

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería en Electrónica



**Sistema de control automático para el proceso de termización de
leche**

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

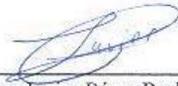
Alberth Hernández Chavarría

Cartago, Enero del 2010

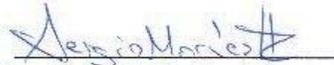
**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
PROYECTO DE GRADUACIÓN
TRIBUNAL EVALUADOR**

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. Javier Pérez Rodríguez
Profesor Lector



Ing. Sergio Morales Hernández
Profesor Asesor

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

Cartago, 26 de Enero del 2010.

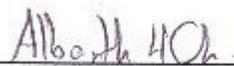
DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

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

Cartago, 26 de Enero del 2010



Alberth Hernández Chavarría

Cédula: 1 1225 0175

RESUMEN

La empresa Nestlé-Prolacsa es una empresa líder en Nicaragua en producción de productos en polvo, la cual opera desde 1966. A lo largo de los últimos años esta empresa experimenta un aumento importante en la demanda de sus productos, razón por la cual la empresa matriz Nestlé, Suiza decide aportar un gran capital para llevar a cabo mejoras en la línea y con esto aumentar la productividad de la misma.

Dado esto, uno de los procesos que requiere de grandes cambios es el de termización, en donde se sustituye gran parte de la estructura física, a la vez de cambiar e incluir equipo nuevo de control y monitoreo.

Consecuentemente, es necesario diseñar la nueva etapa de control y monitoreo dados dichos cambios, en la cual se busca contar con equipo e instrumentación de primera y que se ajuste a los requerimientos específicos de la empresa.

Este documento contiene la solución a dicho diseño, en donde se propone el uso de equipo e instrumentación específicos, a la vez de estudiar cada uno de los lazos de control y así proponer el adecuado control automático de los mismos.

Palabras clave: Controlador lógico programable, sensores, válvulas de control, variadores de frecuencia, modelado matemático, controlador PID.

ABSTRACT

The Nestle-Prolacsa company is a leader in Nicaragua in production of powder products, which has operated since 1966. Over recent years the company saw a substantial rise in demand for their products, why the parent company Nestle, Switzerland decided to make a large capital to make improvements on the line and thereby increase productivity the same.

Given this, one of the processes that require major changes is thermization, where it replaces much of the physical structure, while changing to include new control and monitoring products.

Consequently, it is necessary to design the new stage of control and monitorin, which is looking for equipment and instrumentation first and conforming to the specific requirements of the company.

This document contains the solution to this design, which proposes the use of specific equipment and instrumentation, while studying each of the control loops and thus to propose an appropriate automatic control thereof.

Keywords: programmable logic controller, sensors, control valves, variable frequency drive, mathematical modeling, PID controller.

A mi Madre, mi Padre, mi Hermana y mis Abuelos,
quienes siempre me apoyaron...

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme salud y permitirme estar cumpliendo esta meta como profesional.

A mis padres, hermana y familia en general, quienes siempre me apoyaron y aconsejaron a lo largo de mi carrera universitaria.

A mis profesores los cuales me brindaron valiosas enseñanzas y a mis compañeros y amigos que siempre hicieron más ameno el transcurso de todo este tiempo.

A todas las personas de S.I.Q. S.A. que me ayudaron a llevar a cabo de este proyecto con éxito y que me brindaron su experiencia en todo momento.

A todos, muchas gracias,

Alberth Hernández Chavarría.

ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Problema existente	1
1.2 Solución seleccionada	2
Capítulo 2. Meta y Objetivos.....	3
2.1 Meta.....	3
2.2 Objetivo general.....	3
2.3 Objetivos específicos.....	3
Capítulo 3. Marco teórico.....	5
3.1 Proceso de termización de la leche	5
3.1.1 Proceso de termización de leche en Prolacsa	6
3.2. Hardware utilizado	7
3.2.1 Controladores lógico programables.....	7
3.2.2 Nodo de campo para el manejo de válvulas	8
3.2.3 Panel de visualización o interfaz de operador.....	8
3.2.4 Sensores y transmisores.....	9
3.2.5 Válvulas de control.....	10
3.2.5.1 Dimensionamiento de la válvula	11
3.2.5.2 Características de flujo de la válvula de control.....	12
3.2.5.3 Función de transferencia de la válvula de control.....	14
3.2.6 Motores controlados por variador de frecuencia	15
3.3. Software utilizado	16
3.3.1 Software a nivel de controlador.....	16
3.3.2 Software a nivel de interfaz de usuario	17

3.4. Control automático de procesos	17
3.4.1 Control a lazo cerrado	18
3.4.2 Controlador PI	19
3.4.3 Métodos gráficos de estabilidad	20
3.4.3.1 Carta de Nichols	20
3.4.3.2 Gráficas de Bode	20
Capítulo 4. Procedimiento Metodológico	22
4.1 Reconocimiento y definición del problema.....	22
4.2 Obtención y análisis de información	22
4.3 Implementación de la solución.....	23
Capítulo 5. Descripción detallada de la solución	25
5.1 Análisis de las características principales de la solución	25
5.2 Descripción del hardware	26
5.3 Descripción del software.....	31
5.4 Análisis de lazos de control	38
5.4.1 Lazo de control de nivel	40
5.4.1.1 Descripción del lazo de control.....	40
5.4.1.2 Sensor utilizado	41
5.4.1.3 Instrumento de control.....	44
5.4.1.4 Control automático del lazo	47
5.4.2 Lazo de control de temperatura	49
5.4.2.1 Descripción del lazo de control.....	49
5.4.2.2 Sensor utilizado	50
5.4.2.3 Instrumento de control.....	52

5.4.2.4 Control automático del lazo	53
5.4.3 Lazo de control de flujo	56
5.4.3.1 Descripción del lazo de control	56
5.4.3.2 Sensor utilizado	57
5.4.3.3 Instrumento de control	59
5.4.3.4 Control automático del lazo	62
Capítulo 6. Análisis de resultados	65
6.1 Resultados	65
6.1.1 Configuración de hardware utilizado	65
6.1.2 Estructura del programa de control	66
6.1.3 Estructura de la interfaz de usuario	70
6.1.4 Lazos de control automático	74
6.2 Análisis	83
Capítulo 7. Conclusiones y Recomendaciones	88
7.1 Conclusiones	88
7.2 Recomendaciones	89
Bibliografía.....	90
Apéndices y Anexos	91
Apéndices	91
Apéndice A.1 Abreviaturas	91
Apéndice A.2 Imágenes de equipo utilizado para el control del proceso de termización.....	92
Apéndice A.3 Listado de las señales utilizadas para control del proceso de termización.....	95

Apéndice A.4	Software obtenido para el control de válvulas y motores del proceso de termización	98
Apéndice A.5	Información sobre la empresa/institución.....	99
Anexos.....		100
Anexo A.1	Configuración Nodo de campo	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama general de la solución y equipo del sistema de control.....	2
Figura 2. Diagrama general del proceso de producción de leche en polvo.....	5
Figura 3. Diagrama general del proceso de termización de la empresa Prolacsa, Nicaragua.....	7
Figura 4. Curvas de las características de flujo inherente.....	13
Figura 5. Diagrama de bloques del control a lazo cerrado.....	18
Figura 6. Diagrama de la solución para el control del proceso de termización.	26
Figura 7. Diagrama de activación de válvulas de campo.....	28
Figura 8. Diagrama de la topología de red Ethernet/IP implementada.....	29
Figura 9. Diagrama de flujo para lógica de bloques de válvula y motor.....	32
Figura 10. Lógica de programación del modo automático del proceso de termización.....	35
Figura 11. Pantalla de configuración del bloque PIDE del set de instrucciones....	36
Figura 12. Lógica de navegación de pantallas de la aplicación para el proceso de termización.....	37
Figura 13. Diagrama general de los lazos control del proceso de termización.	39
Figura 14. Lazo de control de nivel del proceso de termización.....	40
Figura 15. Datos técnicos del transmisor de nivel utilizado para el proceso de termización (I).....	41
Figura 16. Datos técnicos del transmisor de nivel utilizado para el proceso de termización (II).....	42
Figura 17. Tiempo de respuesta del sensor de nivel utilizado en el proceso de termización.....	43
Figura 18. Lugar de las raíces del lazo abierto del control de nivel.....	47
Figura 19. Diagrama de bloques del control de nivel del proceso de termización.	49
Figura 20. Lazo de control de temperatura del proceso de termización.....	49
Figura 21. Tiempo de respuesta del sensor de temperatura utilizado en el proceso de termización.....	51
Figura 22. Lugar de las raíces del lazo abierto del control de temperatura.....	54

Figura 23. Diagrama de bloques del control de temperatura del proceso de termización.....	55
Figura 24. Lazo de control de flujo del proceso de termización.....	56
Figura 25. Lugar de las raíces del lazo abierto del control de flujo.....	63
Figura 26. Diagrama de bloques del control de flujo del proceso de termización..	64
Figura 27. Direccionamiento de cada una de las válvulas del nodo de campo.	66
Figura 28. Esquema de programación del proceso de termización.....	67
Figura 29. Bloque de control PIDE para el lazo de control de temperatura.....	69
Figura 30. Pantalla principal del proceso de termización.	70
Figura 31. Pantalla de preparación y recirculación de agua caliente del proceso de termización.	71
Figura 32. Pantalla de manejo y visualización de válvulas.....	71
Figura 33. Pantalla de manejo y visualización de motores de arranque directo....	72
Figura 34. Pantalla de manejo y visualización de bombas de arranque directo....	72
Figura 35. Pantalla de manejo y visualización de bombas controladas por variador de frecuencia.....	72
Figura 36. Pantalla de manejo y visualización de variables para los lazo de control.	73
Figura 37. Diagrama de bloques del control de nivel del proceso de termización sin compensador.....	74
Figura 38. Respuesta del lazo cerrado de control de nivel del proceso de termización sin compensador.....	75
Figura 39. Diagrama de bloques del control de nivel del proceso de termización con compensador.....	75
Figura 40. Respuesta del lazo cerrado de control de nivel del proceso de termización con compensador.....	76
Figura 41. Diagrama de bloques del control de temperatura del proceso de termización sin compensador.....	76
Figura 42. Respuesta del lazo cerrado de control de temperatura del proceso de termización sin compensador.....	77

Figura 43. Diagrama de bloques del control de temperatura del proceso de termización con compensador.....	77
Figura 44. Respuesta del lazo cerrado de control de temperatura del proceso de termización con compensador.....	78
Figura 45. Diagrama de bloques del control de flujo del proceso de termización sin compensador.....	79
Figura 46. Respuesta del lazo cerrado de control de flujo del proceso de termización sin compensador para un set point de 0,42 m ³ /min.	79
Figura 47. Respuesta del lazo cerrado de control de flujo del proceso de termización sin compensador para un set point de 0,22 m ³ /min.	80
Figura 48. Diagrama de bloques del control de flujo del proceso de termización con compensador.....	80
Figura 49. Respuesta del lazo cerrado de control de flujo del proceso de termización con compensador para un set point de 0,42 m ³ /min.	81
Figura 50. Respuesta del lazo cerrado de control de flujo del proceso de termización con compensador para un set point de 0,22 m ³ /min.	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características del controlador lógico programable seleccionado.....	27
Tabla 2. Lista del equipo del bus de módulos de control.....	29
Tabla 3. Direcciones IP de los dispositivos utilizados.	30
Tabla 4. Señales del bloque de control de válvula.	33
Tabla 5. Señales del bloque de control de motor.	33
Tabla 6. Datos del transmisor “ <i>Rosemount 3051 Pressure Transmitter</i> ”.....	43
Tabla 7. Condiciones del sistema de termización.	44
Tabla 8. Datos del valor del coeficiente de ganancia K_v de la válvula de control de nivel.....	46
Tabla 9. Datos de la válvula de control de lazo de nivel del proceso de termización.	46
Tabla 10. Datos del transmisor de temperatura “ <i>Rosemount 3144P</i> ”.	51
Tabla 11. Datos del valor del coeficiente de flujo C_v de la válvula de control de temperatura.....	52
Tabla 12. Datos de la válvula de control de lazo de temperatura del proceso de termización.....	53
Tabla 13. Rangos de flujo de operación del sensor de flujo <i>Rosemount 8721</i> de acuerdo a las dimensiones de la tubería.....	58
Tabla 14. Datos del transmisor de flujo “ <i>Rosemount 8721</i> ”.	58
Tabla 15. Datos de placa del motor <i>Washdown Duty Motor</i> , número de catálogo <i>CWDM3713T</i>	60
Tabla 16. Especificaciones para diferentes modelos de bombas de la familia Waukesha Cherry-Burrell.	61
Tabla 17. Valor de las constantes de los controladores PI diseñados para el proceso de termización.	82
Tabla 18. Características de los sistemas ante los compensadores PI diseñados para el proceso de termización.	82

Capítulo 1. Introducción

La empresa Prolacsa, en la cual se realizó el proyecto, inició operaciones en 1966 en Matagalpa Nicaragua, con el objetivo de producir y vender leche en polvo. En los últimos tiempos ésta empresa a incrementado su producción, por lo cual en el presente año se realiza una remodelación completa de la planta para lograr con esto aumentar y abastecer dicha demanda de sus productos, y a la vez apegarse a una serie de normas y requerimientos de higiene y seguridad internacionales.

Dentro de esta remodelación de la planta se encuentra el cambio e incorporación de equipo y sensores, la modificación de tuberías, entre otras variaciones en el proceso de termización de la leche, lo cual hace necesario el diseño del control automático para dicho proceso.

Este diseño del control automático para el proceso de termización conlleva varios pasos a seguir como lo son el estudio de secuencias de funcionamiento del equipo, el estudio y dimensionamiento del equipo a utilizar, el estudio matemático de los diferentes lazos de control para el consecuente diseño de los compensadores que se encargarán del control automático, entre otros; y de lo cual se base este documento.

1.1 Problema existente

La empresa Nestlé-Prolacsa en Nicaragua experimenta un crecimiento considerable en la demanda de los productos que desarrolla, lo cual la lleva a implementar soluciones para abastecer al creciente y exigente mercado.

Una de estas soluciones llega al aprobársele la inversión de capital por parte de la empresa matriz Nestlé para hacer más eficiente la línea de producción de agregados en polvo; lo cual implica realizar grandes cambios en el proceso de termización, dadas las mejoras en equipo, instrumentación y de proceso. Esto trae como consecuencia la necesidad de diseñar una nueva etapa de control

automático para dicho proceso de termización, la cual involucre todo el nuevo equipo e instrumentación a incluir.

1.2 Solución seleccionada

Requerimientos de la empresa:

1. Utilizar un controlador lógico programable (PLC) para el manejo de equipo de campo y en sí del control automático del proceso.
2. Se deberá programar un sistema de visualización del equipo y del proceso a manejar.
3. El trasiego de datos a campo se hará por medio del protocolo de red Ethernet/IP y por señales eléctricas (señales analógicas de control de 4-20mA y señales de 0-24V).
4. Se entregará los modelos matemáticos de los sistemas de control del proceso (lazos cerrados) con curvas de reacción del sistema.

En la figura 1 se muestra el diagrama general del sistema de control sobre el cual se basa la solución seleccionada para el desarrollo del proyecto.

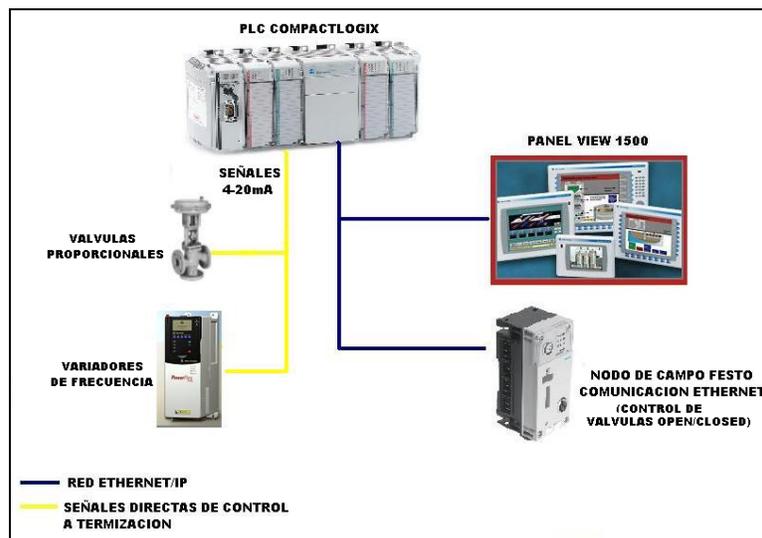


Figura 1. Diagrama general de la solución y equipo del sistema de control.¹

¹ Diagrama realizado por el estudiante, basado en las señales de control del proceso.

Capítulo 2. Meta y Objetivos

2.1 Meta

Contribuir con el proyecto de modernización de la línea de agregados en polvo de la empresa Nestlé-Prolacsa para obtener una mayor productibilidad, esto con el diseño de un sistema de monitoreo y control automático de la etapa de termización.

2.2 Objetivo general

Desarrollar un sistema de monitoreo y control automático para el proceso de termización de la línea de producción de agregados en polvo de la empresa Nestlé-Prolacsa, el cual se ajuste a las especificaciones dadas y equipo del proceso.

Indicador: Obtención del sistema de control automático para el proceso de termización de la línea de agregados en polvo de acuerdo a las características de diseño solicitadas por la empresa Nestlé-Prolacsa; con su lógica de funcionamiento, el modelado de sus lazos de control y un sistema de interfaz de usuario.

2.3 Objetivos específicos

- Analizar las características eléctricas y de funcionamiento del equipo a utilizar para implementar el proceso de control automático del sistema de termización.

Indicador: Estudio y configuración del equipo o hardware a utilizar para así integrarlo como solución de automatización del proceso de termización.

- Diseñar la lógica de funcionamiento del equipo del proceso de termización basados en el estudio de la secuencia de funcionamiento de dicho proceso facilitada por el personal de la empresa Nestlé-Prolacsa.

Indicador: Programación de las rutinas o secuencias del funcionamiento del proceso de termización con el software de programación RSLOGIX 5000 v17.

- Elaborar modelados matemáticos teóricos de los lazos de control del proceso de termización, basados en las características propias de cada equipo de control e instrumentación y de las especificaciones del proceso.

Indicador: Obtener las expresiones matemáticas de los lazos de control de nivel de la tina de balance, del flujo en la tubería y de temperatura del producto del proceso de termización.

- Realizar el cálculo de los parámetros de los PID's de cada uno de los lazos de control que permitan la funcionalidad del proceso.

Indicador: Obtención de los compensadores respectivos para cada proceso, a partir de la aplicación de métodos teóricos de control automático y así observar la respuesta del sistema a esas constantes con la ayuda del software Matlab.

- Diseño de la interfaz de usuario para el control y visualización del estado del equipo del proceso de termización y de las variables más importantes de dicho proceso.

Indicador: Programación de las pantallas del panel de operador referentes al proceso de termización, en donde se visualizará el estado actual del equipo, variables de medición, alarmas, entre otra información; esto con el software específico de programación Factory Talk View Studio ME.

Capítulo 3. Marco teórico

3.1 Proceso de termización de la leche

Dentro del proceso de producción de leche en polvo se involucran varias etapas o subprocesos como lo son el proceso de recepción de la leche entera, el proceso de almacenamiento, el proceso de termización de la leche, el proceso de estandarización de la leche, el proceso de evaporación de la leche hasta llegar al último de los procesos que corresponde al de secado de la misma tal y como se muestra en la figura 2.

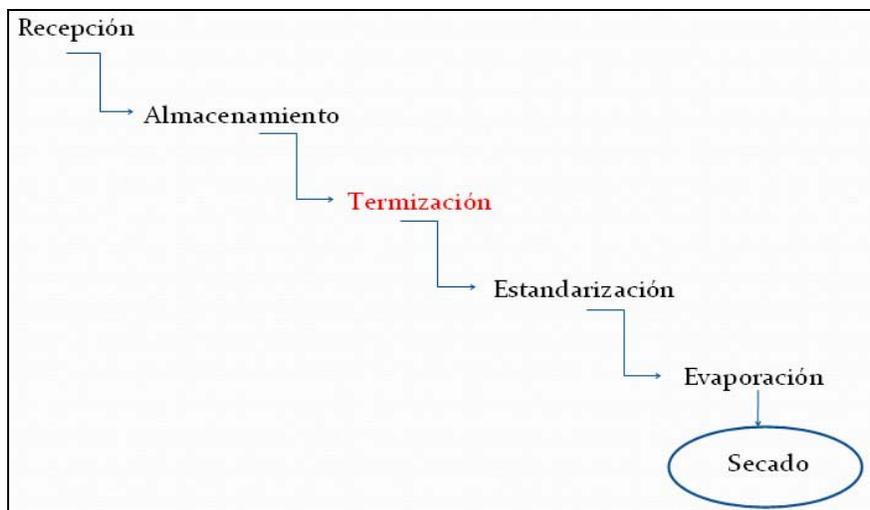


Figura 2. Diagrama general del proceso de producción de leche en polvo.

En lo que corresponde específicamente al proceso de termización de la leche entera recibida en la planta, consiste en una serie de pasos para lograr ciertas características en la misma. A la vez forma parte de uno de los primeros procesos a los que se somete la leche al ser recibida y consiste en aplicar una temperatura de 63 a 75 °C durante 15 segundos, ampliando así el período durante el cual la leche cruda puede ser almacenada. La homogenización es otro de estos procesos comunes y tiene como objetivo conseguir que los glóbulos grasos se rompan y lograr disminuir su tamaño. A la vez, la leche homogeneizada es más digestiva y presenta un color más blanco y atractivo.

3.1.1 Proceso de termización de leche en Prolacsa

Dentro del proceso de termización de la leche en la empresa Nestlé-Prolacsa en Nicaragua, se toma este líquido de un punto de almacenamiento masivo, donde la toda la leche entera recibida es puesta, y se le aplica una serie de subprocesos los cuales forman parte del proceso general de termización. Estos subprocesos de manera ordenada son los siguientes:

1. El almacenamiento constante de una cantidad de leche en un tanque o tina de balance al inicio del proceso, para abastecer al proceso de termización; esto a través de un lazo de control de nivel.
2. Abastecer de leche las tuberías del proceso con un flujo constante, esto a través de un lazo de control de flujo.
3. El calentamiento de la leche a 72 °C por medio de un lazo de control de temperatura.
4. El limpiado de la misma a través de unas máquinas llamadas centrífugas clarificadoras².
5. La exposición de la leche caliente a 72 °C durante 15 segundos a través de un "holding tube".
6. El enfriado final de la leche a 4 °C para su almacenamiento en tanques que se poseen para este fin.

La figura 3 se elaboró por parte del estudiante y con la ayuda de los planos del proceso dados por la empresa Nestlé-Prolacsa, para así mostrar un diagrama general del proceso de termización de dicha empresa y sobre el cual se trabajó en este proyecto.

² Centrifuga Clarificadora: separa sólidos en suspensión en un líquido, lo que se puede entender con realizar un filtrado de un líquido.

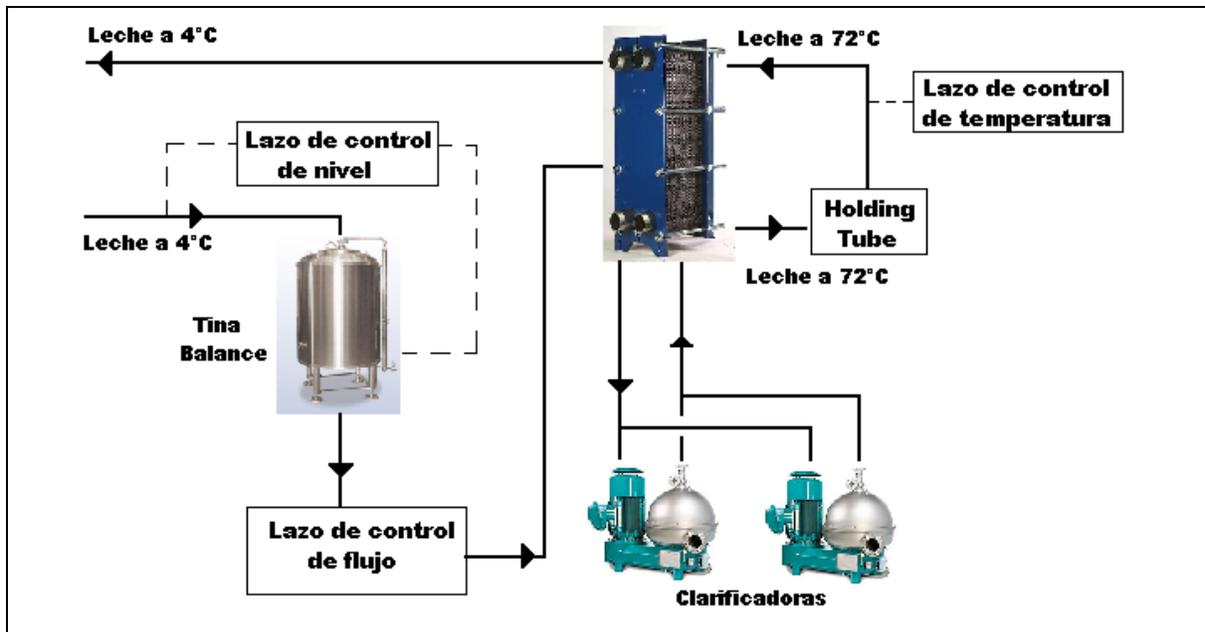


Figura 3. Diagrama general del proceso de termización de la empresa Prolacsa, Nicaragua.

3.2. Hardware utilizado

3.2.1 Controladores lógico programables

En la actualidad los PLC no sólo controlan la lógica de funcionamiento de máquinas, plantas y procesos industriales, sino que también pueden realizar operaciones aritméticas, manejar señales analógicas para realizar estrategias de control, tales como controladores proporcional, integral, derivativo (PID) por lo que son de gran utilidad para los procesos de control automático en la industria³.

Los PLC actuales pueden comunicarse con otros controladores y computadoras a través de diferentes y variados protocolos de comunicación como Modbus, Profibus, DeviceNet, ControlNet, Ethernet/IP, entre otros; o de manera serial con estándares como RS-232, RS-485, RS-422, entre otros.

Al manejar procesos con PLC se tiene la gran ventaja de expandir la cantidad de módulos para el manejo de señales de diferentes tipos como lo pueden ser

³ Tomado de la página www.wikipedia.com

señales discretas, analógicas, de alta velocidad (lectores de pulsos), servos, redes entre otros.

Para el diseño de la automatización de este proceso se utilizó un controlador central modelo Compact Logix 1769-L32E, perteneciente a la familia Logix de Allen-Bradley, el cual permite un rápido procesamiento de datos y la comunicación con diferentes tipos de redes, como lo son la DeviceNet, Ethernet/IP, ControlNet, entre otras; teniendo así la posibilidad de integrar una solución fiable y eficiente.

3.2.2 Nodo de campo para el manejo de válvulas

Para el monitoreo, la apertura y cierre de las diversas válvulas manejadas por aire comprimido del proceso de termización se utilizó un dispositivo denominado nodo de campo, el cual está desarrollado para trabajar exclusivamente como esclavo bajo el protocolo de comunicación Ethernet/IP y que a la vez es compatible con el controlador utilizado en esta solución, lo cual representó una manera eficaz de controlar los equipos remotos en este proyecto, válvulas por aire comprimido en este caso específico.

En el Anexo 1 se detalla más información sobre el dispositivo utilizado para el manejo de válvulas en este proyecto, además de detallar aspectos técnicos de configuración importantes para el desarrollo del mismo.

3.2.3 Panel de visualización o interfaz de operador

Un panel de visualización o interfaz de operador es la herramienta de comunicación entre el controlador lógico programable o programa y el usuario del proceso u operador de una empresa, con la cual se puede monitorear y manejar el equipo y proceso dado. El sistema de visualización y control utilizado en el desarrollo de este proyecto se comunica con el controlador lógico programable a través del protocolo de comunicación Ethernet/IP.

3.2.4 Sensores y transmisores

Con los sensores y transmisores son los encargados de realizar la acción de medición en un sistema de control, la cual es vital para poder llevar a cabo el control de un proceso. En sí en el sensor se da un fenómeno mecánico, eléctrico, químico o similar, el cual se relaciona con la variable de proceso que se está midiendo; el transmisor, a su vez, convierte este fenómeno en una señal que se puede transmitir, y por lo tanto, ésta tiene relación con la variable de proceso.⁴

Algunos términos importantes y relacionados con los sensores y transmisores son la escala, el rango y el cero del instrumento. La escala la definen los valores mayor y menor que el instrumento esta capacitado a medir, mientras que el rango esta dado por la diferencia entre estos valores y el cero esta dado por el valor mínimo de medición.

Las señales que se utilizan para comunicar los instrumentos de medición pueden ser variadas, como por ejemplo señales neumáticas o presión de aire (3-15psi, 6-30psi, 3-27psi), señales eléctricas o electrónicas (4-20mA, 10-50mA, 1-5V, 0-10V), señales digitales o discretas (unos y ceros), entre otras. Además, frecuentemente es necesario convertir un tipo de señal por otro lo cual se hace por medio de un transductor.

Entre los sensores más comunes en los procesos de hoy en día se tienen los de presión, flujo, temperatura y nivel; de los cuales es importante conocer los parámetros que describen el comportamiento del sensor. Una de las características principales de un sensor es la ganancia, la cual se obtiene como la relación del rango de entrada respecto al rango de salida en el caso de linealidad del sistema de control, tal como se muestra en la ecuación 1.

$$K_r = \frac{\text{Rango salida}}{\text{Rango entrada}} \quad \text{Ecuación 1}$$

⁴ Control automático de procesos, Carlos A. Smith, Armando B. 1^{era} ed. 1991.

A la vez, algunos procesos no son lineales como por ejemplo la medición de flujo a través de un sensor diferencial de presión, en donde se tiene específicamente que la ganancia esta dada por la ecuación 2.

$$K_T = \frac{32}{F_{MAX}^2} \cdot \bar{F}$$

Ecuación 2

De manera general, se tiene que la respuesta dinámica de la mayoría de los sensores-transmisores es mucho más veloz que la del proceso, con lo cual sus constantes de tiempo y tiempo muerto se pueden considerar despreciables y por lo tanto su función de transferencia la da la ganancia pura, sin embargo cuando se analiza la dinámica, la función de transferencia del instrumento queda representada por el sistema de primer orden dado en la ecuación 3.

$$G(s) = \frac{K_T}{\tau \cdot s + 1}$$

Ecuación 3

Donde:

K_T : Ganancia del transmisor.

τ : Constante de tiempo del transmisor.

3.2.5 Válvulas de control

Las válvulas proporcionales son los elementos de control más utilizados en la actualidad en las plantas de proceso para mantener en los valores requeridos las variables de control de los procesos de las industrias. Mediante el cambio en la apertura de estas válvulas se modifica la resistencia al flujo y en consecuencia el flujo mismo.

Una de las primeras características que se debe de determinar en la escogencia del tipo de válvula a utilizar en determinado proceso, es el estado de la misma en ausencia de energía que la accione, ya sea normalmente cerrada o normalmente abierta, esto pensando en aspectos de seguridad y de producción.

3.2.5.1 Dimensionamiento de la válvula

El dimensionamiento de la válvula consiste en el procedimiento mediante el cual se realiza el cálculo del factor del coeficiente de flujo de la válvula (C_v); el cual se define como la cantidad en volumen de líquido que fluye por unidad de tiempo cuando la válvula se encuentra completamente abierta.

El factor de coeficiente de flujo puede presentar algunas diferencias dependiendo de la casa o fabricante de la válvula específica con la que se trabaje. Las mayores diferencias se presentan en las ecuaciones para dimensionar las válvulas usadas en procesos con fluidos que se comprimen como gas, vapor o vapor de agua.

En el caso de los líquidos se tiene que la capacidad de la válvula esta definida por la ecuación 4.

$$f = C_v \cdot \sqrt{\frac{\Delta P}{G_f}} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

f: Flujo de liquido (gpm U.S.).

ΔP : caída de presión en la sección de la válvula (psi).

G_f : Gravedad especifica del líquido a la temperatura en que fluye.

De la ecuación 4 y conociendo el flujo al cual trabaja el proceso en condiciones normales, se puede despejar el valor del coeficiente de flujo de la válvula quedando la expresión de la ecuación 5.

$$C_v = f \cdot \sqrt{\frac{G_f}{\Delta P}} \quad \text{Ecuación 5}$$

Cuando se utiliza fluidos compresivos surgen diferencias debido básicamente al fenómeno conocido como flujo crítico, el cual es la condición que se presenta cuando el flujo no es función de la raíz cuadrada de la caída de presión en la sección de la válvula, sino únicamente en de la presión de entrada en la válvula.

Como ejemplo los fabricantes de válvulas de Masoneilan proponen la ecuación 6 para el caso de procesos con vapor de agua.

$$C_v = \frac{W \cdot (1 + 0,0007 \cdot T_{SH})}{1,83 \cdot C_f \cdot P_1 \cdot (y - 0,148 \cdot y^3)}$$

Ecuación 6

Donde:

W: Tasa de flujo (lb/hr).

T_{SH} : Grados de sobrecalentamiento (°F).

C_f : Factor de flujo crítico.

P_1 : Presión de entrada a la válvula (psi).

Y la variable y se usa para expresar la condición crítica del flujo y esta dada por la ecuación 7.

$$y = \frac{1,63}{C_f} \cdot \sqrt{\frac{\Delta P}{P_1}}$$

Ecuación 7

3.2.5.2 Características de flujo de la válvula de control

Para obtener un diseño de control para un proceso con válvulas de control se debe lograr que el sistema conformado tenga un comportamiento constante hasta donde sea posible, o lo que es lo igual un comportamiento lineal a pesar de la no linealidad del mismo. Al lograr reducir las características no lineales del sistema, conformado en este caso por el sensor, el transmisor y la unidad de proceso; se obtiene como resultado una ganancia constante.

La característica de flujo de la válvula de control está definida como la relación entre el flujo a través de la válvula y la posición de la misma conforme varía la posición del 0% a 100%. Existen dos características de flujo las cuales son la de flujo inherente o de caída de presión constante en la válvula y la de flujo en instalación o de variación de caídas de presión producto del funcionamiento.

Para entender la primera de estas características se utilizará la figura 4, en donde se tienen tres comportamientos dependiendo del tipo de válvula que se utilice.

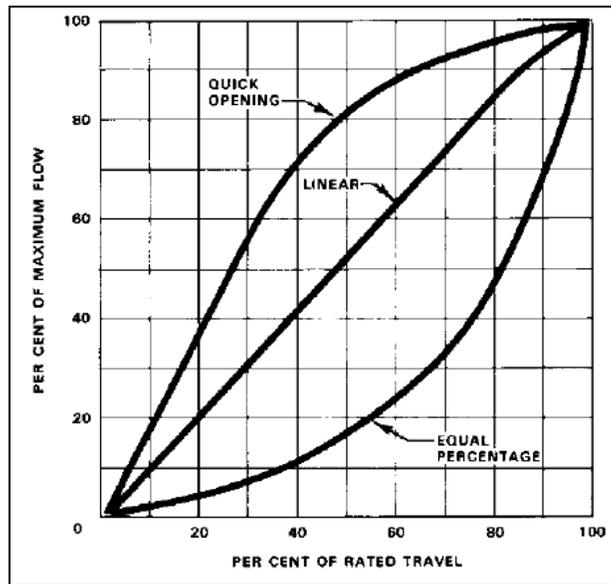


Figura 4. Curvas de las características de flujo inherente.⁵

Estos comportamientos son los siguientes:

- Característica de flujo lineal: flujo directamente proporcional al desplazamiento de la válvula.
- Característica de flujo porcentual igual: al inicio de la apertura de la válvula produce un cambio muy pequeño en el flujo pero conforme llega a un punto de apertura el flujo varía considerablemente.
- Característica de flujo rápido de apertura: produce un gran flujo con un pequeño desplazamiento de la posición de la válvula.

Estas últimas se usan en aplicaciones de abierto-cerrado, las de flujo lineal se utilizan en aplicaciones en donde la caída de presión en la válvula es bastante constante como control de nivel de líquidos y las de flujo porcentual se puede decir que son las más utilizadas en procesos en donde se esperan grandes variaciones en la caída de presión.

⁵ Imagen tomada del libro: Control automático de procesos, Carlos A. Smith, Armando B. 1^{era} ed. 1991

Para entender las características de flujo en instalación se debe saber que cuando la válvula esta instalada en la tubería la caída de presión a través de ella se modifica conforme varíe el flujo. Esta caída de presión en la válvula y en sí en el sistema esta dada por la ecuación 8.

$$\Delta P_o = \Delta P_v + \Delta P_L \quad \text{Ecuación 8}$$

De donde cada una de estas caídas de presión se obtiene con las ecuaciones 9 y 10.

$$\Delta P_L = K_L G_f f^2 \quad \text{Ecuación 9}$$

$$\Delta P_v = G_f \frac{f^2}{C_v^2} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

ΔP_L : caída de presión debido a fricción, tuberías, equipo, entre otros.

ΔP_v : caída de presión debido a la válvula.

f: flujo a través de la válvula.

K_L : constante de fricción para la línea.

G_f : gravedad especifica del líquido.

Por otro lado, se puede relacionar el coeficiente C_v con la posición de la válvula (vp), tanto para el comportamiento de flujo lineal como de porcentaje igual (α) como se muestra en las ecuaciones 11 y 12 respectivamente.

$$C_v(vp) = (C_v|_{vp=1}) \cdot vp \quad \text{Ecuación 11}$$

$$C_v(vp) = (C_v|_{vp=1}) \cdot \alpha^{vp-1} \quad \text{Ecuación 12}$$

3.2.5.3 Función de transferencia de la válvula de control

Basados en los aspectos mencionados hasta el momento se tiene que la función de transferencia para una válvula de control esta dada por la ecuación 13 y la cual se muestra a continuación.

$$G_v(s) = \frac{K_v}{\tau_v \cdot s + 1}$$

Ecuación 13

Donde:

K_v : ganancia de la válvula.

τ_v : Constante de tiempo de la válvula.

Y se tiene la relación mostrada en la ecuación 14.

$$K_v = 0,865 \cdot C_v$$

Ecuación 14

Recordando que:

C_v : coeficiente de flujo de la válvula.

3.2.6 Motores controlados por variador de frecuencia⁶

En la actualidad, debido al gran ahorro de recursos y la eficiencia que significa para los procesos, se está sustituyendo en el control de flujos los métodos como el estrangulamiento de válvulas por otros en donde se varía la velocidad del motor que acciona la bomba para abastecer el flujo específico.

El método más eficiente para la variación de velocidad es hoy en día el uso de variadores de frecuencia aplicados a los motores asincrónicos, principalmente aquellos que emplean el principio de control por modulación del ancho de pulso (PWM).

En el caso del estrangulamiento de válvulas para controlar determinado flujo, la reducción de este se obtiene al precio de un incremento en las pérdidas, mientras que con el control por velocidad variable resulta posible ajustar las características de la bomba sin incrementar las pérdidas; y los requerimientos de potencia son radicalmente reducidos según la velocidad disminuye.

A fin de mantener la densidad de flujo aproximadamente constante y que no haya consecuencias en el momento que desarrolla el motor, la tensión de línea debe variarse también proporcionalmente a la frecuencia. A veces es aconsejable una

⁶ Artículo en Internet de la página <http://www.cubasolar.cu>

desviación con respecto a esta regla en los casos en que el momento de la carga disminuya marcadamente con la reducción de la velocidad, por ejemplo, en los accionamientos de cargas centrífugas, como bombas y ventiladores. En este caso, al disminuir la tensión en mayor proporción que la frecuencia, se produce una reducción del flujo y mejoran los indicadores energéticos del motor, al mismo tiempo que la disminución del momento máximo no es peligrosa desde el punto de vista de la capacidad de sobrecarga.

3.3. Software utilizado

Al analizar los software a utilizar para llevar a cabo el desarrollo de este proyecto se debe hacer desde el punto de vista de programación del dispositivo lógico (PLC), el cual es el encargado del manejo de todo el equipo relacionado al proceso, y desde el dispositivo que servirá de interfaz entre el hombre u operador y el proceso o equipo a controlar.

3.3.1 Software a nivel de controlador

El software RSLogix 5000 se diseña para trabajar con las plataformas del controlador Logix5000. El software es un paquete de programas informáticos obediente del IEC 61131-3 que ofrece programación en escalera, texto estructurado, bloque diagrama de funciones, y editor de sistemas secuenciales para desarrollar programas de aplicación. Estos programas se pueden estructurar en diversas subrutinas, las cuales son llamadas desde la rutina principal.

La elección de este paquete de programación se llevo a cabo dadas las características antes mencionadas, las cuales representan una solución eficiente y a la vez sencilla para llevar a cabo la programación de las secuencias y bloques de los equipos a utilizar.

3.3.2 Software a nivel de interfaz de usuario⁷

El software Factory Talk View ME es utilizado en este proyecto para el diseño de la interfaz de usuario, el cual es elaborado con el fin común de realizar una navegación eficiente para ayudar a acelerar el desarrollo de las aplicaciones HMI (Human Machine Interface) y de formación a tiempo.

Además, este software es parte de un conjunto escalable y unificado de control para el diseño de soluciones de control, diseñado para soportar el manejo y monitoreo de diferentes procesos a través de redes de comunicación, lo cual hace el uso de estos productos una solución eficiente.

3.4. Control automático de procesos

Al hablar del control automático de procesos se debe explicar un concepto fundamental como lo es un proceso continuo, el cual es aquel cuya magnitud a regular varía de forma continua en el tiempo, pudiendo pasar por infinitos valores. En la actualidad el mundo real es analógico o continuo, como también lo son la mayoría de los procesos industriales, hasta el punto que resulta difícil encontrar uno en el que no exista regulación de alguna magnitud. Se puede mencionar una extensa lista de magnitudes a controlar como velocidad, presión, fuerza, caudal, potencia, nivel, temperatura, tensión, intensidad, entre otros; lo que hace el control automático de procesos un tema cotidiano en la industria.

Para diseñar sistemas de regulación o control automático se debe tener suficientes conocimientos en la teoría matemática y física del proceso en específico que se trata, pero a la vez se debe de tener conocimientos de la tecnología con la cual se llevará a cabo la implementación de dicho control. Una regulación eficiente con características de ser rápida, precisa y sin oscilaciones, solo es posible cuando se puede predecir cómo responderá el proceso, de forma que se corrijan así las desviaciones antes de que aparezcan, que en sí es lo que envuelve la teoría del control automático.

⁷ Información tomada de la página en Internet: <http://www.rockwellautomation.com>

3.4.1 Control a lazo cerrado

El control a lazo cerrado es aquel en el cual se recibe la realimentación de la señal de salida del proceso para así poder realizar la comparación con respecto al valor deseado y así llevar a cabo un control más exacto a través de un dispositivo de control. Con esto, el primer paso para poder regular es poder medir, por eso la evolución del control ha exigido el desarrollo de sensores y de diferentes técnicas de medida y tratamiento de la señal. Actualmente se tiende a incluir dentro del propio sensor toda la electrónica que realiza el tratamiento de la señal y poder así manipularla.

En la figura 5 se muestra la representación en diagrama de bloques del control a lazo cerrado (para representar gráficamente la relación que existe entre los componentes de un sistema), en donde se puede a su vez expresar la ecuación de transferencia para dicho diagrama tal y como se hace en la ecuación 15.

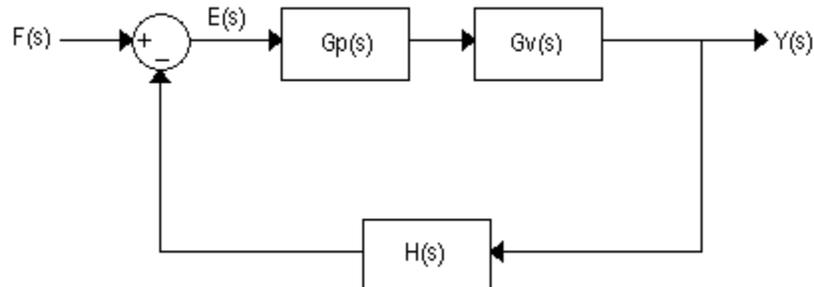


Figura 5. Diagrama de bloques del control a lazo cerrado.

De este diagrama de bloques se tiene:

$F(s)$: Señal de entrada.

$E(s)$: Señal de error.

$Y(s)$: Señal de salida.

$H(s)$: Función de transferencia de realimentación.

$G_p(s)$: Función de transferencia del regulador o controlador.

$G_v(s)$: Función de transferencia de la planta a controlar.

$$\frac{F(s)}{Y(s)} = \frac{G_p(s) \cdot G_v(s)}{1 + G_p(s) \cdot G_v(s) \cdot H(s)} \quad \text{Ecuación 15}$$

Hoy en día el método más utilizado para realizar el control automático de procesos es con el regulador proporcional-integral-derivativo o PID, el cual toma en cuenta el error, la integral del error y la derivada del error. La acción de control del regulador se calcula multiplicando los tres valores por una constante y sumando los resultados. Los valores de las constantes, que reciben el nombre de constante proporcional (K_p), integral (K_i) y derivativa (K_d), definen el comportamiento del regulador.

3.4.2 Controlador PI

El tipo de controlador PI o compensador de atraso permite eliminar la desviación del controlador proporcional (K_p) y es utilizado comúnmente para mejorar el comportamiento del sistema ante cambios rápidos en la variable de proceso.

La acción de este compensador se basa en la constante de tiempo o de integración τ_i , la cual indica que mientras este presente el término de error el controlador se mantendrá cambiando su respuesta y, por lo tanto, integrando el error para así eliminarlo. Por lo tanto, se tiene que mientras el error este presente el controlador se mantendrá integrándolo y por lo tanto, añadiéndolo a la salida hasta que el error desaparezca. La ecuación 16 describe el comportamiento del controlador PI.

$$G_p(s) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{\tau_i \cdot s} \right) \quad \text{Ecuación 16}$$

En donde:

$G_p(s)$: Función de transferencia del controlador PI.

K_p : Constante proporcional.

τ_i : constante de tiempo o de integración.

3.4.3 Métodos gráficos de estabilidad

En la práctica el desempeño de un sistema de control se determina más realísticamente por sus características en el dominio del tiempo. Por otro lado, en el dominio de la frecuencia se cuenta con una serie de métodos gráficos que no están limitados a un bajo orden. Se puede así aprovechar que las propiedades en el dominio del tiempo de un sistema se pueden predecir con base en las características en el dominio de la frecuencia; por lo que la utilización de estos métodos gráficos representa una herramienta útil para el diseño de reguladores o compensadores.⁸

3.4.3.1 Carta de Nichols⁹

En sí el análisis con la carta de Nichols es una modificación de los métodos de Bode y Nyquist, pero con algunas otras ventajas. Básicamente la carta de Nichols es una transformación de los círculos de magnitud y fase en la representación rectangular en contornos no circulares magnitud y fase, sobre una representación, en coordenadas polares, de la magnitud en decibeles contra el ángulo de fase.

La representación sobre la carta de Nichols tiene algunas ventajas: en primer lugar se puede representar un intervalo de amplitudes más amplio, debido a que la magnitud de la respuesta de lazo abierto se representa sobre una escala logarítmica. Además la representación de la función de transferencia se obtiene mediante la suma algebraica de las magnitudes individuales. A diferencia de las gráficas de bode, el método de Nichols presenta la ventaja de mostrar en una sola grafica la fase y la magnitud de la función que se analiza.

3.4.3.2 Gráficas de Bode

Los diagramas o gráficas de Bode son gráficos de márgenes de fase y de ganancia en función de la frecuencia. Ellas constituyen una herramienta fácil y sencilla y de suma utilidad para el análisis y diseño de sistemas lineales. Una

⁸ Kuo, Benjamín. C. *Sistemas de Control Automático*. 7a.Ed

⁹ Información obtenida de la página en Internet: <http://www.monografias.com>

representación de Bode consiste de dos gráficos: el primero el log MR (ganancia) vrs w y el segundo θ vrs w . Frecuentemente, el término $20 \log MR$ se expresa en decibeles y se grafica en vez de log MR.

El criterio de estabilidad de Bode para la respuesta de un sistema en el dominio de la frecuencia, puede determinar los límites de estabilidad para lazos de control por retroalimentación aún cuando se incluya un tiempo muerto en el lazo. El criterio consiste en determinar la frecuencia a la cual el ángulo fase de la función de transferencia de lazo abierto es -180° ($-\pi$ radianes) y la relación entre las amplitudes para dicha frecuencia. El criterio de estabilidad de Bode determinado sobre la base de la respuesta de un sistema en el dominio de la frecuencia se puede establecer de la siguiente manera:

“Para que un sistema sea estable, la Relación entre las Amplitudes debe ser menor que la unidad cuando el ángulo fase es -180° ($-\pi$ radianes)”. Es decir:

Si $MR < 1$ a un $\theta = -180^\circ$, el sistema es estable

Si $MR > 1$ a un $\theta = -180^\circ$, el sistema es inestable

Para un $MR = 1$ a un $\theta = -180^\circ$, los diagramas de Bode de una lazo de control por retroalimentación permiten determinar la ganancia última del controlador. La frecuencia a la que se alcanza esta condición es la frecuencia última.

Capítulo 4. Procedimiento Metodológico

4.1 Reconocimiento y definición del problema

Como ya se ha mencionado anteriormente en el documento, la problemática bajo la cual se desarrolló este proyecto se basa en la necesidad de rediseñar la etapa de control del proceso de termización de la empresa Nestlé-Prolacsa en Nicaragua, esto debido a los diferentes cambios que se dieron en el mismo para obtener una mayor productividad y a la vez apegarse a una serie de normas y requerimientos de higiene y seguridad internacionales.

La información referente a la problemática existente y lo que se deseaba obtener en el proceso de termización con la implementación de los cambios, se realizó bajo varias reuniones con el personal de ingeniería y producción de la empresa Nestlé-Prolacsa, en donde se definió los aspectos más importantes a obtener con la realización de este proyecto.

4.2 Obtención y análisis de información

La información recolectada a lo largo del desarrollo del proyecto se hizo a través de consultas a los ingenieros de la empresa Nestlé-Prolacsa en cuanto a lógica de funcionamiento, secuencias y requerimientos de diseño propios del proceso de termización, además de consultas técnicas por medio de correos a los distribuidores de los diferentes equipos. Por otro lado, las licencias de programación a nivel de controlador como de panel de operador las suministró la empresa con la cual se realiza el proyecto.

Así, el análisis de la información se enfocó principalmente a los siguientes puntos:

- a. Consultas con personas experimentadas y conocedoras del proceso y de procesos similares.
- b. Consultas con los encargados de los equipos como las bombas de agua, válvulas, centrífugas y sensores presentes en la planta.
- c. Analizar las condiciones físicas del proceso de termización.

- d. Información de manuales y hojas de datos de los equipos a utilizar.
- e. Documentación relacionada con el análisis del control automático de procesos.

Bajo estos puntos y con la aplicación de los conocimientos adquiridos a lo largo de la preparación como futuro ingeniero, se diseñó la solución para llevar a cabo el proceso de automatización de la etapa de termización.

4.3 Implementación de la solución

Para lograr desarrollar la propuesta de solución se debió realizar una serie de pasos los cuales abarcan desde el inicio con la búsqueda de información de referencia y que se mencionan a continuación:

- a. Reconocimiento del proceso de termización.

El estudio y reconocimiento inicial del proceso de termización que se lleva a cabo en la empresa Nestlé-Prolacsa se realizó bajo una reunión con los ingenieros de la misma, en donde se explicó las características más importantes de funcionamiento del mismo así como su lógica de proceso.

- b. Adquisición de datos.

Posteriormente, bajo una segunda reunión con los ingenieros de la empresa Nestlé-Prolacsa, se llevó a cabo la recaudación de los datos de funcionamiento más importantes del proceso, así como de las características del equipo presente en la planta y que se seguiría utilizando (centrífugas, válvulas, sensores, entre otros).

- c. Selección del equipo a implementar en el proyecto.

Se requirió investigar los equipos presentes en el mercado y sus correspondientes características, y analizando las características presentes en el proyecto, se procedió a la selección del equipo que mejor se ajustaba a los requerimientos para así utilizarlo en la solución.

d. Estudio teórico de los lazos de control.

En este punto, una vez escogido el equipo a utilizar y con las especificaciones de funcionamiento del proceso, se realizó el estudio teórico de los lazos de control presentes en el proceso (nivel, temperatura y flujo); para así diseñar los correspondientes compensadores y obtener el control automático del proceso.

e. Pruebas y simulación del control de los lazos.

Una vez realizado el estudio de los lazos cerrados se procedió a realizar la simulación de los mismos con el compensador diseñado, para así observar el correcto funcionamiento bajo los requisitos dados inicialmente.

f. Diseño de programa de control y de la interfaz de usuario para el centro de control de operación.

Se diseñó la aplicación para el control del proceso, basados en las características solicitadas por la empresa Nestlé-Prolacsa; en donde además se requirió de las licencias de los softwares respectivos para realizar la interfaz de recolección de datos, monitoreo y control.

g. Pruebas y simulación de la programación de secuencia de funcionamiento.

Con el diseño del programa de control principal y la aplicación para el centro remoto de control de operaciones, se procedió a realizar las pruebas de las secuencias del proceso.

Capítulo 5. Descripción detallada de la solución

5.1 Análisis de las características principales de la solución

Dado que se requiere mejorar y modernizar la planta en cuanto a equipo a implementar, se tuvo desde un inicio presente en la elaboración del diseño de la solución, trabajar con equipo moderno que brinde eficiencia, confiabilidad y que a la vez trabajen bajo determinados estándares de calidad.

Para iniciar la explicación del proceso de solución, dada la problemática existente, es importante mencionar y enumerar las características que se desean para el proceso.

1. Utilización de un controlador lógico programable maestro el cual será el encargado de manejar todo el equipo de campo, así como las secuencias en modo automático y el control de los lazos cerrados.
2. Utilización de un panel de usuario el cual muestre de manera clara e ilustrativa el monitoreo del equipo del proceso de termización, así como de los valores de las variables del mismo dadas por los diferentes sensores de flujo, presión, temperatura y nivel instalados en campo.
3. Propuesta del diseño del control automático de cada uno de los lazos cerrados del proceso (nivel, de flujo y de temperatura) basados en el estudio y análisis matemático y gráfico de cada uno de dichos lazos y sus características específicas.
4. Configuración de una red de comunicación bajo el protocolo Ethernet/IP la cual enlace los diferentes dispositivos de control presentes en el proceso de termización, como lo son el controlador principal, el panel de usuario y equipo de campo.
5. Programación de cada uno de los bloques de control de cada equipo así como de las rutinas de la secuencia de operación del equipo de termización en modo automático, esto a partir de la descripción del proceso suministrada por la empresa Nestlé-Prolacsa.

5.2 Descripción del hardware

Una vez estudiada la información recaudada con la ayuda de la empresa Nestlé-Prolacsa y estudiando los requerimientos del proceso, se estableció el diagrama de bloques de la figura 6, en el cual se muestra de manera general los bloques con los cuales se trabajaría para dar la solución a la nueva etapa de control del proceso de termización.

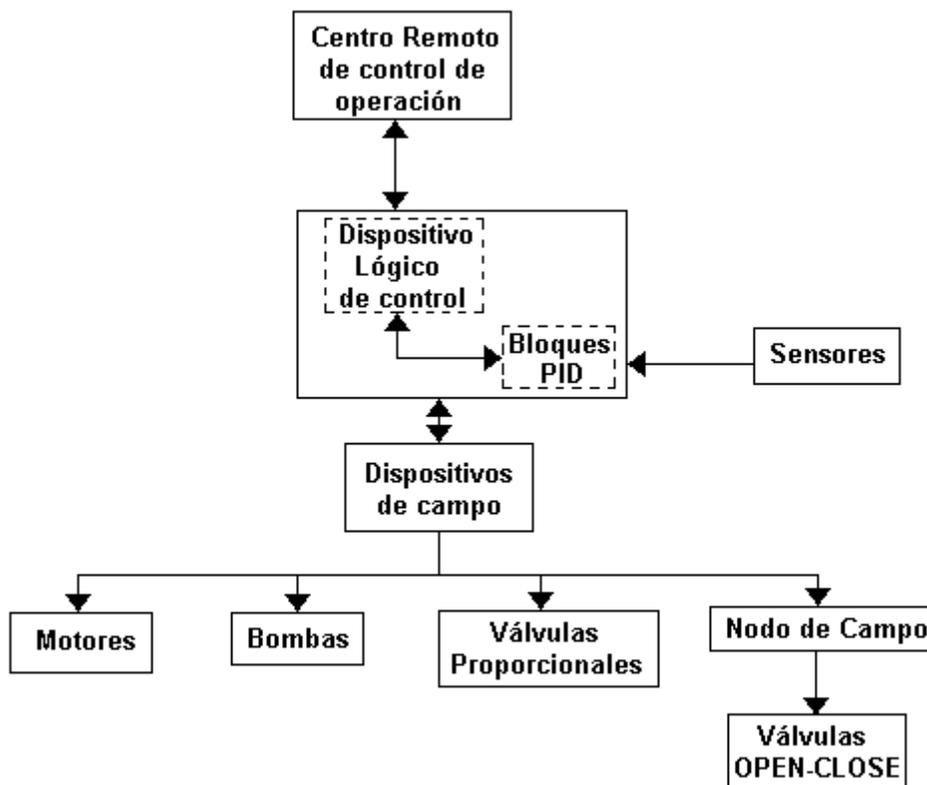


Figura 6. Diagrama de la solución para el control del proceso de termización.

Dentro de toda la información recolectada del proceso se logró organizar el diagrama mostrado en la figura 6, en donde se halló la necesidad de contar con un controlador central que cumpla ciertas características específicas, además de otras más solicitadas directamente por la empresa tal y como se enumeran a continuación:

- a. Manejar una cantidad considerable de señales tanto a 24 VCD como analógicas de 4-20 mA.
- b. Comunicación bajo el único protocolo de comunicación Ethernet/IP, esto para evitar equipo extra debido a adaptadores de comunicación en el sistema.
- c. Manejo de tres lazos de control automático PID.
- d. Capacidad de expansiones a futuro en cuanto a equipo y secuencias de programa.
- e. Respaldo inmediato en cuanto a garantía del producto.

Dadas estas características requeridas se optó por la utilización de un controlador lógico programable, el cual cuenta entre otras, con las características que se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Características del controlador lógico programable seleccionado.

Modelo	Características
CompactLogix 1769-L32E	<ul style="list-style-type: none"> - 512 kB de memoria interna. - Capacidad de manejar módulos de entradas y salidas de tipo digitales como analógicas. - Capacidad de manejar hasta un total de 30 módulos locales de entradas y salidas (digitales y/o analógicas). - Puertos de comunicación Ethernet/IP y RS-232 integrados. - Manejo de bloques de control PID predefinidos. - Posibilidad de programación en diferentes lenguajes.

Con esto se logra cumplir con las características requeridas además de contar con un controlador robusto y de rápido procesamiento de datos, lo cual de igual manera es importante para el control y monitoreo del proceso de termización.

Por otro lado, debido a la gran cantidad de válvulas OPEN-CLOSE del proceso ubicadas en campo, y por tanto distantes del panel principal de control, se optó por buscar una manera alternativa y eficiente que manejara de manera remota las señales de activación de dicho equipo. Se encontró en el mercado y se decidió utilizar un nodo esclavo de campo, el cual maneja la activación de dichas señales

por comunicación Ethernet/IP, evitando así la utilización ineficiente de la gran cantidad de señales de salida digital que conllevaba la activación de todas las válvulas del proceso.

La manera de operación se explica con la ayuda de la figura 7, en la cual se tiene que dada la lógica de control programada en el dispositivo lógico principal, se genera la señal de activación para una válvula dada, señal que se transmite vía protocolo Ethernet/IP hasta el nodo de campo el cual a su vez recibe y manipula dicha señal para activar un solenoide y así la entrada de aire a la válvula respectiva. La configuración para el funcionamiento específico de este nodo de campo en el presente proyecto se muestra en el Anexo A.1.

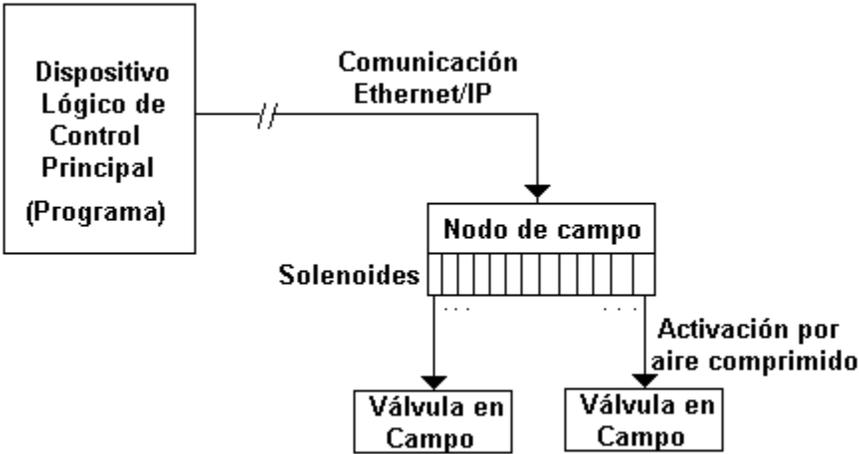


Figura 7. Diagrama de activación de válvulas de campo.

Para el manejo de la activación de las dos centrífugas, las bombas y los motores, la referencia de los dispositivos de control y las señales de los sensores; se tiene la conformación de módulos locales (junto al controlador) que se lista en la tabla 2.

Tabla 2. Lista del equipo del bus de módulos de control.

Modelo	Cantidad	Descripción
1769-L32E	1	Controlador lógico programable CompactLogix
1769-IF16C	1	Módulo de 16 entradas analógicas de 4-20mA
1769-OF8C	1	Módulo de 8 salidas analógicas de 4-20mA
1769-IQ32	1	Módulo de 32 entradas digitales a 24 V DC
1769-OB32	1	Módulo de 32 salidas digitales a 24 V DC
1769-PA4	1	Fuente del controlador lógico programable

Por otro lado, el panel de operador utilizado en la solución tiene integrado un puerto de comunicación Ethernet/IP y RS-232, por lo que no requiere de ningún convertidor de protocolo, siendo esto de gran importancia ya que se desea tener una red con un protocolo generalizado entre los dispositivos a manejar (Ethernet/IP).

Tomando en cuenta todos los dispositivos a manejar se puede configurar la red de comunicación, la cual como se ha mencionado es bajo el protocolo Ethernet/IP y dentro de la red y direcciones IP específicas suministradas por la empresa, la cual está bajo la red 10.167.16.XXX. En la figura 8 se muestra el diagrama de la topología final de la red implementada con su respectiva dirección IP y en la tabla 3 se presenta la lista de direcciones de cada uno de los dispositivos.

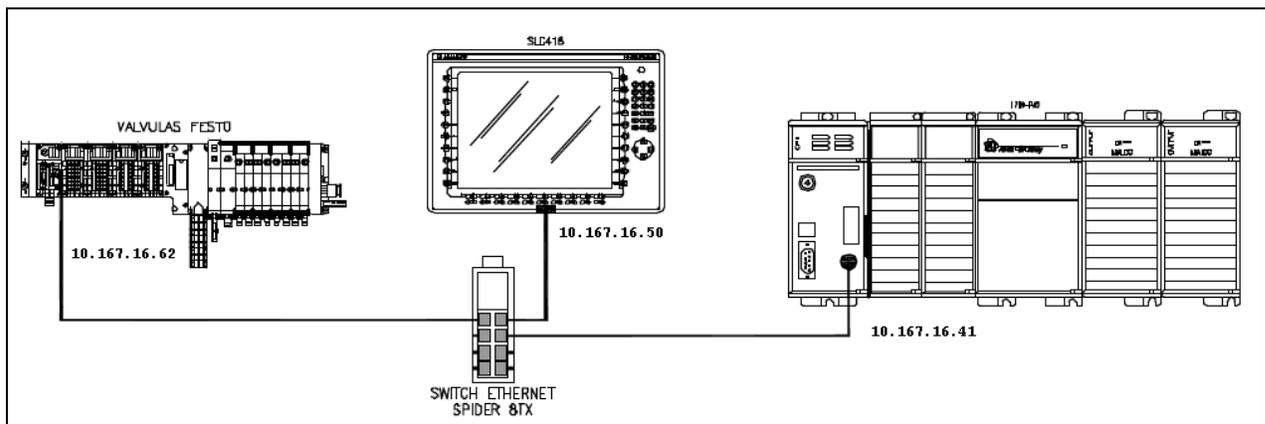


Figura 8. Diagrama de la topología de red Ethernet/IP implementada.

Tabla 3. Direcciones IP de los dispositivos utilizados.

Dirección IP	Dispositivo
10.167.16.41	Controlador lógico programable
10.167.16.50	Panel de operador
10.167.16.62	Nodo de campo

Por último, para llevar a cabo el control de los lazos cerrados del proceso de termización se utilizó el siguiente equipo tanto de medición como de control, el cual se especificará y estudiará más adelante en el documento, en el apartado 5.4 correspondiente al análisis de los lazos de control del proceso de termización.

1. Lazo de control de nivel: se utilizó un sensor-transmisor de nivel del tipo “*Rosemount 3051 Pressure Transmitter*” y una válvula proporcional de la familia *GEA* modelo “*Varivent serie A*”.
2. Lazo de control de temperatura: se utilizó un sensor-transmisor de temperatura del tipo RTD de “*Rosemount 3144P*” y una válvula proporcional modelo “*Fisher-Rosemount PF52.1-HP*”.
3. Lazo de control de flujo: se utilizó un sensor-transmisor de flujo modelo “*Rosemount 8721*” y una bomba de la familia *Baldor-Reliance* modelo *Washdown Duty Motor* número de catálogo *CWDM3713T* controlada por variador de frecuencia.

5.3 Descripción del software

A nivel de programación del controlador lógico programable, la configuración del sistema se realizó utilizando el paquete de software RSLogix 5000 v17. Con esto y con el controlador utilizado, se tiene la posibilidad de programación de tareas alternas de tipo continuo, periódica o por evento dependiendo del proceso que se desee controlar o monitorear.

Además, mediante este software se puede utilizar diferentes tipos de programación como lo son programación en escalera, texto estructurado, diagrama de bloques funcionales y diagrama de bloques secuenciales; con los que se puede desarrollar cada una de las funcionalidades del sistema y de su equipo.

Por otro lado, esta versión de software permite la programación de estructuras llamadas *Add On Instructions*, las cuales se utilizan en este proyecto. Esta herramienta permite reducir la programación y tener programas más ordenados al contar con bloques funcionales preelaborados. Este es el caso de los motores y válvulas, los cuales son equipos con un bloque de programación fija para cada equipo, lo cual volvería la programación repetitiva para todos los motores o válvulas del sistema.

Inicialmente, se debió diseñar un bloque general de programación de control de señales para las válvulas y los motores, con lo que se debió trabajar con las señales dadas en las tablas 4 y 5 respectivamente. La lógica de control del bloque para cada equipo debió de ser programado bajo la secuencia mostrada en la figura 9.

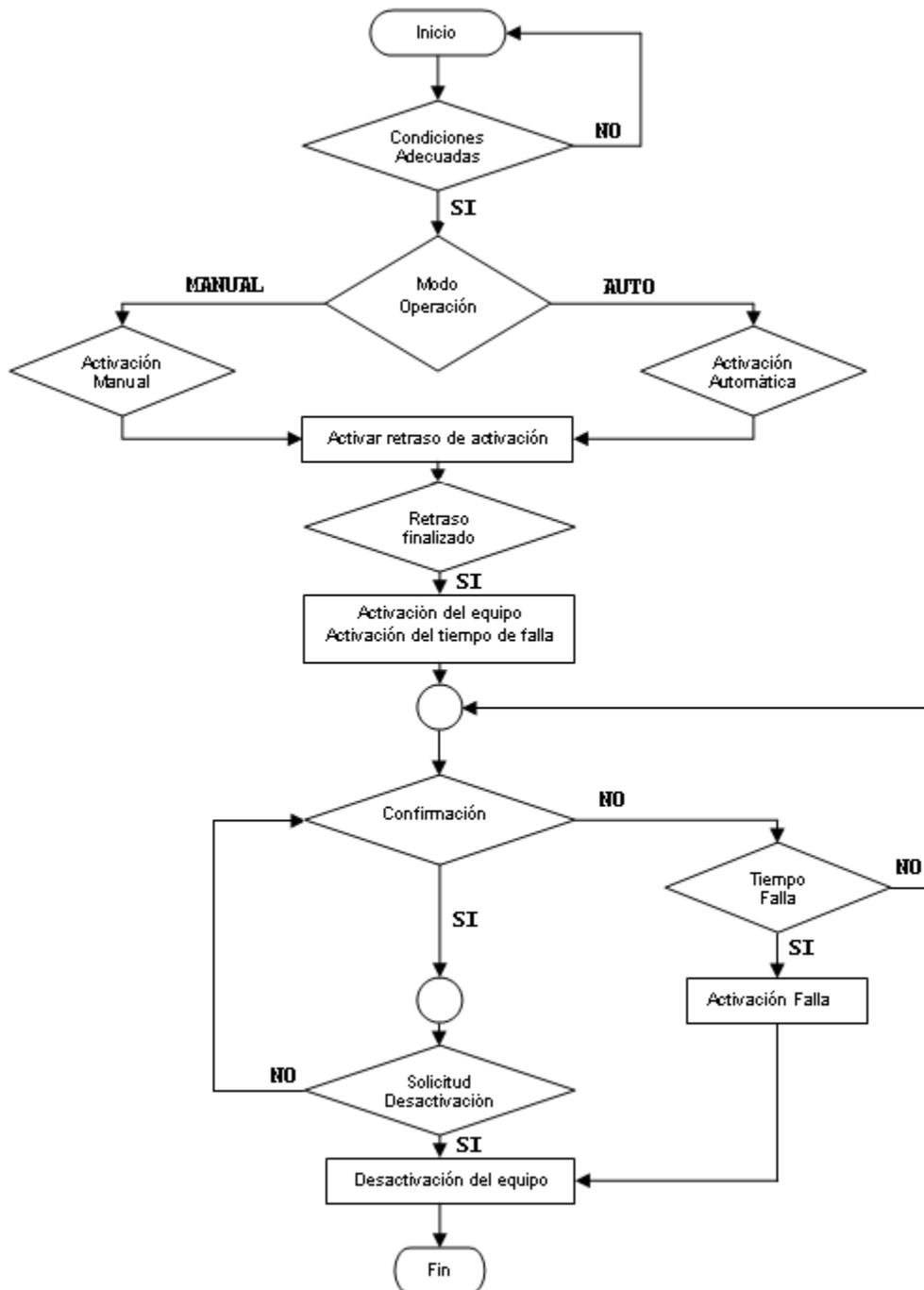


Figura 9. Diagrama de flujo para lógica de bloques de válvula y motor.

Tabla 4. Señales del bloque de control de válvula.

Señal	Tipo	Fuente	Destino
Comando Activación	Salida	PLC	Nodo de campo
Confirmación Apertura	Entrada	Señal de campo	PLC
Confirmación Cierre	Entrada	Señal de campo	PLC
Apertura Manual	Entrada	Panel de Operador	PLC
Cierre Manual	Entrada	Panel de Operador	PLC
Modo Manual/Automático	Entrada	Panel de Operador	PLC
Reset de Falla	Entrada	Panel de Operador	PLC
Falla	Salida	PLC	Panel de Operador
Condiciones OK	Entrada	PLC	Panel de Operador

Tabla 5. Señales del bloque de control de motor.

Señal	Tipo	Fuente	Destino
Comando Arranque	Salida	PLC	Nodo de campo
Confirmación Arranque	Entrada	Señal de campo	PLC
Arranque Manual	Entrada	Panel de Operador	PLC
Apagado Manual	Entrada	Panel de Operador	PLC
Modo Manual/Automático	Entrada	Panel de Operador	PLC
Reset de Falla	Entrada	Panel de Operador	PLC
Falla	Salida	PLC	Panel de Operador
Jog	Entrada	Señal de campo	PLC
Condiciones OK	Entrada	PLC	Panel de Operador

Una vez realizados los bloques de control para el equipo de válvulas y motores se debió realizar y programar la lógica de la secuencia en funcionamiento en modo automático del proceso de termización. La información de dicha secuencia fue suministrada por el personal de la empresa Nestlé-Prolacsa con el fin de llevar a cabo la activación y accionamiento de los diferentes equipos tal y como ellos lo sugerían para el proceso.

Esta secuencia en modo automático se puede resumir en los pasos que se mencionan a continuación, y para obtener mayor referencia del proceso en sí de termización de la empresa Nestlé-Prolacsa dirigirse a la sección 3.1 de este documento.

1. Técnica

- Abrir la válvula de drenaje (V11.01).
- Verificar rutas.

2. Preparación de Agua Caliente

- Verificar el nivel del agua (LSH06.02 - LSL06.02) en el tanque de recirculación de agua caliente (TANK06.02).
- Cerrar la válvula V06.03 y abrir la válvula V06.04 para recircular el agua hasta alcanzar la temperatura de inicio de proceso (aproximadamente 74°C).
- Si el nivel de agua es bajo en el tanque de recirculación de agua caliente (TANK06.02) mantener abierta la válvula de ingreso de agua potable (V04.03) hasta que alcance el nivel alto.
- Si el nivel de agua es alto comenzar la preparación de agua caliente.
- Detener la preparación de agua caliente cuando (TE06.02) alcance los 74°C.

3. Arranque de Clarificadoras

- Iniciar el arranque de las clarificadoras.

4. Alimentar con Leche Fresca

- Una vez alimentada con leche fresca la termización, iniciar el suministro de agua helada al intercambiador de placas abriendo la válvula respectiva (V00.01) y el suministro de agua caliente (abrir V06.03 y cerrar V06.04)

5. Fin de Termización

- Cuando se desee terminar el proceso de termización se deberá de realizar con el oprimir un botón con la opción de parar proceso.

Los pasos de termización mencionados anteriormente se pueden representar en un diagrama de flujo con el fin de hacer más sencilla la tarea de programación de la secuencia del modo automático del proceso de termización. Este diagrama se muestra en la figura 10 y fue el utilizado para la labor de dicha programación.

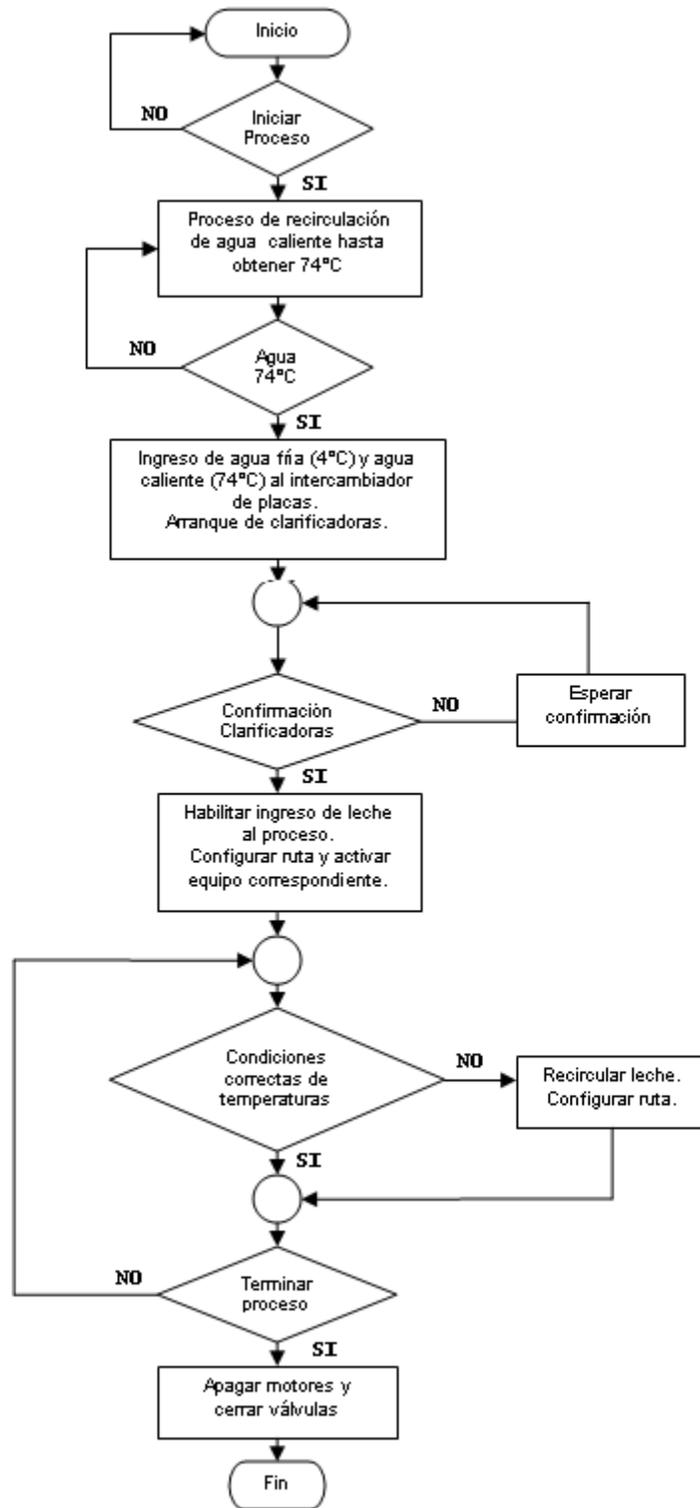


Figura 10. Lógica de programación del modo automático del proceso de termización.

Por otro lado, es importante mencionar que para implementar el control PID de los lazos cerrados del proceso de termización, esto a partir del estudio teórico y matemático realizado, se utilizó el bloque *PIDE* del set de instrucciones del software utilizado. Este bloque está construido con las bases de control proporcional, integral y derivativo, con lo que para implementar un control PID en un lazo cerrado únicamente se hace el llamado a este bloque funcional tal y como se muestra en la figura 11, con lo que solo se debe de personalizar cada bloque con las características propias del sistema estudiado y asignar las constantes obtenidas matemáticamente para el lazo.

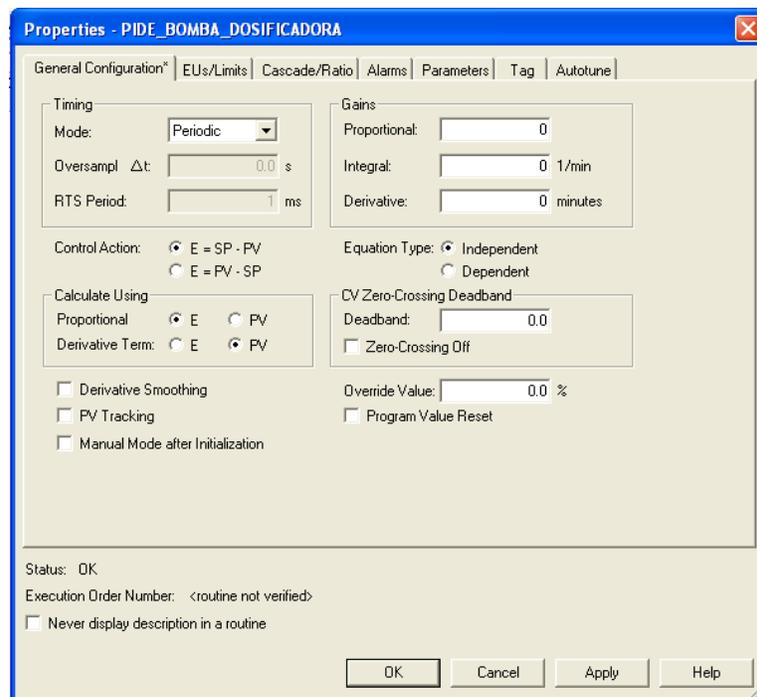


Figura 11. Pantalla de configuración del bloque PIDE del set de instrucciones.

En lo que concierne al diseño y realización de las pantallas del panel de operador a utilizar en el proceso de termización, se decidió implementar una aplicación bajo el software Factory Talk View ME. Esta aplicación se realizó de manera seccionada, con pantallas depuradas conteniendo únicamente la información necesaria para el monitoreo y control del proceso por parte del operador.

Esto se decidió inicialmente como requisito primordial por parte de la empresa, por lo que se estructuró la aplicación siguiendo la lógica de navegación de pantallas tal y como se muestra en la figura 12, en donde se tiene una pantalla principal con el equipo y datos de los parámetros más importantes, así como una pantalla secundaria referente a la preparación del agua caliente utilizada en dicho proceso de termización, en donde de igual manera aparece el equipo utilizado en dicho subproceso.

Además, se tiene que se diseñó pantallas de manejo y manipulación de cada uno de los equipos como motores, bombas y válvulas, para el manejo en modo automático o manual del equipo, y una pantalla para la manipulación de los lazos cerrados, tal como se muestra de igual manera en la figura 12.

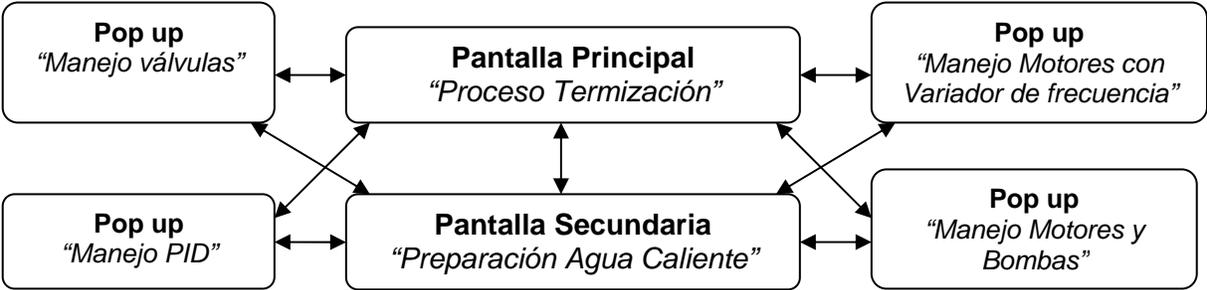


Figura 12. Lógica de navegación de pantallas de la aplicación para el proceso de termización.

5.4 Análisis de lazos de control

Como parte importante para la realización del sistema de control automático del proceso de termización está el estudio matemático de los lazos de control; esto ya que a partir de dicho estudio y el comportamiento en las curvas de respuesta del sistema, se proponen los compensadores específicos para cada uno de los lazos cerrados.

Es importante mencionar que el estudio matemático de los lazos de control involucra tanto los requerimientos de proceso específicos así como las características propias de cada instrumento de control a utilizar y del sistema físico de la planta como lo puede ser tuberías, producto a manipular, entre otros.

Como herramienta a utilizar para realizar un análisis gráfico y más específico de cada planta de cada uno de los lazos de control, se usa el software Matlab, con el cual se observa tendencias y se hace un estudio y análisis mediante métodos gráficos.

Los lazos de control específicos con los que se trabaja para obtener el sistema de control automático del proceso de termización son tres:

1. Lazo de control de nivel: se controlará el nivel de la tina de balance al inicio del proceso por medio del porcentaje de apertura de una válvula proporcional que permite el ingreso de producto.
2. Lazo de control de flujo: se controlará el flujo en la tubería por medio de la velocidad de rotación de una bomba centrífuga que trabaja con variador de frecuencia.
3. Lazo de control de temperatura: se controlará la temperatura de la leche en el proceso por medio del porcentaje de apertura de una válvula proporcional de suministro de vapor para calentar el agua con la cual se calienta dicha leche.

Con la ayuda de la figura 13 se puede observar gráficamente el proceso de termización y los lazos de control de dicho proceso. Para este proceso se tiene valores específicos para el flujo en las tuberías y para la temperatura de la leche en el proceso, mientras que el nivel de la tina de balance puede ser ajustado por el operador. Estos valores son los siguientes:

1. Nivel: puede ser configurado entre $0,4-0,8\text{m}^3$ (400-800L). La tina de balance tiene capacidad para $0,8\text{m}^3$ (800L).
2. Flujo: al tener dos centrifugas clarificadoras si se opera con una el flujo en la tubería deberá ser de $0,22\text{m}^3/\text{min}$ (13 000L/h), mientras que si se opera con las dos deberá de ser de $0,42\text{m}^3/\text{min}$ (25 000L/h).
3. Temperatura: la temperatura del producto en el proceso deberá mantenerse en $72\text{ }^\circ\text{C}$ y así lograr la termización. Con esto la temperatura en el agua deberá mantenerse en $74\text{ }^\circ\text{C}$.

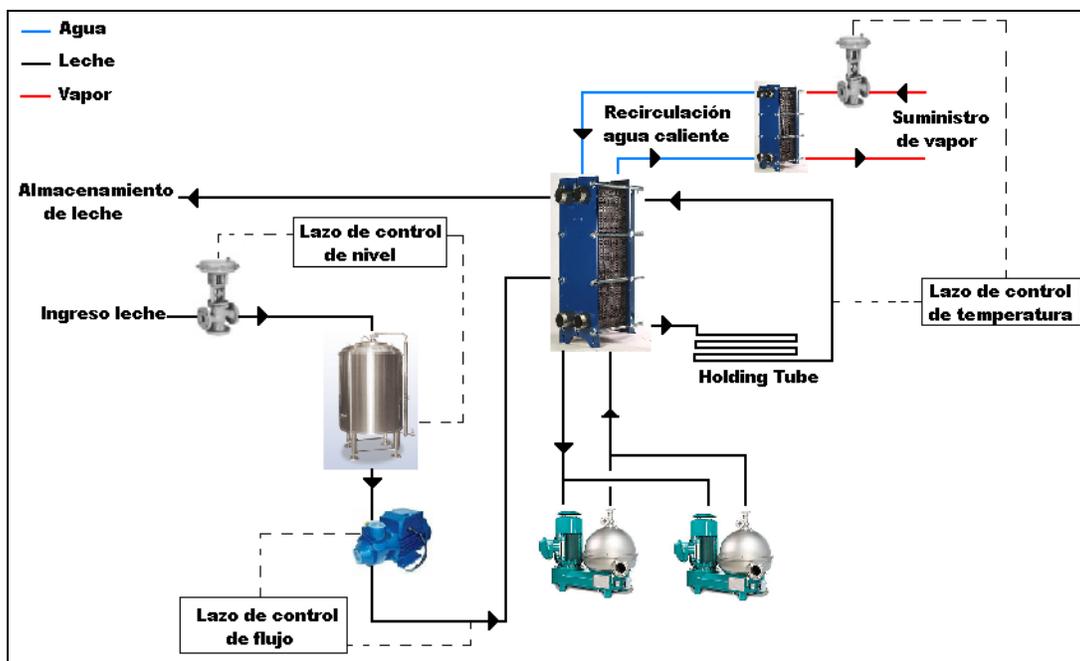


Figura 13. Diagrama general de los lazos control del proceso de termización.

5.4.1 Lazo de control de nivel

5.4.1.1 Descripción del lazo de control

A la hora de estudiar el lazo de control de nivel del proceso de termización y con la ayuda de la figura 14, se tiene que se realiza a través de una válvula proporcional en la entrada, con lo que al aumentar el nivel de la tina de balance del inicio del proceso con respecto al valor set point o SP, dicha válvula se deberá cerrar paulatinamente para lograr llegar a dicho valor de set point. De manera inversa se tiene que si el nivel de la tina de balance disminuye con respecto al valor set point ingresado por el operador, la válvula de control deberá de abrir para lograr alcanzar el valor dado y así lograr obtener el funcionamiento de control automático.

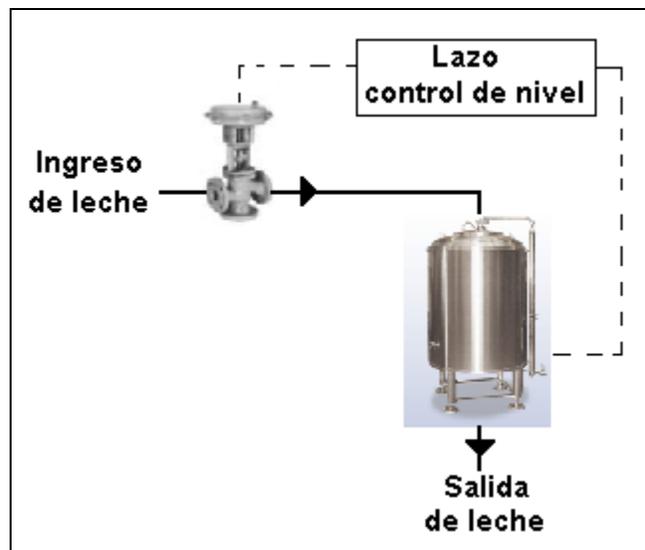


Figura 14. Lazo de control de nivel del proceso de termización.

La función de este punto de almacenamiento o tina de balance al inicio del proceso, es mantener siempre una cantidad constante de leche al inicio del proceso para así asegurarse de tener el producto mínimo requerido para lograr abastecer de leche a termización. Con esto, a la vez, se mantendrá con producto la bomba controlada encargada de mantener el flujo constante en el proceso de termización.

5.4.1.2 Sensor utilizado

Se tiene como sensor para el lazo de realimentación de control un sensor de nivel tipo “Rosemount 3051 Pressure Transmitter” el cual es mostrado en la figura A.2.1 del Apéndice A.2.

Este sensor tiene como parámetros más importantes los mostrados en la figura 15 y 16, los cuales fueron tomados de la hoja de datos del sensor respectivo. De estas figuras se toman los datos requeridos para obtener la ecuación de la función de transferencia del sensor y necesaria para realizar el análisis matemático del lazo de control además de observar que la respuesta del sensor es lineal.

Standard Configuration	
Unless otherwise specified, transmitter is shipped as follows:	
ENGINEERING UNITS	
<i>Differential/Gage:</i>	inH ₂ O (Range 0, 1, 2, and 3) psi (Range 4 and 5)
<i>Absolute/3051T:</i>	psi (all ranges)
4 mA	0 (engineering units above)
20 mA	Upper range limit
Output:	Linear
Flange type:	Specified model code option
Flange material:	Specified model code option
O-ring material:	Specified model code option
Drain/vent:	Specified model code option
Integral meter:	Installed or none
Alarm:	Upscale
Software tag:	(Blank)

Figura 15. Datos técnicos del transmisor de nivel utilizado para el proceso de termización (I).

3051CD, 3051CG, 3051L						
Range	Minimum Span		Range and Sensor Limits			
	3051CD ⁽¹⁾ , CG, L	Upper (URL)	3051C Differential	Lower (LRL)		
				3051C/ Gage	3051L Differential	3051L Gage
0	0.1 inH ₂ O (0,25 mbar)	3.0 inH ₂ O (7,47 mbar)	-3.0 inH ₂ O (-7,47 mbar)	NA	NA	NA
1	0.5 inH ₂ O (1,2 mbar)	25 inH ₂ O (62,3 mbar)	-25 inH ₂ O (-62,3 mbar)	-25 inH ₂ O (-62,3 mbar)	NA	NA
2	2.5 inH ₂ O (6,2 mbar)	250 inH ₂ O (0,62 bar)	-250 inH ₂ O (-0,62 bar)	-250 inH ₂ O (-0,62 bar)	-250 inH ₂ O (-0,62 bar)	-250 inH ₂ O (-0,62 bar)
3	10 inH ₂ O (24,9 mbar)	1000 inH ₂ O (2,49 bar)	-1000 inH ₂ O (-2,49 bar)	0.5 psia (34,5 mbar abs)	-1000 inH ₂ O (-2,49 bar)	0.5 psia (34,5 mbar abs)
4	3 psi (0,20 bar)	300 psi (20,6 bar)	-300 psi (-20,6 bar)	0.5 psia (34,5 mbar abs)	-300 psi (-20,6 bar)	0.5 psia (34,5 mbar abs)
5	20 psi (1,38 bar)	2000 psi (137,9 bar)	-2000 psi (-137,9 bar)	0.5 psia (34,5 mbar abs)	NA	NA

Figura 16. Datos técnicos del transmisor de nivel utilizado para el proceso de termización (II).

Como se estudió en la sección 3.2.4 se tiene que para el sensor de nivel la ecuación de la función de transferencia es:

$$H(s) = \frac{K_T}{\tau \cdot s + 1}$$

Donde:

K_T : Ganancia del transmisor.

τ : Constante de tiempo del transmisor.

La ganancia del transmisor en el rango utilizado, el cual es el 2 (2,5 inH₂O - 250 inH₂O) ya que la tina de balance mide aproximadamente 80 in, está dado por la relación entre el rango de entrada y el de salida de la siguiente manera:

$$K_T = \frac{\text{Rango salida}}{\text{Rango entrada}} = \frac{20 \text{ mA} - 4 \text{ mA}}{8,99 \text{ psi} - 0,0899 \text{ psi}} = 1,8 \text{ mA} / \text{psi}$$

Además, se toma de la hoja de datos respectiva del sensor la constante de tiempo del transmisor la cual se define tal y como se muestra en la imagen de la figura 17.

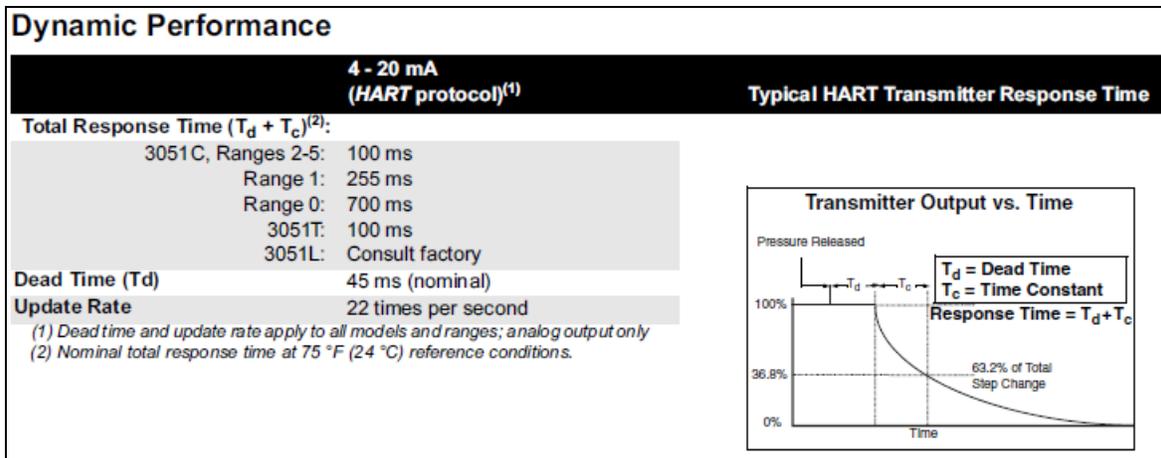


Figura 17. Tiempo de respuesta del sensor de nivel utilizado en el proceso de termización.

Por lo tanto, se tiene que el tiempo de respuesta para el sensor de nivel utilizado en el rango 2 está dado por:

$$\tau = T_d + T_c = 100ms$$

Así se puede tabular los datos finales para el sensor de nivel utilizado para el proceso de termización tal y como se muestra en la tabla 6.

Tabla 6. Datos del transmisor “Rosemount 3051 Pressure Transmitter”.

Familia	Transmisor	Ganancia K_T [mA/psi]	Constante de Tiempo τ [s]
Rosemount	Rosemount 3051	1,8	0,1

Se obtiene la ecuación de la función de transferencia para el transmisor del sensor de nivel del proceso de termización tal y como se muestra a continuación.

$$H(s) = \frac{1,8}{0,1 \cdot s + 1}$$

5.4.1.3 Instrumento de control

El control de nivel de este proceso se realiza por medio de una válvula proporcional de la familia *GEA* modelo *Varivent serie A*, la cual es mostrada en la figura A.2.2 del Apéndice A.2, y tiene como característica importante pertenecer al tipo de control de flujo porcentual.

En el sistema estudiado se tiene que se trabajará con leche, con un flujo nominal de aproximadamente 25 m³/h (25000 L/h) y bajo determinadas condiciones de presión en la válvula, las cuales se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Condiciones del sistema de termización.

Líquido	Densidad [kg/h]	Flujo nominal [m ³ /h]	Diferencia de presión en válvula [bar]
Leche entera	1032	25	1

Con esta información y con la ayuda de la ecuación para obtener el valor de la constante de la válvula a utilizar, la cual es obtenida de la respectiva hoja de datos y que se muestra a continuación, se procede a obtener dicha constante.

$$K_v = \frac{Q}{31,6} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\Delta p}}$$

Donde:

K_v : Ganancia de la válvula [m³/h].

Q : Flujo del líquido [m³/h].

ρ : Densidad del líquido [kg/h].

Δp : Diferencia de presión en la válvula [bar].

Se obtiene así el siguiente valor de constante para la válvula de control de nivel bajo las condiciones propias del proceso de termización.

$$K_v = \frac{25}{31,6} \cdot \sqrt{\frac{1032}{1}}$$

$$K_v = 25,42 \text{ m}^3/\text{h}$$

Pero a la vez se tiene que es recomendado sobredimensionar este valor en un factor dado en la propia hoja de datos de la válvula, lo que asegura el funcionamiento del control incluso aún cuando los datos de funcionamiento se desvíen, por lo que se tiene como resultado el siguiente valor de constante de válvula.

$$K_v = \frac{25,42 \text{ m}^3/\text{h}}{0,7} = 36,31 \text{ m}^3/\text{h}$$

Con la ayuda de la tabla 8, se tiene que para la válvula proporcional a utilizar en el proceso de termización, la cual como se mencionó es de la familia *GEA* modelo *Varivent serie A*, DN80 de 3" y actuador MFI-30, la constante de ganancia de la válvula es $K_v = 43 \text{ m}^3/\text{h}$, con lo que queda demostrado que la válvula a utilizar satisface las condiciones nominales de operación del proceso de termización de la empresa Prolacsa.

Tabla 8. Datos del valor del coeficiente de ganancia K_V de la válvula de control de nivel.

DN	Antrieb Actuator	Sitz/Size Ø	Kvs-Wert Kvs-value	max. perm. differential pressures Δp (bar)				
				Ventilfunktion/Valve function federschließend/spring to close		Ventilfunktion/Valve function federöffnend/spring to open		
metric	Typ-Hub Type-Stroke	mm		Federanzahl/No. of springs 3	Federanzahl/No. of springs 6	Federanzahl/No. of springs 3		
Inch OD Inch IPS								
25	1"	MFI-20	11	S 2	2,5	25	25	25
			16		4	25	25	25
			19		7	25	25	25
			24		11	22,6	25	25
40	1 1/2"	MFI-20	19	S 5,6	7	25	25	25
			24		11	22,6	25	25
			32 (37)		18	11,1	25	25
50	2"	MFI-20	24	S 8,4	11	22,6	25	25
			32 (37)		18	11,1	25	25
			37		26	7,6	21,5	25
65	2 1/2"	MFI-30	37	S 14	26	15	20	20
			48		43	8	20	20
			62		50	4	11,6	20
		MFIII-30	37	S 14	26	16	16	20
			48		43	16	16	20
			62		50	13,3	16	20
80	3"	MFI-30	48	S 21,1	43	8	20	20
			62		68	4	11,6	20
			73		85	2,5	8	20
		MFIII-30	48	S 21,1	43	16	16	20
			62		68	13,3	16	20
100	4"	MFI-30	62	S 34,2	68	4	11,6	20
			73		100	2,5	8	20
			90		120	1,2	4,7	-

Así mismo se tiene que para dicha válvula proporcional la constante de tiempo o tiempo de respuesta de la misma es de 2 segundos, con lo que se puede resumir los datos obtenidos para dicha válvula en la tabla 9.

Tabla 9. Datos de la válvula de control de lazo de nivel del proceso de termización.

Familia	Serie	Ganancia K_V [m ³ /h]	Constante de Tiempo τ_V [s]
GEA	Varivent serie A	43	2

Además, según se estudio en la sección 3.2.5.3, se sabe que la ecuación para la función de transferencia para una válvula de control está dada por la siguiente ecuación.

$$G_V(s) = \frac{K_V}{\tau_V \cdot s + 1}$$

Donde:

K_v : Ganancia de la válvula.

τ_v : Constante de tiempo de la válvula.

Por lo que se tiene como resultado la siguiente ecuación para la función de transferencia de la válvula de control del lazo de nivel del proceso de termización.

$$G_v(s) = \frac{43}{2 \cdot s + 1}$$

5.4.1.4 Control automático del lazo

Para el lazo de control de nivel se tiene que la función de transferencia a lazo abierto está dada por la ecuación que se muestra a continuación.

$$G_v(s) = \frac{43}{2 \cdot s + 1} = \frac{21,5}{s + \frac{1}{2}}$$

Con esta ecuación se puede representar el diagrama de ubicación del lugar de las raíces a lazo abierto, en donde se cuenta con un polo en -0,5. Este diagrama se muestra en la figura 18.

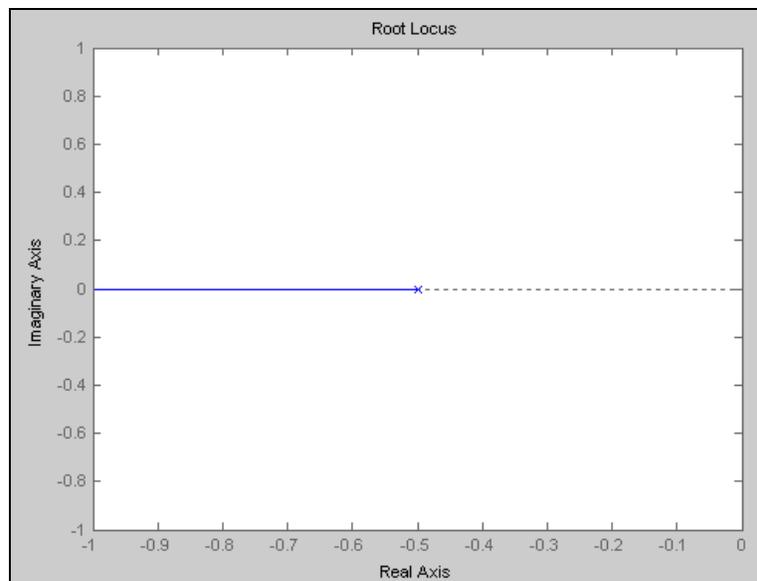


Figura 18. Lugar de las raíces del lazo abierto del control de nivel.

Al diseñar el compensador se parte del criterio de compensado por ubicación de un cero (z_0) arbitrario. El criterio para ubicar el cero del compensador se basa inicialmente en el tipo de sistema (tipo 0 para este caso) con lo cual se coloca el valor a la derecha del polo real más lento ($-1/2$), esto tomando en cuenta no llegar a afectar la estabilidad del sistema y manteniéndose siempre a la izquierda del eje $j\omega$. Por lo tanto, como criterio de diseño se escogerá colocar el cero en $-0,4$.

Por otro lado, como criterio de diseño generalmente se considera para un compensador de atraso una ganancia K_p . Para este modelado se considerará como ganancia proporcional del compensador un valor menor a la unidad, esto ya que se tiene por parte del sistema una ganancia de la válvula sumamente alta, por lo que se debe reducir, con la inclusión del compensador, la ganancia total del sistema. El lograr esta reducción se debe a que al tener una ganancia muy elevada ocasionará sobreimpulsos muy elevados, y en ocasiones hasta producir que el sistema entre en oscilación. Por lo tanto se escoge una ganancia proporcional de $K_p=0,1$ (reducción en una décima parte la ganancia propia de la válvula). La función del compensador resultante será por tanto la que se muestra a continuación.

$$G_p(s) = 0,1 \cdot \frac{s + 0,4}{s}$$

Por último, al utilizar como parte de la solución un controlador lógico programable se podrá hacer uso de la herramienta de manejo de señales analógicas conocida como unidades de ingeniería, lo que relaciona la señal de corriente de 4-20mA del sensor con un valor de 4000 a 20000 en el PLC. Así, se tendrá que el sensor a implementar visto por el controlador tendrá una ganancia igual a la unidad.

Por lo tanto, se tiene que el lazo cerrado de control de nivel del proceso de termización al agregar el compensador queda conformado como se muestra en la figura 19, en donde el valor del set point esta dado por el operador en el rango de entre $0,4-0,8 \text{ m}^3$ (400-800 L).

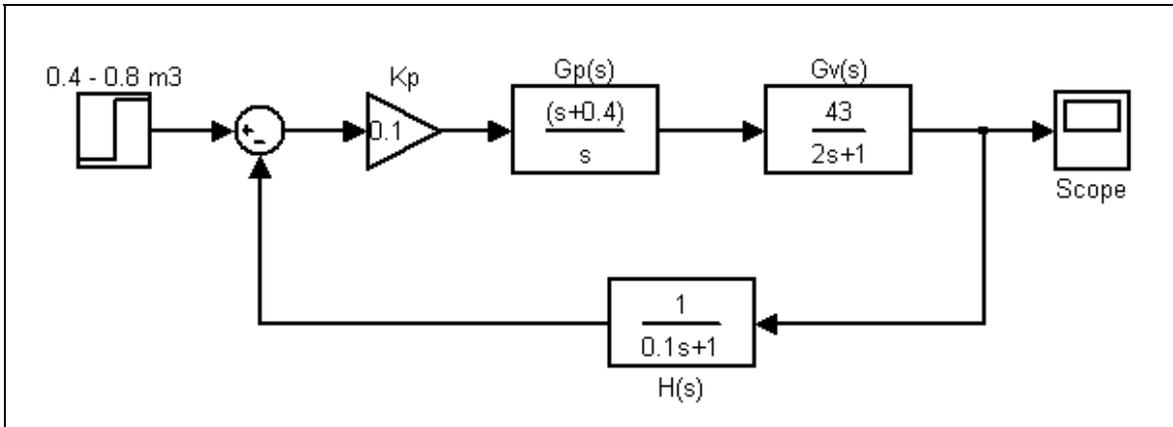


Figura 19. Diagrama de bloques del control de nivel del proceso de termización.

5.4.2 Lazo de control de temperatura

5.4.2.1 Descripción del lazo de control

Este lazo de control tiene como función lograr mantener una temperatura de 72 °C en la leche del proceso de termización y con la ayuda de la figura 20 se explica su funcionamiento. Se tiene que se debe de mantener una temperatura de 72 °C en la leche del proceso, pero esto a través de dos intercambiadores de placas tal y como se muestra en la figura 20, y de la siguiente manera: con un primer intercambiador de placas se calentará agua por medio de vapor, con lo que a su vez esta agua a alta temperatura calentará, a través del segundo intercambiador de placas, la leche del proceso.

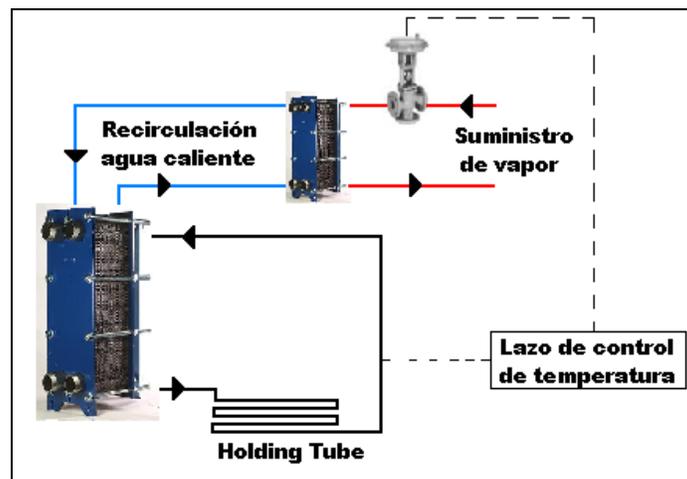


Figura 20. Lazo de control de temperatura del proceso de termización.

Este calentamiento indirecto de la leche se hace ya que de calentarse directamente a través del vapor provocaría consecuencias indeseadas en las propiedades de la leche, esto debido al cambio brusco de temperatura; por lo que se opta realizar dicho calentamiento a través de agua caliente lo que evita dañar la compostura y características de la leche.

La manera de realizar este control de temperatura se basa en un comportamiento específico dado en el proceso, el cual es que al lograr una temperatura 2 °C mayor en el agua (74 °C) para calentar la leche entrante al proceso, la cual ingresa con una temperatura de 4 °C, se garantiza obtener en el producto (leche) la temperatura deseada (72 °C). Con esto se puede decir que se basa el control de temperatura de la leche en un control directo de la temperatura del agua y esto por medio del nivel de apertura de una válvula proporcional de alta presión que controla el ingreso de vapor.

5.4.2.2 Sensor utilizado

Para el control de este lazo cerrado se utilizó sensor resistivo de temperatura del tipo RTD, los cuales tienen como principio de funcionamiento el aprovechar el efecto que tiene la temperatura en la conducción de los electrones para que, ante un aumento de temperatura, haya un aumento de la resistencia eléctrica que presentan.

Específicamente el sensor utilizado fue una RTD de platino con punta de plata, el cual presenta características lineales y una resistencia muy estable con respecto a la relación con la temperatura. El modelo utilizado en el proceso de termización es la mostrada en la figura A.2.3 del Apéndice A.2, y perteneciente a la familia Rosemount, el cual trae integrado el transmisor y la base a ser colocada en la tubería por donde fluirá el líquido.

Al estudiar las características de este sensor se tiene que es calibrado para medir un rango de temperatura entre 0 °C y 150 °C, esto por las características del proceso en específico bajo las cuales trabajaría el sensor. Además, se tiene que la señal generada por el transmisor bajo este rango de temperaturas es entre 4 mA y

20 mA; por lo que con estos datos se puede calcular la constante para este sensor-transmisor como se muestra en la siguiente ecuación.

$$K_T = \frac{\text{Rango salida}}{\text{Rango entrada}} = \frac{20\text{ mA} - 4\text{ mA}}{150^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}} = 0,107 \text{ mA}/^\circ\text{C}$$

Por otro lado, con la ayuda de la hoja de datos del respectivo modelo del sensor-transmisor utilizado, se observa la constante de tiempo en la figura 21, para el modelo de platino y punta de plata.

Thermal Response Time	
Silver tip:	
$t_{0.5}$	1.8 sec ±1 sec
$t_{0.63}$	2.4 sec ±1 sec
$t_{0.9}$	4.7 sec ±1 sec
Nickel tip:	
$t_{0.5}$	2.1 sec ±1 sec
$t_{0.63}$	2.7 sec ±1 sec
$t_{0.9}$	5.5 sec ±1 sec

Figura 21. Tiempo de respuesta del sensor de temperatura utilizado en el proceso de termización.

Estos datos se pueden resumir en la tabla 10, y los cuales son necesarios para llevar a cabo el estudio teórico del sensor-transmisor utilizado y consecuentemente del proceso.

Tabla 10. Datos del transmisor de temperatura “Rosemount 3144P”.

Familia	Transmisor	Ganancia K_T [mA/°C]	Constante de Tiempo τ [s]
Rosemount	Rosemount 3144P	0,107	2,4

Se obtiene así la ecuación de la función de transferencia para el transmisor del sensor de temperatura del proceso de termización tal y como se muestra a continuación.

$$H(s) = \frac{0,107}{2,4 \cdot s + 1}$$

5.4.2.3 Instrumento de control

Para llevar a cabo el control de temperatura del agua, y a la vez de la leche, se hace por medio de una válvula proporcional de alta presión modelo Fisher-Rosemount PF52.1-HP la cual es mostrada en la figura A.2.4 del Apéndice A.2; con lo cual se controla el ingreso de vapor al primer intercambiador de placas y así calentar el agua que a su vez calentará por medio del segundo intercambiador de placas la leche del proceso.

En la hoja de datos de la misma, se tabula los valores respectivos del coeficiente de flujo de la válvula (C_v) dependiendo de su característica de flujo lineal o de igual porcentaje, del porcentaje de apertura de la misma, además de sus dimensiones y clases de las mismas dependiendo del tipo de su posicionador (D, T o S). Esta información se muestra en la tabla 11.

Tabla 11. Datos del valor del coeficiente de flujo C_v de la válvula de control de temperatura.

VALVE SIZE		PORT DIA.	MAXIMUM TRAVEL	LINEAR					EQUAL PERCENTAGE				
				Valve Opening, Percent of Total Travel									
				10	30	70	100	100	10	30	70	100	100
DIN	Inches	mm	mm	C_v				F_L	C_v				F_L
Class 900 & 1500 D & T Trim (Design HPD & HPT) Flow Down													
50	2	47.6	38	---	12.5	43.0	52.2	.91	---	3.26	26.4	41.0	.93
80	3	73.0	50	---	31.5	101	121	.93	---	4.21	53.2	92.7	.92
100	4	92.1	50	6.91	54.7	165	201	.91	3.12	13.9	90.6	165	.85
150	6	136.5	76	8.78	149	385	425	.91	3.90	23.1	156	319	.82

Teniendo las características propias del sistema de termización, el cual cuenta con una tubería de 3" y con una válvula proporcional de flujo de igual porcentaje, se tiene que a una apertura total el coeficiente de flujo de la misma es de 92,7 lb/h. Sabiendo la relación entre el coeficiente de flujo C_v y el coeficiente de ganancia de la válvula K_v está dada por la siguiente ecuación, se obtiene el siguiente valor de K_v .

$$K_v = 0,865 \cdot C_v$$

$$K_v = 80,19 \text{ lb/h}$$

Así mismo se tiene que para dicha válvula proporcional la constante de tiempo o tiempo de respuesta de la misma es de 2 segundos, con lo que se puede resumir los datos obtenidos para dicha válvula en la tabla 12.

Tabla 12. Datos de la válvula de control de lazo de temperatura del proceso de termización.

Familia	Serie	Ganancia K_v [lb/h]	Constante de Tiempo τ_v [s]
Fisher-Rosemount	PF52.1-HP	80,19	2

Además, como se ha estudiado la ecuación de la función de transferencia para una válvula de control está dada por la siguiente ecuación.

$$G_v(s) = \frac{K_v}{\tau_v \cdot s + 1}$$

Donde:

K_v : Ganancia de la válvula.

τ_v : Constante de tiempo de la válvula.

Por lo que se tiene como resultado la siguiente ecuación para la función de transferencia de la válvula de control del lazo de nivel del proceso de termización.

$$G_v(s) = \frac{80,19}{2 \cdot s + 1}$$

5.4.2.4 Control automático del lazo

Para el lazo de control de temperatura se tiene que la función de transferencia a lazo abierto está dada por la ecuación que se muestra a continuación.

$$G_v(s) = \frac{80,19}{2 \cdot s + 1} = \frac{40,01}{s + \frac{1}{2}}$$

Así, se puede representar el diagrama de ubicación del lugar de las raíces a lazo abierto, en donde se cuenta con un polo en -0,5. Este diagrama se muestra en la figura 22.

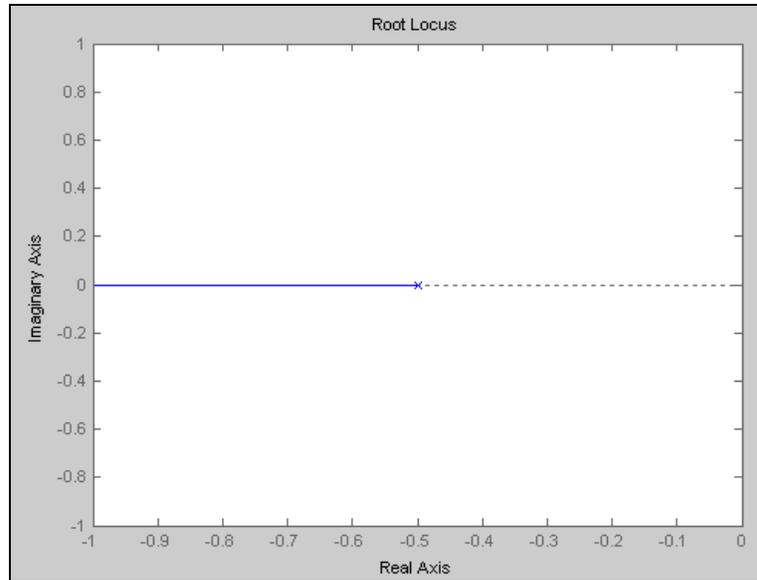


Figura 22. Lugar de las raíces del lazo abierto del control de temperatura.

Al diseñar el compensador para el lazo de temperatura se parte del mismo criterio utilizado para obtener el compensado del lazo de nivel explicado anteriormente en la sección respectiva. Por lo tanto, como criterio de diseño se escogerá colocar el cero del compensador en -0,3.

De igual manera que para el compensador diseñado para el lazo de control de nivel de termización, se considerará como ganancia proporcional del compensador un valor menor a la unidad, esto para reducir la ganancia total del sistema y evitar los grandes sobreimpulsos y oscilaciones propios del sistema sin el compensador a diseñar. Por lo tanto se escoge una ganancia proporcional de $K_p=0,01$ (reducción en una centésima parte la ganancia propia de la válvula). La función del compensador resultante será por tanto la que se muestra a continuación.

$$G_p(s) = 0,01 \cdot \frac{s + 0,3}{s}$$

Por último, para este lazo de control de temperatura también se utilizará la herramienta de manejo de señales analógicas explicada anteriormente conocida como unidades de ingeniería, con lo que se tendrá en el sensor a implementar una ganancia igual a la unidad.

Así, se tiene que el lazo cerrado de control de temperatura del proceso de termización al agregar el compensador queda conformado como se muestra en la figura 23 en donde el valor del set point esta dado por el valor de temperatura requerido en el agua que calienta a su vez a la leche la cual es 74°C.

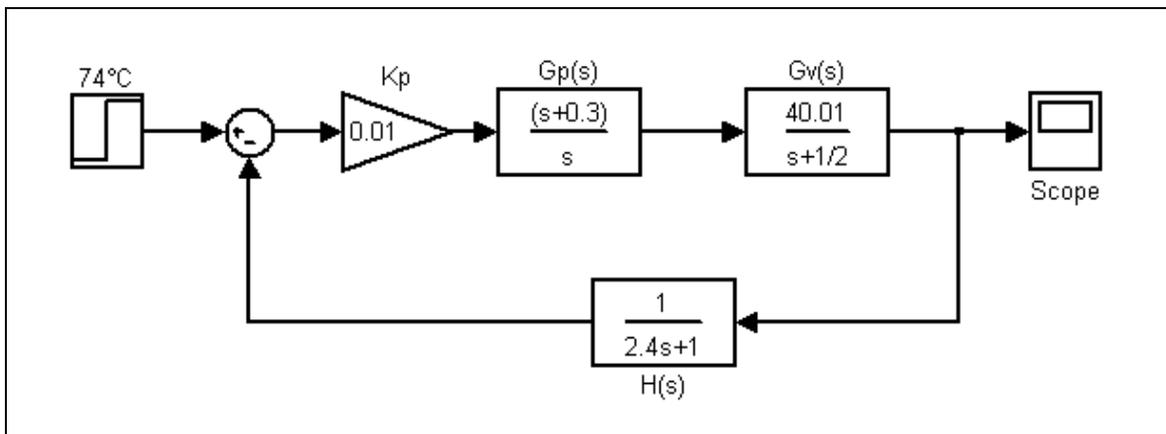


Figura 23. Diagrama de bloques del control de temperatura del proceso de termización.

5.4.3 Lazo de control de flujo

5.4.3.1 Descripción del lazo de control

Por especificaciones del proceso de termización se debe mantener un flujo constante en las tuberías, el cual varía con el funcionamiento de las clarificadoras. Se tiene que al funcionar únicamente una clarificadora se debe de operar a un flujo constante de 13 000 L/h ($0,2167 \text{ m}^3/\text{min}$) mientras que al funcionar las dos clarificadoras en paralelo se debe de operar a un flujo constante de 25 000 L/h ($0,4167 \text{ m}^3/\text{min}$). Este dato de flujo se debe de igual manera tomar en cuenta en el diseño de la secuencia en modo automática, ya que se debe colocar de manera automática un valor de set point en el lazo de control del proceso dependiendo del funcionamiento de dichas clarificadoras.

Este lazo de control automático se muestra en la figura 24, en donde se tiene que el trayecto de la leche por las tuberías del proceso de termización, una vez almacenada de manera temporal en la tina de balance, se lleva a cabo gracias a la ayuda de una bomba y se dirige al intercambiador de placas donde es precalentada para posteriormente ingresarla a las máquinas clarificadoras y finalmente es llevada nuevamente al intercambiador de placas donde es calentada a los $72 \text{ }^\circ\text{C}$.

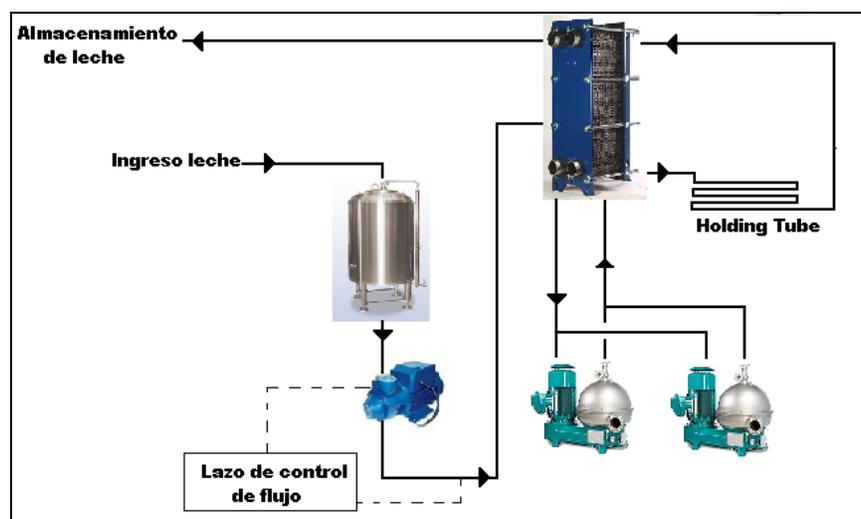


Figura 24. Lazo de control de flujo del proceso de termización.

Una vez calentada a la temperatura requerida y con un flujo constante dependiendo de la operación de ya sea una o las dos clarificadoras, se garantiza tener la leche el tiempo necesario para que se de el proceso de termización (mantener la leche caliente a 72 °C durante 15 segundos para posteriormente enfriarla a 4 °C), lo cual se hace durante el trayecto del holding tube; logrando así ampliar el período durante el cual la leche cruda puede ser almacenada.

5.4.3.2 Sensor utilizado

El sensor de flujo utilizado para llevar a cabo el control automático de este lazo es un sensor magnético de flujo modelo *Rosemount 8721*, el cual está diseñado para la industria alimenticia, de bebidas y aplicaciones farmacéuticas; y se muestra en la figura A.2.5 del Apéndice A.2.

El principio de funcionamiento esta basado en la ley de inducción electromagnética de Faraday, que establece que un voltaje será inducido en un conductor que se mueve a través de un campo magnético. Esta magnitud de voltaje inducido es directamente proporcional a la velocidad del conductor, por lo que así se obtiene el valor del flujo del líquido del proceso.

En sí el sensor está conformado por bobinas de campo magnético colocadas en los lados opuestos de la tubería para generar un campo magnético. A medida que en el proceso se hace fluir determinado líquido a través de la tubería, y en sí a través de dicho campo con una velocidad promedio, los electrodos sensan la tensión inducida.

Al estudiar la información presentada en la hoja de datos de este sensor-transmisor se encuentra los datos de la tabla 13, en la cual se describe los rangos de flujo de operación de dicho sensor de acuerdo a las dimensiones de la tubería a utilizar.

Tabla 13. Rangos de flujo de operación del sensor de flujo *Rosemount 8721* de acuerdo a las dimensiones de la tubería.

Nominal Line Size in Inches (mm)	Minimum/Maximum Flow Rate							
	Gallons per Minute				Liters per Minute			
	at 0.04 ft/s (Low-flow Cutoff)	at 1 ft/s (Min Range Setting)	at 3 ft/s	at 30 ft/s (Max Range Setting)	at 0.012 m/s (Low-flow Cutoff)	at 0.3 m/s (Min Range Setting)	at 1 m/s	at 10 m/s (Max Range Setting)
1/2 (15)	0.038	0.941	2.82	28.23	0.14	3.50	11.67	116.7
1 (25)	0.108	2.694	8.08	80.813	0.41	10.18	33.40	334.07
1 1/2 (40)	0.254	6.345	19.03	190.36	0.96	23.98	78.69	786.9
2 (50)	0.418	10.459	31.37	313.77	1.58	39.54	129.7	1,297
2 1/2 (65)	0.597	14.922	44.77	447.66	2.22	55.51	185.0	1,850
3 (80)	0.922	23.042	69.12	691.26	3.49	87.10	285.7	2,857
4 (100)	1.588	36.679	119.0	1,190.4	6.00	138.6	492.0	4,920

Sabiendo que la dimensión de la tubería del proceso de termización es de 3", los rangos de flujo máximo y mínimo del sensor son los siguientes.

$$Flujo_{MIN} = 0,00349 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$Flujo_{MAX} = 2,857 \text{ m}^3/\text{min}$$

Con lo que se calcula el coeficiente de ganancia del sensor necesaria para obtener la ecuación de la función de transferencia del mismo.

$$K_T = \frac{\text{Rango salida}}{\text{Rango entrada}} = \frac{20 \text{ mA} - 4 \text{ mA}}{2,857 \text{ m}^3/\text{min} - 0,00349 \text{ m}^3/\text{min}} = 5,6073 \text{ mA}/\text{m}^3/\text{min}$$

Además, se toma de la hoja de datos del sensor la constante de tiempo del mismo el cual es de 0,2 segundos, con lo cual se puede resumir los datos de interés del sensor-transmisor en la tabla 14.

Tabla 14. Datos del transmisor de flujo "*Rosemount 8721*".

Familia	Transmisor	Ganancia K_T [mA/m ³ /min]	Constante de Tiempo τ [s]
Rosemount	Rosemount 8721	5,6073	0,2

Se obtiene así la ecuación de la función de transferencia para el transmisor del sensor de flujo del proceso de termización tal y como se muestra a continuación.

$$H(s) = \frac{5,6073}{0,2 \cdot s + 1}$$

5.4.3.3 Instrumento de control

Para llevar a cabo el control automático del flujo del proceso de termización se utiliza un variador de frecuencia *VTL 5000* de la familia *Danfoss*, presentado en la figura A.2.6 del Apéndice A.2, el cual maneja la velocidad del motor de la bomba del proceso, modelo *Washdown Duty Motor* número de catálogo *CWDM3713T* de la familia *Baldor-Reliance* y cuyos datos de placa se muestran en la tabla 15. Así, el motor es conectado al variador de frecuencia el cual es controlado por una señal analógica de 4-20mA, dada por el controlador lógico programable en este caso, y así variar la velocidad del mismo. Para que la planta permanezca en la velocidad establecida por el set point, se utiliza el lazo de realimentación el cual está comprendido por el sensor de flujo presentado en la sección anterior, el cual proporcionará en sus terminales una corriente proporcional al flujo presente en la tubería.

Como dato importante a observar en la tabla 15 está la velocidad nominal a la cual opera dicho motor, 3450 rpm; la cual representa la velocidad a la cual trabajará la bomba centrífuga a utilizar.

Tabla 15. Datos de placa del motor *Washdown Duty Motor*, número de catálogo *CWDM3713T*.

SPEC. NUMBER:	37H877Y719H1
CATALOG NUMBER:	CWDM3713T
FL AMPS:	37.5-34/17
208V AMPS:	37.5
BEARING-DRIVE-END:	6307
BEARING-OPP-DRIVE-END:	6206
DESIGN CODE:	A
DOE-CODE:	010A
FL EFFICIENCY:	90.2
ENCLOSURE:	TEFC
FRAME:	215TC
HERTZ:	60
INSULATION-CLASS:	F
KVA-CODE:	K
SPEED [rpm]:	3450
OUTPUT [hp]:	15
PHASE:	3
POWER-FACTOR:	91
RATING:	40C AMB-CONT
SERIAL-NUMBER:	--
SERVICE FACTOR:	1.15
VOLTAGE:	208-230/460

Por otro lado, se utilizó la bomba modelo 2075 de la familia Waukesha Cherry-Burrell. Los datos de flujo máximo, dependiendo de las dimensiones de la tubería de este y otros modelos de bombas de dicha familia son mostradas en la tabla 16, en donde específicamente se tiene que para el modelo utilizado, para la tubería del 3" presente en el proceso de termización, y a la velocidad nominal del motor (3450 rpm) vista en la tabla 15, la bomba está capacitada para trabajar a un flujo máximo de 1,133 m³/min, lo que equivale a 68 000 L/h. Así, con la ayuda del variador de frecuencia se puede manejar el valor de la velocidad de este motor y con esto el flujo en las tuberías del proceso.

Tabla 16. Especificaciones para diferentes modelos de bombas de la familia Waukesha Cherry-Burrell.

Model	Inlet Size in (mm)		Outlet Size in (mm)		Maximum Impeller Size In (mm)		Maximum Capacity GPM (m3/hr)				Maximum Head Feet (Meters)			
							1750 RPM		3500 RPM		1750 RPM		3500 RPM	
2045	1.50	(38)	1.50	(38)	4.50	(114)	97	(22)	190	(43)	22	(7)	88	(27)
	2.0	(31)	1.50	(38)	4.50	(114)	97	(22)	190	(43)	22	(7)	88	(27)
2065LV	1.50	(38)	1.50	(38)	6.50	(165)	100	(23)	200	(45)	44	(13)	180	(55)
	2.00	(51)	1.50	(38)	6.50	(165)	100	(23)	200	(45)	44	(13)	180	(55)
	2.50	(65)	1.50	(38)	6.50	(165)	100	(23)	200	(45)	44	(13)	180	(55)
2065	2.50	(65)	2.00	(51)	6.50	(165)	245	(56)	400	(91)	47	(14)	190	(58)
2065HV	3.00	(76)	2.00	(51)	6.50	(165)	370	(84)	500	(114)	50	(15)	200	(61)
2075	3.00	(76)	1.50	(38)	8.6875	(218)	125	(28)	300	(68)	80	(24)	320	(98)
2085LV	2.00	(51)	1.50	(38)	8.50	(216)	70	(16)	145	(33)	81	(24)	330	(100)
2085	3.00	(76)	2.50	(64)	8.6875	(218)	480	(109)	840	(191)	85	(26)	342	(104)
	4.00	(102)	2.50	(64)	8.6875	(218)	480	(109)	840	(191)	85	(26)	342	(104)
2105	4.00	(102)	4.00	(102)	10.50	(267)	1400	(318)	N/A	N/A	133	(41)	N/A	N/A
2105	6.00	(152)	4.00	(102)	10.50	(267)	1400	(318)	N/A	N/A	133	(41)	N/A	N/A

Con estos datos y al analizar la planta para este lazo de control se tiene que el variador de frecuencia y el motor trifásico se comportan como un motor DC, esto ya que al variador lo controla una señal de 4-20 mA, la misma que al variar cambia en forma proporcional la velocidad del motor trifásico; con lo cual el sistema tendría un modelo con una ecuación de transferencia de primer orden tal como se muestra en la siguiente ecuación.

$$G_M(s) = \frac{K}{\tau \cdot s + 1}$$

Donde:

K: ganancia del sistema.

τ : Constante de tiempo del sistema.

Así, se puede analizar que la ganancia del sistema se obtiene con las características propias del mismo, en donde se tiene una respuesta lineal del mismo y dada por la relación de 4 mA correspondientes a apagar el motor o 0 m³/h y 20 mA para obtener el flujo máximo de 1,133 m³/min como se muestra en la siguiente ecuación.

$$K = \frac{\text{Rango salida}}{\text{Rango entrada}} = \frac{20 \text{ mA} - 4 \text{ mA}}{1,133 \text{ m}^3/\text{min} - 0 \text{ m}^3/\text{min}} = 14,122 \text{ mA}/\text{m}^3/\text{min}$$

Por otro lado, la constante de tiempo de respuesta del variador y el motor se define según las especificaciones de los mismos, en donde con la ayuda de la información de la casa ensambladora de estos equipos se tiene que como tiempo crítico de respuesta en la salida un valor de aproximadamente 1 segundos. Así, la ecuación para este sistema queda tal y como se muestra en la siguiente ecuación.

$$G_M(s) = \frac{14,122}{s + 1}$$

5.4.3.4 Control automático del lazo

En lo que corresponde al lazo de control de flujo se tiene que la función de transferencia a lazo abierto está dada por la ecuación que se muestra a continuación.

$$G_M(s) = \frac{14,122}{s + 1}$$

Con esta ecuación, se puede representar el diagrama de ubicación del lugar de las raíces a lazo abierto, en donde se cuenta con un polo en -1. Este diagrama se muestra en la figura 25.

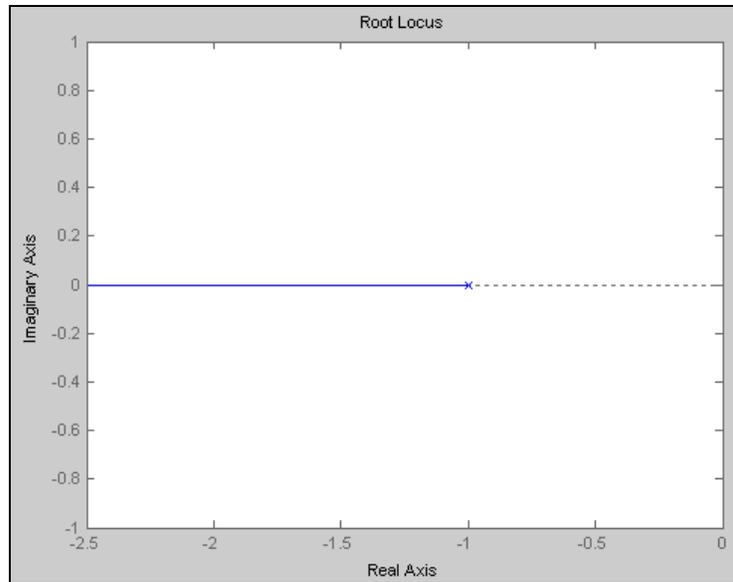


Figura 25. Lugar de las raíces del lazo abierto del control de flujo.

Al diseñar el compensador se parte del criterio de compensado por ubicación de un cero (z_0) arbitrario. Al igual que con los lazos anteriores, se debe colocar el valor de dicho cero a la derecha del polo real más lento, -1 en este caso. Por lo tanto, como criterio de diseño se escogerá colocar el cero en -0,95.

En lo que respecta a la ganancia proporcional del compensador, dada la elevada ganancia del sistema en sí, se debe asignar un valor menor a la unidad, esto para reducir la ganancia total del sistema y evitar los grandes sobreimpulsos y oscilaciones propios del sistema sin el compensador a diseñar. Por lo tanto se escoge una ganancia proporcional de $K_p=0,1$ (reducción en una décima parte la ganancia propia del sistema). La función del compensador resultante será por tanto la que se muestra a continuación.

$$G_p(s) = 0,1 \cdot \frac{s + 0,95}{s}$$

Por último, de igual manera que con los lazos anteriores se utilizará la herramienta de manejo de señales analógicas explicada anteriormente conocida como unidades de ingeniería, con lo que se tendrá en el sensor a implementar una ganancia igual a la unidad.

Así, se tiene que el lazo cerrado de control de flujo del proceso de termización al agregar el compensador queda conformado como se muestra en la figura 26, en donde el valor del set point esta dado por valores entre $0,22\text{m}^3/\text{min}$ a $0,42\text{m}^3/\text{min}$ dependiendo del funcionamiento de una o de las dos centrifugas clarificadoras del proceso.

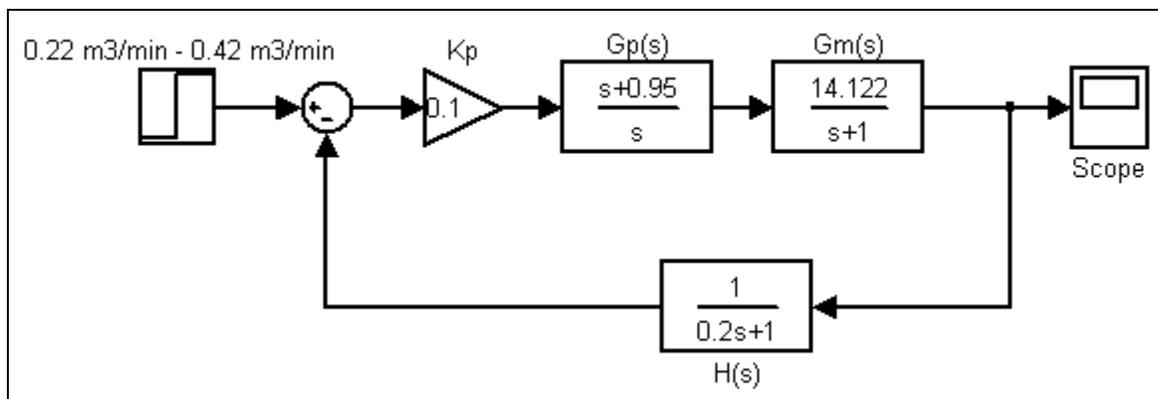


Figura 26. Diagrama de bloques del control de flujo del proceso de termización.

Capítulo 6. Análisis de resultados

6.1 Resultados

6.1.1 Configuración de hardware utilizado

Con la información suministrada por la empresa Nestlé-Prolacsa en Nicaragua, se elaboró las tablas con la información de las señales de entradas y salidas del proceso de termización, con la distinción del tipo de señal (digital o analógica); para con esto lograr hacer la distribución de dichas señales en los módulos tal y como se muestra en las tabla A.3.1, A.3.2, A.3.3 y A.3.4 del Apéndice A.3 y lograr realizar el control de los equipos del proceso.

Por otro lado, en lo que concierne al manejo de las válvulas por medio del nodo de campo, el direccionamiento de cada una de las válvulas se llevó a cabo propiamente en el programa elaborado para el control del proceso de termización. En dicho programa una vez incluido y configurado el módulo, como módulo genérico, se puede direccionar cada uno de los puntos del nodo, los cuales representan la señal de apertura o cierre de determinada válvula, como un bit de control tal y como se muestra en la figura 27.

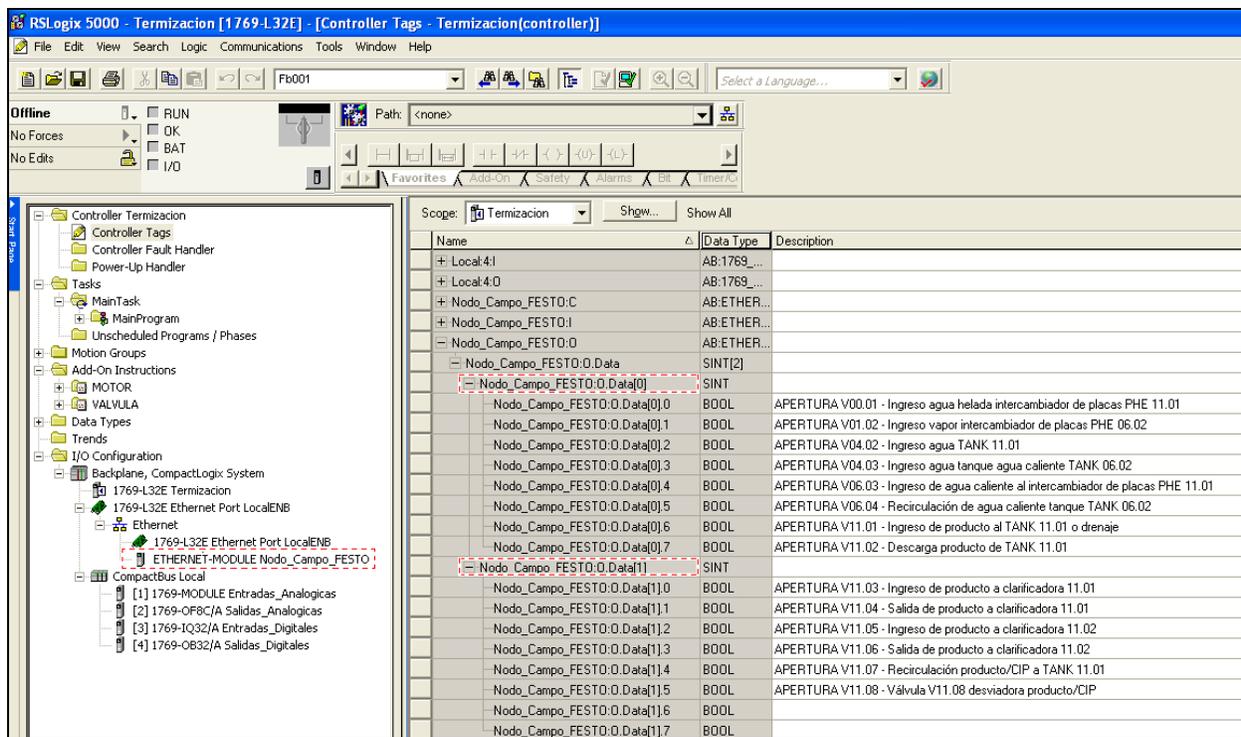


Figura 27. Direccionamiento de cada una de las válvulas del nodo de campo.

6.1.2 Estructura del programa de control

En lo que se refiere al control del equipo a utilizar en el proceso de termización, se cuenta con una serie de válvulas y motores que poseen el mismo principio de control desde el controlador lógico programable, por lo que al utilizar la herramienta conocida como “add-on” del software utilizado, se programó un bloque general con el cual se utiliza instancias de este bloque para el manejo de cada equipo específico ya sea válvulas o motores. Los bloques de programación elaborados para el manejo de estos equipos, válvulas y motores, se muestran en las figuras A.4.1 y A.4.2 respectivamente del Apéndice A.4.

Por otro lado, a partir del diagrama de flujo elaborado para el manejo de la secuencia en modo automático del proceso de termización, se llevo a cabo la programación de dicha secuencia, la cual se estructuró en un solo programa en el que se subdividió en varias rutinas de programación tal y como se muestra en la

figura 28. En esta figura se observa además como se introdujo en el programa los bloques lógicos de válvula y motor explicados anteriormente de manera de instrucciones del tipo “Add-Ons”.

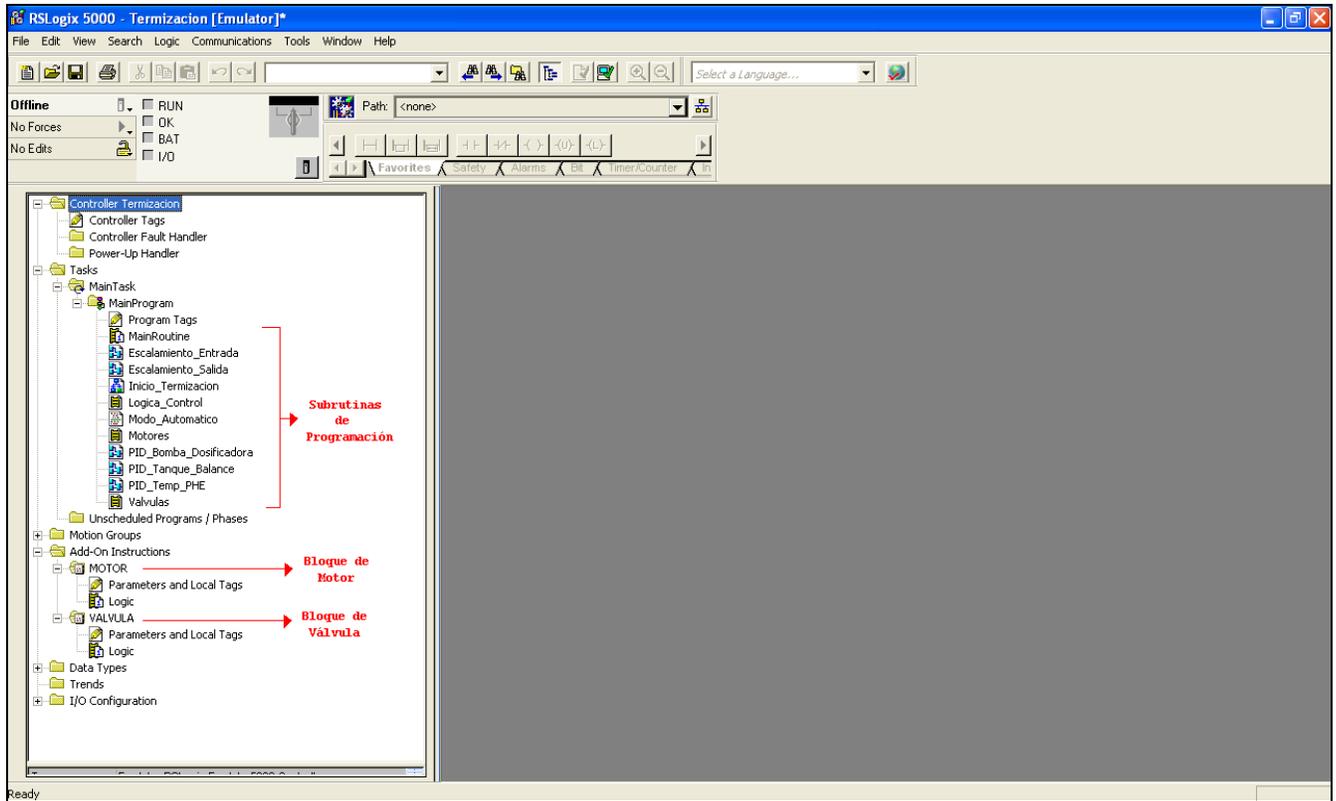


Figura 28. Esquema de programación del proceso de termización.

El tipo de rutinas que se muestran en la figura 28 y que en sí fueron utilizadas en la programación del proceso de termización, son del tipo escalera, texto estructurado, diagrama de bloques y diagrama de bloques secuenciales.

A continuación se mencionan las rutinas utilizadas en el programa de termización y se explica su función dentro del programa general de termización.

- Principal: Esta rutina se utiliza para llamar al resto de las rutinas del programa de termización.
- Escalamientos Entradas: Esta rutina programada en bloques funcionales, se encarga del escalamiento de los parámetros analógicos de entrada.

- Escalamientos Salidas: Esta rutina programada en bloques funcionales, se encarga del escalamiento de los parámetros analógicos de salida.
- Espejo Entradas: Esta rutina maneja los parámetros de entradas discretas como lo son sensores, confirmaciones, manetas de equipos, entre otros.
- Espejo Salidas: Esta rutina maneja los parámetros de salidas discretas como lo son arranques de motores, apertura de válvulas, entre otros.
- Espejo Salidas FESTO: Esta rutina maneja los parámetros específicos de salidas discretas de apertura de las válvulas controladas vía Ethernet por el nodo de campo CPX-FB32.
- Inicio Termización: Esta rutina programada en diagrama de bloques secuenciales maneja la inicialización en modo automático del proceso de termización, lo referente a temperatura inicial del proceso, arranque de motores y apertura de válvulas.
- Lógica Control: En esta rutina se maneja las condiciones durante el proceso.
- Modo Automático: Esta rutina posiciona en modo automático todo el equipo del sistema con solo oprimir un botón desde el panel de operador.
- Motores: Desde esta rutina se controla cada uno de los bloques de motor del programa de termización.
- PID Bomba Dosificadora: Esta rutina controla el lazo de control de flujo correspondiente a la salida de la tina de balance de este proceso y que alimentan a las clarificadoras.
- PID Tanque Balance: Esta rutina controla el lazo de control de nivel de la tina de balance a través de una válvula proporcional a la entrada.
- PID Temp PHE: Esta rutina controla el lazo de control de la temperatura del proceso de termización.
- Válvulas: Desde esta rutina se controla cada uno de los bloques de válvula del programa de termización.

Por otro lado, para implementar a través del controlador lógico programable los compensadores previamente diseñados bajo el estudio teórico y matemático y así lograr el control automático de los lazos, se utilizó el bloque predefinido “PIDE”, explicado en la sección anterior. Como ejemplo, en la figura 29 se muestra el bloque implementado para el lazo de control de temperatura en donde se observa como el parámetro de la variable de proceso (PV) es el respectivo al escalamiento proveniente de la entrada del sensor de temperatura (4-20mA) y escalado en un rango en el PLC, siendo coherentes a como se configuró el rango en el propio sensor de flujo. Posteriormente, este bloque genera una señal denominada variable de control en porcentaje (CV), la cual representa la señal de referencia de apertura de la válvula proporcional en este caso. Este bloque actúa en manera automática ante un valor de set point (SP) asignado, o de manera manual ante un valor fijo de variable de proceso (CV) asignado por el usuario u operador.

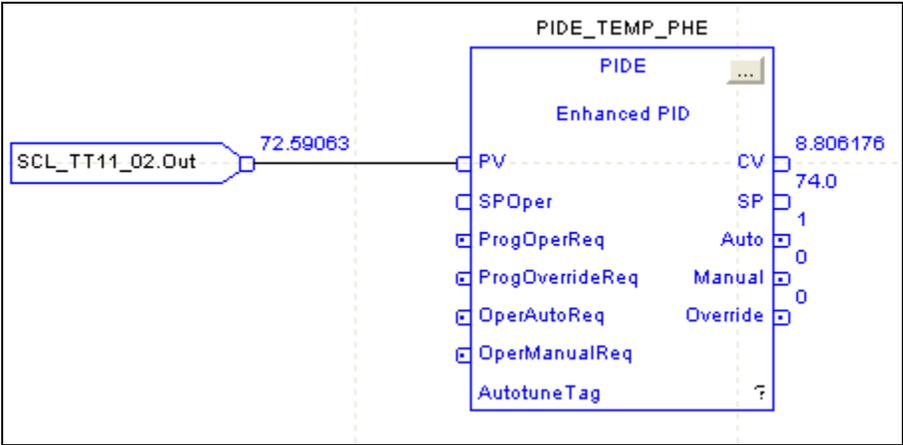


Figura 29. Bloque de control PIDE para el lazo de control de temperatura.

6.1.3 Estructura de la interfaz de usuario

A partir de la distribución y navegación de pantallas descrita en la sección 5.3, se obtiene como resultados diversas pantallas las cuales se muestran en las figuras 30-36. En la figura 30 se muestra el diseño de la pantalla principal del proceso de termización en donde se muestra su equipo relacionado así como el valor de las variables de control y monitoreo más importantes como lo son presiones, niveles, temperaturas, entre otras.

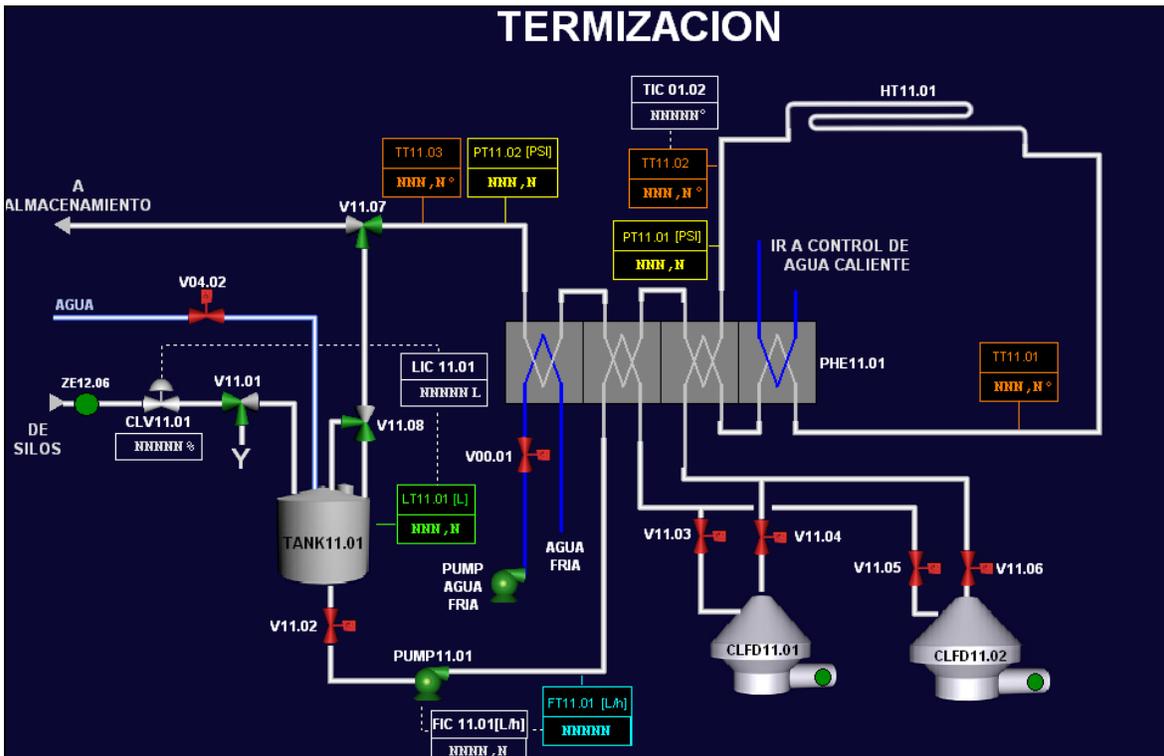


Figura 30. Pantalla principal del proceso de termización.

Por otro lado, como pantalla secundaria se tiene el subproceso de preparación y recirculación de agua caliente para el proceso de termización, la cual se muestra en la figura 31, en donde a su vez se diseñó esta pantalla con únicamente el equipo y variables concernientes al mismo.

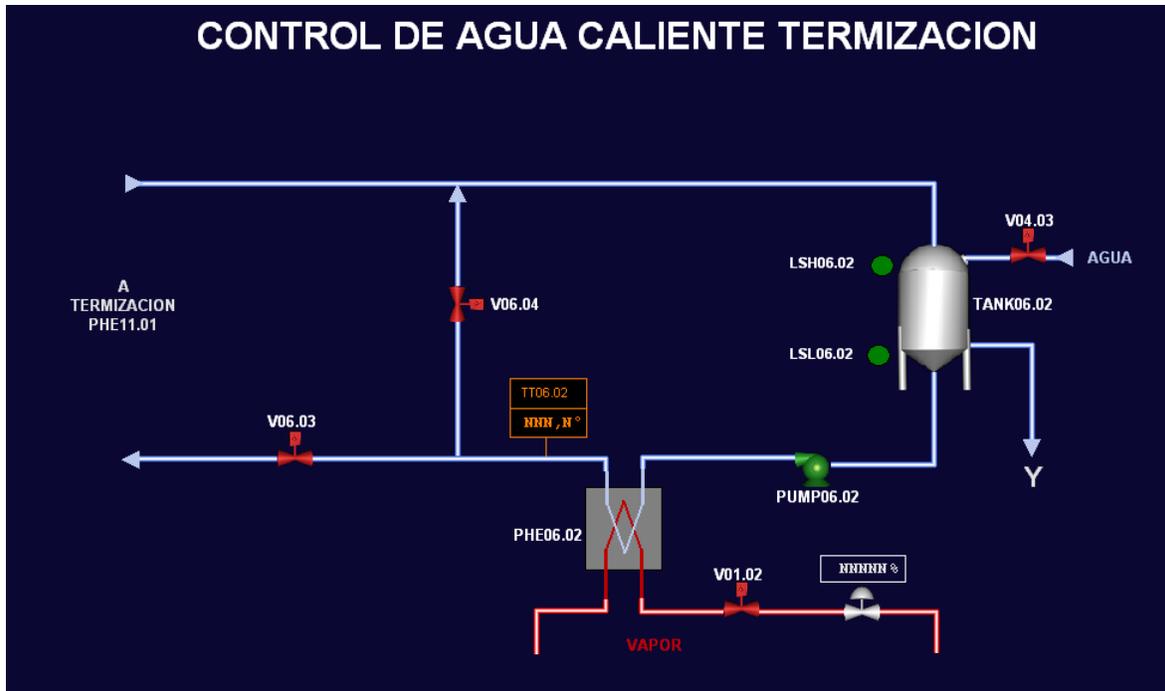


Figura 31. Pantalla de preparación y recirculación de agua caliente del proceso de termización.

Para el manejo y visualización del estado de válvulas, motores y bombas de arranque directo y motores controlados por variador de frecuencia, se diseñó las pantallas mostradas en las figuras 32, 33, 34 y 35 respectivamente.

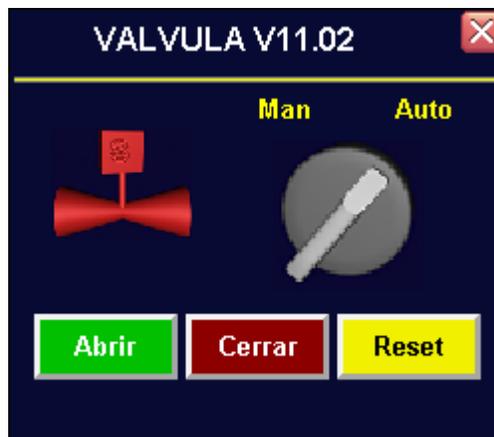


Figura 32. Pantalla de manejo y visualización de válvulas.



Figura 33. Pantalla de manejo y visualización de motores de arranque directo.



Figura 34. Pantalla de manejo y visualización de bombas de arranque directo.

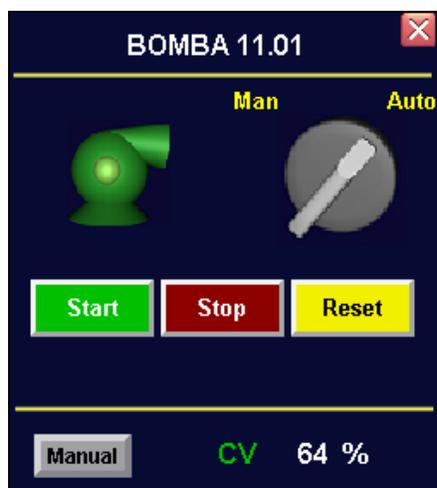


Figura 35. Pantalla de manejo y visualización de bombas controladas por variador de frecuencia.

Por último, para la manipulación y visualización de los lazos cerrados del proceso de termización se diseñó una pop up el cual muestra los datos más importantes en el control de un lazo cerrado como lo son la variable de proceso (PV), la variable de control (CV) y el valor deseado o set point (SP). A la vez, en esta pantalla se visualiza la tendencia de cada una de estas variables tal y como se muestra en la figura 36.



Figura 36. Pantalla de manejo y visualización de variables para los lazo de control.

6.1.4 Lazos de control automático

Utilizando la herramienta de MatLab Simulink, se procedió a simular el comportamiento eventual de los sistemas ante los valores específicos de referencia (setpoint), para condiciones de operación de los sistemas tanto sin compensador así como en presencia del mismo, para lograr así analizar las repercusiones de estos sobre el proceso y obtener el control automático deseado para los mismos.

Inicialmente se estudió el comportamiento del lazo cerrado sin compensador del proceso de control de nivel de termización, tal y como se muestra en la figura 37, en donde para un valor común de operación de nivel de $0,5 \text{ m}^3$ (500 L) se obtuvo como respuesta a lazo cerrado la gráfica mostrada en la figura 38.

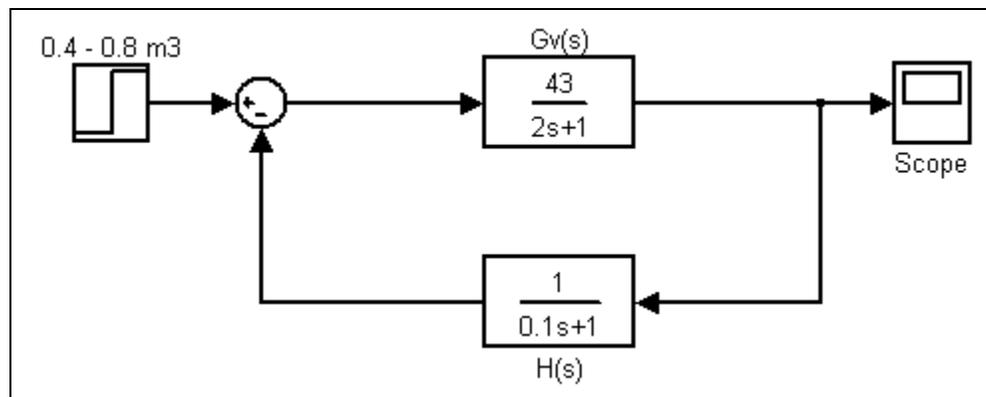


Figura 37. Diagrama de bloques del control de nivel del proceso de termización sin compensador.

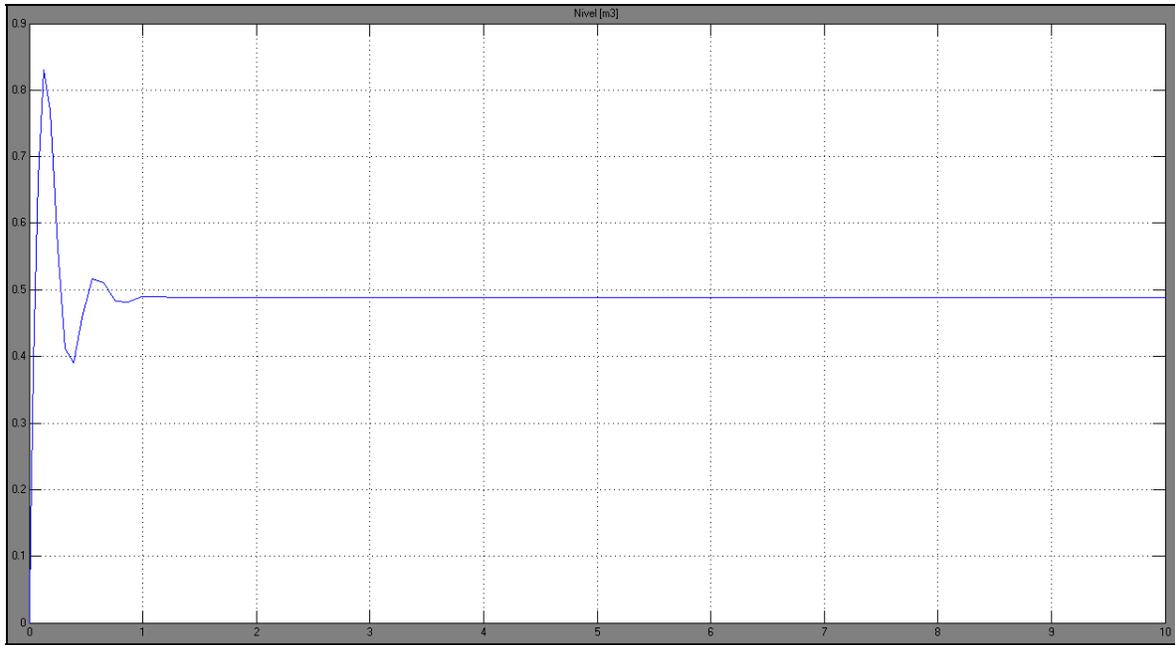


Figura 38. Respuesta del lazo cerrado de control de nivel del proceso de termización sin compensador.

Al incluir en el lazo cerrado el compensador diseñado en el apartado anterior, el diagrama de bloques a simular es el mostrado en la figura 39, en donde de igual manera para un set point común de operación de $0,5 \text{ m}^3$ (500 L) se obtiene como respuesta el gráfico mostrado en la figura 40.

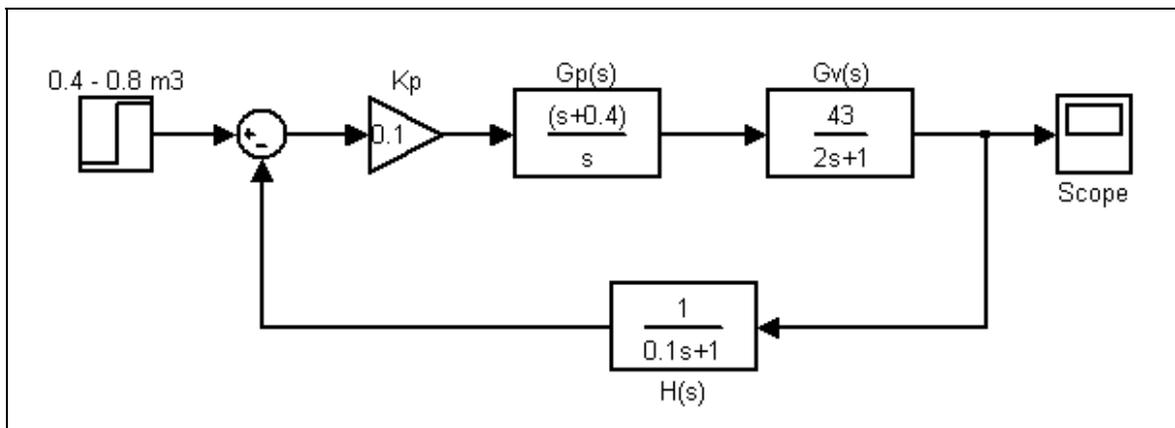


Figura 39. Diagrama de bloques del control de nivel del proceso de termización con compensador.

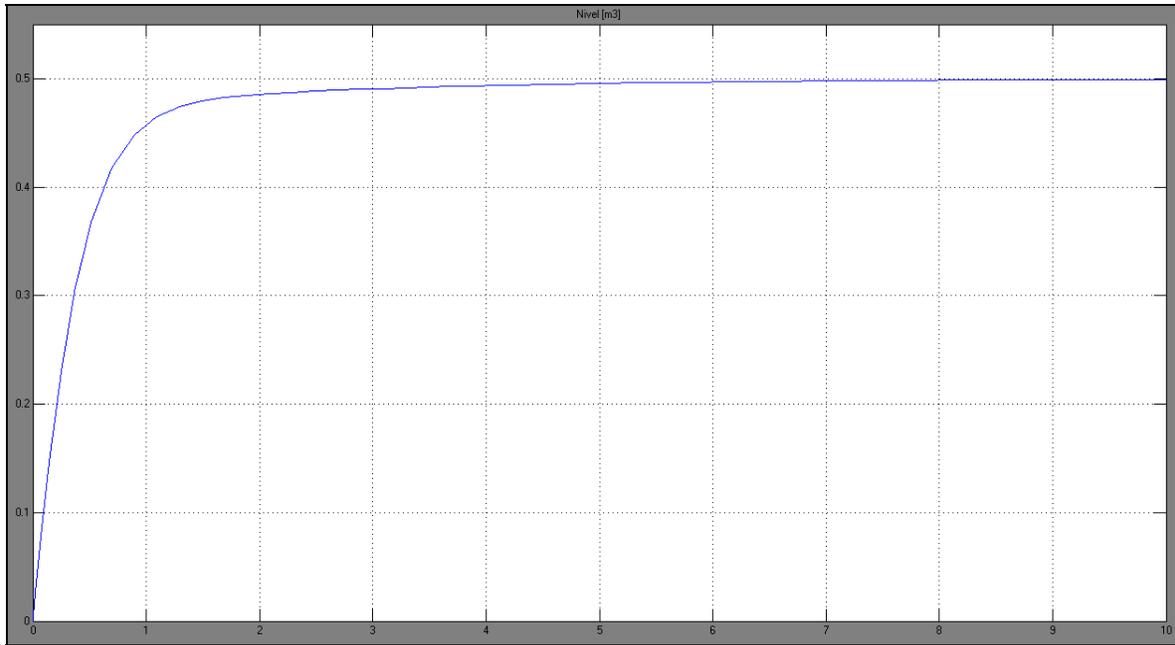


Figura 40. Respuesta del lazo cerrado de control de nivel del proceso de termización con compensador.

De igual manera para el estudio del comportamiento del lazo cerrado sin compensador del proceso de control de temperatura, se llevo a cabo con la ayuda del diagrama que se muestra en la figura 41, en donde para un valor de set point de operación de temperatura de 74 °C se obtuvo como respuesta a lazo cerrado la gráfica mostrada en la figura 42.

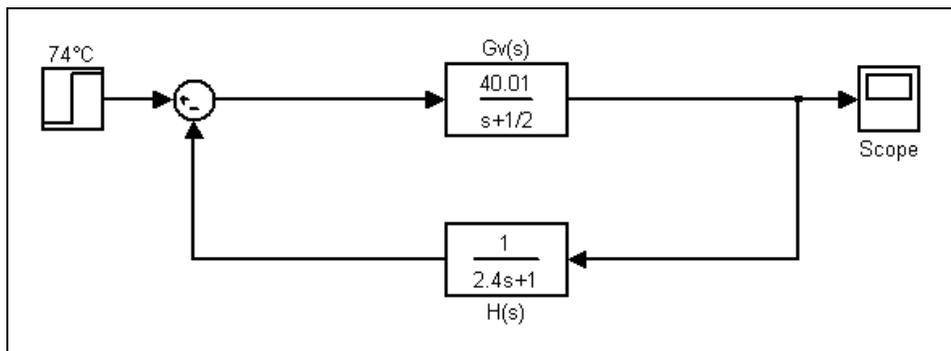


Figura 41. Diagrama de bloques del control de temperatura del proceso de termización sin compensador.

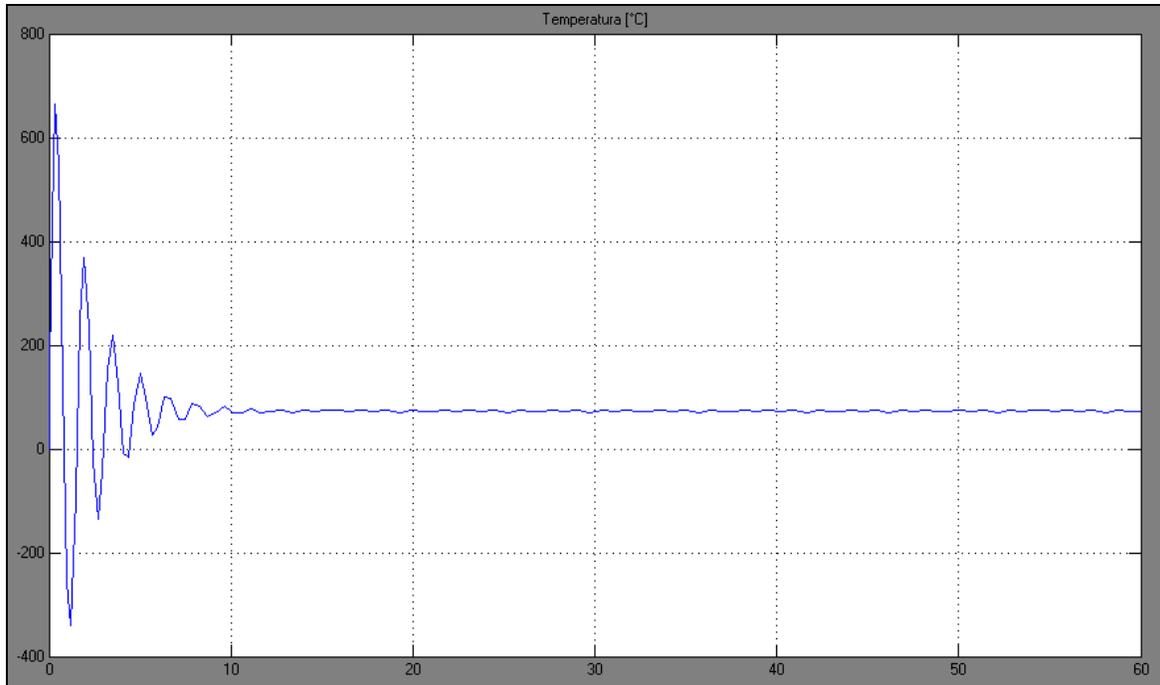


Figura 42. Respuesta del lazo cerrado de control de temperatura del proceso de termización sin compensador.

Posteriormente, al incluir en el lazo cerrado el compensador diseñado para el proceso de control de temperatura, el diagrama de bloques a utilizar es el mostrado en la figura 43, en donde de igual manera para el set point de operación de 74 °C se obtiene como respuesta el gráfico mostrado en la figura 44.

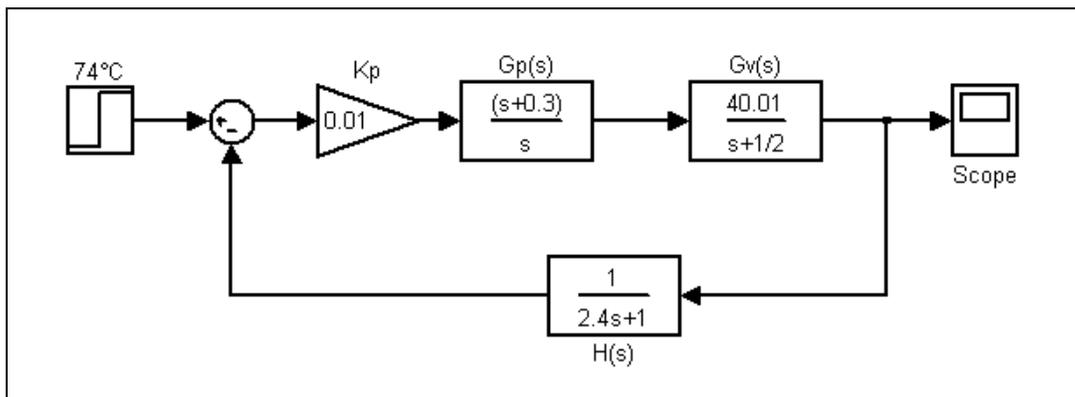


Figura 43. Diagrama de bloques del control de temperatura del proceso de termización con compensador.

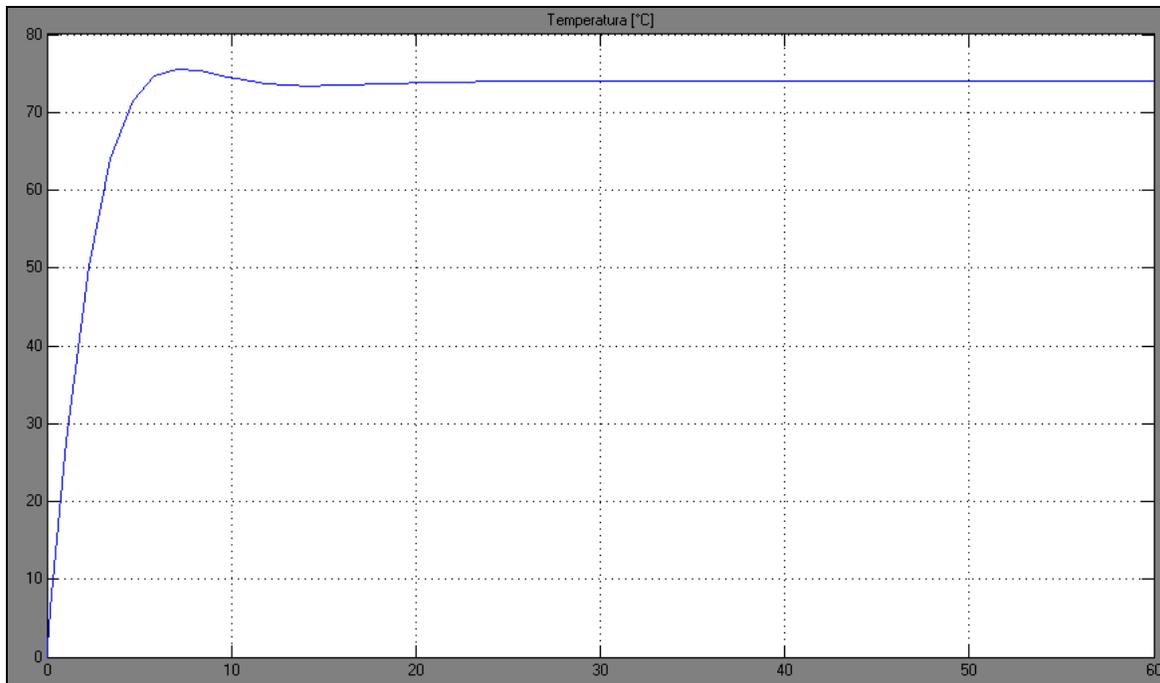


Figura 44. Respuesta del lazo cerrado de control de temperatura del proceso de termización con compensador.

Por último, para el estudio del comportamiento del lazo cerrado sin compensador del proceso de control de flujo, se llevo a cabo con la ayuda del diagrama que se muestra en la figura 45, en donde para un valor de set point de operación de temperatura de $0,42 \text{ m}^3/\text{min}$ ($25\ 000 \text{ L/h}$) se obtuvo como respuesta a lazo cerrado la gráfica mostrada en la figura 46. Además para un valor de set point de $0,22 \text{ m}^3/\text{min}$ ($13\ 000 \text{ L/h}$) se obtiene la respuesta mostrada en la figura 47.

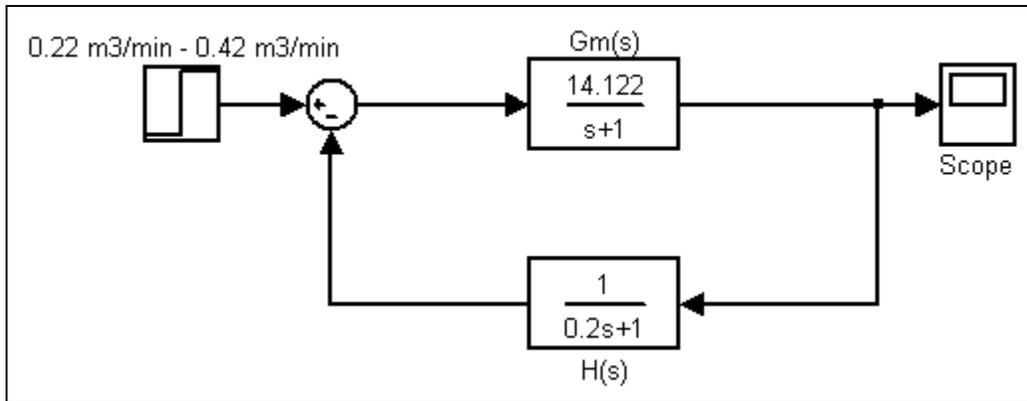


Figura 45. Diagrama de bloques del control de flujo del proceso de termización sin compensador.

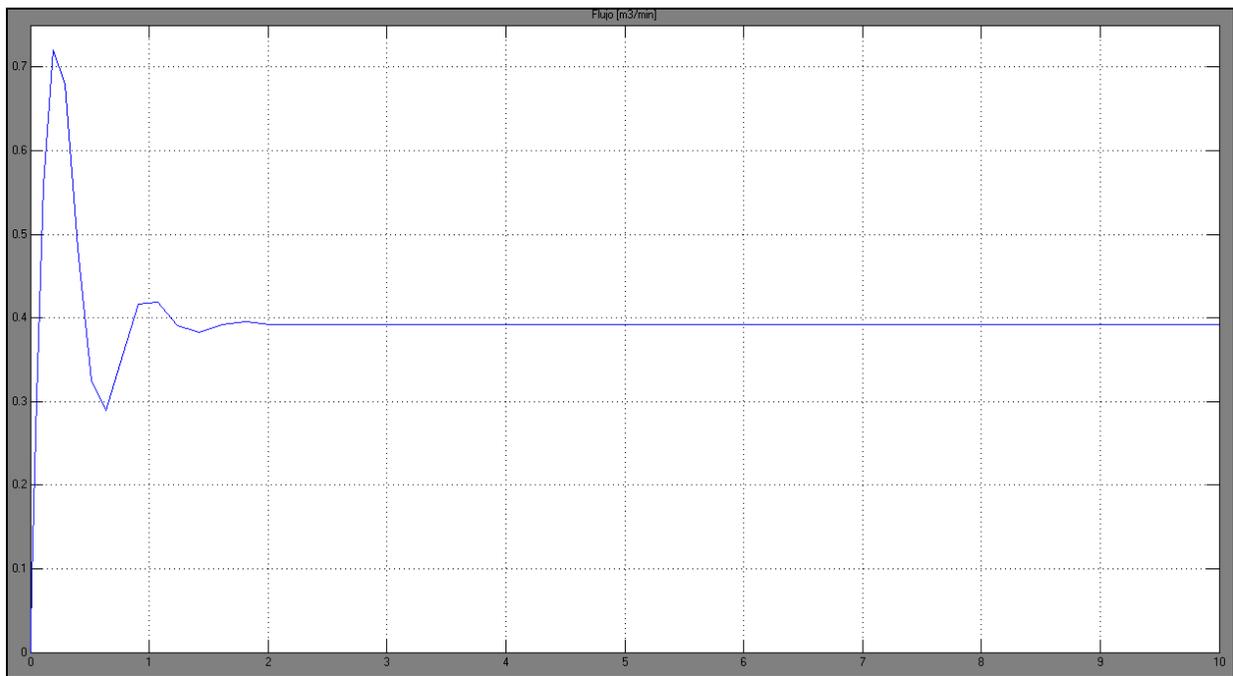


Figura 46. Respuesta del lazo cerrado de control de flujo del proceso de termización sin compensador para un set point de 0,42 m³/min.

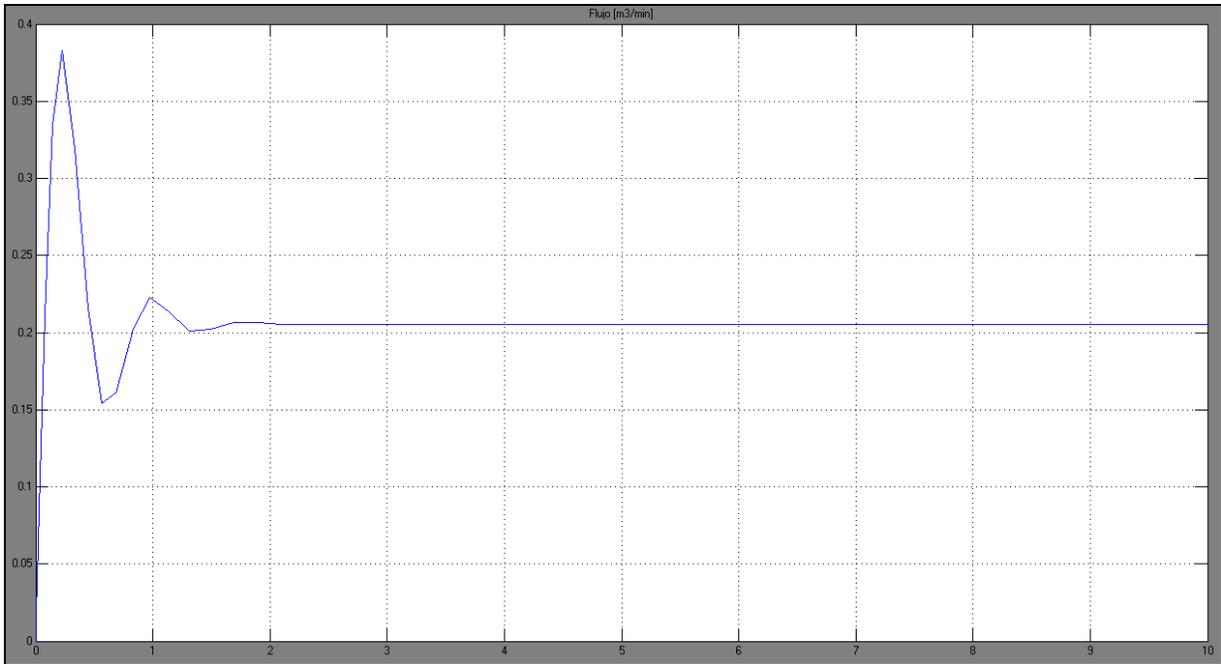


Figura 47. Respuesta del lazo cerrado de control de flujo del proceso de termización sin compensador para un set point de $0,22 \text{ m}^3/\text{min}$.

Así, al incluir en el lazo cerrado el compensador diseñado para el proceso de control de flujo, el diagrama de bloques a utilizar es el mostrado en la figura 48, en donde para un set point de operación de $0,42 \text{ m}^3/\text{min}$ y $0,22 \text{ m}^3/\text{min}$ se obtiene como respuestas los gráficos mostrados en las figuras 49 y 50 respectivamente.

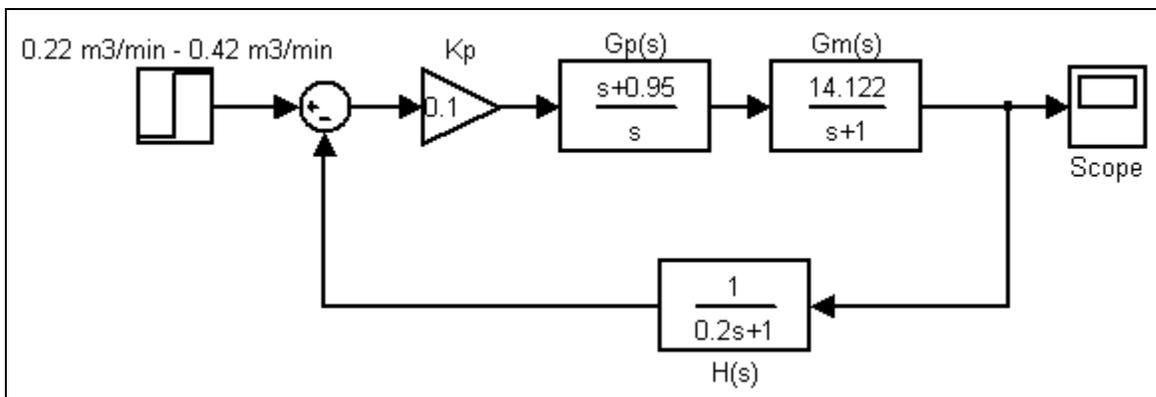


Figura 48. Diagrama de bloques del control de flujo del proceso de termización con compensador.

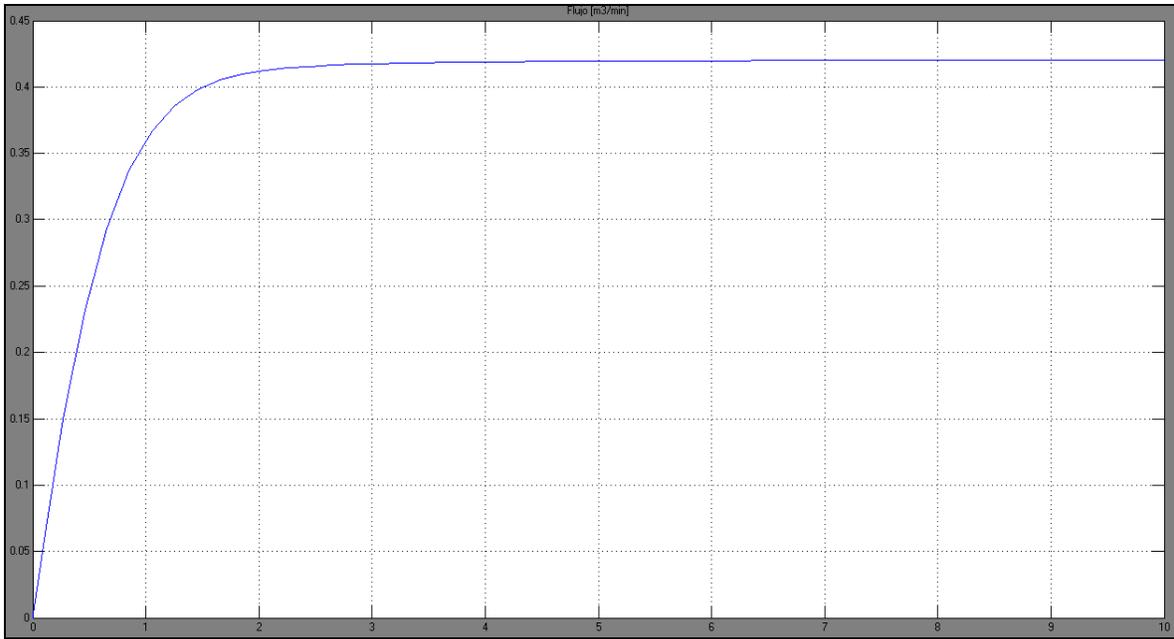


Figura 49. Respuesta del lazo cerrado de control de flujo del proceso de termización con compensador para un set point de $0,42 \text{ m}^3/\text{min}$.

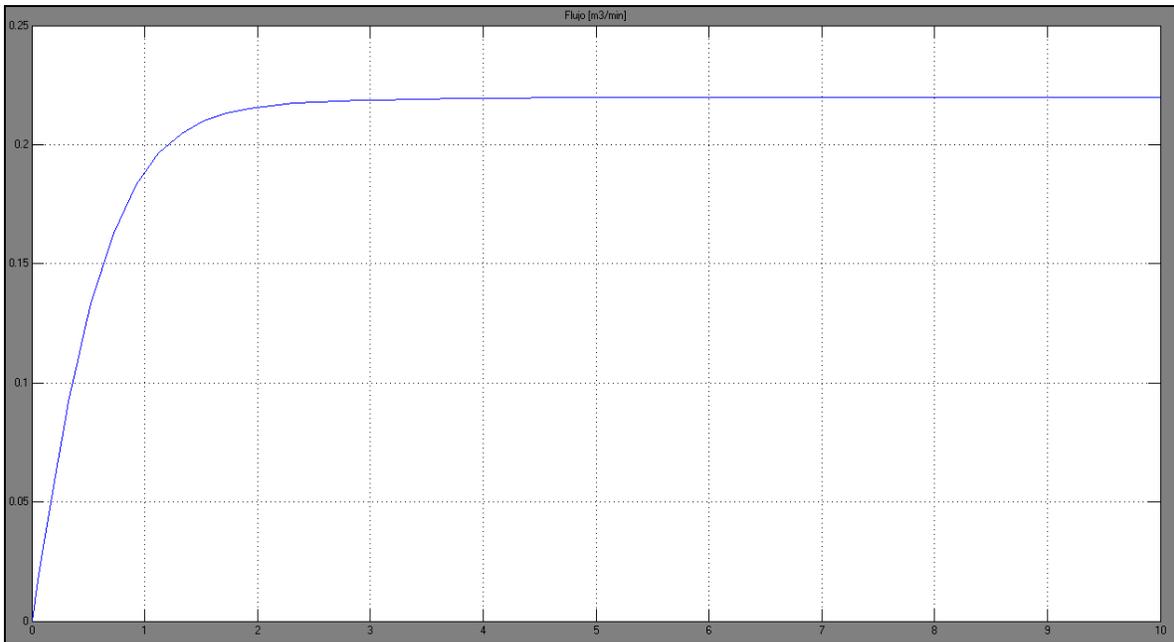


Figura 50. Respuesta del lazo cerrado de control de flujo del proceso de termización con compensador para un set point de $0,22 \text{ m}^3/\text{min}$.

De manera general se puede resumir los parámetros de los sistemas de control estudiados y los compensadores diseñados, para los tres lazos de control del proceso de termización, tal y como se muestra en la tabla 17.

Tabla 17. Valor de las constantes de los controladores PI diseñados para el proceso de termización.

Lazo de control	Función de transferencia del sistema	Función de transferencia del sensor	Función de transferencia de compensador PI	K_p	τ_i [s]
Nivel	$G_V(s) = \frac{43}{2 \cdot s + 1}$	$H(s) = \frac{1}{0,1 \cdot s + 1}$	$G_p(s) = 0,1 \cdot \frac{s + 0,4}{s}$	0,1	2,5
Temperatura	$G_V(s) = \frac{80,19}{2 \cdot s + 1}$	$H(s) = \frac{1}{2,4 \cdot s + 1}$	$G_p(s) = 0,01 \cdot \frac{s + 0,3}{s}$	0,01	3,33
Flujo	$G_M(s) = \frac{14,122}{s + 1}$	$H(s) = \frac{1}{0,2 \cdot s + 1}$	$G_p(s) = 0,1 \cdot \frac{s + 0,95}{s}$	0,1	1,05

Además, en la tabla 18 se muestra información referente a las características más importantes de las respuestas de los lazos de control del proceso de termización, en donde se presenta como datos importantes el tiempo de estabilización, el sobreimpulso máximo y el error en estado estacionario de los sistemas.

Tabla 18. Características de los sistemas ante los compensadores PI diseñados para el proceso de termización.

Lazo de control	Set Point	Variable de proceso en estado estable	Tiempo de estabilización [s]	Valor del sobreimpulso máximo	Error en estado estacionario [%]
Nivel	0,5 m ³	0,48 m ³	5	0,5 m ³	4
Temperatura	74 °C	73,5 °C	15	75,6 °C	1,08
Flujo	0,22 m ³ /min	0,21 m ³ /min	4,5	0,22 m ³ /min	4,54
	0,42 m ³ /min	0,41 m ³ /min	4,5	0,42 m ³ /min	2,38

6.2 Análisis

Desde un inicio lo que se propuso con la realización de este proyecto fue diseñar el control automático del nuevo proceso de termización, siguiendo ciertos puntos de interés por parte de la empresa Nestlé-Prolacsa, los cuales recordando eran, la utilización de un controlador lógico programable con tecnología de punta, la implementación de una red con un único protocolo de comunicación entre los dispositivos a utilizar y un control automático fundamentado en el estudio teórico y matemático de los lazos cerrados del proceso.

Bajo la solución que se planteó a lo largo del documento para este proceso, se tiene que al utilizar el controlador modelo CompactLogix 1769-L32E, se equipa al proceso con un PLC de última generación con lo que se obtiene una solución eficiente en cuanto a manejo de los equipos y capacitado a la vez a trabajar bajo expansiones a futuro sobre el proceso. Además, se planteó implementar equipo bajo un único protocolo de comunicación, como lo es el Ethernet/IP (cuya red es mostrada en la figura 8), el cual como se sabe es actualmente la red de comunicación universal a nivel mundial, lo que otorga al proceso de termización características de suma importancia para la empresa, como lo es la supervisión, manejo y soporte remoto de toda la etapa de control desde cualquier ordenador que se encuentre dentro de la red y que tenga la autorización de manipulación de la misma; además de la eficiencia y estabilidad propios de la comunicación bajo este protocolo de comunicación.

Al analizar la aplicación diseñada para el panel de operador del proceso de termización, se tiene que se realizó bajo la idea principal de colocar o mostrar en cada pantalla únicamente la información necesaria para el operador durante la manipulación del proceso. Con esto se evitó sobrecargar el ambiente visual y así a la vez minimizar los riesgos de mala operación o no entendimiento de la aplicación por parte de las personas encargadas de supervisar y manipular el proceso de termización.

Como se observa en los resultados de la aplicación diseñada (figuras de la 30 a la 36), ésta se distribuyó en dos pantallas generales del proceso como lo son la vista general de termización y la de preparación de agua caliente para abastecer el proceso. Con esto se controla y se tiene a mano solamente el equipo y variables específicas para cada uno de los procesos, evitando así la confusión generada usualmente con un ambiente gráfico sobrecargado de información innecesaria.

Además, se diseñó para el manejo de cada equipo una pantalla específica de manipulación y visualización del estado, con la cual el operador podrá manejar tanto de manera manual y automática cada uno de los dispositivos como lo son las válvulas y bombas del proceso. Por último, para el manejo y visualización de cada una de las variables de los lazos de control propios del proceso de termización, se diseñó una pantalla en la cual se podrá manejar de manera automática o manual el instrumento de control dependiendo de las condiciones de trabajo, así como si en algún momento se requiriese, variar el valor de las constantes del PID (K_i , K_p y K_c).

Por otro lado, al estudiar la respuesta del sistema de control de nivel del proceso de termización sin el compensador diseñado, la cual se observa en la figura 38, el comportamiento propio del sistema posee al inicio grandes oscilaciones o sobreimpulsos, esto debido a la alta ganancia propia de la válvula proporcional, lo cual tiende a producir que el sistema oscile y pierda estabilidad en su respuesta dinámica. Además, se observa como el sistema por sí solo no logra llegar al valor deseado de set point, $0,5 \text{ m}^3$ (500 L) en este caso, llegando a un valor máximo de aproximadamente $0,48 \text{ m}^3$ (480 L) y manteniéndose en pequeñas oscilaciones al llegar a su estado estacionario. Estas características del sistema dan como resultado la necesidad de utilizar un compensador el cual mejore tanto las características dinámicas así como las estacionarias del proceso, para así lograr exitosamente el control automático del mismo.

Al incluir en el sistema el compensador diseñado, se tiene que se mejora por un lado la respuesta dinámica, en donde se eliminan los sobreimpulsos iniciales ocasionados por la alta ganancia de la válvula, además de la respuesta en estado

estacionario, en donde el error en estado estacionario se mejora notoriamente logrando que el sistema llegue al valor de set point deseado, $0,5 \text{ m}^3$ (500 L) en este caso, tal y como se muestra en la figura 40.

Por lo tanto, con la adición del compensador diseñado se introduce una ganancia proporcional menor a la unidad ($K_p=0,1$), esto con el fin de reducir la ganancia total del sistema, conformado hasta ahora únicamente por la válvula de control ($K_v=43$), y así lograr mejorar las características dinámicas del sistema, además de introducir una constante integral de $\tau_i=2,5$ para obtener una respuesta dinámica rápida de aproximadamente 5 segundos, en donde la variable analizada es el nivel de la tina de balance. Por otro lado, con la adición de dicho compensador diseñado se logra mejorar notoriamente la respuesta estacionaria, con lo que el error en estado estacionario disminuye a tal punto de lograr obtener valores muy cercanos al valor de set point deseado.

De igual manera al analizar el comportamiento del lazo cerrado de temperatura sin el compensador diseñado, tal y como se muestra en la figura 41, se obtiene como resultado la gráfica de respuesta de la figura 42, en donde la elevada ganancia total del sistema, dada únicamente por la constante de la válvula K_v , incide en la respuesta dinámica del proceso. Esto afecta en la estabilidad del sistema ocasionando grandes sobreimpulsos a la hora de tratar de llevar al sistema a su estabilidad en el valor dado por el set point, $74 \text{ }^\circ\text{C}$ en este caso, por lo que esto es indicador de que era necesario utilizar e implementar un control sobre el sistema a través de un compensador.

Por otro lado, se observa en dicha gráfica de la figura 42 como el sistema en su estado estacionario tiende a mantenerse en oscilación entre los valores de $76 \text{ }^\circ\text{C}$ a $70 \text{ }^\circ\text{C}$, lo que es indicador de la sensible inestabilidad del sistema. Con esto, se debió pensar en implementar un compensador que a la vez mejorará este comportamiento en estado estacionario del sistema.

Una vez diseñado el compensador a utilizar para el control de este proceso de temperatura, se introdujo en el lazo para observar sus consecuencias en el

sistema y a la vez analizar las mejoras ante los comportamientos antes mencionados. Al estudiar la respuesta del diagrama de bloques de la figura 43, se obtiene como resultado la gráfica de la figura 44, en donde se observa una notoria mejoría tanto en la respuesta dinámica como en la estacionaria tal y como se analizará.

Por un lado, al analizar la respuesta dinámica se observa como se logra eliminar las grandes oscilaciones producidas por la elevada ganancia de la constante de la válvula proporcional utilizada. Con esto el sistema eleva suavemente la temperatura hasta un valor máximo de aproximadamente 76 °C, el cual es el valor del sobreimpulso máximo del sistema en un tiempo de 7 segundos. Además, se tiene que el tiempo de respuesta del sistema es lo suficientemente rápido, aproximadamente 15 segundos para llegar al valor de 74 °C, tomando en cuenta que la variable con la que se trata es temperatura la cual representa un fenómeno sumamente inercial. Aquí es importante mencionar que para el proceso de termización la validación en la secuencia de la temperatura en la leche se da cuando ésta alcanza valores de entre 72 °C y 76 °C, lo que implica lograr una temperatura en el agua de 74 °C o superior, por lo que se estaría logrando alcanzar la temperatura adecuada para el proceso en un tiempo de aproximadamente 5 segundos lo cual es un tiempo bastante rápido.

Por otro lado, al analizar la respuesta en estado estacionario del sistema se tiene que las pequeñas oscilaciones presentes en ausencia del compensador son eliminadas al incluirlo, con lo que se llega al valor de set point requerido por el proceso el cual es 74 °C y se mantiene constante en ausencia de perturbaciones.

Al analizar el último de los lazos de control, el referente al flujo del proceso, se tiene que en ausencia del compensador diseñado, el sistema presenta problemas en la respuesta dinámica, esto debido a los grandes sobreimpulsos tal y como se muestra en las figuras 46 y 47, para valores de set point de 0,22 m³/min y 0,42 m³/min respectivamente. En estas figuras se observa claramente las oscilaciones presentes debidas, de igual manera que en los sistemas anteriores, a la elevada ganancia propia del sistema en ausencia de cualquier tipo de control. Dado esto

se hizo necesario involucrar un controlador que mejore notoriamente este comportamiento en el estado dinámico de la planta.

En el proceso de diseño del mismo, se planteó la idea de un controlador del tipo PI o compensador de atraso y así mejorar la respuesta dinámica del sistema; en donde la ubicación del cero se realizó basados en la idea de control de un sistema de tipo cero, colocando así el mismo a la derecha y lo más cerca posible del polo real más lento. Además, se colocó a dicho compensador una ganancia menor a la unidad para con esto reducir el efecto de la elevada ganancia del sistema en sí, optando por reducirla a una décima parte.

Así, al añadir el compensador diseñado se observa, con la ayuda de las figuras 49 y 50, como los problemas en el estado dinámico mejoran; logrando así eliminar las oscilaciones y obteniendo un tiempo de estabilización de aproximadamente 4,5 segundos lo que representa una respuesta bastante rápida lo cual de igual manera era deseado para el sistema.

Capítulo 7. Conclusiones y Recomendaciones

7.1 Conclusiones

1. La utilización de un controlador lógico programable representó una solución eficiente para el control automático del proceso de termización, esto debido a su capacidad de manejo de múltiples señales, el cual abarca hasta 30 módulos locales para el manejo de señales analógicas y/o digitales, adaptadores para el manejo de señales remotas, sus puertos de comunicación integrados y el rápido procesamiento de los datos.
2. Las elevadas ganancias propias de los elementos de control del proceso de termización, son las causantes de los problemas de oscilaciones indeseados y la consecuente inestabilidad de los sistemas en la respuesta dinámica, además de generar una respuesta estacionaria incorrecta.
3. Al incluir una ganancia proporcional menor a la unidad en los controladores PI del proceso de termización, se logró por un lado eliminar las oscilaciones ocasionadas por las elevadas ganancias propias de cada uno de los elementos de control, y por otro lado obtener un tiempo de estabilización adecuado para cada uno de los lazos del proceso de termización, en donde para el lazo de nivel se tiene un tiempo de estabilización de 5 segundos, para el lazo de temperatura de 15 segundos y para el lazo de flujo de 4,5 segundos.
4. Con la inclusión de un cero en el controlador PI se mejoró la respuesta en estado estacionario, logrando obtener valores de error en estado estacionario de 4%, 1,08%, 4,54% y 2,38% para la respuesta de los lazos de nivel, temperatura y flujo respectivamente, de cada uno de los lazos cerrados de control del proceso de termización.

5. El panel de operador representó la manera más sencilla de llevar a cabo el monitoreo y control gráfico del equipo del proceso de termización, esto debido a la gran cantidad de equipo a manejar en dicho proceso, evitando con esto el uso de interruptores y botones físicos para el manejo de dicho equipo y del proceso en sí.

7.2 Recomendaciones

1. Se recomienda colocar al variador de frecuencia una tarjeta de comunicación Ethernet/IP, para así añadirlo a la red y lograr obtener el control e información útil del mismo como corriente, temperatura, potencia entregada, entre otras variables del mismo.
2. Se recomienda un rango de funcionamiento más pequeño en el sensor del lazo de control de nivel, para así obtener una mayor precisión en las mediciones; esto ya que actualmente es de 250 in (6,35 m) de columna de agua cuando la tina de balance a lo sumo mide 80 in (2 m) de columna de agua.
3. Es recomendado colocar bajo seguridad la manipulación, desde el panel de operador, de las constantes de los controles PID de los lazos del proceso, esto para no tener influencias negativas dadas por la manipulación sin control de las mismas.

Bibliografía

- <http://www.ab.com>
Descripción del Controlador Lógico Programable y software de programación y manuales.
- <http://www.festo.com>
Descripción de las válvulas de control proporcionales.
- <http://www.emersonprocess.com/Rosemount>
Descripción y características de sensores y transmisores Rosemount.
- Carlos A. Smith, Armando B, *Control Automático de Procesos, Teoría y Práctica*, 1^{ra} edición. México: Editorial LIMUSA, 1991.
- Kuo, Benjamín. C. *Sistemas de Control Automático*. 7^a edición. México: Prentice Hall Hispanoamericana, 1996.
- Enrique Carnicer Royo, Concepción Mainar Hasta. *Bombas Centífugas*. España: Editorial Paraninfo S.A., 1995.
- Paul W. Murrill. *Fundamentals of Process Control Theory*. 3ra edición. Estados Unidos: Instrument Society of America (ISA), 2000.
- Bahram Shahian, Michael Hassul. *Control System Design using Matlab*. Estados Unidos: Prentice Hall, 1993.

Apéndices y Anexos

Apéndices

Apéndice A.1 Abreviaturas

- FT: Sensor de flujo
- LT: Sensor de nivel.
- TT: Sensor de temperatura.
- PT: Sensor de presión.
- PID: Controlador proporcional-integral-derivativo.
- PI: Controlador proporcional-integral.
- HMI: Módulo de interfaz humana, por sus siglas en inglés.
- PLC: Controlador lógico programable.

Apéndice A.2 Imágenes de equipo utilizado para el control del proceso de termización



Figura A.2.1 Sensor y transmisor de nivel utilizado para el proceso de termización.



Figura A.2.2 Válvula de control de nivel del proceso de termización.



Figura A.2.3 Sensor y transmisor de temperatura utilizado para el proceso de termización.



Figura A.2.4 Válvula de control de temperatura del proceso de termización.



Figura A.2.5 Sensor y transmisor de flujo utilizado para el proceso de termización.



Figura A.2.6 Variador de frecuencia utilizado para el control de flujo del proceso de termización.

Apéndice A.3 Listado de las señales utilizadas para control del proceso de termización

Tabla A.3.1 Lista de señales de entradas analógicas del proceso de termización.

Módulo	Slot	Dirección	Etiqueta y descripción
1769-IF16C	1	I:1.0	LT 11.01 – Nivel de producto TANK 11.01
	1	I:1.1	FT 11.01 – Flujo de producto termización
	1	I:1.2	TT 11.01 - Temperatura producto entrada holding tube
	1	I:1.3	PT 11.01 - Presión producto salida holding tube
	1	I:1.4	TT 11.02 - Temperatura producto salida holding tube
	1	I:1.5	PT 11.02 - Presión producto salida intercambiador de placas PHE 11.01
	1	I:1.6	TT 11.03 - Temperatura producto salida intercambiador de placas PHE 11.01
	1	I:1.7	TT 06.02 - Temperatura control agua caliente
	1	I:1.8	Libre
	1	I:1.9	Libre
	1	I:1.10	Libre
	1	I:1.11	Libre
	1	I:1.12	Libre
	1	I:1.13	Libre
	1	I:1.14	Libre
1	I:1.15	Libre	

Tabla A.3.2 Lista de señales de salidas analógicas del proceso de termización.

Módulo	Slot	Dirección	Etiqueta y descripción
1769-OF8C	2	O:1.0	PUMP 11.01 – Velocidad referencia bomba alimentación termización
	2	O:1.1	TCV 01.02 - Referencia apertura válvula control flujo de vapor
	2	O:1.2	CLV 11.01 - Referencia apertura válvula control nivel TANK 11.01
	2	O:1.3	Libre
	2	O:1.4	Libre
	2	O:1.5	Libre
	2	O:1.6	Libre
	2	O:1.7	Libre

Tabla A.3.3 Lista de señales de entradas digitales del proceso de termización.

Módulo	Slot	Dirección	Etiqueta y descripción
1769-IQ32	3	I:1.0	PUMP 11.01 CNF ARRANQUE – Bomba alimentación termización
	3	I:1.1	PUMP 11.01 JOG - Bomba alimentación termización
	3	I:1.2	PUMP 11.01 AUTO - Bomba alimentación termización
	3	I:1.3	PUMP 06.02 CNF ARRANQUE – Bomba recirculación agua caliente
	3	I:1.4	PUMP 06.02 JOG - Bomba recirculación agua caliente
	3	I:1.5	PUMP 06.02 AUTO - Bomba recirculación agua caliente
	3	I:1.6	REMOTO CLFD11.01 - Habilitación de campo clarificadora 11.01
	3	I:1.7	REMOTO CLFD11.02 - Habilitación de campo clarificadora 11.02
	3	I:1.8	CLFD 11.01 CNF ARRANQUE - Clarificadora 11.01
	3	I:1.9	CLFD 11.02 CNF ARRANQUE - Clarificadora 11.02
	3	I:1.10	CLFD 11.01 ALARMA CIP - Clarificadora 11.01
	3	I:1.11	CLFD 11.02 ALARMA CIP - Clarificadora 11.02
	3	I:1.12	ZSO 11.01 APERTURA - Válvula V11.01 desviadora producción/drenar
	3	I:1.13	ZSC 11.01 CIERRE - Válvula V11.01 desviadora producción/drenar
	3	I:1.14	ZSO 11.02 APERTURA - Válvula V11.02 descarga producto de TANK 11.01
	3	I:1.15	ZSC 11.02 CIERRE - Válvula V11.02 descarga producto de TANK 11.01
	3	I:1.16	ZSO 11.07 APERTURA - Válvula V11.07 recirculación producto/CIP a TANK 11.01
	3	I:1.17	ZSC 11.07 CIERRE - Válvula V11.07 recirculación producto/CIP a TANK 11.01
	3	I:1.18	ZSO 11.08 APERTURA - Válvula V11.08 desviadora producto/CIP
	3	I:1.19	ZSC 11.08 CIERRE - Válvula V11.08 desviadora producto/CIP
	3	I:1.20	ZSO 04.02 APERTURA - Válvula V04.02 admisión agua a TANK 11.01
	3	I:1.21	ZSC 04.02 CIERRE - Válvula V04.02 admisión agua a TANK 11.01
	3	I:1.22	LSH 06.01 - Sensor de nivel alto de agua caliente
	3	I:1.23	LSL 06.01 - Sensor de nivel bajo de agua caliente
	3	I:1.24	CNF PUMP AGUA HELADA TERMIZACION
	3	I:1.25	Libre
	3	I:1.26	Libre
	3	I:1.27	Libre
	3	I:1.28	Libre
	3	I:1.29	Libre
	3	I:1.30	Libre
3	I:1.31	Libre	

Tabla A.3.4 Lista de señales de salida digitales del proceso de termización.

Módulo	Slot	Dirección	Etiqueta y descripción
1769-OQ32	4	O:1.0	ARRANQUE PUMP 11.01 - Bomba alimentación termización
	4	O:1.1	ARRANQUE MODO PRODUCCION CLFD 11.01 - Clarificadora 11.01
	4	O:1.2	ARRANQUE MODO CIP CLFD 11.01 - Clarificadora 11.01
	4	O:1.3	ARRANQUE MODO PRODUCCION CLFD 11.02 - Clarificadora 11.02
	4	O:1.4	ARRANQUE MODO CIP CLFD 11.02 - Clarificadora 11.02
	4	O:1.5	ARRANQUE PUMP 6.02 - Bomba recirculación agua caliente
	4	O:1.6	Libre
	4	O:1.7	Libre
	4	O:1.8	Libre
	4	O:1.9	Libre
	4	O:1.10	Libre
	4	O:1.11	Libre
	4	O:1.12	Libre
	4	O:1.13	Libre
	4	O:1.14	Libre
	4	O:1.15	Libre
	4	O:1.16	Libre
	4	O:1.17	Libre
	4	O:1.18	Libre
	4	O:1.19	Libre
	4	O:1.20	Libre
	4	O:1.21	Libre
	4	O:1.22	Libre
	4	O:1.23	Libre
	4	O:1.24	Libre
	4	O:1.25	Libre
	4	O:1.26	Libre
	4	O:1.27	Libre
	4	O:1.28	Libre
	4	O:1.29	Libre
	4	O:1.30	Libre
4	O:1.31	Libre	

Apéndice A.4 Software obtenido para el control de válvulas y motores del proceso de termización

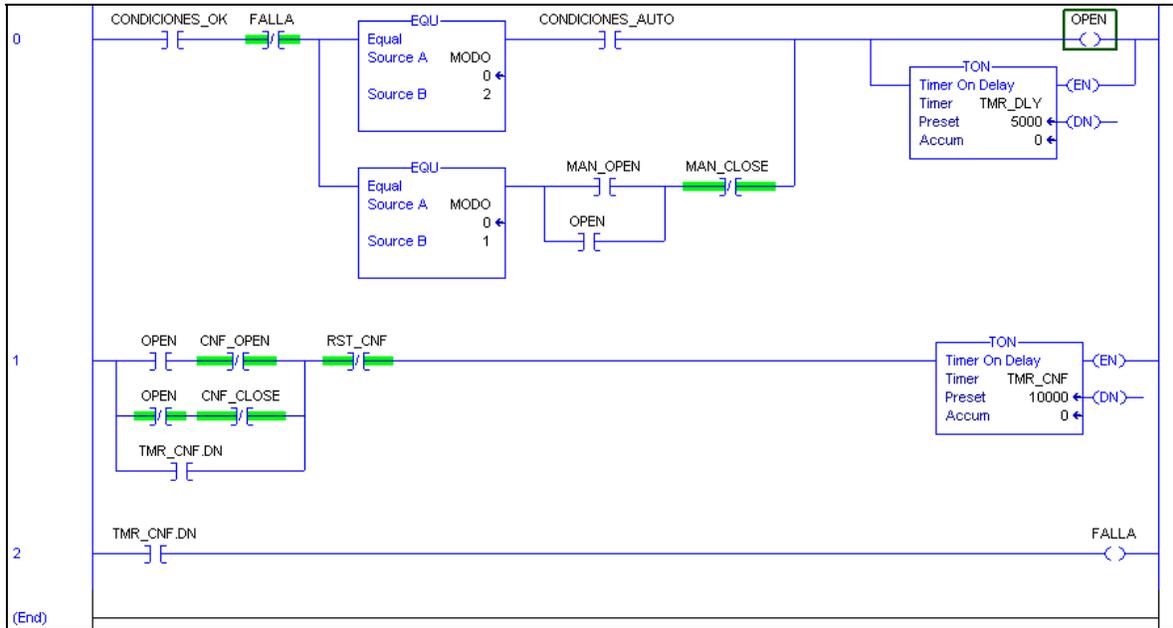


Figura A.4.1 Bloque de programación para el manejo de válvulas.

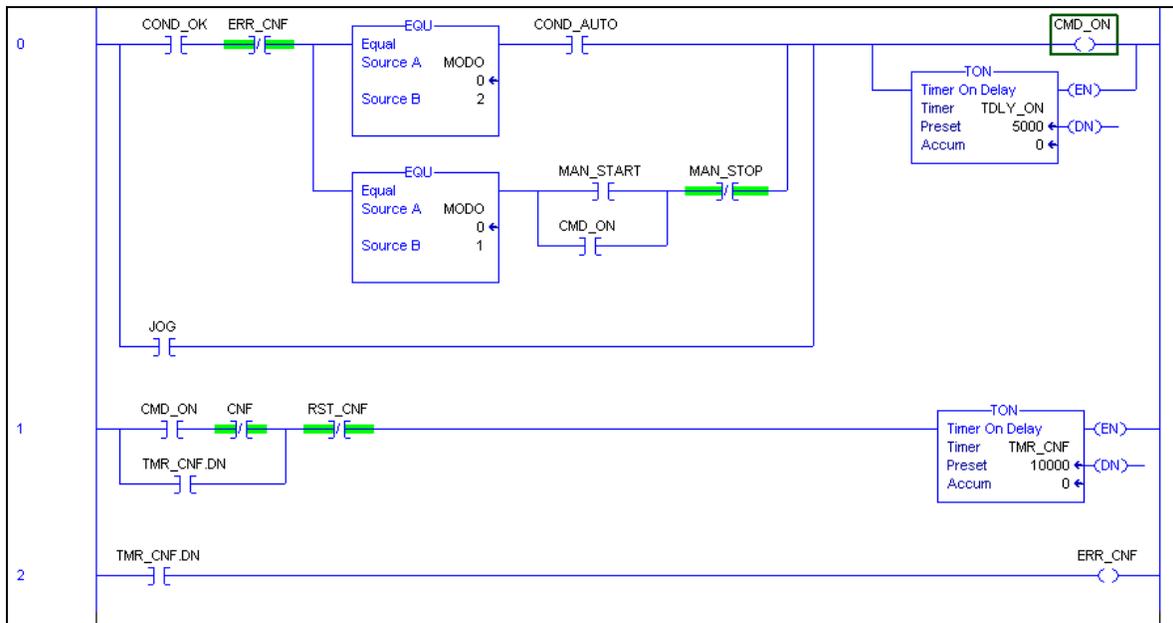


Figura A.4.2 Bloque de programación para el manejo de motores.

Apéndice A.5 Información sobre la empresa/institución¹⁰

A lo largo de más de 12 años la División de Automatización de la empresa ELVATRON S.A desarrolló una variedad interesante de proyectos diferentes, uniendo para tal fin, tecnologías y marcas de clase mundial, con el aporte de ingeniería netamente nacional.

A partir de Octubre de 2004, todo este conocimiento, personal y metodología de trabajo está disponible bajo una nueva compañía denominada SISTEMAS IQ, S.A., cuya misión es el suministro de servicios de Ingeniería en el campo de la automatización, control y proyectos llave en mano.

Los datos de nuestra empresa, incluyendo los proyectos realizados bajo la razón social de Elvatron S.A. son:

Capital: Costarricense.

Número de empleados: 27.

Personal Técnico: 90%.

Especialidad: Integrar sistemas de control e instrumentación electrónicos en maquinaria de manufactura ó industria de proceso, utilizando tecnología de avanzada en el campo de automatización, con desarrollo de ingeniería a nivel local, respetando normas de calidad y seguridad internacionales, y desarrollando paquetes completos "llave en mano" con calidad mundial a costos razonables.

Mercado de trabajo: Industrias de manufactura y proceso como Tabaco, Edificios Inteligentes, LLantas y Hule, Alimentos y Bebidas, Petróleo, Cemento y Generación Eléctrica.

¹⁰ Información tomada de <http://www.sistemas-iq.com/sis/index.html>

Anexos

Anexo A.1 Configuración Nodo de campo¹¹

Para el manejo de las válvulas por aire comprimido se utilizó un nodo de campo de la familia Festo, el cual se muestra en la figura A1.1.



Figura A.1.1 Diagrama nodo de campo CPX-FB32.

Para realizar en campo los ajustes de estos dispositivos se debe de tomar en cuenta los aspectos que se mencionan a continuación. Se tomará como referencia ilustrativa del elemento la imagen de la figura A.1.2.

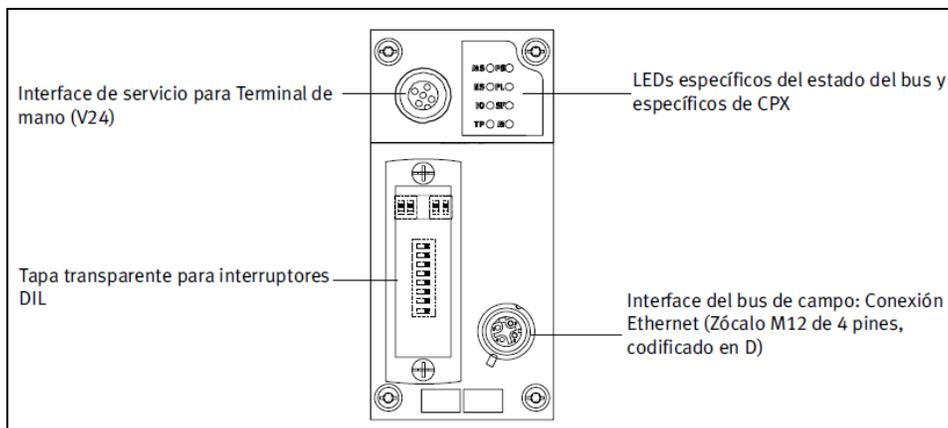


Figura A.1.2 Descripción del nodo de campo CPX-FB32.

¹¹ Información e imágenes tomadas del "Manual de la parte electrónica", Nodo de Campo FB-CPX32, FESTO.

1. Ajustes de los interruptores DIL en el nodo del bus de campo: como se observa en la Figura A.1.2, se cuenta con tres juegos de dipswitch de los cuales dos son de dos interruptores (DIL1 y DIL2) y el restante de 8 interruptores (DIL3).

Los DIL se deben ajustar tal y como se muestra en la figura A.1.3 y se explica a continuación:

- DIL1 o Modo de funcionamiento: modo de funcionamiento remote I/O.
- DIL2 o Modo de diagnóstico o número de bytes de I/O para el remote controller: los bits de estado están activados.
- DIL3 o Direccionamiento IP: direccionamiento dinámico a través de BOOTP/DHCP.

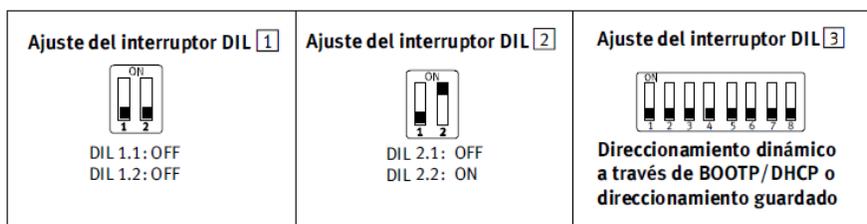


Figura A.1.3 Ajuste de DIL del nodo de campo CPX-FB32.

2. Interfaz de bus de campo: este equipo cuenta con un zócalo de tipo M12 de cuatro pines Ethernet/IP cuya configuración es la que se muestra en la figura A.1.4.

Zócalo M12 EtherNet/IP	Asignación de pines	Explicación	Equivalencia de pines con clavija RJ45
	1. TX+ 2. RX+ 3. TX- 4. RX- Cuerpo: Apantallamiento/blindaje	Transmitted data + Received data + Send data - Receive data -	1 3 2 6

Figura A.1.4 Interfaz del nodo de campo CPX-FB32.