PLC. En la sección de subrutinas se presentan los programas en escalera desarrollados para el control del sistema, los que son invocados desde la subrutina principal de acuerdo a su secuencia de ejecución. Las tablas de datos almacenan la información utilizada en el procesamiento de cada programa.

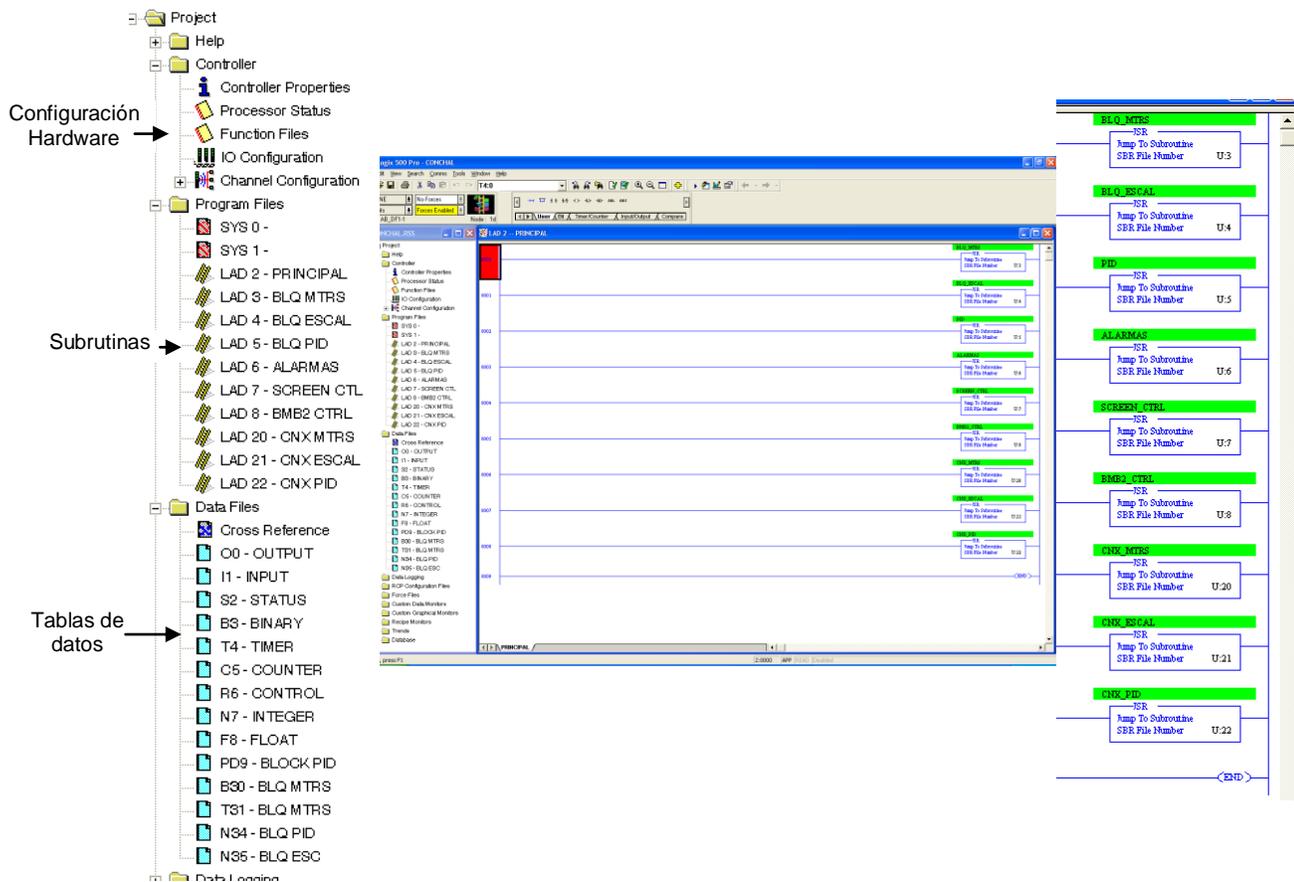


Figura 5.3. Entorno de programación RSLogix500

El programa RSLogix500 presenta un entorno gráfico para la configuración del hardware, en la figura A4.1 de los apéndices se presenta la ventana de las propiedades del controlador por medio de la cual se configuró el PLC por utilizar, en este caso un Micrologix1100 y el protocolo DF1 asignándose el nodo de comunicación al procesador (Nodo 1).

El PLC Micrologix1100 se puede expandir con cuatro módulos adicionales más. Por las características del sistema a controlar se le agregó solamente un módulo mixto de dos entradas y dos salidas analógicas, tal y como se puede observar en la figura A4.2 en el apéndice. Estas entradas y salidas analógicas se configuraron en un rango de entrada de 4 a 20 mA establecido para recibir la señal de presión del sensor colocado en la tubería y enviar la señal de control de frecuencia al variador.

A continuación se presentan los diagramas de flujo en los que se describen las principales lógicas de control creadas en las diferentes subrutinas del programa, que permiten controlar la presión del sistema. En la figura 5.4 se presenta el diagrama de flujo del control de encendido y apagado de cada bomba centrífuga. Para cada una de las bombas, se programó un bloque de encendido/apagado individualmente.

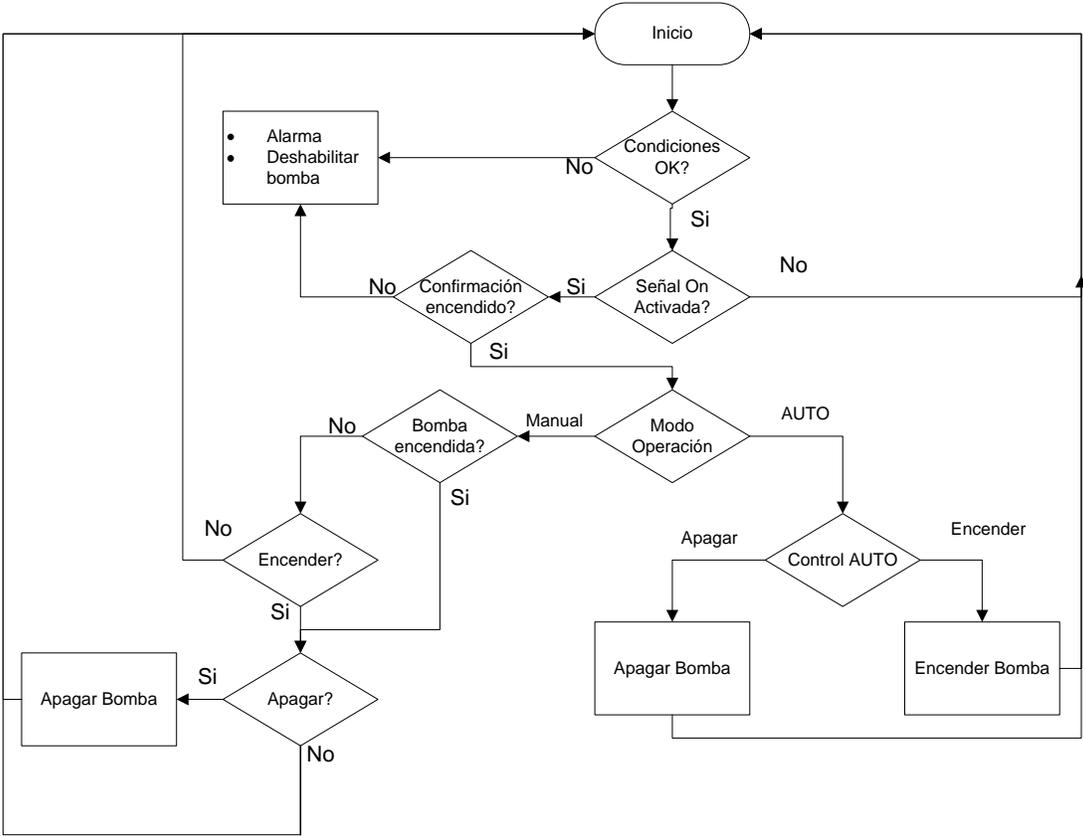


Figura 5.4. Diagrama de flujo del control de encendido/apagado de cada bomba.

Condiciones “OK”. Son condiciones que se evalúan en el programa como una protección del sistema controlado. Entre las condiciones evaluadas están:

- Nivel bajo. Si el relé de control de nivel detecta que el nivel de agua del tanque de captación se encuentra por debajo del límite inferior establecido, se envía una señal al PLC, que la utiliza para evaluar esta condición.
- Falla de alimentación. Si el monitor de fase detecta algún error en la alimentación, como pérdida o desbalance de fase, inversión de fase o nivel de voltaje bajo o alto, se envía una señal al PLC para que se evalúe esta condición.
- Sobrecorriente. En el caso de la bomba 1 esta señal es enviada por el variador de frecuencia desde el relé de salida programado para esta función. En la bomba 2, se obtiene del guardamotor. Esta condición se da si por alguna razón se presenta un disparo por sobrecorriente en los equipos de protección señalados para cada bomba.
- Confirmación AUTO. Esta señal es obtenida de la maneta de selección de modo de operación y le indica al PLC si el sistema se encuentra en modo automático.

De presentarse alguna de las condiciones anteriores se enciende una alarma de advertencia en el panel de operador para indicar la falla detectada. Esto no se aplica en el caso de la confirmación AUTO.

Señal “On”. Esta señal se refiere a la salida del PLC que da la indicación de encender la bomba específica.

Confirmación encendido. Esta señal se obtiene del contactor que energiza la bomba, esto para el caso de la bomba 2. Para la bomba 1 esta señal es obtenida del relé de salida programado para esta función.

La secuencia de confirmación tiene como objetivo asegurarse de que realmente se encuentre activada la bomba. En el caso de que se active alguna bomba y no se reciba la confirmación de encendido, se presentará una alarma en el panel de operador y se deshabilitará la bomba respectiva temporalmente.

Modo de operación. Este modo se selecciona desde el panel de operador. En modo AUTO el PLC controla las bombas de acuerdo con la demanda. En modo Manual se encienden o apagan las bombas por medio del panel de operador, y estas siguen siendo controladas por el PLC.

En la figura 5.5 se presenta el diagrama de flujo de la lógica de control de la velocidad de la bomba 1.

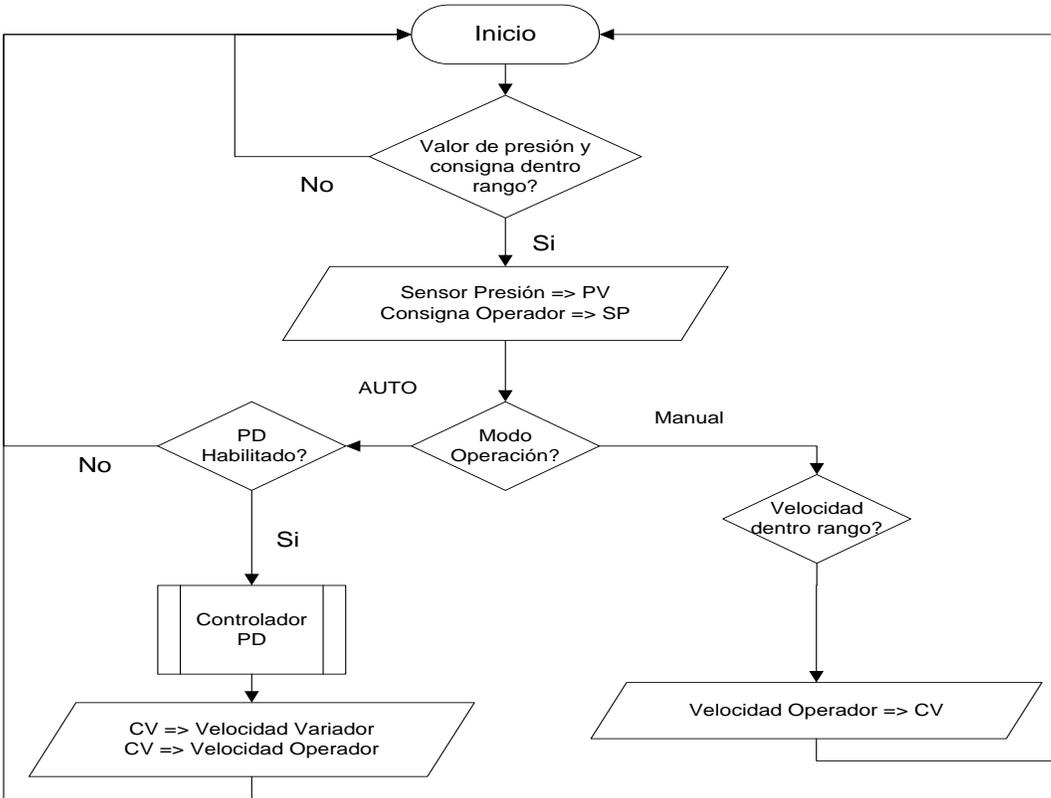


Figura 5.5. Diagrama de flujo del control de velocidad de la bomba 1.

Si la lectura del sensor de presión y la consigna introducida por el operador por medio del panel de operador se encuentran dentro del rango permitido, se asignan estos valores a las variables internas “PV” y “SP” del controlador PD, respectivamente. La verificación del rango permitido se realiza para evitar que se genere una bandera de “Overflow” en el procesador del PLC y que este se vaya a falla, con lo cual se deshabilita el control de los equipos.

El modo de operación se selecciona desde el panel de operador. Si este se encuentra en modo automático y está habilitada la función de PD, el PLC ejecuta el algoritmo del controlador PD de acuerdo con los parámetros previamente cargados y realiza el control de la velocidad de la bomba, con el fin de obtener un valor de presión (PV) igual al de consigna (SP). El “CV” se refiere al valor de control de la velocidad. En modo automático este valor es copiado en la referencia de la velocidad manual introducida por el operador, para que al cambiar el control de automático a manual este se encuentre en el último valor escrito en el modo automático, y mantener así la presión.

En modo manual el operador introduce desde el panel de operador el porcentaje de trabajo al que desea mantener operando la bomba.

En la figura 5.6 se presenta el diagrama de flujo de la lógica de control en modo automático del encendido/apagado de la bomba 2.

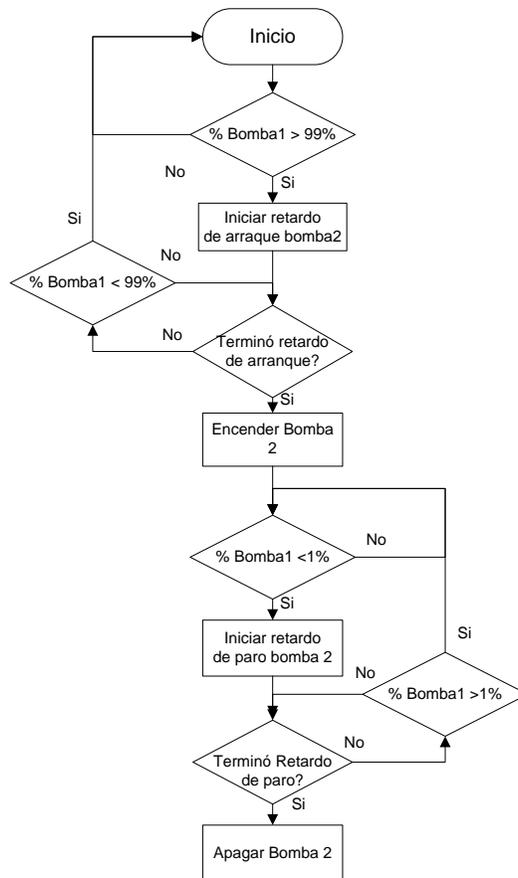


Figura 5.6. Diagrama de flujo del control automático de la bomba 2.

Si el porcentaje de velocidad de la bomba 1 permanece mayor a 99% por un tiempo establecido (configurado por el operador desde el panel) se enciende la bomba 2. Esta permanecerá encendida hasta que el porcentaje de velocidad de la bomba 1 permanezca menor a 1% por el tiempo establecido (configurada por el operador desde el panel), con lo cual se apaga la bomba 2.

5.3.2 Programación del panel de operador.

El panel de operador PanelView 300 Micro se programa en PanelBuilder32, el cual presenta un entorno de programación gráfico. En la figura 5.7 se presenta el entorno de programación de este software.

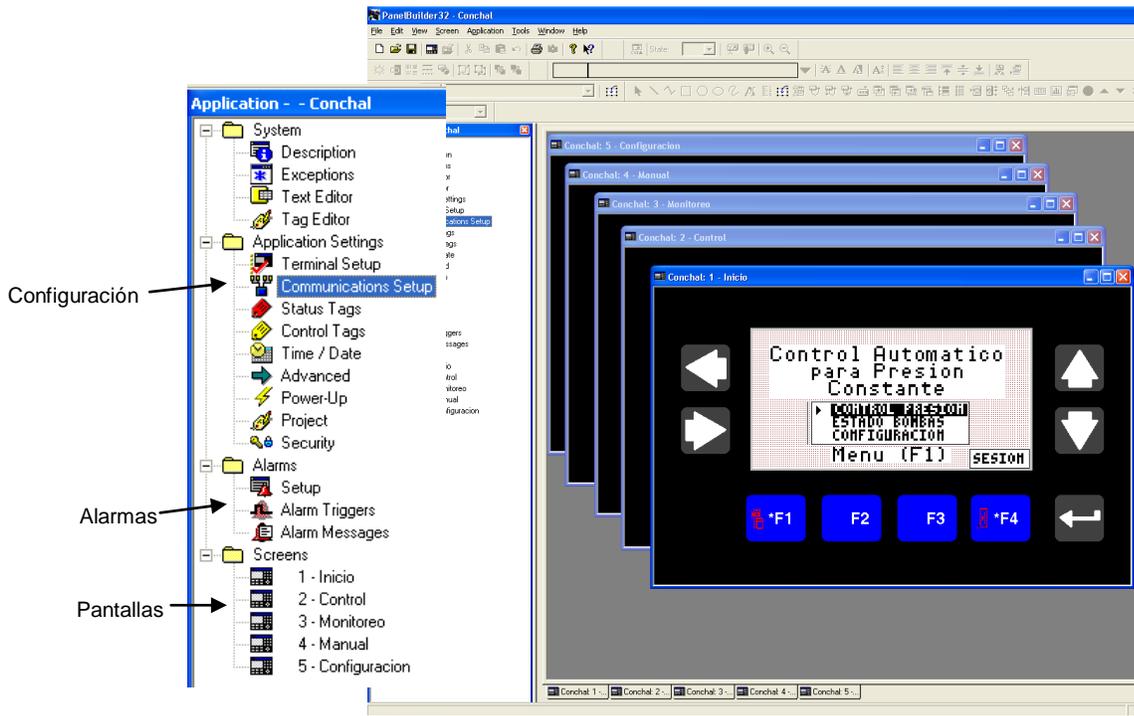


Figura 5.7. Entorno de programación del PanelBuilder32

Como se observa en la figura anterior, en la sección izquierda se tiene un explorador del proyecto. En la sección de configuración se establecen las características físicas del panel por utilizar y de la aplicación por desarrollar por ejemplo el tipo de panel a utilizar, su protocolo de comunicación y la configuración del puerto utilizado. En la sección de alarmas se establecen las alarmas que se desplegarán cada vez que el PLC así lo indique, estas muestran una advertencia cada vez que se active el dato correspondiente en el PLC. En la sección de Pantallas se desarrollan las pantallas que se desplegarán. Estas se construyen por medio de la interfaz gráfica que facilita el software.

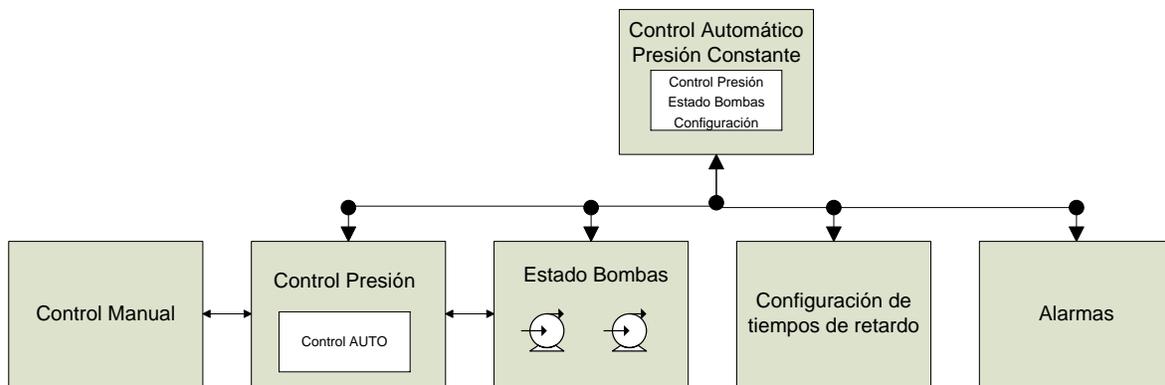
En la sección de apéndices (Figura A4.3) se presenta la configuración del panel donde se seleccionó el PV300 Micro y el protocolo de comunicación DF1. También se establecieron los parámetros del puerto de comunicación. Se creó un nodo con la dirección 2 dentro de una red para un PLC Micrologix.

A continuación se presenta la lista de las alarmas programadas en el panel de operador y una breve descripción.

Tabla 5.2. Lista de alarmas.

Núm.	Mensaje	Causa
1	Tanque con Nivel Bajo	Relé de nivel detectó bajo nivel en tanque
2	Falla en la Tensión de alimentación	Detector de fase detectó falla en la alimentación
3	Falla en el Variador de Frecuencia	Se disparó el variador de frecuencia
4	Error de confirmación en la Bomba 1	El variador no activó la Bomba 1
5	Disparo Térmico Bomba 2	El guardamotor de la bomba 2 se disparó
6	Error de confirmación en la Bomba 2	El contactor de la bomba 2 no se activó

En la figura 5.8 se presenta un diagrama de bloques con las pantallas desarrolladas, donde se muestra hacia cual pantalla se puede navegar.



El sentido de la flecha indica hacia cual pantalla se puede navegar.

Figura 5.8. Diagrama de bloques de pantallas desarrolladas.

Se cuenta con 5 pantallas que se describen brevemente a continuación:

Principal: Contiene el menú principal, desde esta pantalla se puede acceder a las pantallas de Control, Monitoreo y configuración.

Control: Aquí se ingresa el valor deseado de presión, el cual se mantendrá constante en forma automática.

Manual: Se controla el encendido y apagado de las bombas en forma manual, así como la velocidad de la bomba 1.

Monitoreo: Se visualiza el estado de las bombas.

Configuración: Se configuran los retardos para el arranque de la bomba 2 y el porcentaje de trabajo mínimo de la bomba 1, al cual arrancará la bomba 2.

Capítulo VI: Análisis de resultados

En este capítulo se presentan las pantallas desarrolladas para el panel de operador, además los resultados obtenidos de las pruebas efectuadas a la planta, los cuales se muestran por medio de gráficos y tablas. También, se presenta el análisis realizado de estos resultados con el fin de obtener el modelo de la planta y verificar el funcionamiento del compensador implementado.

6.1 Resultados

6.1.1 Pantallas Panel de Operador.

A continuación se presentan las pantallas desarrolladas. En la figura 6.1 se puede apreciar la pantalla del menú principal desde la cual se tiene acceso a las demás pantallas. El botón “Sesión” sirve para iniciar la sesión con privilegios. Esta sesión permite ingresar a la pantalla de configuración.



Figura 6.1. Pantalla principal.

En la figura 6.2 se presenta la pantalla de control automático en la cual el operador podrá ingresar el valor de presión que desea mantener constante en el sistema. Para cambiar al modo de control manual se presiona el botón correspondiente a “Modo”, y esto desplegará la pantalla de la figura 6.3.



Figura 6.2. Pantalla Control Automático.

En la pantalla de control manual se pueden encender y apagar las bombas y establecer el porcentaje de velocidad de la bomba 1. Para cambiar al modo automático se presiona el botón correspondiente a “modo”, desplegándose la pantalla de control automático de la figura 6.2.



Figura 6.3. Pantalla control manual.

En la figura 6.4 se presenta la pantalla de “Monitoreo” desde la cual se puede observar el estado actual de las bombas.



Figura 6.4. Pantalla Monitoreo.

Y por último, se presenta la pantalla de “Configuración” en la figura 6.5, desde la cual se pueden establecer los tiempos de espera y los porcentajes que se deben alcanzar en la velocidad de la bomba 1 para que entre a operar la bomba 2.



Figura 6.5. Pantalla configuración.

6.1.2 Modelado de la planta.

En la figura 6.6 se presenta el gráfico de la respuesta al escalón de la planta a lazo abierto, esta se obtuvo disminuyendo la presión del sistema hasta 2,1 kg/cm² y aplicando un escalón a la señal de velocidad de la bomba hasta llegar a la presión alcanzada. El error en estado estacionario no se muestra ya que la señal aplicada no representa una consigna sino, un escalón a lazo abierto. La línea azul muestra el inicio de la señal aplicada.

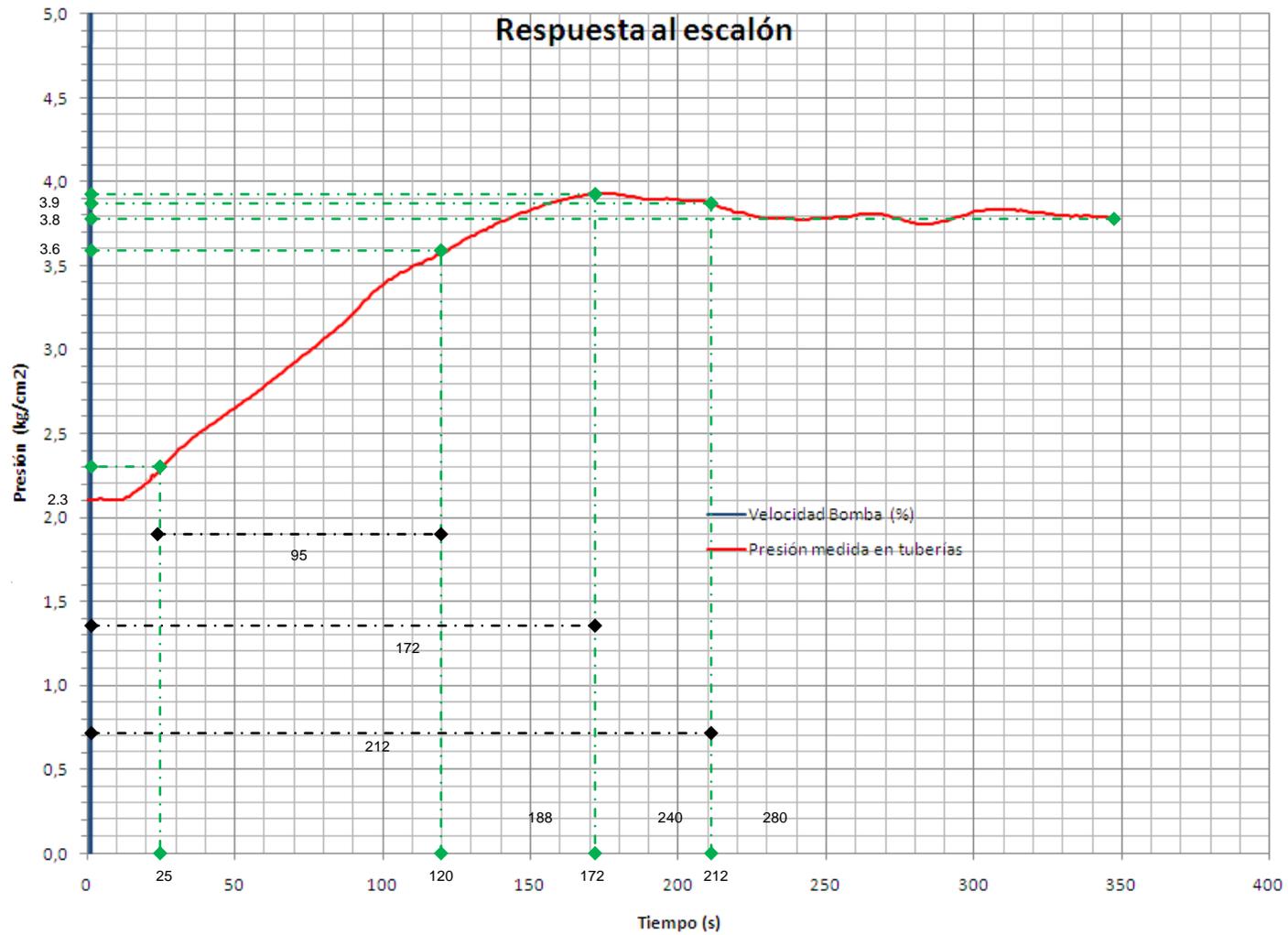


Figura 6.6. Respuesta de la planta a una señal escalón.

Por medio de la tabla 6.1 se muestra el resumen de las especificaciones en el dominio del tiempo de la planta por controlar, las cuales fueron obtenidas a partir de la figura 6.6.

Tabla 6.1. Resumen de especificaciones en el dominio del tiempo.

Especificación en el dominio del tiempo	Valor
Sobrepaso máximo	0.14 kg/cm ²
Valor en estado estable	3.8 kg/cm ²
Porcentaje Sobrepaso máximo	3.5%
Tiempo sobrepaso	172 s
Tiempo de levantamiento	95 s
Tiempo de asentamiento	212 s

Con las especificaciones en el dominio del tiempo de la planta, las cuales se presentan en la tabla 6.1, se procedió a obtener la función de transferencia del sistema con base en la función de transferencia de un sistema prototipo de segundo orden

Siendo $y(t) = \text{Presión (kg/cm}^2\text{) en función del tiempo}$

el sobrepaso máximo M está dado por la ecuación 3.3.1:

$$M = \text{Máx}(y(t)) - \lim_{t \rightarrow \infty}(y(t))$$

Y el porcentaje de sobrepaso máximo está dado por la ecuación 3.3.2:

$$\%M = \frac{M}{\lim_{t \rightarrow \infty}(y(t))} * 100$$

De acuerdo con los datos que se presentan en la tabla 6.1, el valor del sobrepaso máximo fue de 3.93 kg/cm² mientras que el valor de la presión en estado estacionario fue de 3.8 kg/cm² por medio de la ecuación 3.3.2 se obtiene el valor del porcentaje del sobrepaso máximo:

$$\%M = \frac{3.93 \text{ kg/cm}^2 - 3.8 \text{ kg/cm}^2}{3.8 \text{ kg/cm}^2} * 100 \cong 3.5\%$$

En el gráfico de dicha figura se observa que esta empieza en 2.1 kg/cm^2 , por lo que para calcular $\%M$ o porcentaje de sobreimpulso real se les debe restar esta presión inicial para obtener:

$$\%M = \frac{(3.93 - 2.1) \text{ kg/cm}^2 - (3.8 - 2.1) \text{ kg/cm}^2}{(3.8 - 2.1) \text{ kg/cm}^2} * 100 \cong 7.7\%$$

Sustituyendo el valor de M en la ecuación 3.3.18 y despejando el valor de ξ o factor de amortiguamiento relativo se tiene:

$$\xi = \frac{\sqrt{\left(\frac{\ln 0.077}{\pi}\right)^2}}{1 + \left(\frac{\ln 0.077}{\pi}\right)^2} \cong 0.632$$

Una vez obtenido el valor anterior se procede a calcular el valor de la *frecuencia natural no amortiguada* o ω_n . Para esto existen varias aproximaciones en la literatura [6], por lo que su cálculo se basó en el uso de estas aproximaciones para después seleccionar el valor que mejor se ajustara al modelo buscado. Esto dentro del rango de valores que se definió por medio de las aproximaciones utilizadas. Se utilizaron las ecuaciones de los tiempos de levantamiento, de sobrepaso máximo y de asentamiento de las ecuaciones 3.3.21, 3.3.17 y 3.3.22, respectivamente, para el cálculo de la frecuencia natural no amortiguada.

$$\omega_n \cong \frac{1 - 0.4167\xi + 2.917\xi^2}{t_r} \cong 0.0200186 \frac{1}{s}$$

$$\omega_n \cong \frac{\pi}{t_{max} * \sqrt{1 - \xi^2}} \cong 0.0235688 \frac{1}{s}$$

$$\omega_n \cong \frac{3.2}{t_s * \xi} \cong 0.0238727 \frac{1}{s}$$

Después de obtener los valores del factor de amortiguamiento relativo ξ y de la frecuencia natural no amortiguada ω_n para la función de transferencia del sistema prototipo de segundo orden, se graficó su respuesta al escalón con la ayuda del programa MATLAB, y se estableció el valor de ω_n que mejor se ajustó al modelo matemático por determinar dando como resultado $\omega_n = 0.02265 \frac{1}{s}$

Entonces, de acuerdo con la ecuación 3.3.3 se tiene que:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{E(s)} = \frac{\omega_n^2}{s(s + 2\xi\omega_n)}$$

Sustituyendo los valores calculados anteriormente se obtiene el modelo matemático de la planta.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{E(s)} = \frac{0.02265^2}{s(s + 2 \cdot 0.632 \cdot 0.02265)} = \frac{0.000513}{s(s + 0.02863)}$$

Una vez obtenido el modelo matemático se procedió a su validación por medio de la comparación de las especificaciones en el dominio del tiempo de ambas gráficas. En la figura 6.7 se puede observar la respuesta de la simulación a una señal escalón en el dominio del tiempo del modelo matemático obtenido. Con el fin de comparar las características dinámicas del modelo de la planta con respecto a las características de la planta original, se aplicó un escalón de 1.69 kg/cm^2 con una presión inicial de 2.1 kg/cm^2 .

El porcentaje de sobreimpulso en la simulación es calculado sin tomar en cuenta la presión inicial.

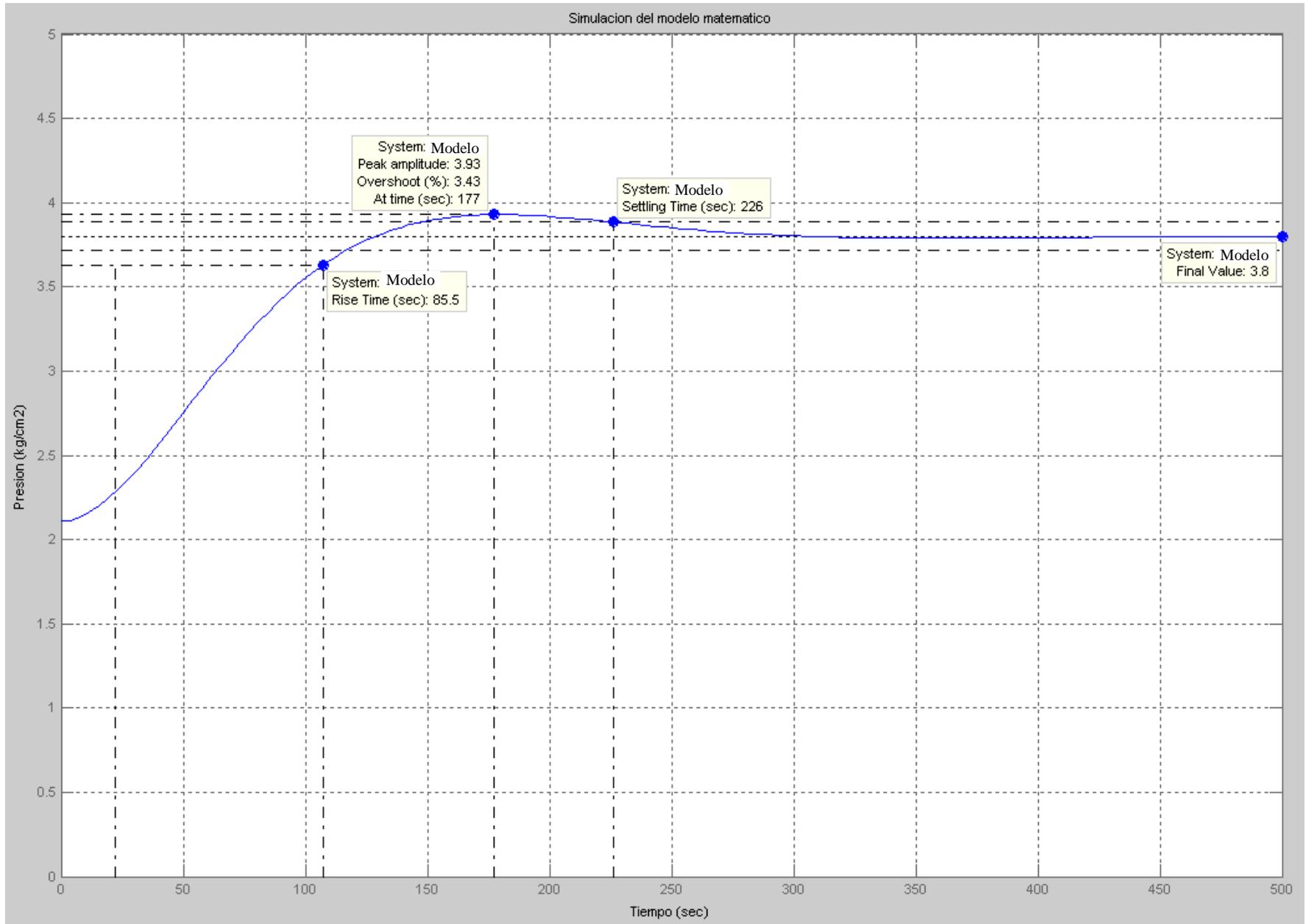


Figura 6.7. Simulación de la respuesta del modelo matemático a una señal escalón.

En la tabla 6.2 se muestra el resumen de las especificaciones en el dominio del tiempo del modelo matemático obtenido anteriormente.

Tabla 6.2. Resumen de especificaciones en el dominio del tiempo del modelo matemático

Especificación en el dominio del tiempo	Valor
Sobrepaso máximo	0.13 kg/cm ²
Valor en estado estable	3.8 kg/cm ²
Porcentaje Sobrepaso máximo	3.43%
Tiempo sobrepaso	177 s
Tiempo de levantamiento	85.5 s
Tiempo de asentamiento	226 s

6.1.3 Diseño del controlador

Por medio de la herramienta SISOTOOL del programa MATLAB se construyó el gráfico del lugar geométrico de las raíces del modelo de la planta a lazo cerrado, y se obtuvo así el gráfico de la figura 6.8.

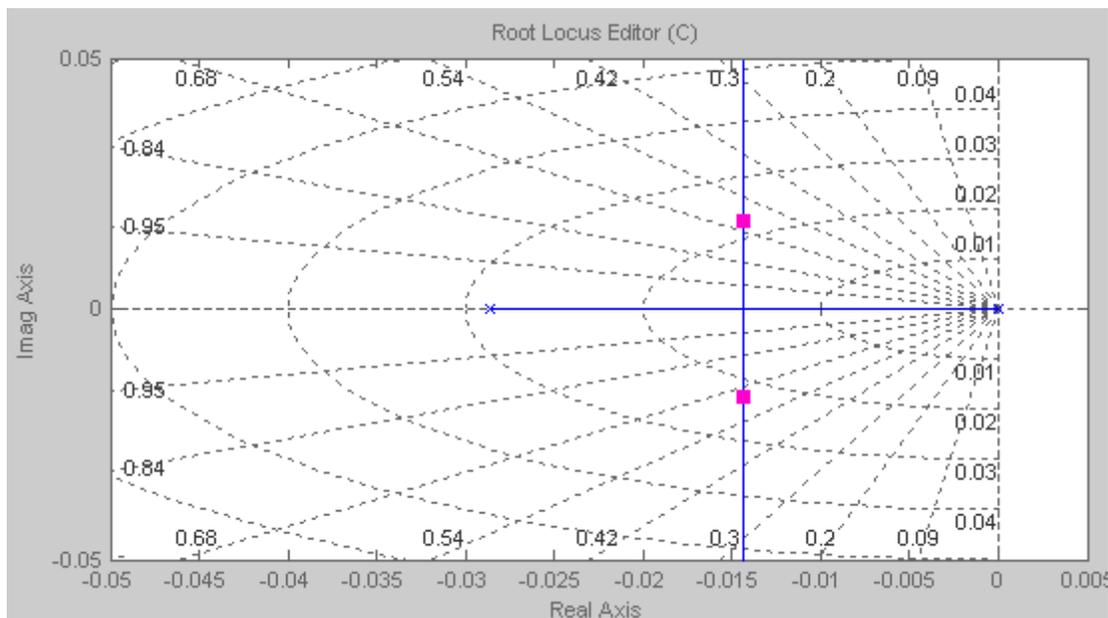


Figura 6.8. Lugar geométrico de las raíces.

Con base en el comportamiento real de la planta se observó que esta presentaba un sobreimpulso de 3.5% y un tiempo de asentamiento de 212 s. Por lo que se predispuso mejorar sus características dinámicas, con lo cual se determinaron los siguientes requerimientos de la respuesta del sistema compensado:

- $\%M \leq 1\%$
- $t_{s5\%} \leq 70s$

De acuerdo a la figura 3.7 y a la ecuación 3.3.12, se puede observar que el factor de amortiguamiento relativo ξ es igual al coseno del ángulo entre la línea radial de las raíces de la ecuación característica y el eje negativo, esto cuando las raíces se encuentran en el semiplano izquierdo del plano s . Entonces por medio de la ecuación 3.3.19, que relaciona el porcentaje de sobreimpulso $\%M$ con el factor de amortiguamiento relativo ξ , se calcula el valor de ξ necesario para cumplir con un sobreimpulso menor al 1% establecido y con este se calcula el ángulo que se debe satisfacer en el lugar geométrico de las raíces. El ángulo calculado fue $\theta \leq 34^\circ$.

En la misma figura 3.7, se aprecia que el valor real de las raíces está dado por el factor de amortiguamiento α que de acuerdo a la ecuación 3.3.9 es igual a $\xi\omega_n$. Entonces por medio de la ecuación 3.3.22 que relaciona α con el tiempo de asentamiento t_s , se calcula el valor real de las raíces para satisfacer la condición dada. El valor calculado fue $\text{Re}\{S1\} \leq -0.045$.

Con la herramienta de MATLAB (SISOTOOL) se indicó en el gráfico del lugar geométrico de las raíces la región donde se cumplen las nuevas especificaciones en el dominio del tiempo, lo cual se muestra en la figura 6.9.

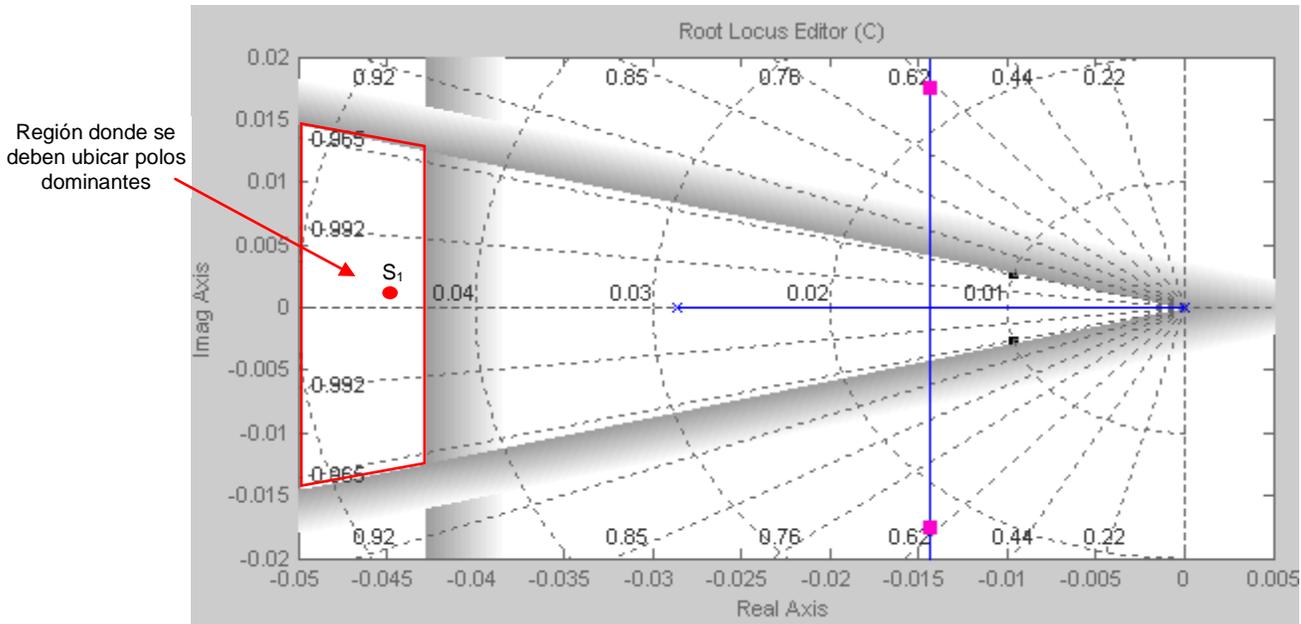


Figura 6.9. Región donde se cumplen las nuevas especificaciones.

De acuerdo a los cálculos realizados y la región enmarcada se seleccionó el punto $s_1 = -0.045 + j0.001$ para ubicar los polos dominantes por medio de un controlador PD, siendo este el punto de operación deseado.

Sabiendo que la función de transferencia del controlador PD está dada por la ecuación 3.2.7

$$G_{PD} = K_P(1 + T_D \cdot s)$$

Se procede a calcular la ubicación del cero a introducir por medio de las condiciones de ángulo dadas en la ecuación 3.3.29:

$$\angle G_1(s_1) = 180^\circ$$

Se calculó el ángulo por introducir para ubicar los polos dominantes en el punto s_1 .

$$\angle G_1(s_1) = \angle \frac{0.000513}{s(s+0.02863)} \Big|_{s=s_1} = 175.23^\circ$$

Luego se calculó la ubicación del cero que me introduce este ángulo a la planta

$$z_o = \text{Re} \{s_1\} - \frac{\text{Im} \{s_1\}}{\tan(180^\circ - \angle\theta)} = 0.03301$$

Una vez calculada la ubicación del cero se procedió a calcular la ganancia K_p que finalmente ubica los polos dominantes en el punto deseado, esto por medio de la condición de magnitud de la ecuación 3.3.28.

$$|G(s)(s + 0.03301)|_{s=s_1} = \frac{1}{|k_p|}$$

Eso dio como resultado $k_p = 119.63$

Después de calcular los valores del compensador se ingresa a la herramienta SISOTOOL para comprobar que los polos dominantes estén ubicados en el punto seleccionado, lo cual se muestra en la figura 6.10

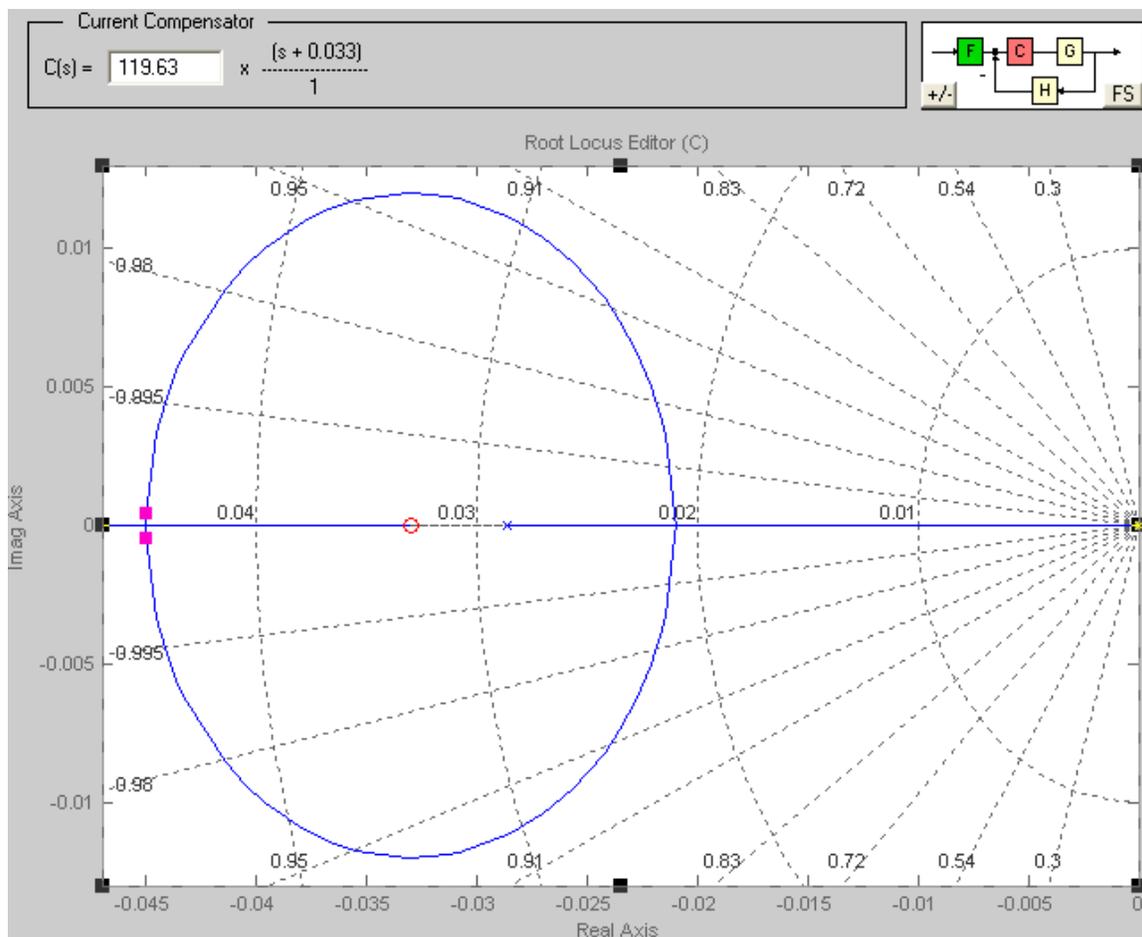


Figura 6.10. Lugar geométrico de la raíces del sistema compensado.

En la figura 6.11 se muestra la simulación de la respuesta en el dominio del tiempo del sistema compensado.

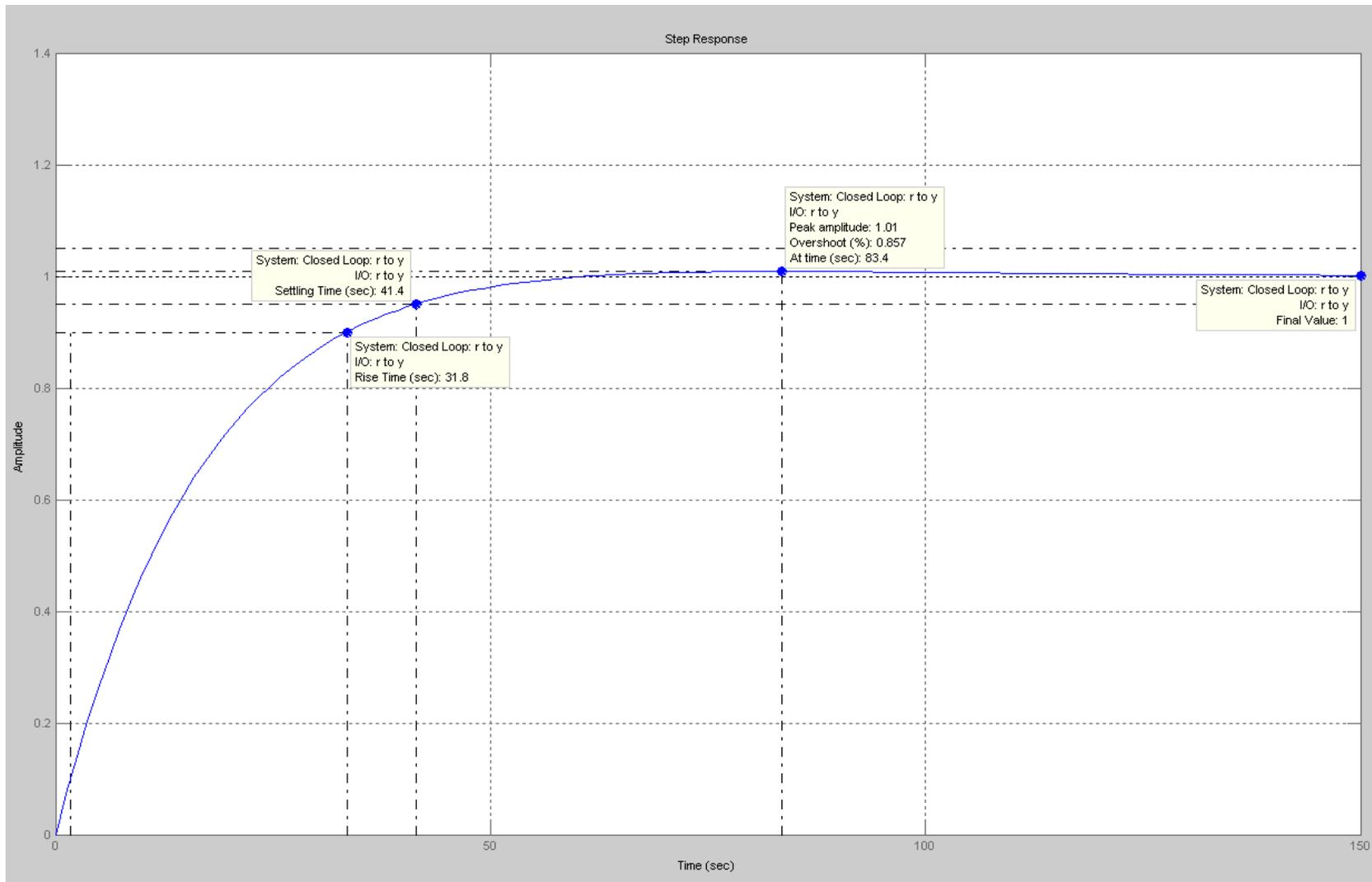


Figura 6.11 Simulación de la respuesta a una señal escalón del sistema compensado.

Una vez confirmado el funcionamiento del compensador se procede a obtener los parámetros del controlador PD.

$$G_{PD} = K_p(1 + T_D \cdot s) = 119.63 \cdot (s + 0.03301)$$

Reacomodando la expresión se tiene:

$$G_{PD} = K_p(1 + T_D \cdot s) = 3.95 \cdot (1 + 30.29s)$$

con lo cual se obtienen los valores de los parámetros del compensador PD.

$$K_p = 3.95$$

$$T_D = 30.29$$

Con el controlador diseñado e implementado se procede a validar su funcionamiento por medio de la respuesta a una entrada escalón del sistema real. Este se muestra en la figura 6.12. En la gráfica se presenta la señal de control del controlador, el cual está representado en porcentaje, valor de presión consignado al que se debe llegar, y la lectura de la presión obtenida en la tubería.

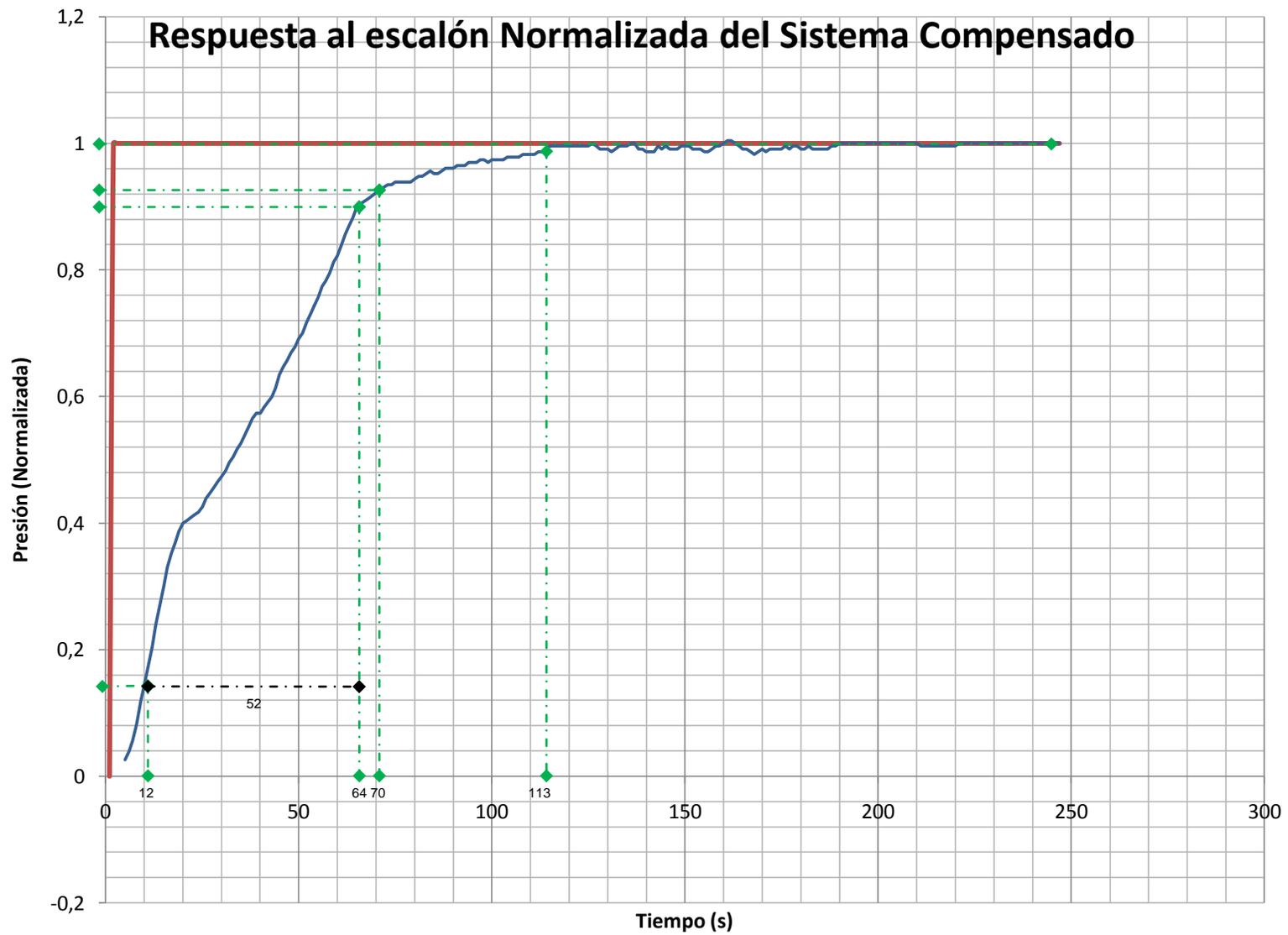


Figura 6.12 Respuesta a una señal escalón del sistema compensado (Normalizado).

Por medio de la tabla 6.3 se muestra el resumen de las especificaciones en el dominio del tiempo de la planta con el controlador implementado, estas fueron obtenidas a partir de la figura 6.12.

Tabla 6.3. Resumen de especificaciones en el dominio del tiempo de la planta con el controlador implementado.

Especificación en el dominio del tiempo	Valor
Sobrepaso máximo	0 kg/cm ²
Valor en estado estable	4.9 kg/cm ²
Porcentaje Sobrepaso máximo	0 %
Tiempo sobrepaso	113 s
Tiempo de levantamiento	52 s
Tiempo de asentamiento	70 s

6.2 Análisis.

En la tabla 6.4 se presenta una comparación entre los valores de la planta real y los valores del modelo matemático desarrollado, con el fin de validar el modelo. Estos valores se tomaron de las tablas 6.1 y 6.2 respectivamente.

Tabla 6.4. Comparación de especificaciones en el dominio del tiempo de la planta por utilizar y el modelo matemático obtenido.

Especificación	Valor real	Valor modelo	% Error (%)
Sobrepaso máximo	0.14 kg/cm ²	0.13 kg/cm ²	7
Porcentaje Sobrepaso máximo	3.5%	3.4%	3
Tiempo sobrepaso	172 s	177 s	3
Tiempo de levantamiento	95 s	85.5 s	10
Tiempo de asentamiento	212 s	226 s	7

De conformidad con la tabla anterior se puede apreciar que los porcentajes de error de las especificaciones en el modelo matemático desarrollado y la planta real se encuentran entre los valores establecidos en los objetivos del proyecto donde se determinó obtener un 90% de similitud entre el modelo matemático y la planta real, logrando así validar el modelo desarrollado.

En la tabla 6.3 se tienen las especificaciones en el dominio del tiempo de la planta con el controlador implementado, como se puede observar el porcentaje de sobreimpulso es 0% y el tiempo de asentamiento es de 70s. Con esto se logra cumplir con los requerimientos del sistema compensado establecidos en la etapa del diseño del controlador.

A continuación se presenta una comparación entre los valores de la planta real y los valores del sistema compensado. Estos valores se tomaron de las tablas 6.1 y 6.3 respectivamente.

Tabla 6.5. Comparación de especificaciones en el dominio del tiempo de la planta real y de la planta con el compensador implementado.

Especificación	Sin compensador	Compensado
Porcentaje Sobrepasso máximo	3.5%	0%
Tiempo sobrepasso	172 s	113 s
Tiempo de levantamiento	95 s	52 s
Tiempo de asentamiento	212 s	70 s

Observando los datos de la tabla 6.5 se tiene que el compensador mejora notablemente las características dinámicas del sistema controlado ya que logra un sistema con una respuesta más rápida que el anterior y logra obtener un sistema estable. Con esto se logra cumplir con los objetivos planteados y darle solución al problema presentado.

Tabla 6.6. Comparación de especificaciones en el dominio del tiempo de la simulación de la planta compensada y de la planta real con el compensador implementado.

Especificación	Simulación	Planta Real
Porcentaje Sobrepasso máximo	1%	0%
Tiempo sobrepasso	84s	113 s
Tiempo de levantamiento	32s	52 s
Tiempo de asentamiento	42s	70 s

Se observa en la tabla 6.6 que la respuesta de la planta real con el compensador implementado es más lenta que lo esperado, sin embargo el comportamiento de este se ajusta a las especificaciones diseñadas. La diferencia en los tiempos se debe a las limitaciones de respuesta de la planta real.

Capítulo VII: Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

- Se logró implementar el sistema de control automático que permite mantener la presión del agua de forma constante, en relación con el valor ingresado como consigna.
- Por medio del controlador PD se disminuyeron los tiempos de respuesta y el sobreimpulso del sistema hidráulico logrando un sistema más eficaz.
- La planta real con el controlador implementado tuvo una respuesta más lenta de lo esperado debido a su capacidad de respuesta.

7.2 Recomendaciones

- Se recomienda el uso de dispositivos de paro de emergencia para detener el sistema en forma inmediata. Esto como seguridad tanto de equipos como del personal ante posibles fallas del control automático.
- Se recomienda realizar una alternancia de bombas dependiendo de las horas de uso, semanal o temporizado, ya que actualmente existe una bomba que se utilizará más que la otra. Esto ayuda a que el desgaste físico sea similar en ambas bombas y reduce la frecuencia del mantenimiento preventivo de las máquinas evitando una continua detención del sistema.
- Se recomienda la medición de la señal de presión del sistema, en el instante en que la bomba 2 entra en operación mientras se regula la velocidad de la bomba 1, para descartar una posible sobrepresión en las tuberías.

Bibliografía

1. Cornell “**Bombas Industriales**”
<http://www.marienco.com/doc/nuevos/Catalogo%20de%20Productos%20%20Bombas%20Centrifugas%20Industriales.pdf> [En Línea].
2. Cornell “**Clear Liquid -- Literature**”
<http://www.cornellpump.com/industrial/clearliterature.htm> [En Línea].
3. Elgueta Díaz, Cristian Marcelo. “**Aplicación de un Inversor Multinivel como Variador de Frecuencia de un Motor de Inducción Trifásico**”
www.ing.puc.cl/power/paperspdf/dixon/tesis/Elgueta.pdf [En Línea]
4. Fernández Díez, Pedro. “**Ingeniería Energética**”
<http://personales.ya.com/universal/TermoWeb/index.html> [En Línea].
5. Interiano E. “**Control Automático**”
<http://www.ie.itcr.ac.cr/einteriano/control2/> [En Línea].
6. Kuo, Benjamín C. **Sistemas de control automático**. 5ª Ed. México, Prentice-HALL HISPANOAMERICANA , 1996.
7. Ortiz León, G. “**Control Automático**”
http://www.ie.itcr.ac.cr/gaby/Licenciatura/Control_Automatgico/Presentaciones/ [En Línea].
8. Resnick/Halliday/Krane **Física Volume 1**, 5ª Ed. México, Grupo Patria Cultural, 2003, México
9. Rockwell Automation. “**Literature Library** ”
http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/public/documents/webassets/browse_category.hcst [En Línea].
 - a. Pub. No. 1763-UM001B-EN-P Micrologix 1100 User Manual.
 - b. Pub. No. 1763-RM001B-EN-P Micrologix 1100 Instruction Set.
 - c. Pub. No. 22C-UM001E-EN-P PowerFlex 400 User Manual.
 - d. Pub. No. 1762-IN005A-US-P Micrologix Analog Input/Output Module
 - e. Pub. No. 41061-156-01(A) PanelView 300 Micro Instal. Instructions
 - f. Pub. No. 2711-6.0 PanelBuilder Software User Manual.
10. Schneider Electric “**RM4L... Liquid level control relays**”
<http://www.download.schneider-electric.com/C1257307002C054E/All/754D4EB6D62FAE75C1257322006088B6?Opendocument> [En Línea].

11. Schneider Electric “**RM4T...Control relays**”
<http://www.download.schneider-electric.com/C1257307002C054E/All/6D88EC1D33EC0595C125732200608794?Opendocument> [En Línea].
12. Schneider Electric “**Nautilus Electronic Pressure Sensors**”
<http://www.schneider-electric.com/corporate/en/support/automation-and-control-library/download/download-documents-iframe.page?URL=http://www.download.schneider-electric.com/RepositorySchneider/Index.nsf/DisplayProductDocumentation%3FOpenAgent%26L=EN%26App=Schneider%26p=522%26c=43,201,203,204,304> [En Línea].
13. Simon. **Hidráulica básica**, 2ª Ed. Limusa, 1993.
14. Streeter/Wylie. **Mecánica de los Fluidos**, 8ª Ed. Mcgraw-Hill 1995.
15. Zubicavay, M. y Álvarez, J. **Bombas. Teoría, diseño y aplicaciones** 3ª Ed. Limusa, 2003.

Apéndices

A.1 Glosario, abreviaturas y simbología

Glosario

Bomba Centrífuga: Máquina hidráulica que transforma la energía mecánica de un impulsor rotatorio llamado rodete en energía cinética y potencial requeridas

DF1: Protocolo de comunicación serial desarrollado por Rockwell Automation para comunicación entre equipos de su marca.

Electrodo: Conductor utilizado para hacer contacto con una parte *no metálica* de un circuito.

Flujo: Cantidad de fluido por unidad de tiempo desplazándose por una tubería.

Grifo: Llave que permite la salida o la interrupción del paso de un líquido contenido en un depósito.

Presión: Magnitud física que mide la fuerza por unidad de superficie, y sirve para caracterizar como se aplica una determinada fuerza resultante sobre una superficie.

Relé: Dispositivo electromecánico, que funciona como un interruptor controlado por un circuito eléctrico en el que, por medio de un electroimán, se acciona un juego de uno o varios contactos que permiten abrir o cerrar otros circuitos eléctricos independientes.

RS-232: Protocolo de comunicación para el intercambio serie de datos binarios.

Variador de frecuencia: (AFD *Adjustable Frequency Drive*) es un sistema para el control de la velocidad rotacional de un motor de corriente alterna (AC) por medio del control de la frecuencia de alimentación suministrada al motor.

Abreviaturas

HMI: Interfaz Humano-Máquina por sus siglas en inglés (*Human-Machine Interface*).

LED: Diodo emisor de luz (acrónimo del inglés de *Light-Emitting Diode*) es un dispositivo semiconductor que emite luz cuando circula por él una corriente eléctrica en el sentido establecido.

MATLAB: *MA*Trix *LAB*oratory, "laboratorio de matrices" es un software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Entre las funciones están: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware.

PD: Proporcional-Derivativo.

PID: Proporcional - Integrativo - Derivativo.

PLC: Controlador Lógico Programable (acrónimo del inglés de Programmable Logic Controller).

SCADA: Control, supervisión y adquisición de datos (acrónimo del inglés de Supervisory Control and Data Acquisition)

Simbología

CV: Nombre de la variable interna del PLC que controla señal de velocidad enviada al Variador de Frecuencia.

I/O: Simbología utilizada para hacer referencia a las Entradas y Salidas del PLC.

LAD: Simbología que se le da a las subrutinas del lenguaje de programación en escalera para las aplicaciones de Rockwell Automation.

M: Sobrepasomáximo.

PV: Nombre de la variable interna del PLC que recibe la lectura sensor de presión.

SP: Nombre de la variable interna del PLC que recibe el valor consigna por parte del panel de operador.

t_d : Tiempo de retardo.

t_r : Tiempo de levantamiento.

t_s : Tiempo de asentamiento.

α : Factor de amortiguamiento o constante de amortiguamiento.

ω_n : Frecuencia natural no amortiguada.

ξ : Factor de amortiguamiento relativo.

Con respecto a un motor trifásico de inducción tenemos:

R_r : Resistencia rotórica

R_e : Resistencia del estator

L_{eq} : Inductancia equivalente del rotor y el estator vista desde las terminales del estator

s : Deslizamiento,

p : Número de polos,

ω_{red} : Frecuencia angular de alimentación

ω_s : Velocidad angular sincrónica

ω_r : Velocidad mecánica del rotor.

E_e : Voltaje inducido en el estator

F_f : Factor de forma

f_s : Frecuencia de las corrientes en el estator

N_e : Número de vueltas de los enrollados

ϕ : Flujo total en el entrehierro

ζ : Factor de bobinado.

A.2 Información sobre la empresa/institución

A.2.1 Descripción de la empresa

AASA es una de las cuatro empresas que forman parte de “Grupo GD de Costa Rica” el cual inició operaciones en el país en 1990, con la fundación de GD Ingeniería Eléctrica S.A. por parte del Ing. Giuseppe Daniele. Las cuatro empresas que conforman el Grupo GD de Costa Rica están especializadas en diversas ramas de la Ingeniería Eléctrica y de la automatización, estas son:

- GD Ingeniería Eléctrica S.A.
- AASA, Automatización Avanzada S.A.
- CODIEL, Consultoría y Diseño Eléctrico S.A.
- IMESA, Ingeniería y Materiales Eléctricos S.A.

Por su parte, AASA específicamente se desarrolla en el área de la automatización de los procesos industriales para los diferentes tipos de Industria, cubriendo necesidades de integración de sistemas, control e información, según sea necesario.

A.2.2 Descripción del departamento o sección en la que se realizó el proyecto

El proyecto se realizó en el “Departamento de Desarrollo de Proyectos”. Este departamento es el encargado de desarrollar e implementar los proyectos una vez que son aprobados por el departamento de ventas. Los proyectos son asignados y transferidos a un Ingeniero de proyectos el cual se encarga de la realización del mismo. Este departamento está compuesto por tres Ingenieros y un Coordinador de proyectos. Entre las etapas comunes en el manejo del proyecto se encuentran las siguientes:

- Selección y compra de los equipos a utilizar.
- Elaboración de los diagramas de conexión.
- Cableado y Ensamble de los gabinetes de control.
- Pruebas al gabinete de control en el taller local.
- Diseño y programación de la lógica de control.
- Diseño y programación de la interfaz de usuario.
- Simulación de los programas de control.
- Instalación del gabinete de control.
- Comisionamiento de señales de control.
- Puesta en marcha y pruebas de funcionamiento.

A.3 Fotografías del gabinete de control.

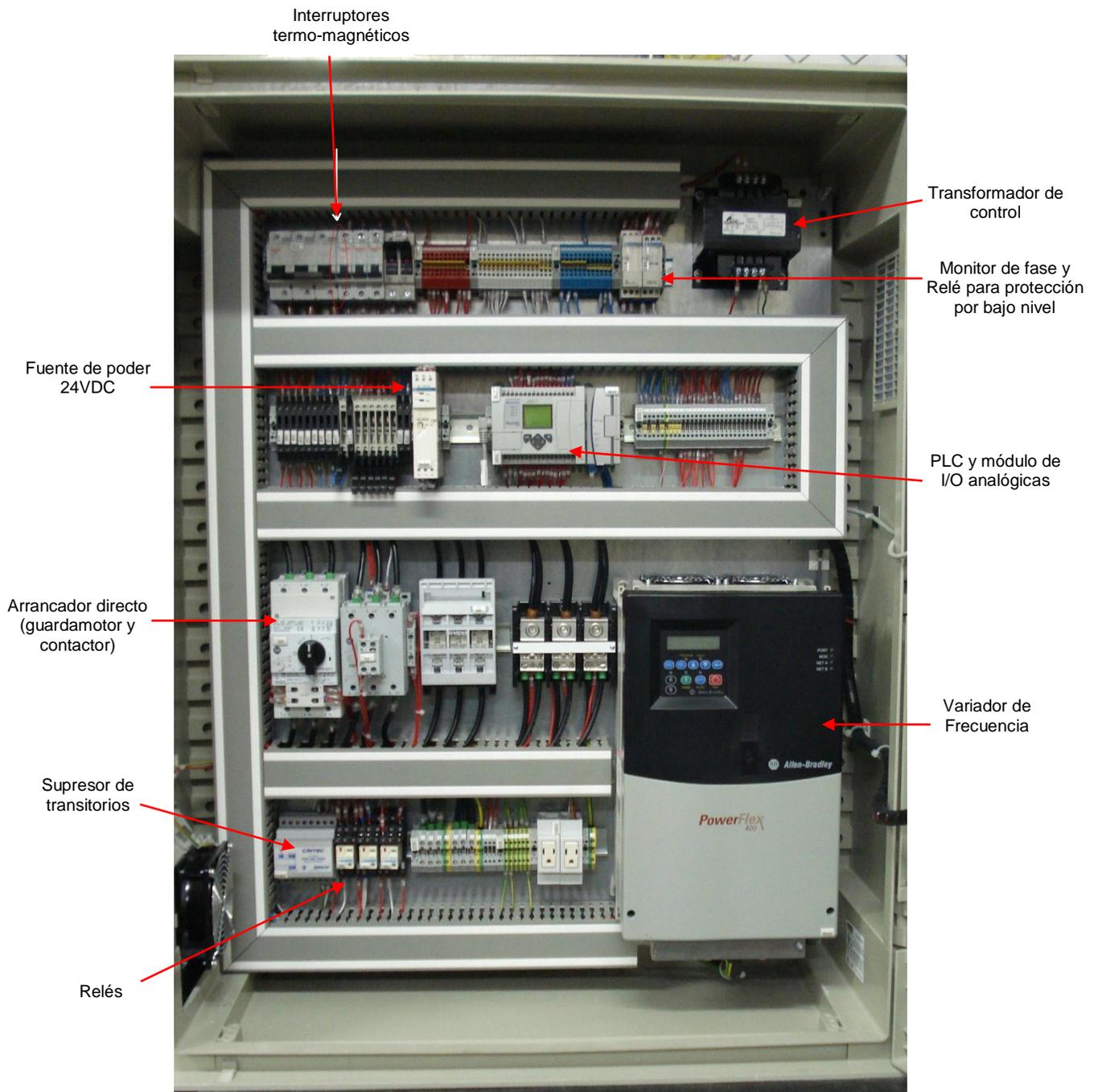


Figura A3.1. Gabinete con equipos de control

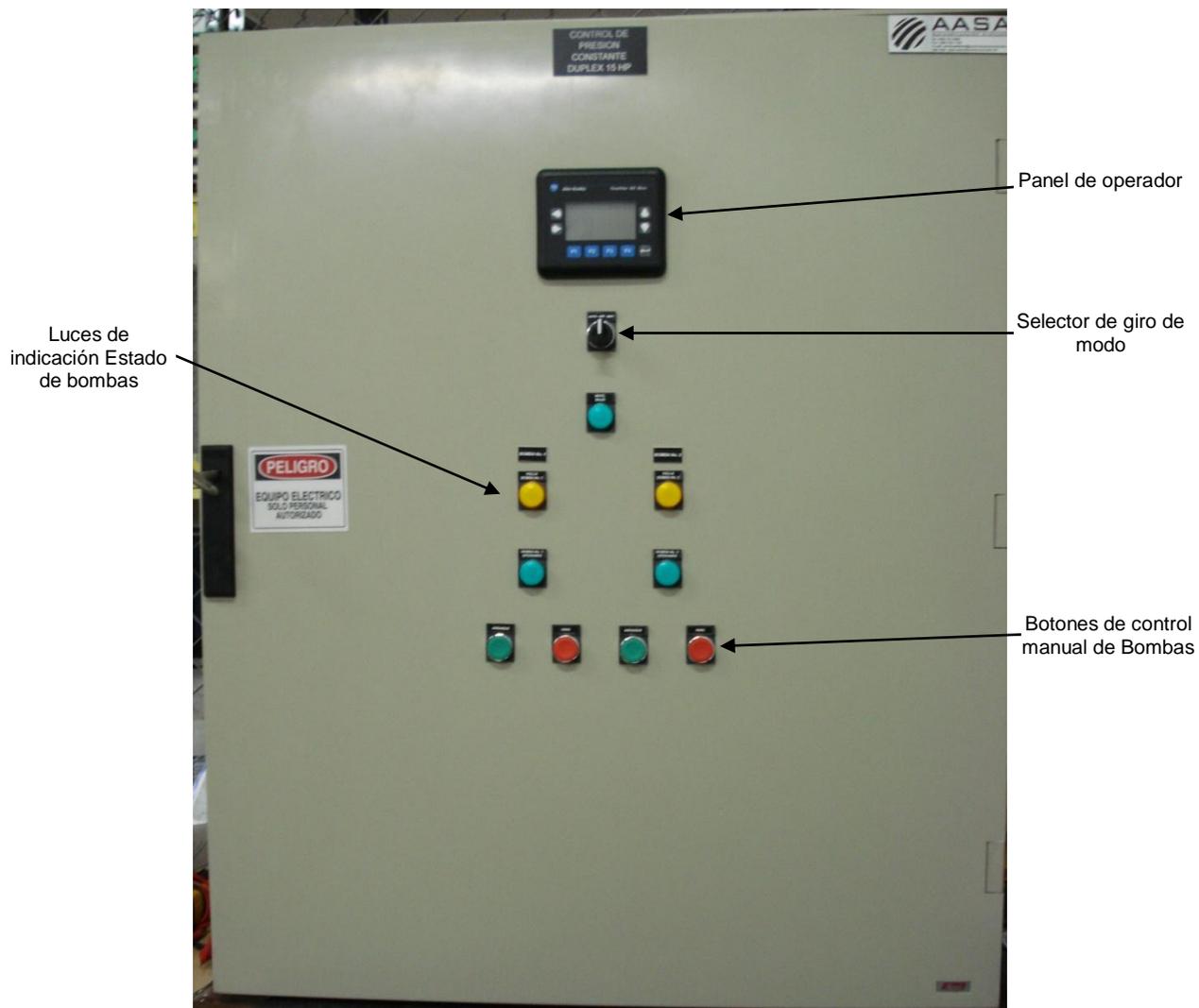


Figura A3.2. Gabinete de control. Vista frontal.

A.4 Configuración del PLC y el Panel de operador.

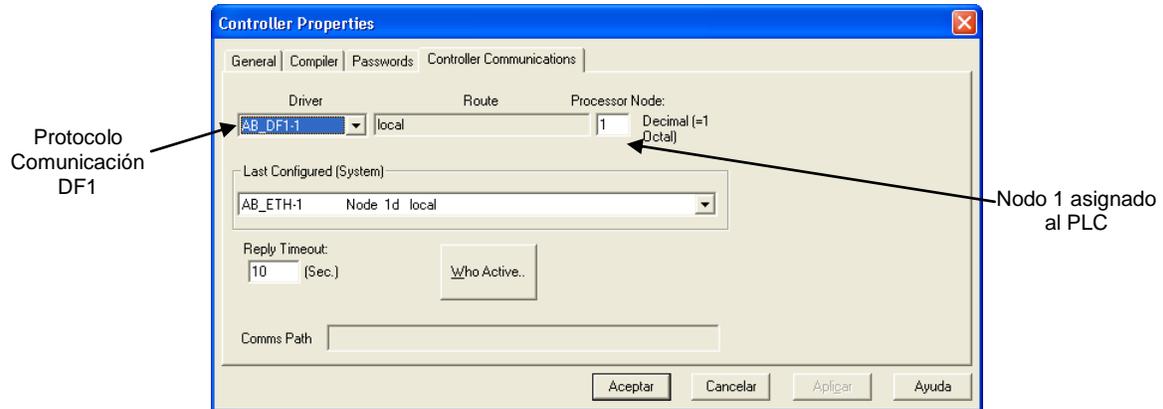


Figura A4.1. Propiedades del controlador.

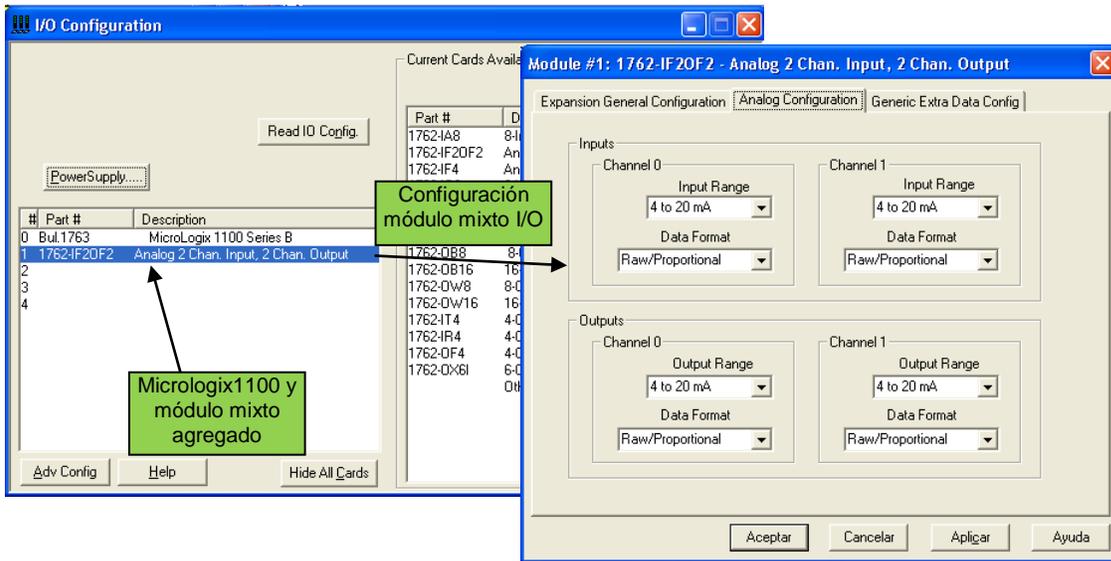


Figura A4.2. Configuración de entradas/salidas.

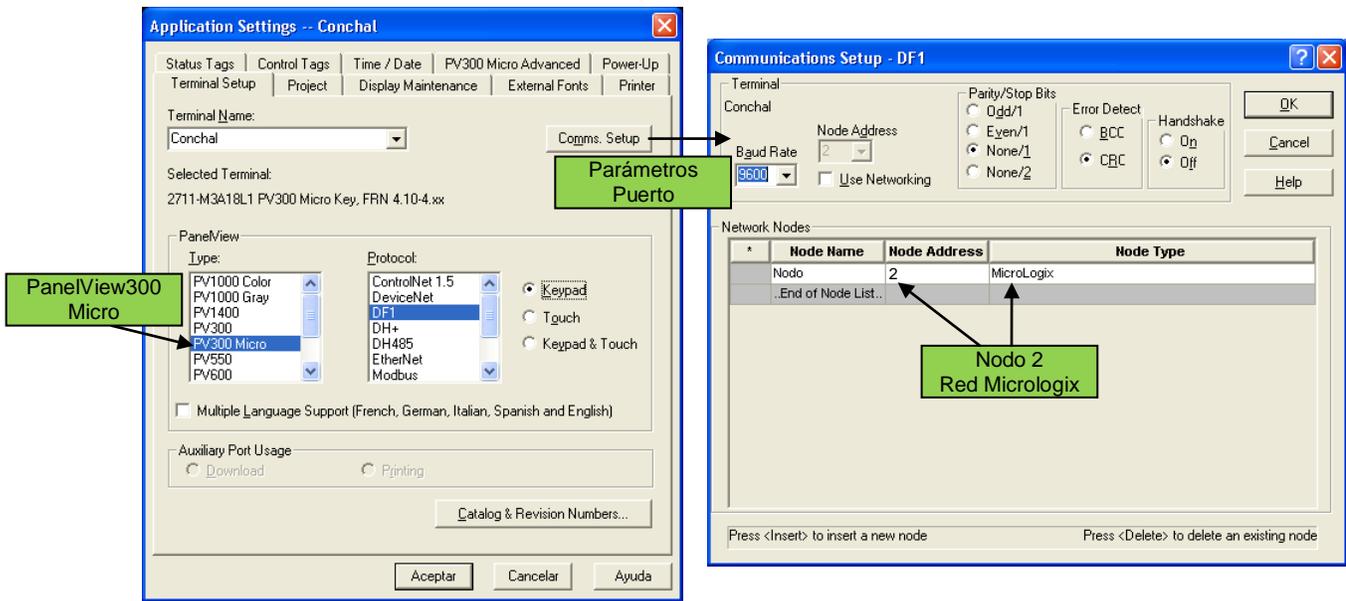


Figura A4.3. Configuración del panel de operador.

Anexos

B1. Dimensiones de la bomba centrífuga utilizada

En la figura B1.1 se muestra un diagrama en el que detallan las dimensiones de las bombas utilizadas.

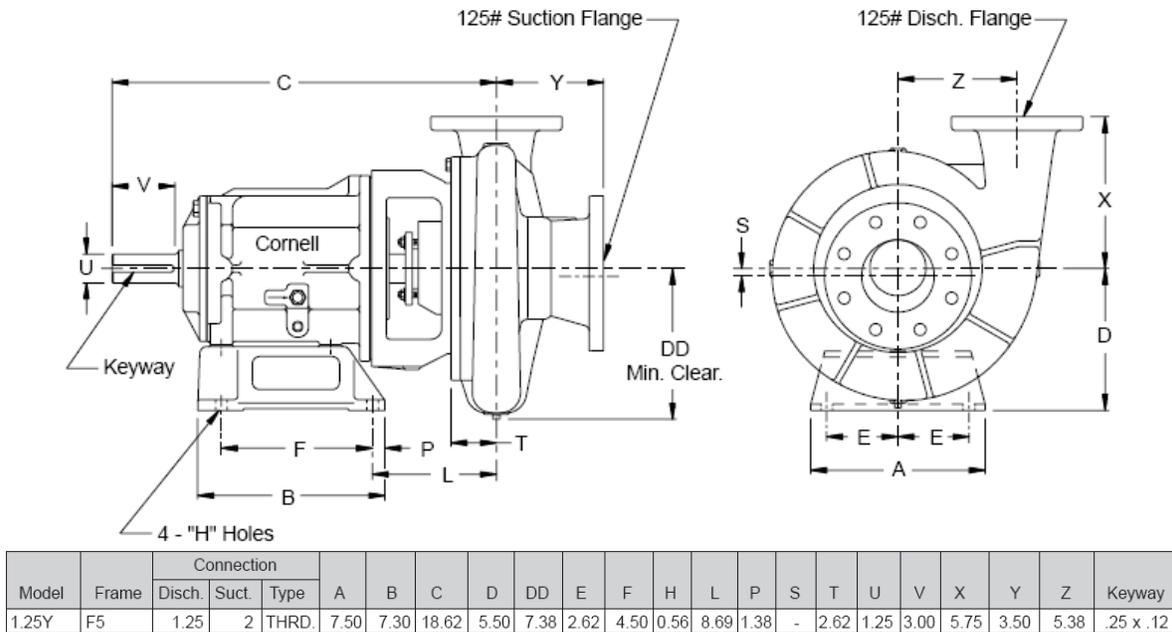


Figura B1.1. Dimensiones de la bomba centrífuga. [2]

B2. Micrologix 1100 y Módulo mixto de I/O analógicas.

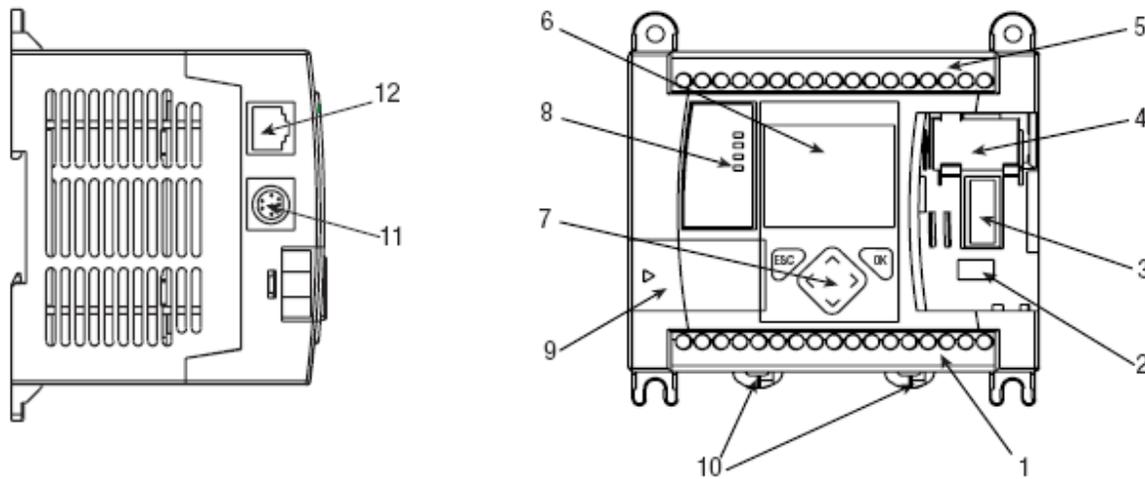


Figura B2.1. PLC Micrologix 1100. Allen Bradley. [9a]

En las tablas B2.1 y B2.2 se presentan las características del Hardware del PLC Micrologix 1100.

Tabla B2.1 Características del hardware del Micrologix 1100.

Núm.	Descripción	Núm.	Descripción
1	Bornes de salidas	7	Teclado para LCD
2	Conector de batería	8	LED de estado
3	Conector para expansión de I/O	9	Puerto para módulo de memoria
4	Batería	10	Sujetadores para Rail DIN
5	Bornes de entradas	11	Puerto para comunicación RS-232/485 (Canal 0)
6	LCD	12	Puerto Ethernet (canal 1)

Tabla B2.2 Micrologix 1100 1763-L16AWA Alimentación e I/O empotrados.

Alimentación	Entradas digitales	Entradas analógicas	Salidas digitales
120/240V AC	(10) 120V AC	(2) Entradas de voltaje 0-10V AC	(6) Salidas a relé Aisladas individuales

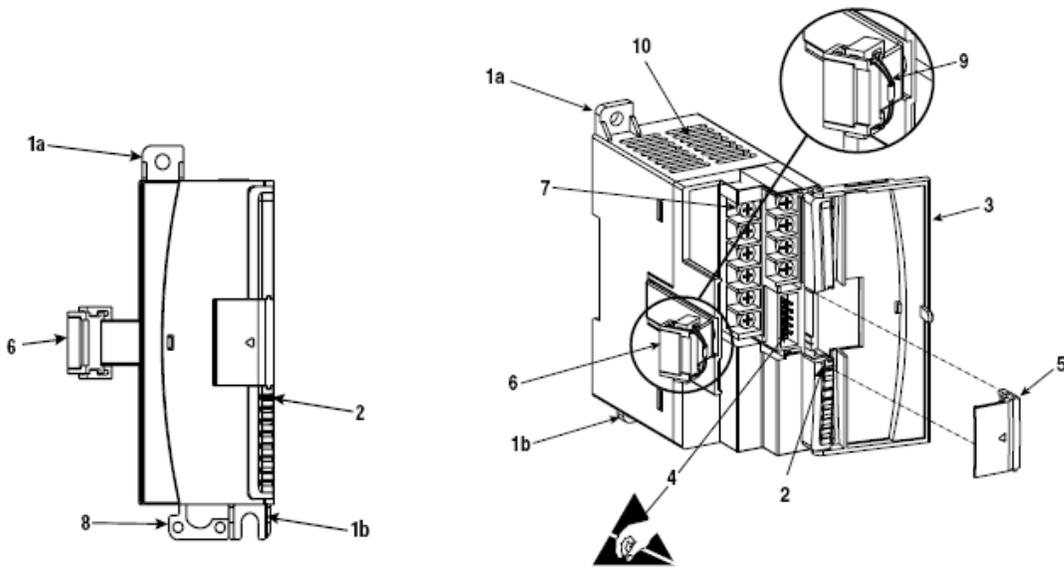


Figura B2.2. Módulo mixto de entradas/salidas analógicas 1762-IF2OF2. [9d]

En la tabla B2.3 se presentan las características del hardware del módulo mixto de entradas/salidas analógicas 1762-IF2OF2

Tabla B2.3. Módulo mixto I/O analógicas

Núm.	Descripción
1a	Orificio superior para montaje
1b	Orificio inferior para montaje
2	LED de diagnóstico
3	Compuerta del módulo con etiqueta de identificación
4	Conector de bus con terminal macho
5	Cobertor del conector de bus
6	Cable con conector femenino
7	Bornes de entrada/salida
8	Sujetador de riel DIN
9	Pull loop
10	Selector de tipo de entrada

B3. Relé de control de nivel RM4-LG01

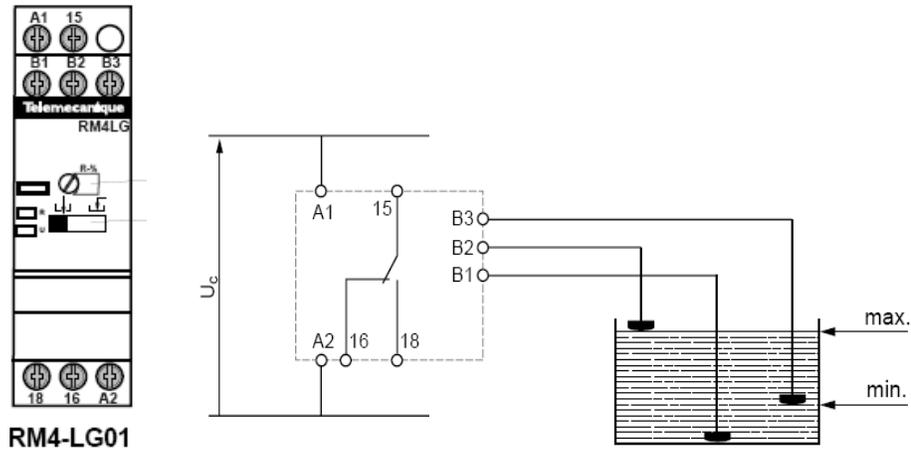


Figura B3.1. Relé de control de nivel RM4-LG01 y su conexión típica. [10]

B4. Conexión típica del monitor de fase RM4-TA01

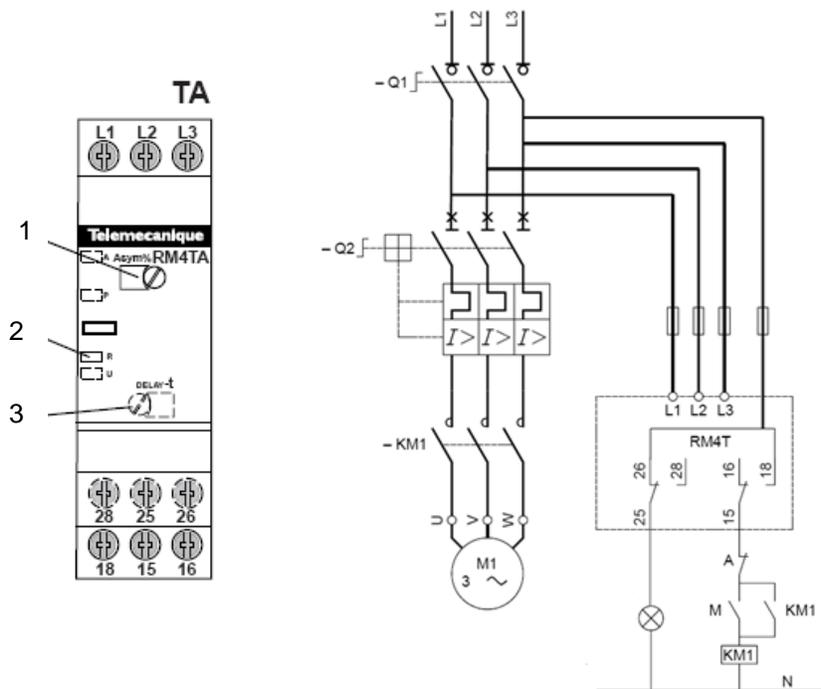


Figura B4.1. Monitor de fase RM4-TA01 y conexión típica [11]

Tabla B4.1. Ajustes del monitor de fase RM4-TA01.

Núm.	Descripción
1	Potenciómetro ajuste umbral de asimetría
2	Visualización por LED
3	Ajuste de la temporización

B5. PanelView 300 Micro

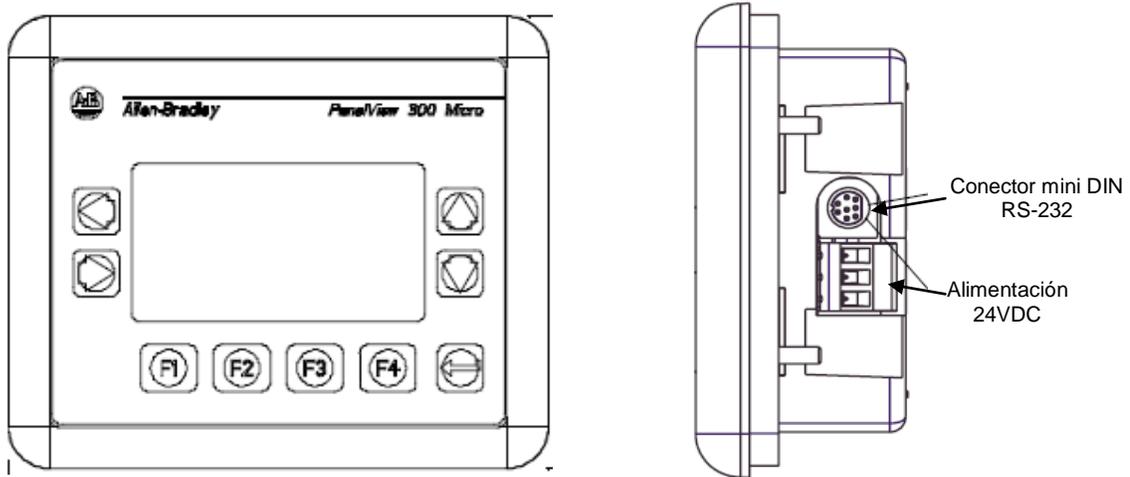


Figura B5.1. PanelView 300 Micro. [9e]

En la tabla B5.1 se presentan las principales características del panel de operador seleccionado.

Tabla B5.1. Características del PanelView 300 Micro.

Especificación	Descripción
Alimentación	11 a 30 VDC (nominal 24VDC)
Consumo Potencia	2.5 W máx. (0.105 A a 24VDC)
Pantalla	LCD con luz de retroiluminación LED
Resolución	128 x 64
Temperatura de funcionamiento	0 a 55 °C

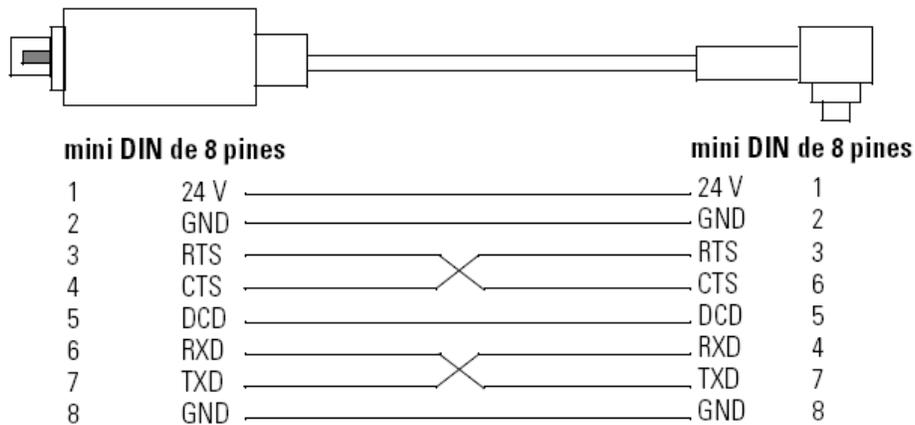


Figura B5.2. Esquema de pines del cable 1761-CBL-HM02. [9e]

B6. Variador de frecuencia PowerFlex400

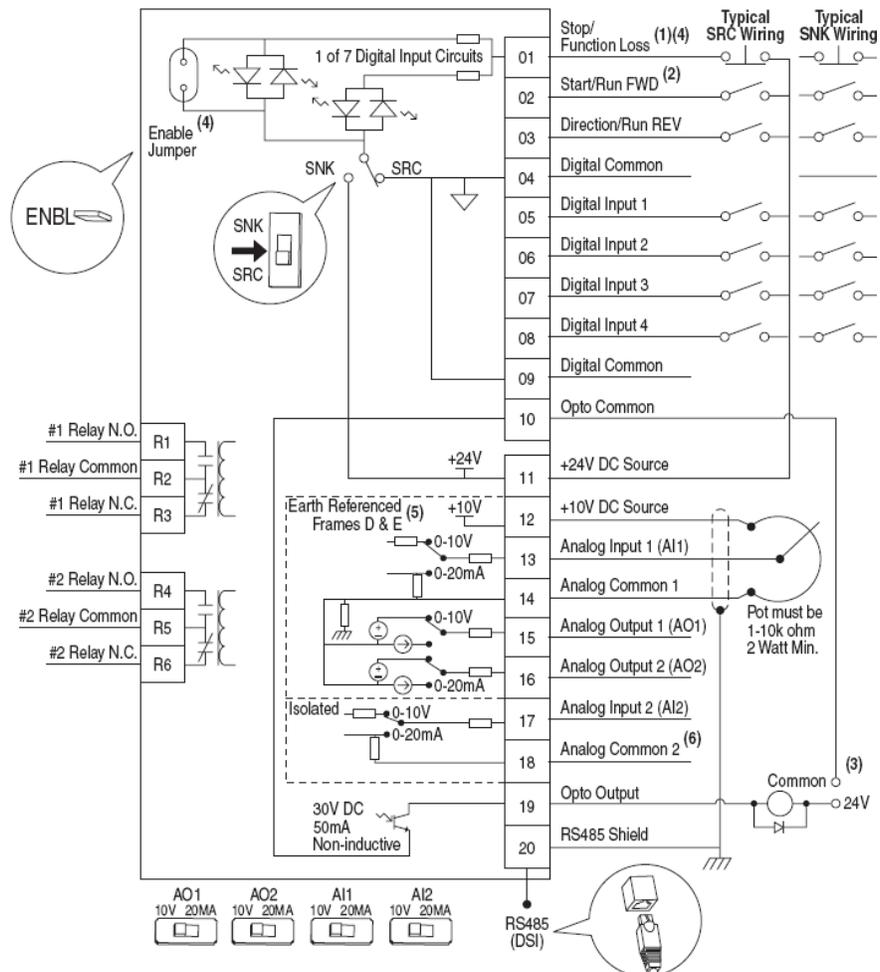


Figura B6.1. Diagrama de bloques del cableado de control del PowerFlex400. [9c]

B7. Respuesta de la planta a una señal escalón en lb/p²



Figura B7.1. Respuesta de la planta a una señal escalón en PSI.

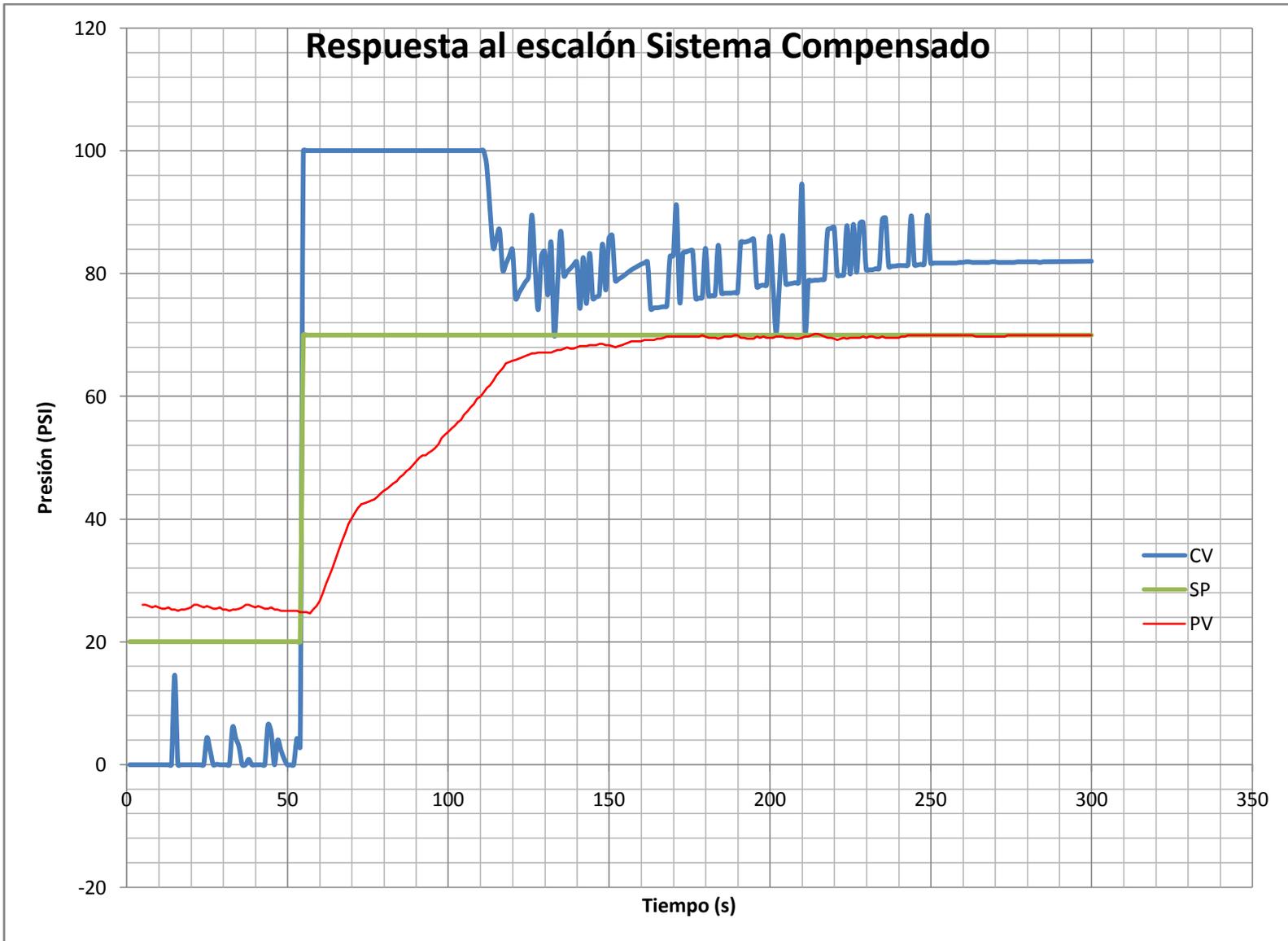


Figura B7.2 Respuesta a una señal escalón del sistema compensado (Planta real) en PSI.