



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA,
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**TEMA: REINGENIERÍA DE LA ESTACIÓN DE
PROCESOS PS-2800 DEL LABORATORIO CIM**

AUTORES:

**PICHOASAMÍN MORALES DIEGO FERNANDO
CÓNDOR LINCANGO WILLIAN DAVID**

DIRECTOR:

ING. CHACÓN ENCALADA LUIS ALEJANDRO MSc.

SANGOLQUÍ

2016



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación: "**REINGENIERÍA DE LA ESTACIÓN DE PROCESOS PS-2800 DEL LABORATORIO CIM**", realizado por los señores **DIEGO FERNANDO PICHOASAMÍN MORALES** y **WILLIAN DAVID CÓNDOR LINCANGO**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a los señores **DIEGO FERNANDO PICHOASAMÍN MORALES** y **WILLIAN DAVID CÓNDOR LINCANGO** para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, mayo 2016

Luis Alejandro Chacón
Ingeniero Electrónico
Master Automática y Robótica

Ing. Alejandro Chacón Encalada MSc.

DIRECTOR



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **DIEGO FERNANDO PICHOASAMÍN MORALES** con cédula de identidad N°: 1718438771 y **WILLIAN DAVID CÓNDOR LINCANGO** con cédula de identidad N°: 1719928424, declaramos que este trabajo de titulación **“REINGENIERÍA DE LA ESTACIÓN DE PROCESOS PS-2800 DEL LABORATORIO CIM”** ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada

Sangolquí, mayo 2016

Sr. Diego Fernando Pichoasamín M.
C.C. 1718438771

Sr. Willian David Condor L.
C.C. 1719928424



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **DIEGO FERNANDO PICHOASAMÍN MORALES** y **WILLIAN DAVID CÓNDOR LINCANGO**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca virtual de la institución el presente trabajo de titulación “**REINGENIERÍA DE LA ESTACIÓN DE PROCESOS PS-2800 DEL LABORATORIO CIM**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, mayo 2016



Sr. Diego Fernando Pichoasamín M.
C.C. 1718438771



Sr. Willian David Condor L.
C.C. 1719928424

DEDICATORIA

El presente proyecto va dedicado a mi familia, en especial a mi padre Luis y a mi madre Olga, quienes supieron cuidarme, amarme y guiarde durante toda mi vida, aquellos que me apoyaron durante toda mi formación académica.

A ti padre, por tus consejos y enseñanzas, por guiarme en el camino de la vida con tu experiencia, por enseñarme que lo más importante es la confianza en uno mismo y el compartir con la familia, te dedico esta obra por siempre apoyarme y confiar en mí.

A ti madre, por ser un ejemplo de mujer, por tu esfuerzo y tu diario sacrificio con mis hermanos y conmigo, por siempre estar presente en los buenos y malos momentos de mi vida, porque siempre fuiste el pilar fundamental de la familia, este logro te lo debo a ti.

Diego

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a toda mi familia, en especial a mi madre, Marcia tú has sido el pilar fundamental durante toda mi vida, me has impulsado y sabido aconsejar en los momentos en que he necesitado de un rumbo o una guía, muy dentro de mi ser queda tu inmensa ayuda y desinterés al apoyarme en todo momento en cada decisión y acción que he tomado.

Lo dedico también a mí padre, Jorge por ser la persona que durante toda mi infancia fue ejemplo de verdad, sinceridad y alegría, que a pesar de todos los momentos duros pasados este trabajo es el resultado de su apoyo en el todo momento, tu compañía durante aquellas noches de desvelo siempre han sido un incentivo a seguir a pesar del cansancio o del fastidio.

A mis abuelitos, que siempre se han preocupados por mí, en todo momento y han sido un ejemplo de lucha y valentía, les agradezco por su inmensa sabiduría, fruto de tantas vivencias y experiencias pasadas, su gran conocimiento me ha enseñado que nunca se termina de aprender y que hay cosas que uno no puede entender y simplemente aceptar.

David

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme salud y bienestar, por permitirme lograr uno de mis sueños, y por concederme una maravillosa familia.

A mis padres por haberme dado el mejor regalo, la educación, por todo el tiempo dedicado en mí, por su ayuda, preocupación y entrega, les estaré eternamente agradecido.

A mis hermanos y familiares por apoyarme en el transcurso de mi formación académica y aconsejarme en el trajinar de la vida cotidiana, por ser ejemplos a seguir en la parte humana e intelectual.

Al Ingeniero Alejandro Chacón por aportarnos con su conocimiento y experiencia para el desarrollo del proyecto y por darnos la facilidad para el desarrollo del mismo.

A todos mis compañeros que tuve el agrado de conocer en mi formación académica y se convirtieron en grandes amigos, en especial a Willian con quien se forjó una gran amistad al desarrollar el presente proyecto.

Finalmente agradezco a Salomé por estar junto a mí en los triunfos y en los duros momentos de mi vida, por ser una persona con la cual puedo contar indispensablemente, por entregarme su amor sincero y depositar su confianza en mí.

Diego

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme la oportunidad de aprender cosas nuevas cada día, por darme una familia que me ha permitido seguir mis sueños y me ha apoyado en cada paso.

Agradezco a mis padres por ser mi sustento y apoyo en cada momento durante mi vida entera, sin ustedes no hubiera sido posible.

Agradezco a mi compañero y amigo Diego por haber creído en mí como una persona adecuada para desarrollar este proyecto conmigo, por toda su colaboración y ayuda durante todo este maravilloso proceso de aprendizaje.

A mis amigos que siempre han estado en el momento necesario, cuando he necesitado un poco de apoyo, con todos y cada uno de ustedes he quedado en deuda por su constante preocupación hacia mi persona.

Finalmente agradezco a todos los excelentes académicos que han aportado con sus conocimientos durante toda la carrera, un agradecimiento en especial a nuestro director de proyecto, Ingeniero Alejandro Chacón que ha aportado con su experiencia para el desarrollo de este proyecto.

David

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN.....	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vii
ÍNDICE DE CONTENIDO	ix
ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT	xvi
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Justificación e importancia	2
1.3. Alcance del proyecto	2
1.4. Objetivo	3
1.4.1. Objetivo general	3
1.4.2. Objetivo específico.....	4
CAPÍTULO II	5
CARACTERIZACIÓN DE LA ESTACIÓN PS-2800	5
2.1. Operación y funcionamiento de la estación.....	6
2.1.1. Funcionalidades.....	6
2.1.2. Descripción de componentes.....	6
2.1.3. Subsistemas de la estación	19
2.2. Determinación del estado inicial de la estación PS-2800.....	25
2.2.1. Matriz de evaluación	25
2.2.2. Resultados de la evaluación	27
2.3. Propuesta de solución para la Reingeniería de la estación PS-2800.....	27
2.3.1. Reposición o corrección de elementos defectuosos.....	27
2.3.2. Propuesta de Reingeniería de la estación PS-2800.....	30
2.4. Evaluación de soluciones	46
2.4.1. Criterios de evaluación.....	46
2.4.2. Resultados de la evaluación	46

CAPÍTULO III	49
PROCESO DE ADAPTACIÓN	49
3.1. Adaptación mecánica	50
3.1.1. Diseño de la estructura mecánica.	50
3.1.2. Proceso de maquinado.....	52
3.2. Adaptación eléctrica.....	52
3.2.1. Conexión del panel táctil SIMATIC OP177B	52
3.3. Adaptación de instrumentación	54
3.3.1. Transmisor de nivel (LT541)	54
3.3.2. Bomba centrifuga (DC PUMP P1)	55
3.3.3. Transmisor de flujo (FT535)	56
3.3.4. Tarjeta Generadora PWM – Bomba DC P1.	57
3.4. Adaptación de algoritmos de control.....	58
3.4.1. Modelamiento de sistemas	59
3.4.2. Algoritmo de control del lazo de flujo 531.....	64
3.4.3. Algoritmo de control del lazo de flujo 535.....	72
3.4.4. Algoritmo de control del lazo de nivel 541	76
3.4.5. Algoritmo de control del lazo de temperatura 511 con actuador On/Off	81
3.4.6. Algoritmo de control del lazo de temperatura, proceso de calentamiento.....	84
3.4.7. Algoritmo de control del lazo de temperatura, proceso de enfriamiento	89
3.5. Adaptación de estrategias de control.....	90
3.5.1. Control de nivel 541 – Estrategia por cascada	91
3.5.2. Control de Flujo 531 - Estrategia por razón de flujos	92
3.5.3. Control de nivel 541 - Estrategia por superposición	93
3.5.4. Control de temperatura 511 - Estrategia por rango partido	95
3.6. Reprogramación del PLC a través de lenguaje FBD	96
3.6.1. Bloques Implementados en la programación del PLC	97
3.6.2. Descripción y funcionamiento de las rutinas implementadas.....	102
CAPÍTULO IV	116
INTERFACES DEL SISTEMA	116
4.1. Integración de la pantalla digital	117
4.1.1. Topología de red	117
4.1.2. Integración de la pantalla digital con el controlador CompactLogix.....	118
4.2. Diseño de interfaz	119
4.2.1. Características de diseño	119
4.2.2. Diseño de pantallas de la HMI	120
4.3. Implementación de las interfaces del sistema.....	132
4.3.1. Pantalla de selección	132
4.3.2. Pantallas de Proceso	135
4.3.3. Pantalla de mantenimiento	138

CAPÍTULO V.....	140
PRUEBAS Y RESULTADOS EXPERIMENTALES	140
5.1. Prueba de operación de los componentes de la estación	140
5.2. Prueba de funcionamiento de los lazos de control	142
5.2.1. Control de temperatura 511-Técnica de control ON-OFF con histéresis	142
5.2.2. Control de flujo 531 - Técnica de control PI.....	144
5.2.3. Control de nivel 541- Técnica de control PI.....	147
5.2.4. Control de nivel 541 – Estrategia por cascada	147
5.2.5. Control de flujo 535 – Estrategia por razón de flujos.....	149
5.2.6. Control de nivel 541 – Estrategia por superposición.....	151
5.2.7. Control de temperatura 511 – Estrategia por rango partido	154
CAPÍTULO VI	156
GUÍAS MULTIMEDIA	156
6.1. Características de diseño de guías multimedia	156
6.2. Arquitectura del entorno web	157
6.3. Diseño de las páginas web	159
6.3.1. Pantalla principal.....	159
6.3.2. Pestañas de contenidos referentes al proyecto.....	160
6.3.3. Pestañas de contenidos referentes a procesos implementados	160
6.3.4. Pestañas de contenidos referente a descargas.....	161
6.4. Implementación del entorno web	162
6.4.1. Implementación de actividades	162
CAPÍTULO VII.....	166
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	166
7.1. Conclusiones	166
7.2. Recomendaciones.....	168
BIBLIOGRAFÍA.....	170
ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Funcionalidades de la estación PS-2800.....	7
Tabla 2. Elementos del tablero de control de fábrica.....	18
Tabla 3. Matriz de evaluación de los elementos de la estación.....	25
Tabla 4. Elementos defectuosos de la estación PS-2800.....	27
Tabla 5. Especificaciones técnicas del emisor de infrarrojos.....	28
Tabla 6. Especificaciones técnicas del Detector Optoschmitt.....	28
Tabla 7. Especificaciones técnicas del sensor de presión	29
Tabla 8. Especificaciones técnicas de la bomba centrífuga DC	29
Tabla 9. Especificaciones técnicas de la electroválvula DC	30
Tabla 10. Especificaciones Técnica del pulsador de emergencia.....	30
Tabla 11. Características técnicas del Panel SIMATIC OP177B.....	32
Tabla 12. Características de operación del Panel SIMATIC OP177B	32
Tabla 13. Evaluación de soluciones.....	48
Tabla 14. Direcciones IP de los dispositivos de la estación PS-2800	118
Tabla 15. Requisitos para la integración de la pantalla digital con el PLC	118
Tabla 16. Características de la pantalla de selección	122
Tabla 17. Características de la pantalla de procesos	124
Tabla 18. Características de la pantalla de diagrama P&ID	125
Tabla 19. Características de la pantalla de alarmas y advertencias de proceso	126
Tabla 20. Características de la pantalla de curvas de proceso.....	128
Tabla 21. Características de la pantalla de parámetros de ingeniería.....	129
Tabla 22. Características de las pantallas de mantenimiento	130
Tabla 23. Lista de entradas analógicos, módulo 1769-IF4.....	141
Tabla 24. Lista de salidas del módulo analógico 1769-OF2	141
Tabla 25. Lista de entradas digitales, módulo 1769-IQ16F	141
Tabla 26. Lista de salidas digitales, módulo 1769-OB16P	142
Tabla 27. Técnica OnOff - parámetros de control del lazo de temperatura 511.....	144
Tabla 28. Técnica PI - parámetros de control del lazo de flujo 531	144
Tabla 29. Técnica PID - parámetros de control del lazo de nivel 541	147
Tabla 30. Estrategia cascada - parámetros de control del lazo de nivel 541	149
Tabla 31. Estrategia cascada - parámetros de control del lazo de flujo 535.....	149
Tabla 32. Estrategia razón - Parámetros de control	151
Tabla 33. Estrategia superposición - parámetros de control del lazo de nivel 541.....	152
Tabla 34. Estrategia superposición - parámetros de control del lazo de flujo 535	152
Tabla 35. Estrategia rango partido - parámetros de control del lazo de temperatura 511	154

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Descripción del capítulo II	5
Figura 2. Elementos del interruptor de nivel.....	8
Figura 3. Respuesta del transmisor de nivel Cerabar PMC 133.....	9
Figura 4. Respuesta del transmisor de nivel ultrasónico Banner.....	10
Figura 5. Respuesta del transmisor de temperatura Pt100	11
Figura 6. Diagrama de funcionamiento del transmisor de flujo.....	12
Figura 7. Respuesta del transmisor de flujo FT531	14
Figura 8. Respuesta del transmisor de flujo FT535	14
Figura 9. Partes de una bomba centrífuga.....	15
Figura 10. Respuesta de la bomba centrífuga DC PUMP P1.....	16
Figura 11. Respuesta de la apertura de la válvula proporcional.....	17
Figura 12. Diagrama del tablero de control en su estado de fábrica	19
Figura 13. Subsistema del control de temperatura	20
Figura 14. Subsistema del control de nivel	22
Figura 15. Subsistema del control de flujo 535.....	23
Figura 16. Subsistema del control de flujo 531.....	24
Figura 17. Estación PS-2800, estructura de fábrica	31
Figura 18. Estación PS-2800 de fábrica, brazo robótico	31
Figura 19. Pantalla Siemens OP177B	32
Figura 20. Lazo de control de temperatura, ON-OFF con histéresis.....	34
Figura 21. Lazo de control de flujo, técnica PI.....	35
Figura 22. Lazo de control de nivel, técnica PI.....	36
Figura 23. Lazo de control, estrategia cascada de nivel-flujo	38
Figura 24. Lazo de control, razón de flujo	40
Figura 25. Lazo de control, superposición de flujo constante-nivel mínimo.....	42
Figura 26. Lazo de control, rango partido de temperatura-flujo de refrigeración.....	43
Figura 27. Diagrama de bloques de funciones	45
Figura 28. Descripción del capítulo III	49
Figura 29. Medidas del tablero de control, estado de fábrica.....	50
Figura 30. Tablero de control con adaptación de la pantalla digital.....	50
Figura 31. Diseño mecánico de la estación PS-2800, vista lateral	51
Figura 32. Diseño mecánico de la estación PS-2800, vista frontal	51
Figura 33. Diseño de la estación PS-2800, vista superior	51
Figura 34. Maquinado del tablero de control	52
Figura 35. Adaptación mecánica en la estación PS-2800	52
Figura 36. Diagrama de conexión eléctrica del PLC y la pantalla digital	53
Figura 37. Ubicación del LT541 en el lazo de control de nivel	54
Figura 38. Ubicación de la bomba DC PUMP P1 en el lazo de nivel	55
Figura 39. Ubicación del FT535 en el lazo de flujo 535.....	56
Figura 40. Lazo abierto del subsistema de flujo 531.....	59
Figura 41. Lazo abierto del subsistema de flujo 535.....	60
Figura 42. Lazo abierto del subsistema de nivel 541	61
Figura 43. Lazo abierto del subsistema de temperatura, calentamiento	62
Figura 44. Lazo abierto del subsistema de temperatura, enfriamiento	63
Figura 45. Diagrama de control para el lazo de flujo 531	64
Figura 46. Diagrama de Bode para el diseño de un regulador	66
Figura 47. Diagrama de bode del lazo de control 531	68
Figura 48. Desplazamiento de la fase	69
Figura 49. Diagrama de control para el lazo de flujo 535	72
Figura 50. Diagrama de bode del lazo de control 535	74
Figura 51. Diagrama de control para el lazo de nivel 541	76
Figura 52. Diagrama de bode del lazo de control 541	78
Figura 53. Diagrama de control para el lazo de temperatura 511	81
Figura 54. Control On-Off con histéresis.....	82
Figura 55. Comportamiento del algoritmo de control On-off con histéresis.....	83
Figura 56. Ancho de pulso de la variable manipulada	84
Figura 57. Diagrama de control de lazo 511, proceso de calentamiento.....	85
Figura 58. Diagrama de bode planta de temperatura en calentamiento.....	86
Figura 59. Diagrama de control de lazo 511, proceso de enfriamiento	89
Figura 60. Diagrama de bloques del sistema de control en cascada.....	91
Figura 61. Diagrama de bloques del sistema de control por razón de flujos	92

Figura 62. Diagrama de bloques del sistema de control por superposición	93
Figura 63. Diagrama de bloques del sistema de control por rango partido	95
Figura 64. Add-On Instruction “UC_LPM”	98
Figura 65. Add-On Instruction “UC_Grados”	98
Figura 66. Add-On Instruction “UC_cm”.....	98
Figura 67. Add-On Instruction “LPM_UC”.....	99
Figura 68. Add-On Instruction “Grados_UC”	99
Figura 69. Add-On Instruction “PROM”	99
Figura 70. Add-On Instruction “Move_Bits”	100
Figura 71. Add-On Instruction Escalar.....	100
Figura 72. Add-On Instruction Latch-unlatch.....	100
Figura 73. Instrucción SRTP (Tiempo proporcional de rango partido).....	101
Figura 74. Instrucción PIDE	101
Figura 75. Grafset de la rutina principal	103
Figura 76. Diagrama de flujo de la estrategia de control PI.....	105
Figura 77. Diagrama de flujo de la técnica de control On/Off con histéresis	107
Figura 78. Diagrama de flujo de la técnica de control PI - lazo 541	108
Figura 79. Diagrama de flujo de la estrategia de control por razón de flujos.....	110
Figura 80. Diagrama de flujo de la estrategia de control en cascada	111
Figura 81. Diagrama de flujo de la estrategia de control por superposición	112
Figura 82. Diagrama de flujo de la estrategia de control por rango partido	114
Figura 83. Descripción del capítulo IV	116
Figura 84. Topología de red de los equipos en la estación PS-2800	117
Figura 85. Puertos de conexión del panel OP177B.....	117
Figura 86. Arquitectura de las pantallas del HMI	121
Figura 87. Diseño de la pantalla de selección	123
Figura 88. Diseño de la pantalla de proceso	123
Figura 89. Diseño de la pantalla del diagrama P&ID	125
Figura 90. Diseño de la pantalla de alarmas y advertencias de proceso.....	126
Figura 91. Diseño de la pantalla de curvas del proceso	127
Figura 92. Diseño de la pantalla de parámetros de ingeniería.....	128
Figura 93. Diseño de la pantalla de mantenimiento-pestaña actuadores digitales.....	130
Figura 94. Diseño pantalla de mantenimiento-pestaña actuadores analógicos.....	131
Figura 95. Diseño de la pantalla de mantenimiento-pestaña de medición	131
Figura 96. Pantalla de bienvenida del proyecto	132
Figura 97. Pantalla de selección de modo de funcionamiento de la estación	133
Figura 98. Pantalla de selección de tipo de proceso de la estación	133
Figura 99. Pantalla de selección de los procesos de flujo	133
Figura 100. Pantalla de selección de procesos de nivel	134
Figura 101. Pantalla de selección de procesos de temperatura	134
Figura 102. Pantalla de variables de proceso de la estrategia razón de flujos	135
Figura 103. Pantalla diagrama P&ID de la estrategia de razón de flujos	136
Figura 104. Pantalla de configuración de parámetros del controlador	136
Figura 105. Curvas de controlador primario-estrategia de razón de flujos	137
Figura 106. Curvas del controlador secundario-estrategia de razón de flujos.....	137
Figura 107. Pantalla de alarmas de la estrategia de razón de flujos	137
Figura 108. Pantalla de Medición de transmisores e interruptores	138
Figura 109. Pantalla de activación de actuadores digitales	139
Figura 110. Pantalla de activación de actuadores analógicos.....	139
Figura 111. Respuesta de la variable MV de los reguladores FC535 y LC541.....	151
Figura 112. Respuesta de los actuadores de la estrategia de rango partido	154
Figura 113. Jerarquía de página web	158
Figura 114. Menú principal del entorno web	159
Figura 115. Submenús del contenido referencial	160
Figura 116. Pestañas de procesos de la estación	160
Figura 117. Partes de cada tipo de estrategia o técnica	161
Figura 118. Contenido de la pestaña de descargas	162
Figura 119. Implementación de la actividad 1, control de nivel - técnica PI	163
Figura 120. Implementación de la actividad 1, control de flujo- técnica PI.....	163
Figura 121. Implementación de la actividad 2, control de flujo- técnica PI.....	164
Figura 122. Implementación de la actividad 3, control de flujo estrategia de razón	164
Figura 123. Implementación de la actividad 3, control de temperatura On/Off.....	165

RESUMEN

El proyecto reingeniería de la estación de procesos tiene como objetivo reutilizar las características de la estación PS-2800 y formar un sistema de entrenamiento para procesos industriales, incorporando tecnologías actuales para el control y monitoreo de los procesos. En la primera etapa se desarrolló la caracterización de la estación, detallando la operación y funcionamiento de la misma, además se elaboró una matriz de evaluación para determinar qué elementos se encuentran operativos y cuales son objeto de reemplazo; conociendo el estado inicial de la estación se procedió a realizar y evaluar diferentes propuestas de solución para la reingeniería de la estación. Posterior al estado inicial de la estación, se desarrolló la etapa de adaptación entre las cuales se efectúan las adaptaciones mecánicas, eléctricas y de instrumentación; una vez instalado todos los componentes y elementos que permiten el correcto funcionamiento de la estación se realizó el modelamiento de los subsistemas de control de temperatura, nivel y flujo. A partir de la función de transferencia se procedió a diseñar las técnicas de control On-Off con histéresis, PID y las estrategias de control en cascada, superposición, razón y rango partido, la programación de las técnicas y estrategias en el controlador CompactLogix se realiza mediante el lenguaje de programación FBD. En la tercera etapa se procedió a integrar un indicador gráfico que permite observar el comportamiento de las variables del proceso, en esta etapa se detalla la integración de la pantalla digital de marca Siemens con el controlador de marca Allen Bradley, además se diseño e implemento una interfaz HMI centrada en el usuario para la operación de la estación. Finalmente se elaboró al diseño e implementación de prácticas multimedia en el software Ardora, desarrollando una práctica por cada estrategia y técnica de control para que los estudiantes interactúen y aprovechen los recursos que ofrece una estación que maneja tres diferentes variables de procesos industriales.

PALABRAS CLAVES

- **TÉCNICAS DE CONTROL**
- **ESTRATEGIAS DE CONTROL**
- **LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN FBD**

ABSTRACT

The process station reengineering project aims to take advantage of the features of the PS-2800 station and build a training system for industrial processes incorporating current technologies for the control and monitoring of processes. The first phase of the project develops the characterization of the station and details its operation. To determine which elements are operating and which are obsolete and need to be replaced through an evaluation matrix. Considering the initial status of the station the different options proposed as reengineering solutions were evaluated. The next phase, once the initial state has been analyzed, was to develop the adaptation phase, which involves the mechanical, electrical and instrumentation adaptations. Initially, to allow the proper operation of the station, some elements and components were replaced or reinstalled, then the level, flow and control temperature subsystems modeling were developed. After applying the transfer function, the design of techniques On-Off control with hysteresis, PID and cascade, overlay, reason and split range control strategies was possible. Additionally, the programming techniques and strategies in the controller CompactLogix were performed based on the FBD programming language. The third phase focused on integrating a touch panel to monitor the behavior of the variables of the process. In this phase its detailed the integration of graphic indicator Siemens with employs an Allen Bradley driver, also a HMI user-centric interface for operation of the PS-2800 station was designed and implemented. The final phase was to design and implement a multimedia practices platform based on the Ardora software, there is one practice for each technical and control strategy with the aim that the students interact with a station that manages three different variables of industrial processes.

KEYWORDS

- **CONTROL TECHNIQUES**
- **CONTROL STRATEGIES**
- **FBD PROGRAMMING LANGUAGE**

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Como parte de los procesos de mejoramiento de los laboratorios del departamento de eléctrica y electrónica en el área de Automatización y Control se ha iniciado un proceso de adquisición de equipamiento enfocado en el entrenamiento y aprendizaje de los estudiantes en su etapa final de formación, visto desde este enfoque se ha encontrado la oportunidad de aprovechar los equipos existentes en diferentes laboratorios y repotenciarlos para el aprovechamiento de los estudiantes.

1.1. Antecedentes

La estación PS-2800 es parte del sistema de entrenamiento en CIM2000, la cual tiene actualmente un tiempo de vida de 18 años, por lo cual sus funciones actualmente se encuentran limitadas en un 70%, sin embargo, su constitución física puede ser reutilizada aprovechando los componentes de instrumentación y demás actuadores industriales instalados en ella.

La reutilización de la estación permitirá que esta sea empleada en otro laboratorio donde se explote sus características de control de procesos, tales como lazos de control On-Off, PID y Control por temporización; en variables típicamente industriales tales como nivel, temperatura y caudal; ya que los estudiantes de la carrera de Automatización y Control tienen las habilidades y destrezas necesarias para realizar proyectos de reingeniería en plantas de control.

Este tipo de lazos de control (On-Off, PID, Control por Temporización) son habitualmente utilizados en el control de proceso industriales, además son estudiados e implementados de forma práctica sobre plantas de procesos en la asignatura Control de Procesos. Entre las ventajas de este tipo de lazos de control se encuentra la posibilidad de implementación de estrategias de control tales como control en cascada, control por relación, control selectivo, entre otras estrategias.

1.2. Justificación e importancia

En el departamento de Eléctrica y Electrónica se persigue de acuerdo a la Misión y Visión de la Universidad de las Fuerzas Armadas, la excelencia académica, un eje importante en este objetivo es el contar con laboratorios perfectamente equipados para la elaboración de prácticas que desarrollen las competencias básicas y propias de la profesión.

La reingeniería en la estación de control de procesos PS-2800, permitirá tener una estación de prácticas en el control de variables típicamente industriales como nivel, temperatura y caudal, empleando tecnologías tradicionales y modernas; de esta manera se pretende desarrollar las habilidades y destrezas referentes al control de procesos industriales, potenciando las capacidades profesionales de los estudiantes.

La información del uso (manuales) de la estación PS-2800 actualmente es inexistente; por lo que es inherente el desarrollo de la documentación adecuada que permita entender y operar las nuevas prestaciones de la estación, tales como monitoreo en tiempo real empleando tecnologías industriales de punta y nuevos lenguajes de programación como alternativas a los lenguajes habituales.

En la actualidad, el uso de herramientas de tecnología de la información y comunicación (TIC) dentro del campo de la enseñanza contribuye al proceso de formación, colaborando en los procesos a través de prácticas guiadas y evaluación continua, como una estrategia moderna en la formación de los estudiantes.

1.3. Alcance del proyecto

La reingeniería del proyecto realizará la adecuación de la estructura de la estación, permitiendo usarla en otro laboratorio. Se recuperarán los procesos de control de nivel, caudal y temperatura empleando tecnologías de medición y control industriales, además de la reposición y reparación de elementos que no se encuentran funcionales en la estación.

Los lazos de control en Nivel, Temperatura y Caudal, se rediseñarán, evaluarán y mejorarán hasta obtener las mejores condiciones de control posibles, utilizando una filosofía de control para un entorno de entrenamiento didáctico mediante componentes industriales como sensores, actuadores y controladores; permitiendo a los estudiantes aplicar sus conocimientos y destrezas.

A través de una pantalla de toque se realizará la operación, visualización y monitoreo de las variables de la estación, se diseñará y programará interfaces HMI centradas en el usuario, tomando en cuenta normas de diseño internacionales que permitan una adecuada comprensión de los cambios en cada variable de control de los subsistemas de la estación.

Se desarrollará la programación de los lazos de control mediante lenguajes de programación diferentes al típico lenguaje LADDER, tales como programación en lenguaje gráfico por medio de Diagrama de Bloques de Funciones (FBD), que permitan mejorar las competencias y explorar las nuevas alternativas de programación de autómatas programables.

Al ser un proyecto para la enseñanza en estudiantes, se proyecta desarrollar las guías de prácticas empleando tecnologías (TIC) que admitan al estudiante tener horas de aprendizaje autónomo y continuo, además permitirá al docente aprovechar todas las ventajas que supone un dispositivo que maneja tres variables de control simultáneamente.

1.4. Objetivo

1.4.1. Objetivo general

- Realizar la reingeniería de la estación de control de procesos PS-2800 enfocada como un sistema de entrenamiento de procesos industriales.

1.4.2. Objetivo específico

- Identificar las características reutilizables de la estación para ser aprovechadas como un equipo de entrenamiento didáctico en la asignatura de control de procesos.
- Rediseñar los lazos de control de la estación PS-2800 para su integración en un sistema de entrenamiento didáctico de procesos de control industriales.
- Integrar al sistema un indicador gráfico de las variables del proceso compatible con la tecnología instalada en la estación.
- Implementar una Interfaz HMI centrada en el usuario para la operación de la estación PS-2800.
- Desarrollar un conjunto de prácticas empleando tecnologías TIC que beneficien al estudiante en el aprendizaje de control de procesos.

CAPÍTULO II

CARACTERIZACIÓN DE LA ESTACIÓN PS-2800

En el presente capítulo se detalla las prestaciones que exhibe la estación de procesos PS-2800 en su estado de fábrica; además se realiza una descripción y evaluación de los sensores y actuadores instalados en la estación, lo que permite determinar que dispositivos se encuentran operables y cuales son objeto de reemplazo, considerando las características técnicas y de operación de cada uno de ellos.

Una vez realizada la evaluación del estado inicial, se plantea propuestas de solución para la reingeniería de la estación en base a los objetivos presentados en el capítulo I, finalmente se efectúa una evaluación por medio del director y ejecutantes del proyecto sobre la aprobación de las soluciones de reingeniería planteadas; a continuación, se describe en la Figura 1 los temas que abarca el capítulo II.

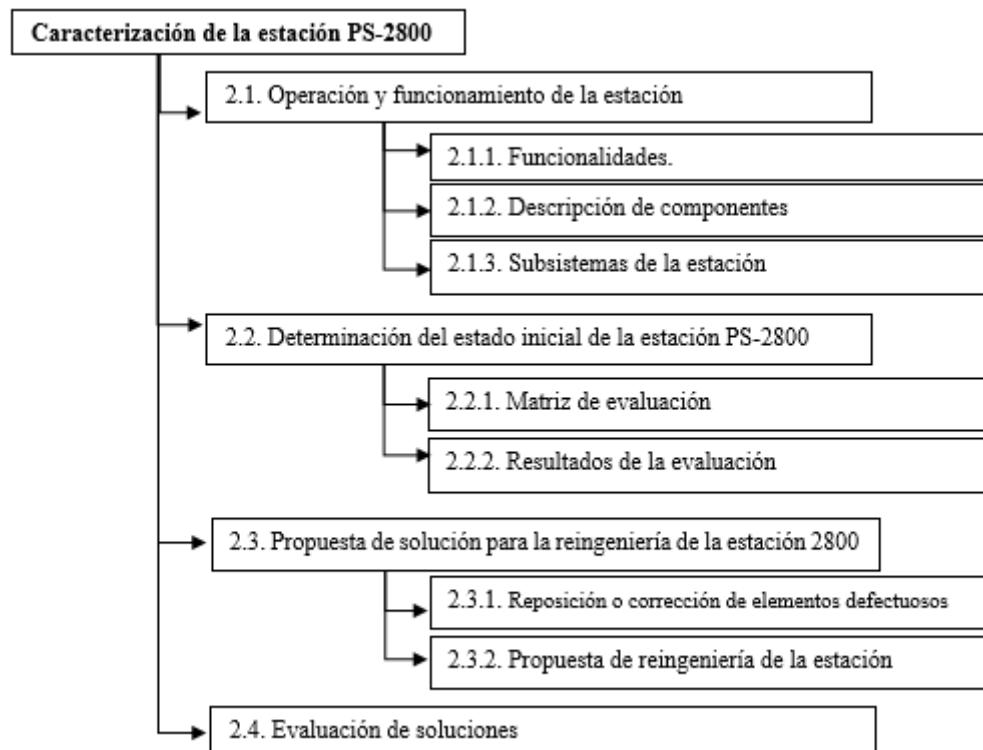


Figura 1. Descripción del capítulo II

2.1. Operación y funcionamiento de la estación

2.1.1. Funcionalidades

Las funcionalidades que presenta la estación permiten al estudiante el desarrollo de algoritmos de control avanzado, especialmente enfocados en la implementación de lazos de control de tipo PID. Adicionalmente como parte de un correcto entrenamiento en el uso de tecnología de controladores lógicos programables, se propone realizar una completa configuración de módulos de entradas y salidas analógicas permitiendo mejorar las destrezas y solventando problemas comunes al momento de la puesta en marcha tanto de medición de variables como en la activación de dispositivos actuadores.

Las funcionalidades que presta la estación PS-2800 al estudiante si sus elementos de control e instrumentación funcionan al 100%, es decir, con todos sus elementos operativos como son sensores, actuadores, módulos de comunicación, etc., se detallada en la Tabla 1.

2.1.2. Descripción de componentes

2.1.2.1. Dispositivos de Medición de la estación PS-2800.

Interruptores de Nivel.

Un interruptor de nivel es un dispositivo que permite detectar si el líquido se encuentra a cierto nivel o altura en un depósito, usado principalmente para la medición de líquidos, monitorización de niveles determinados o como alarmas de seguridad para el control de bombas de alta y baja potencia; las partes principales del interruptor que se encuentra instalado en la estación PS-2800 se visualizan en la Figura 2.

Tabla 1**Funcionalidades de la estación PS-2800**

Funcionalidad	Disponible en:	Descripción
Control de actuadores digitales	-Electroválvulas DC -Bomba centrifuga AC -Calentador -Radiador	La estación permite el control de diversos actuadores ON/OFF, que activan o desactivan diferentes dispositivos que modifican los valores de salida de las variables encontradas en los procesos de la estación.
Control de actuadores analógicos	-Bomba DC -Válvula proporcional	Permite el control de actuadores que responden a señales proporcionales, es decir poseen muchos estados de funcionamiento frente a los actuadores más básicos de activación ON/OFF.
Programación de Controladores Lógicos programables	-PLC	Permite la implementación de algoritmos ON/OFF o PID para el control de los diferentes procesos encontrados en la estación PS-2800.
Desarrollo de algoritmos de control en variables analógicas	-PLC	Permite el desarrollo, evaluación e implementación de diferentes tipos de control además de la aplicación de las estrategias de control más utilizadas en control de procesos.
Medición de variables mediante instrumentación Industrial	-Transmisor de temperatura -Transmisor de flujo -Transmisor de nivel	Permite la medición de parámetros industriales como el caudal, la temperatura y el nivel mediante instrumentación puramente industrial.
Control de temperatura	-Transmisor de nivel -Enfriador -Calentador	Permite controlar la temperatura del agua en el reservorio B1, mediante la activación de un calentador eléctrico y su medición mediante una termocupla de tipo industrial.
Control de Nivel	-Transmisor de nivel -Bomba de succión	Permite el control del nivel del reservorio B1, mediante la apertura de una electroválvula de vaciado y la activación de una bomba P1 DC de 24V proporcional controlada por un circuito que recibe una señal de 0 a 10 V, esta tarjeta genera PWM para controlar la velocidad de rotación de la bomba.
Control de Flujo (Bomba proporcional)	-Transmisor de flujo -Bomba de succión	Permite controlar el flujo que circula en el lazo de Flujo del reservorio B1, esto permite controlar además la temperatura del agua de dicho reservorio.
Control de flujo (Electroválvula proporcional)	-Transmisor de flujo -Electroválvulas ON/OFF -Electroválvula Proporcional -Bomba de desagüe	Permite la circulación de agua a los reservorios B2, B4 y B6 para su respectiva limpieza, el flujo se controla mediante una válvula proporcional que limita el flujo generado por la bomba P2.

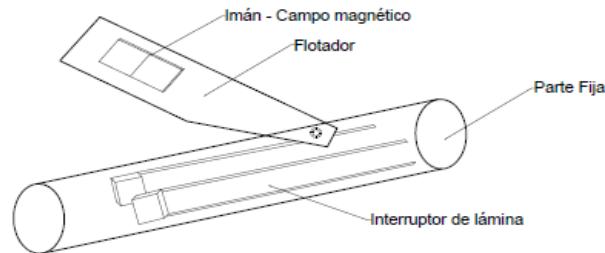


Figura 2. Elementos del interruptor de nivel

Transmisor de Nivel (Cerabar PMC 133).

Los transmisores de nivel permiten medir la altura a la que se encuentra un líquido a partir de una referencia determinada, existen diversos tipos como son medidores de nivel por presión, desplazamiento del flotador, radar, etc.

Los transmisores de nivel por presión hidrostática basan su medición a través de la presión diferencial que se genera mediante el contacto del líquido con el diafragma del medidor, el diafragma mide la presión en un punto del fondo del tanque, considerando que la altura y densidad del líquido son directamente proporcionales a la presión diferencial, en la Figura 3 se observa la respuesta que presenta el transmisor de nivel en centímetros en función de las unidades crudas del PLC.

Especificaciones técnicas:

Voltaje de alimentación: 13-30 VDC

Variación de la presión: 1-100 PSI

Variación de la corriente: 4-20 mA

Especificaciones de operación:

Rango de trabajo: 50 mm a 265 mm

Span: 215 mm

Resolución: 5 mm

Sensibilidad: 0.00023 mA/mm

Error Promedio: $\pm 0.75\%$

Temperatura admisible: hasta 30 °C

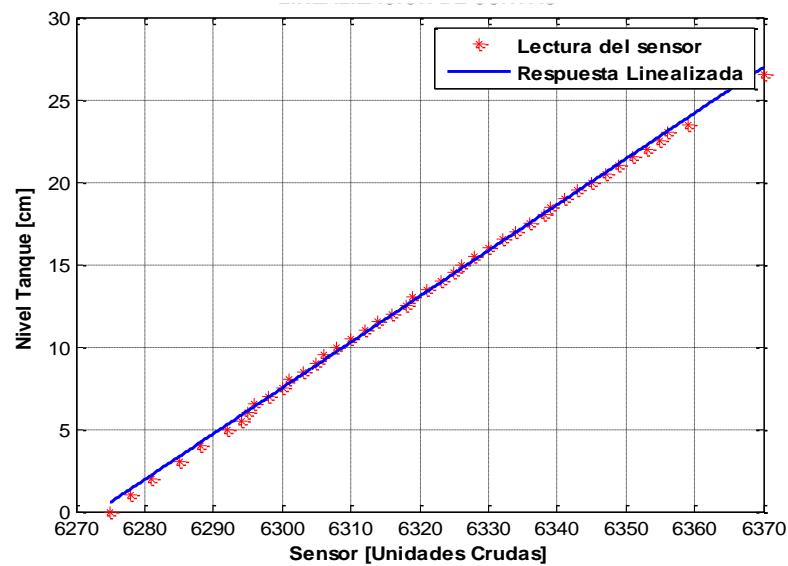


Figura 3. Respuesta del transmisor de nivel Cerabar PMC 133

$$\text{Nivel[cm]} = -1.7446 * 10^3 + 0.2781 * \text{sensor[Unidades Crudas]}$$

$$y = -1.7446 * 10^3 + 0.2781 * x$$

Transmisor de Nivel (Ultrasónico Banner T30UUNA).

El transmisor basa su principio de funcionamiento en la interacción de los ultrasonidos contra un objeto, el orden de la frecuencia de los ultrasonidos es superior a las audibles, es decir mayor a 20kHz. Los transmisores ultrasónicos emiten un pulso cuyo lóbulo o campo de acción es de forma cónica, el tiempo que transcurre entre la emisión del sonido y la percepción del eco por parte del receptor nos permite calcular la distancia a la cual se encuentra el objeto que permite la reflexión de la onda. (Perez de Diego, 2016)

El transmisor de nivel que se instaló en la estación PS-2800 se encuentra ubicado en el reservorio B1 en el subsistema de control de nivel, el cual se detalla en el apartado 2.1.3. No se utilizó el transmisor de nivel con las características de fábrica, debido a que no se encontró un transmisor de nivel por presión hidrostática que cumpla con los requerimientos de operación de la estación, en tal virtud se optó por utilizar el transmisor de nivel ultrasónico.

En la Figura 4 se describe la respuesta que presenta el transmisor de nivel ultrasónico, a continuación, se detalla las especificaciones técnicas y operativas del transmisor.

Especificaciones técnicas:

Voltaje de alimentación:	13-30 VDC
Voltaje de salida:	0-10 VDC
Salida del transistor:	Configuración NPN

Especificaciones de operación:

Rango de funcionamiento:	150mm a 1000mm
Rango de trabajo:	250 mm a 410 mm
Span:	160 mm
Resolución:	1.05 mm
Sensibilidad:	±0.25% de la distancia

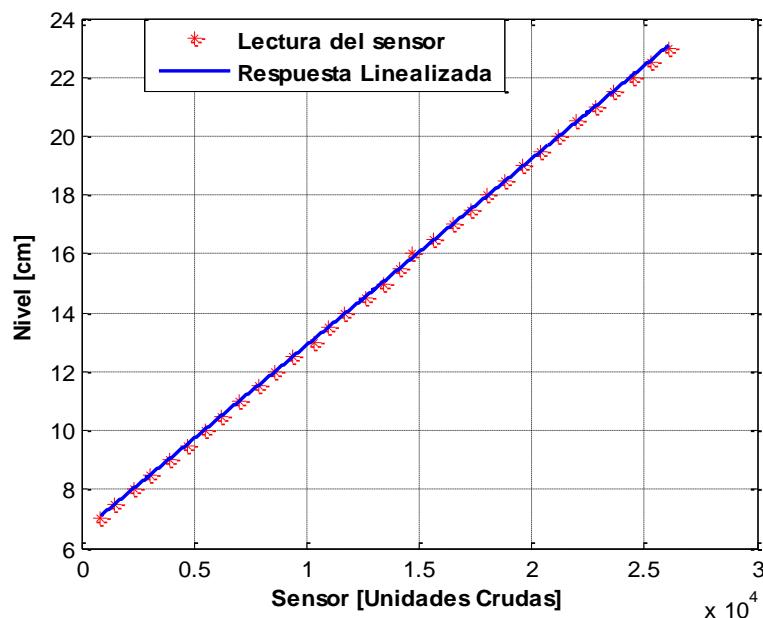


Figura 4. Respuesta del transmisor de nivel ultrasónico Banner

$$\text{Nivel[cm]} = 6.5447 + 0.0006 * \text{sensor[Unidades Crudas]}$$

$$y = 6.5447 + 0.0006 * x$$

Transmisor de Temperatura (Pt100).

El transmisor de temperatura permite convertir la variable física de temperatura en una señal electrónica para su control, uno de los tipos de trasmisor más comunes en la industria son los detectores de temperatura resistivos RTD, los cuales basan su principio de medición en la variación de la resistencia de su conductor, la magnitud de esta modificación se relaciona directamente con la variación de la temperatura.

Dentro del grupo de los detectores de temperatura encontramos el Pt100, el mismo que se encuentra ubicado en el reservorio B1 de la estación PS-2800. A continuación, se describe las especificaciones técnicas, operativas y la respuesta que presenta el transmisor de temperatura en grados centígrados en función de las unidades crudas del PLC, ver Figura 5.

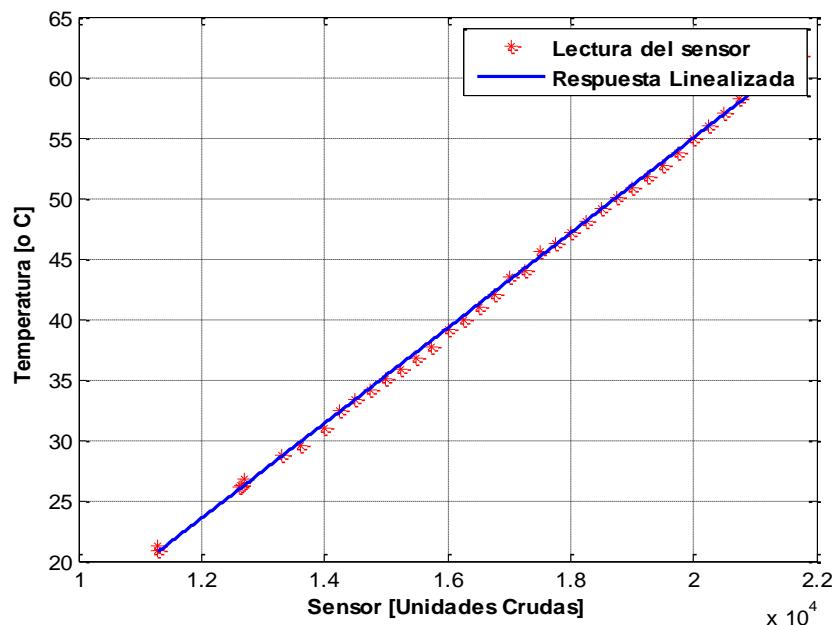


Figura 5. Respuesta del transmisor de temperatura Pt100

$$\text{Temperatura}[\text{°C}] = -23.6917 + 0.0039 * \text{sensor} [\text{Unidades Crudas}]$$

$$y = -23.6917 + 0.0039 * x$$

Especificaciones técnicas:

Resistencia a 0 °C:	100 Ω
Variación de resistencia:	100-146.06 Ω
Variación de la corriente:	4-20 mA

Especificaciones de operación:

Rango de trabajo:	20 °C a 50 °C
Span:	30 °C
Resolución:	0.003913 °C
Sensibilidad:	0.1637 mA/°C
Error Promedio:	±1.38%

Trasmisor de Flujo.

Es un dispositivo que se instala en la línea de la tubería por la cual fluye un gas o líquido, permitiendo medir el caudal que circula por dicha tubería. En la industria uno de los sensores más utilizados para la medición de caudal son los sensores por rueda de paletas, en la Figura 6 se observan las partes principales del transmisor de flujo instalado en la estación.

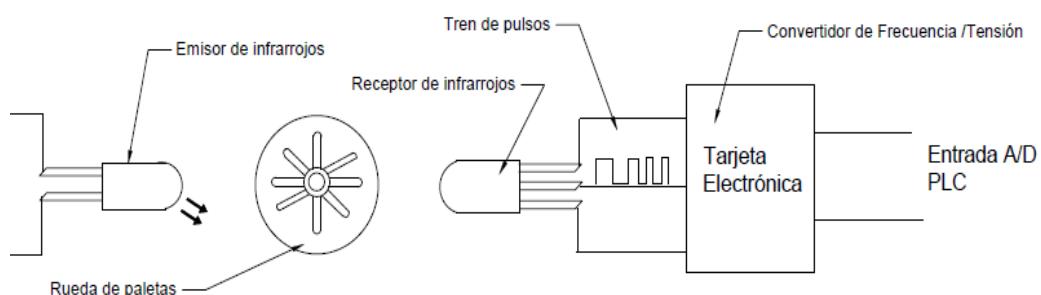


Figura 6. Diagrama de funcionamiento del transmisor de flujo

El emisor y receptor se encuentran ubicados al lado opuesto de la rueda de paletas, su funcionamiento consiste que la rueda de paletas del transmisor gira debido al paso del líquido por la tubería, las paletas al girar bloquean al receptor del rayo de luz infrarrojo generado por el emisor, el bloqueo provocado por el movimiento de las

paletas genera un tren de pulsos mediante el rayo de luz, el cual es detectado y transmitido electrónicamente hacia el PLC a través de una tarjeta conversadora de frecuencia a voltaje, el número de revoluciones que se detecta es proporcional al caudal del líquido que atraviesa por el sensor.

En la estación PS-2800 están instalados dos transmisores de flujo, el primero se encuentra ubicado en la línea de tuberías del lazo de control 531, y el segundo se encuentra en el lazo de control 535, como se detalla en el apartado 2.1.3. A continuación, se describe las especificaciones técnicas, operativas y la respuesta que presentan los transmisores de flujo FT531 y FT535, ver Figura 7 y Figura 8 respectivamente.

Especificaciones técnicas del transmisor FT531 y FT535:

Variación de la corriente:	0-20 mA
Tarjeta electrónica:	Conversor de frecuencia a tensión
Voltaje de alimentación:	24 VDC

Especificaciones de operación del transmisor FT531:

Rango de trabajo:	4 LPM a 7 LPM
Span:	3 LPM
Resolución:	1.77 cm ³ /min
Sensibilidad:	0.0011 mA/cm ³
Error Promedio:	±0.29%

Especificaciones de operación del transmisor FT535:

Rango de trabajo:	6 LPM a 12 LPM
Span:	6 LPM
Resolución:	1.77 cm ³ /min
Sensibilidad:	0.0011 mA/cm ³
Error Promedio:	±0.29%

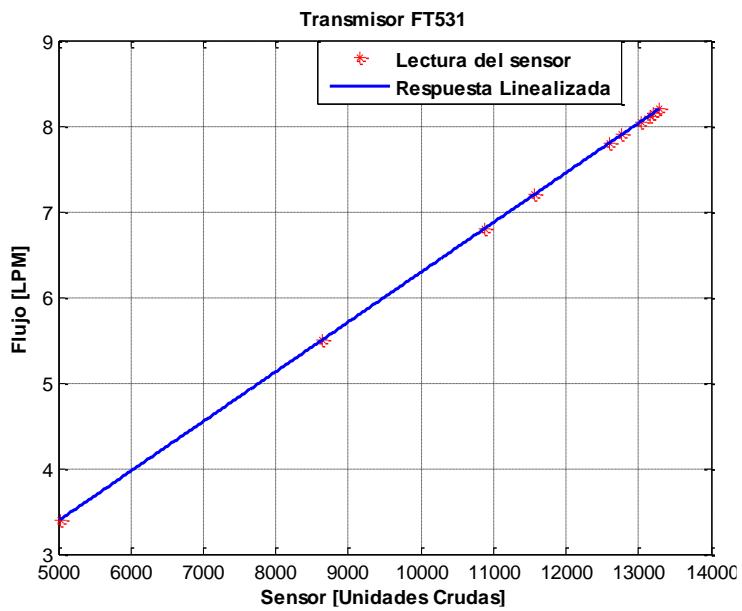


Figura 7. Respuesta del transmisor de flujo FT531

$$\text{Flujo[LPM]} = 0.4803 + 0.00058 * \text{sensor[Unidades Crudas]}$$

$$y = 0.4803 + 0.00058 * x$$

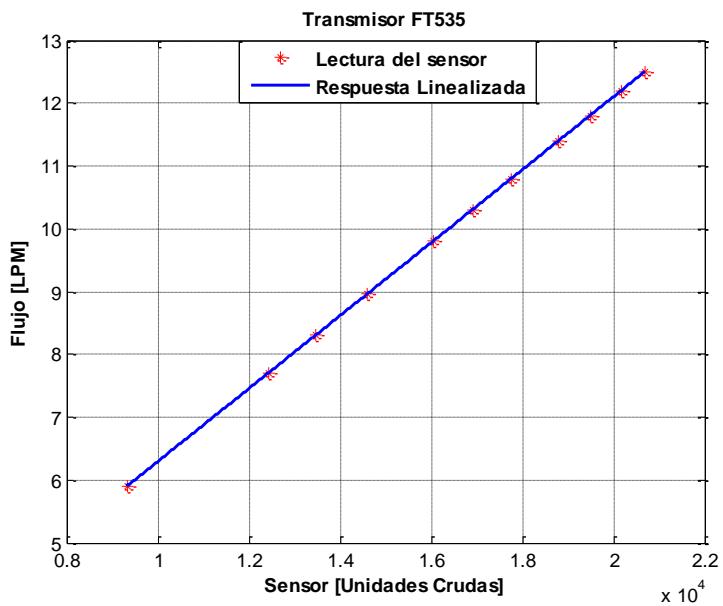


Figura 8. Respuesta del transmisor de flujo FT535

$$\text{Flujo[LPM]} = 0.4803 + 0.00058 * \text{sensor[Unidades Crudas]}$$

$$y = 0.4803 + 0.00058 * x$$

2.1.2.2. Actuadores de la estación PS-2800.

Bombas centrífugas.

Las bombas centrífugas describen su funcionamiento a través de la función entre la altura y el caudal, la cual es conseguida mediante la rotación del impulsor en el interior de la voluta, cuando el rodete al girar a altas velocidades aporta una energía de velocidad al líquido provocando que el líquido se proyecte hacia la zona externa del cuerpo (impulsión) de la bomba debido a la fuerza centrífuga del impulsor, en la Figura 9 se observa las partes principales de una bomba centrífuga.

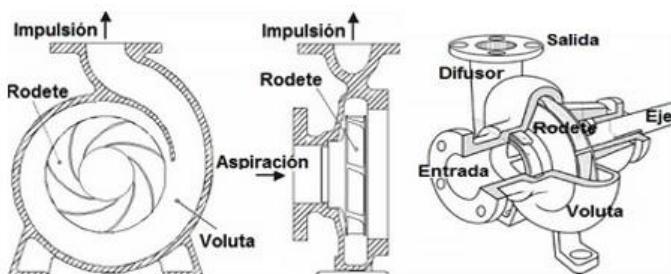


Figura 9. Partes de una bomba centrífuga

Fuente: (Ingemecanica, 2015)

La estación PS-2800 cuenta con dos bombas centrífugas para su funcionamiento, la primera es de la marca Jabsco y trabaja en corriente continua, mientras que la segunda bomba es de la marca Paolo y trabaja en corriente alterna. A continuación, se describe las especificaciones técnicas, operativas y la respuesta que presentan las bombas centrífugas, ver Figura 10.

Especificaciones técnicas de la bomba centrífuga AC (P2):

Voltaje de alimentación: 115/230V, 60 Hz

Capacidad: 5-40 L/min

Potencia del motor: 0.50 Hp

Rpm: 2850

Corriente de consumo: 2.5 A

Especificaciones técnicas de la bomba centrífuga DC (P1):

Voltaje de alimentación: 24 VDC

Corriente de consumo: 5 A

Capacidad: 22.7 L/min

Especificaciones de operación de la bomba centrífuga DC (P1):

Rango de trabajo: 6 L/min a 12 L/min

Ciclo de trabajo (PWM): 40 % a 80 %

Span: 4.5 L/min

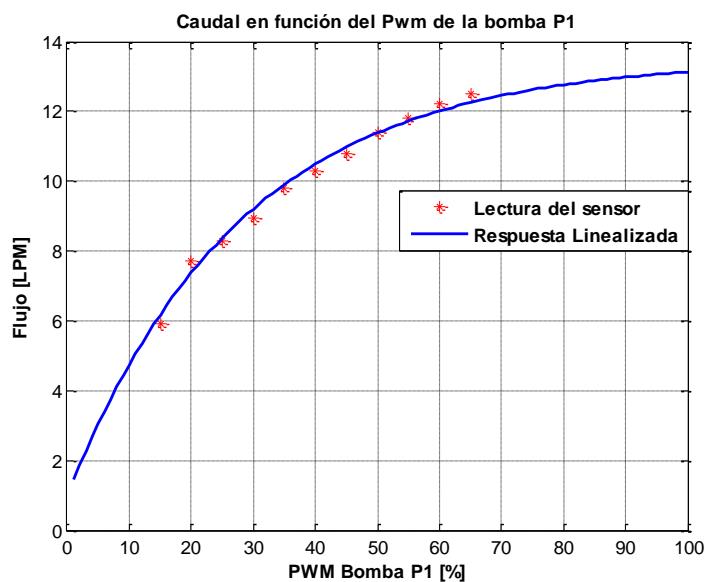


Figura 10. Respuesta de la bomba centrífuga DC PUMP P1

$$\text{Flujo[LPM]} = 1 + 2.6(4.8 * 1 - e^{-\left(\frac{\text{apertura [%]}}{28}\right)})$$

$$y = 1 + 2.6(4.8 * 1 - e^{-\left(\frac{x}{28}\right)})$$

Válvula proporcional (SQS65).

Dispositivo que permite regular el caudal de un sistema hidráulico, el motor síncrono reversible es accionado por una señal analógica de 0 a 10 VDC, el cual genera un desplazamiento deseado por medio de un tren de engranajes de antibloqueo, regulando de esta manera el caudal del sistema (SIEMENS, 1999, p.2).

La válvula del dispositivo se abre o cierre en proporción a la señal de control, considerando que en 0 voltios la válvula se encuentra cerrada; el actuador mantiene su posición al retirar la señal de control, la válvula regresa a su posición inicial únicamente cuando existe un fallo en la alimentación. A continuación, se describe las especificaciones y la respuesta que presenta la válvula proporcional, ver Figura 11.

Especificaciones técnicas:

Voltaje de alimentación: 24 V AC, 50/60 Hz

Potencia de consumo: 3 VA

Especificaciones de operación:

Voltaje de operación: 0v a 10V

Rango funcional (apertura): 10% a 60%

Rango de trabajo: 4 LPM a 7 LPM

Span: 2200 cm³/min

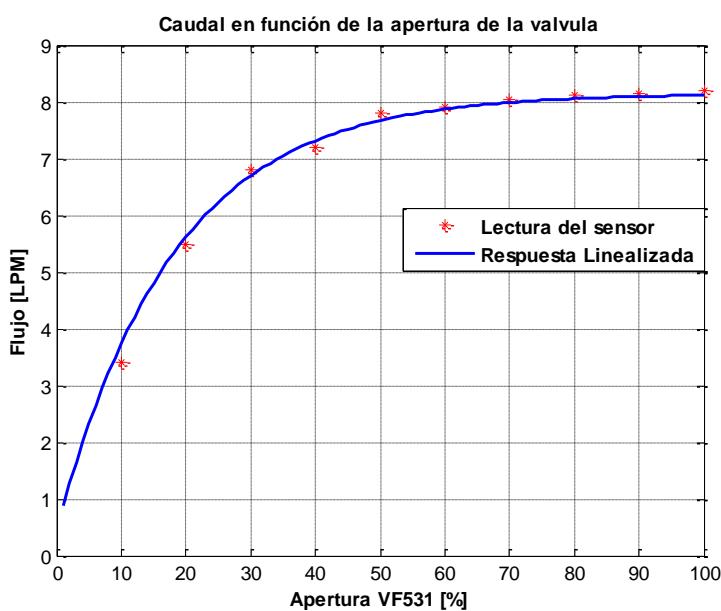


Figura 11. Respuesta de la apertura de la válvula proporcional

$$\text{Flujo[LPM]} = 0.485 + 0.5808(13.2 * 1 - e^{-\left(\frac{\text{apertura [%]}}{11.6}\right)})$$

$$y = 0.485 + 0.5808(13.2 * 1 - e^{-\left(\frac{x}{11.6}\right)})$$

2.1.2.3. Tablero de control.

La estación PS-2800 dispone de un tablero de control que está dividido en dos secciones como se observa en la Figura 12; la primera parte permite controlar y monitorear la estación mediante luces indicadoras y botones, incluyendo el botón de emergencia que deshabilitada toda acción que se esté ejecutando en ese instante; y en la segunda parte del tablero de control se encuentra el diagrama P&ID de fábrica de los lazos de control de la estación PS-2800. A continuación, se describen los elementos del tablero de control en la Tabla 2.

Tabla 2
Elementos del tablero de control de fábrica

Elementos	Función
L1	Luz indicadora de comunicación en línea con el CIM2000
L3	Luz indicadora de encendido del sistema
L4	Luz indicadora de error en el sistema
PLC ON	Botón de encendido del PLC
PLC OFF	Botón de apagado del PLC
EMERGENCY STOP	Botón de paro de emergencia del sistema

2.1.2.4. Controlador CompactLogix 1768-L43.

La estación PS-2800 cuenta con controlador lógico programable de la marca Allen Brandely, Compact Logix 1768-L43, que permite controlar a nivel de máquina procesos secuenciales en tiempo real, dependiendo de entradas/salidas, movimientos y la red del sistema.

Especificaciones técnicas del PLC:

CPU:	CompactLogix 1768-L43
Módulo de comunicación:	1768-ENBT (Ethernet/IP)
2 Módulo de entradas digital:	1769-IQ16F ,16 entradas a 24 VDC
2 Módulo de salidas digital:	1769-OB16P ,16 salidas a 24 VDC
1 Módulo de salidas analógicas:	1769-OF2, 2 salidas unipolares
1 Módulo de entradas analógicas:	1769-IF4, 4 entradas diferenciales/unipolares

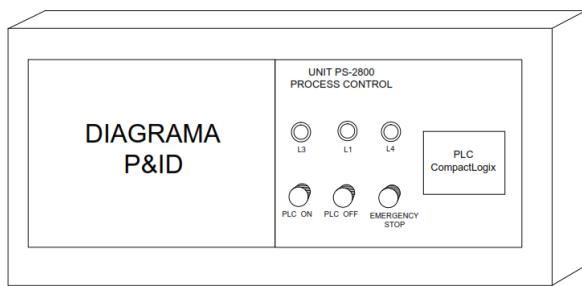


Figura 12. Diagrama del tablero de control en su estado de fábrica

2.1.3. Subsistemas de la estación

En el ANEXO 1 se visualiza el diagrama P&ID de la estación PS-2800 en su estado de fábrica, dicha estación ha sufrido modificaciones en su tecnología de control, pero ha mantenido sus lazos de control tal y como se encontraban al momento de adquirir la estación.

Para un análisis más detallado de los diferentes elementos que conforman la estación PS-2800, se ha dividido al sistema en cuatro subsistemas basados en los cuatro sensores analógicos que posee la estación, debido a este motivo la estación posee 4 lazos principales que pueden ser monitoreados y controlados.

2.1.3.1. Subsistema de control de temperatura 511.

El subsistema permite el control de la temperatura del agua del reservorio B1. La temperatura del agua que se encuentre en el reservorio B1 es medida mediante el transmisor de temperatura TT511 que genera una señal de corriente y es enviada al controlador de temperatura TC511.

El controlador maneja la activación de un calentador eléctrico de 2000W o de la unidad de enfriamiento conformada por un radiador y un ventilador FAN, además controla la electroválvula V516 que permite el ingreso del agua hacia el reservorio B1 directamente, mientras que la electroválvula V515 permite que el líquido atraviese por el sistema de enfriamiento. El diagrama P&ID del subsistema de control de temperatura se observa en la Figura 13.

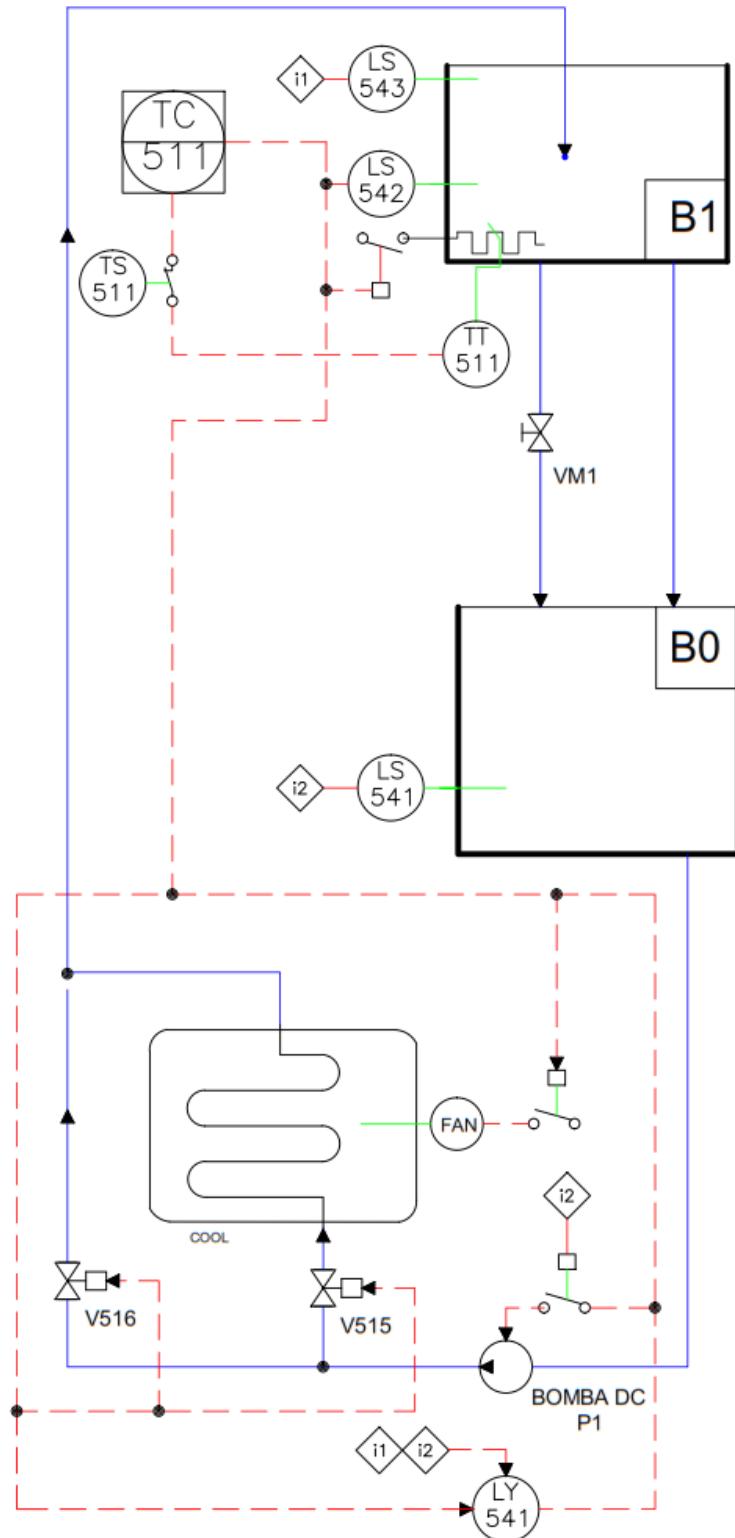


Figura 13. Subsistema del control de temperatura

2.1.3.2. Subsistema de control de nivel 541.

El subsistema de nivel permite establecer un nivel de agua fijo en el reservorio B1, esto se logra mediante la medición constante del nivel por parte del transmisor de LT541, el cual determina la altura que alcanza el agua en dicho reservorio y envía el valor de la altura al controlador de nivel LC541.

El controlador maneja la activación o desactivación de la bomba centrífuga DC (P1), considerando para su funcionamiento y como seguridades a los interruptores de nivel LS541 y LS543; el controlador además manipula la temporización de cierra y apertura de la electroválvula de vaciado V500 y a la electroválvula de llenado V510. El diagrama P&ID del subsistema de control de nivel se observa en la Figura 14.

2.1.3.3. Subsistema de control de Flujo 535

El subsistema permite establecer un flujo circulante hacia el reservorio B1 desde el reservorio B0. El flujo producido por la bomba centrífuga DC P1 puede ser modificado mediante el cambio de velocidad de giro en el motor de la bomba, dicha velocidad es controlada mediante una salida analógica de 0 a 10V generada por el controlador de flujo FC535.

El flujo que se envía al reservorio B1 es medido por el transmisor FT535 mediante un transmisor de rueda de paletas que genera una señal de frecuencia, esta señal es interpretada por un conversor de frecuencia a corriente y enviada al controlador, la electroválvula de llenado V516 permite el ingreso del líquido bombeado desde el reservorio B0 hacia el reservorio B1 y la electroválvula V500 permite que fluya el líquido desde el reservorio B1 hacia el reservorio B0; se considera al subsistema de flujo 535 totalmente independiente del sistema de flujo 531. El diagrama P&ID del subsistema de control de temperatura se observa en la Figura 15.

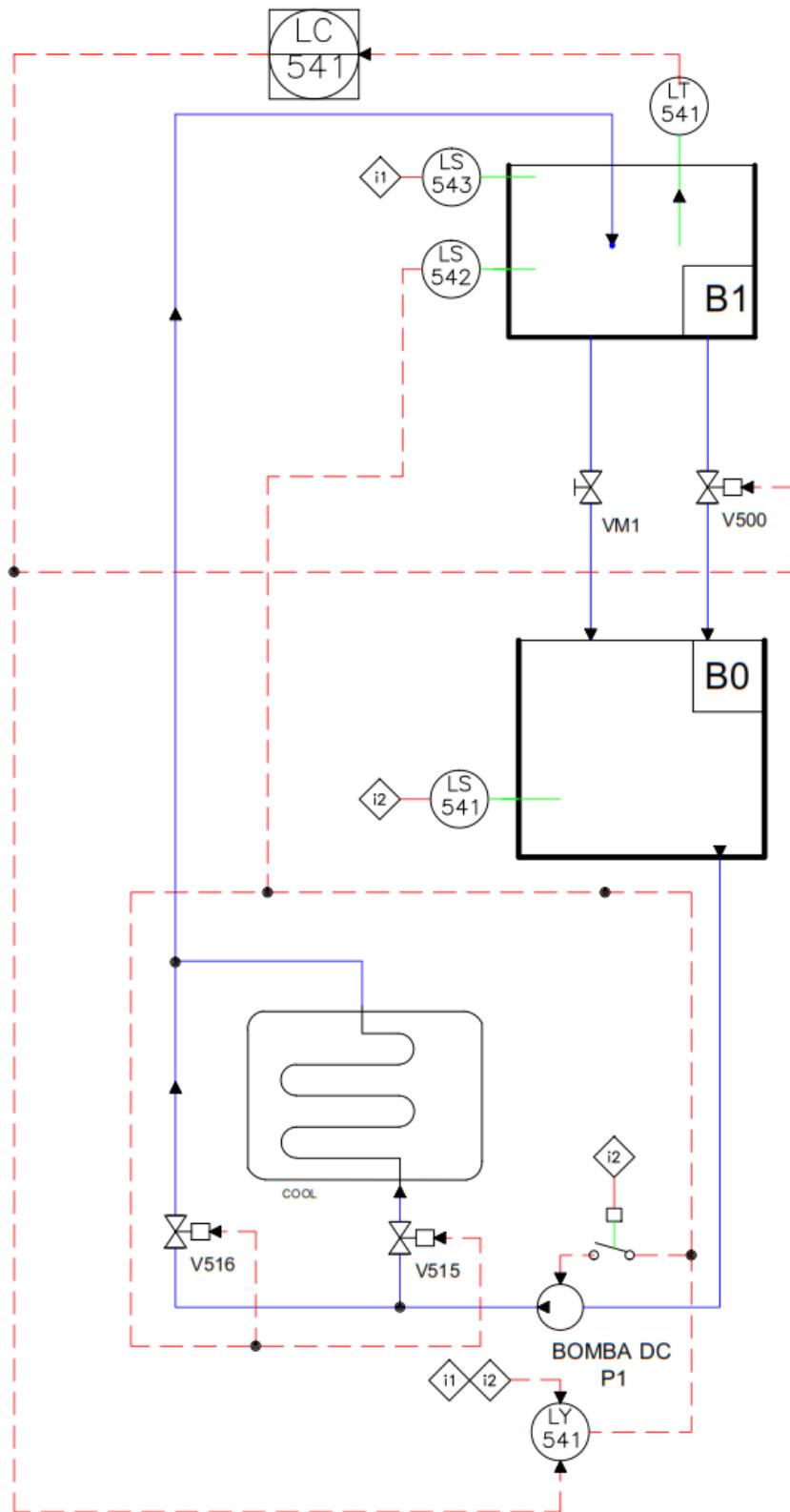


Figura 14. Subsistema del control de nivel

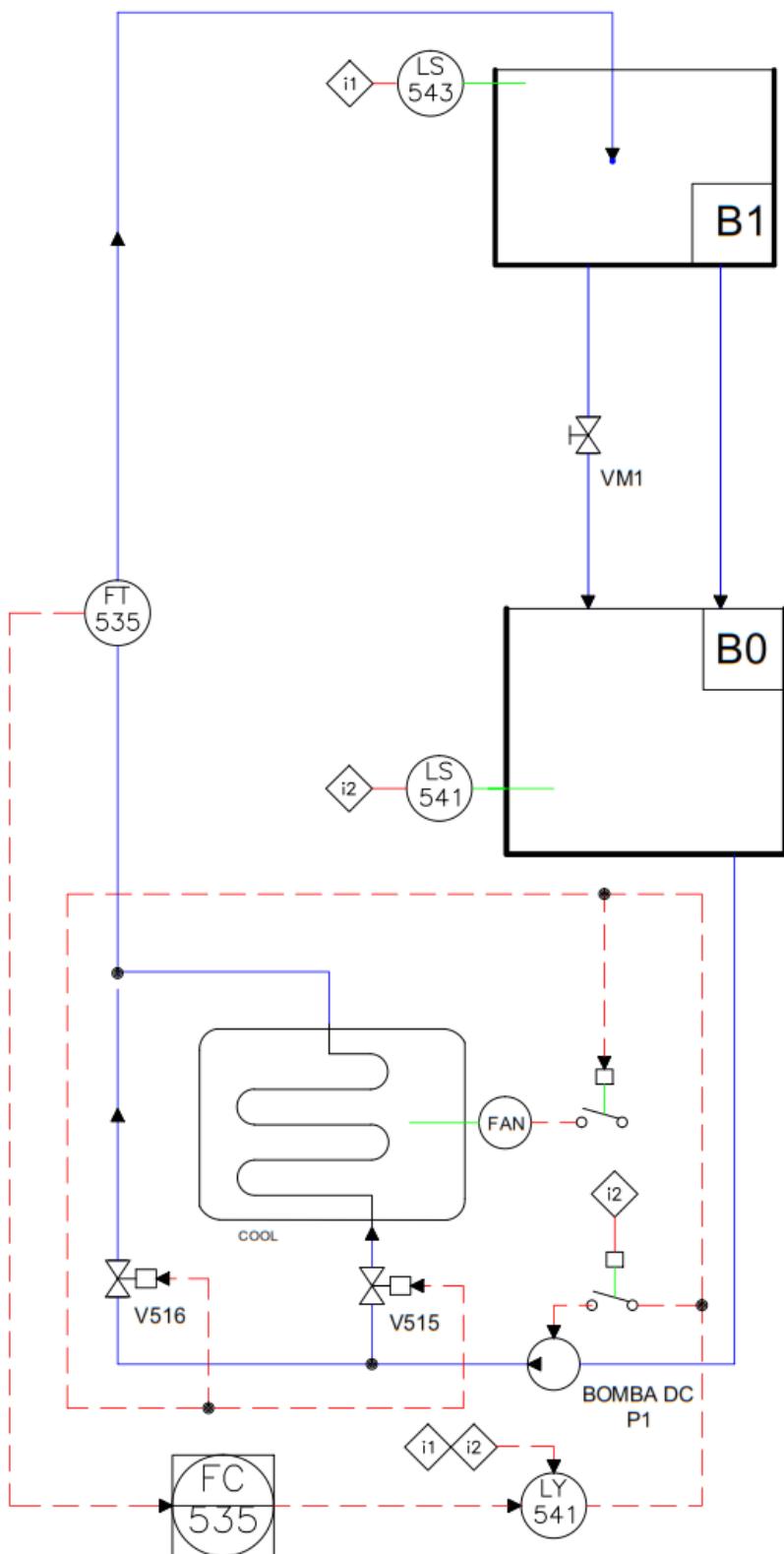


Figura 15. Subsistema del control de flujo 535

2.1.3.4. Subsistema de control de Flujo 531

El subsistema permite el control del flujo que circula hacia los reservorios B2, B4 y B6 desde el tanque colector. El flujo de agua hacia los tanques es generado por una bomba centrifuga AC P2 y regulado por la válvula proporcional VF531, dicho flujo es medido con un sensor de paletas que genera una señal de frecuencia variable, la cual es interpretada por un conversor de frecuencia a corriente.

El controlador FC531 recibe la señal de corriente del conversor para determinar el flujo de agua que atraviesa por la línea de tubería del subsistema, el controlador tiene la capacidad de manipular la variación de la apertura de la válvula proporcional VF531 mediante una salida analógica de 0 a 10V. El diagrama P&ID del subsistema de control de temperatura se observa en la Figura 16.

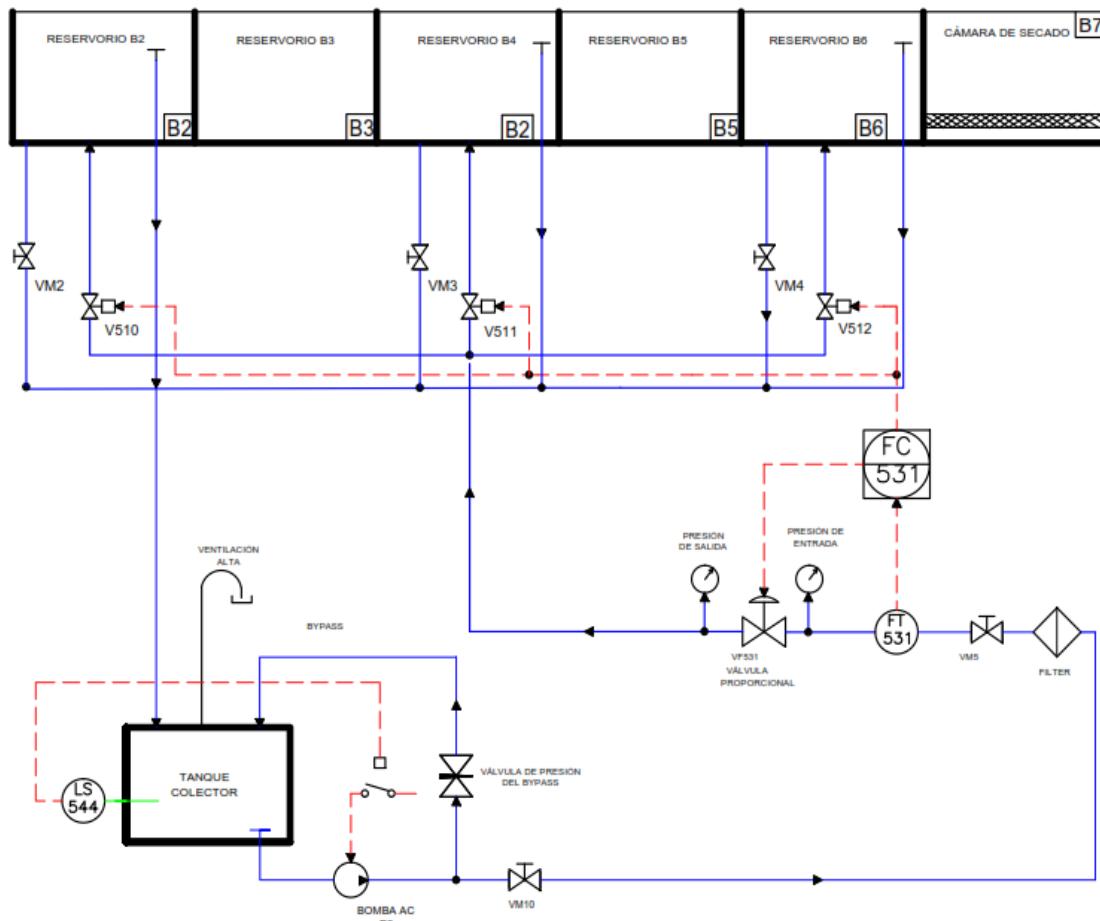


Figura 16. Subsistema del control de flujo 531

2.2. Determinación del estado inicial de la estación PS-2800

2.2.1. Matriz de evaluación

Para el análisis del estado actual de la estación, se procedió a realizar una matriz de evaluación de cada elemento instalado en la estación PS-2800, el criterio de evaluación que se eligió fue a través del funcionamiento de cada elemento, asignado un 100% si el elemento se encuentra operable, un 50% si el elemento necesita ajustes o reparaciones para ser utilizado en la estación, y un 0% si el elemento es objeto de reemplazo, la matriz de evaluación se visualiza en la Tabla 3.

Tabla 3

Matriz de evaluación de los elementos de la estación

Sistema	Elemento	Descripción	Funcionamiento
Panel de control	PLC ON	Pulsador de encendido del PLC	100%
	PLC OFF	Pulsador de apagado del PLC	100%
	EMERGENCY STOP	Paro de emergencia	0%
	L4	Indicador error	100%
	L1	Indicador PLC en línea	100%
	L3	Indicador PLC encendido	100%
	LS541	Transmisor de nivel, mínimo nivel reservorio B0.	100%
	LS542	Transmisor de nivel, mínimo nivel reservorio B1.	100%
	LS543	Transmisor de nivel, máximo nivel reservorio B1.	100%
	LS544	Transmisor de nivel mínimo, tanque colector	100%
Eléctrico	C10/FB	Realimentación, Ventilador	100%
	C11/FB	Realimentación, Calentador	100%
	C12/FB	Realimentación, Radiador	100%
	C13/FB	Realimentación, Bomba de Drenaje	100%
	C14/FB	Realimentación Bomba de Succión	100%
	C10	Ventilador	100%
	C11	Calentador	100%

continua ➔

	C12	Radiador	100%
	C13	Bomba de Drenaje P2	100%
	C14	Bomba de Succión P1	100%
	FT 531	Sensor de flujo para la línea los reservorios B2, B4, B6	100%
	FT 535	Sensor de flujo para la línea del reservorio B1	0%
	TT 511	Sensor de temperatura para el reservorio 1, pt 100	100%
	LT 541	Sensor de nivel para el reservorio B1, Cerebrar Trasmisor de Presión	0%
	VF 531	Valvular proporcional	100%
	DC PUM P1	Motor DC	100%
	TARJETA PWM	Tarjeta que genera el PWM para el elemento DC PUM P1	0%
Hidráulico	PRESURRE IN	Indicador de Presión de la bomba de drenaje P2	100%
	PRESURRE OUT	Indicador de Presión de la línea de llenado a los tanques B1, B3, B5	100%
	VM1	Válvula proporcional manual	100%
	VM2	Válvula manual	100%
	VM3	Válvula manual	100%
	VM4	Válvula manual	100%
	VM5	Válvula manual	100%
	VM6	Válvula manual	100%
	VM7	Válvula manual	100%
	VM8	Válvula manual	100%
	VM9	Válvula manual	100%
	VM10	Válvula manual	100%
	VM11	Válvula manual	100%
	VM12	Válvula manual	0%
Eléctrico - Hidráulico	VM13	Válvula manual	0%
	VM14	Válvula proporcional manual	100%
	V500	Válvula solenoide de descarga, Reservorio B1	50%
	V510	Válvula solenoide de llenado Reservorio B2	100%
	V511	Válvula solenoide de llenado, Reservorio B4	100%
	V512	Válvula solenoide de llenado, Reservorio B5	50%
	V515	Válvula solenoide de control de llenado, Tanque colector	100%
	V516	Válvula solenoide de control de llenado, Tanque colector	100%

2.2.2. Resultados de la evaluación

En la Tabla 4 se describe el resultado de la matriz de evaluación del estado de los elementos de la estación, la matriz nos indicó que existe un total de 6 elementos defectuosos en la estación que impiden un funcionamiento adecuado de los procesos de control.

Tabla 4

Elementos defectuosos de la estación PS-2800

Elemento	Descripción	Estado
V500	Electroválvula 24Vdc 10 W, reservorio B1	Solenoide defectuoso
V512	Electroválvula solenoide de 24Vdc 10 W, reservorio B5	Electroválvula incompleta
FT535	Flujómetro de paletas	Elementos de detección dañados (diodo IR y receptor IR).
DC PUM P1	Bomba centrifuga DC de 24V	La bomba se encuentra dañado en su constitución interna.
Tarjeta de PWM	Tarjeta controladora de PWM para la bomba centrifuga P2.	No genera el PWM al medir con el osciloscopio.
LT541	Sensor de nivel del reservorio B1	Compra del elemento, debido a que la estación no cuenta con este sensor.

2.3. Propuesta de solución para la Reingeniería de la estación PS-2800

2.3.1. Reposición o corrección de elementos defectuosos

Posterior a la evaluación del estado inicial de la estación PS-2800, se determinó un conjunto de elementos que por su condición actual no permiten el correcto funcionamiento de la estación, para la cual se establece la necesidad de reparar o reponer dichos elementos.

Debido a la dificultad de encontrar todos los elementos en el mercado, se ha ejecutado un análisis de las características propias de cada elemento y se ha buscado un reemplazo en almacenes dentro y fuera del territorio ecuatoriano.

2.3.1.1. Elementos internos del FT535 (Detección Infrarroja).

Se ha determinado el reemplazo de los elementos de detección internos del transmisor de nivel, para lo cual se procedió a identificar las características de dichos elementos y se realizó una cotización de los elementos fuera del país debido a que no existe disponibilidad en el territorio ecuatoriano. El emisor y el Detector Optoschmitt de Infrarrojos que se adquirió presentan las características que se detallan en la Tabla 5 y Tabla 6 respectivamente.

Tabla 5

Especificaciones técnicas del emisor de infrarrojos

Especificación	Resultado
Marca	HONEYWELL
Modelo	SEP8506
Voltaje	1.5 Vdc
Corriente	7 Ma
Tipo	Ga - As

Tabla 6

Especificaciones técnicas del Detector Optoschmitt

Especificación	Resultado
Marca	HONEYWELL
Modelo	SDP8600
Voltaje	4.5 - 12 Vdc
Corriente	2 mA
Tipo	Buffer

2.3.1.2. Transmisor de presión Cerabar PMC 133.

Se ha determinado el reemplazo del transmisor de nivel debido a la dificultad que presenta la reparación del elemento, se ejecutó la compra del sensor de presión hidráulico en el extranjero, ya que en el Ecuador no se encuentra este tipo de transmisores, las características técnicas se detallan en la Tabla 7.

Tabla 7**Especificaciones técnicas del sensor de presión**

Especificación	Resultado
Modelo	CERABAR PMC 133 1N1F2T6Q4Q
Rango de medición	0 - 100 PSIG
Corriente de salida	4 mA – 20 mA
Voltaje de alimentación	12.5 V a 36V

2.3.1.3. Bomba Centrifuga DC PUMP P1.

Se ha determinado el reemplazo de la bomba DC centrifuga, ya que no se encuentra disponible en la estación PS-2800, las características técnicas de la bomba se detallan en la Tabla 8.

Tabla 8**Especificaciones técnicas de la bomba centrifuga DC**

Especificación	Resultado
Marca	JABSCO
Modelo	Mini Puppy Bronze DC Pump
Tipo	Bomba centrifuga
Voltaje	24V
Caudal	6 Litres/min

2.3.1.4. Electroválvulas DC “V500 y V512”.

Posterior a la evaluación del estado de la estación se ha encontrado que dos electroválvulas (V500 y V512) presentan dificultades en su funcionamiento. La electroválvula de vaciado del tanque (V500) se encuentra averiada; por lo tanto, se procedió a repararla y realizar un mantenimiento en toda su estructura, considerando las características técnicas que se detallan en la Tabla 9.

En lo referente a la válvula de llenado del reservorio B6 (V512) se procedió a no reemplazarla debido a que el reservorio B6 no está incluido en la reingeniería de la estación PS-2800

Tabla 9**Especificaciones técnicas de la electroválvula DC**

Especificación	Resultado
Marca	Baccara
Modelo	GEM-SOL Direct Operated
Tipo	TYPE V 22 Way
Voltaje	24V
Potencia	10W

2.3.1.5. Pulsador de parada de emergencia “EMERGENCY STOP”.

El pulsador de emergencia del tablero de control no se encuentra operativo, por lo cual se realizó la compra del elemento considerando las especificaciones de la Tabla 10.

Tabla 10**Especificaciones técnicas del pulsador de emergencia**

Especificación	Resultado
Marca	LS Industrial
Modelo	A22E
Tipo	Paro de emergencia con enclavamiento
Voltaje	110 V - 220V
Corriente	10 A

2.3.2. Propuesta de Reingeniería de la estación PS-2800**2.3.2.1. Adaptación mecánica.**

La propuesta de adaptación de la estructura mecánica de la estación se realizó debido a que existen dispositivos y elementos de la estación que no están incluidos en el proceso de reingeniería de la estación, en la Figura 17 y Figura 18 se observa la estación PS-2800 en su estado inicial, entre las adaptaciones que se realizó citamos las siguientes:

- Retiro del robot cartesiano
- Retiro del soporte de aluminio del robot artesano



Figura 17. Estación PS-2800, estructura de fábrica



Figura 18. Estación PS-2800 de fábrica, brazo robótico

2.3.2.2. Integración de pantalla digital SIEMENS SIMATIC PANEL OP177B.

Como parte de la propuesta de reingeniería de la estación PS-2800, enfocada en convertir a dicha estación en un dispositivo de entrenamiento para variables analógicas, se integró en la estación, específicamente en el tablero de control un panel táctil de operador de la marca “Siemens OP177B”, en la Figura 19 se observa la pantalla digital que permite el monitoreo, control y visualización de las variables del sistema.

La pantalla está conectada mediante una red Ethernet al PLC Allen Bradley instalado en la estación, previa a la implementación se realizó el diseño de interfaces centrándose en la usabilidad de la estación como un equipo de entrenamiento de procesos típicamente industriales. El panel cuenta con las características técnicas y de operativas que se detallan en la Tabla 11 y Tabla 12 respectivamente.

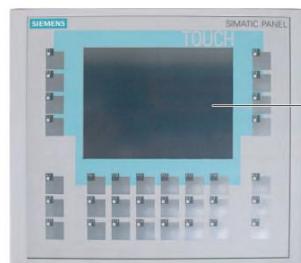


Figura 19. Pantalla Siemens OP177B

Fuente: (SIEMENS, 2015)

Tabla 11

Características técnicas del Panel SIMATIC OP177B

Características	Descripción
Tipo Pantalla	LCD-STN
Área activa del display	115.18 mm x 86.38 mm (5,7'')
Tiempo de vida a 50% de brillo, típico	50 000 h
Tipo de unidad de entrada	Pantalla táctil analógica resistiva Teclado de membrana
Memoria de aplicación	2 MB
Tensión nominal	+24Vdc
Rango admisible	20.4 V a 28.8 V (-15%, +20%)
Consumo de corriente típico	Aprox. 300mA
Corriente continua máx.	Aprox. 500mA
Fusible interno	Electrónico

Fuente: (SIEMENS, 2015)

Tabla 12

Características de operación del Panel SIMATIC OP177B

Característica	Cantidad/especificación
Cantidad de avisos de bit	2000
Cantidad de avisos analógicos	50
Longitud de texto de aviso	80 caracteres
Acuse simultaneo de alarmas	16 grupos de acuse
Comportamiento de memoria	Remanente
Cantidad de variables	1000
Vigilancia de límites	Sí
Escala lineal	Sí
Cantidad de imágenes	500
Texto de ayuda (longitud)	320 caracteres
Protocolo Comunicación Allen Bradley	Ethernet/IP, DF1, DH+ Gateway DF1, DH485

Fuente: (SIEMENS, 2015)

2.3.2.3. Adaptación de lazos de control para el desarrollo de técnicas y estrategias de control.

Los subsistemas de la estación han sido cambiados respecto a los de fábrica, como se observa en el ANEXO 2, permitiendo que en la estación puedan efectuarse siete diferentes técnicas o estrategias de control de procesos industriales. A continuación, se detallan las técnicas y estrategias de control que se efectuaron en el proceso de reingeniería de la estación PS-2800.

Control del lazo de temperatura 511, técnica de control ON-OFF con histéresis.

El control del lazo de temperatura de la estación PS-2800, se desarrolla en lazo cerrado, ver Figura 20, aplicando la estrategia del control ON-OFF con histéresis. A continuación, se detalla el funcionamiento del lazo de temperatura.

- Se utiliza la bomba DC P1 para llenar de agua el reservorio B1 hasta un nivel previamente establecido, bombeando agua desde el reservorio B0, para ello es necesario la activación de la electroválvula V516.
- Se utiliza como actuador el calentador eléctrico a 120 VAC, que conmuta entre encendido apagado dependiendo de la temperatura del agua en el reservorio B1.
- Se mide la temperatura del reservorio B1 mediante el Transmisor de temperatura TT511 que proporciona una salida de 4 a 20 mA.
- Se utilizan los sensores de nivel LS541, LS542, LS543 para conservar los niveles de agua adecuados en los reservorios.
- Se recomienda utilizar el transmisor de nivel LT541 para controlar la válvula de drenaje V500 y la bomba DC P1, permitiendo obtener un nivel entre 14 cm y 16 cm.

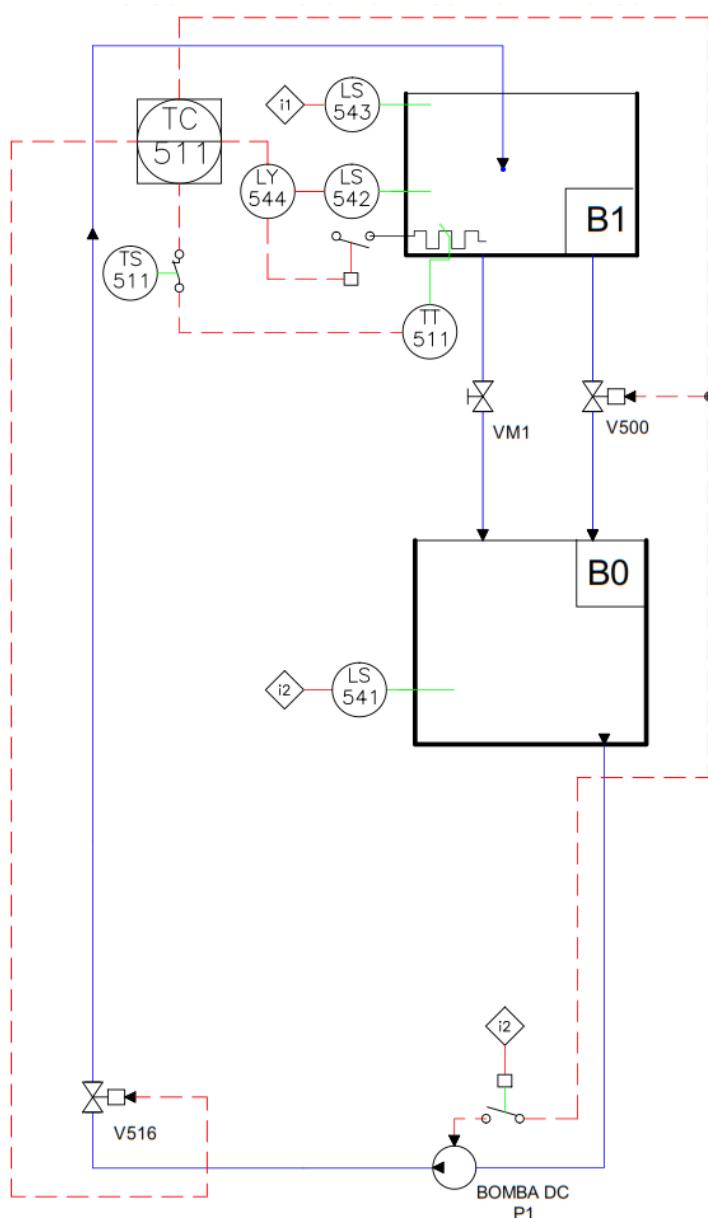


Figura 20. Lazo de control de temperatura, ON-OFF con histéresis

Control del lazo de Flujo 531, técnica de control proporcional integral (PI)

El control de flujo del lazo 531 se desarrolla en lazo cerrado, ver Figura 21, aplicando la estrategia del control PI. A continuación, se detalla el funcionamiento del lazo de flujo 531.

- La válvula manual VM2 permanece abierta para que fluya el agua a través del lazo de flujo, permitiendo que el tanque colector no se quede sin agua.

- Se procede a activar las electroválvulas V510 y abrir las válvulas manuales VM8 y VM10 para que permitan la circulación de agua desde el tanque colector hacia el reservorio B2.
- Se utiliza el transmisor de flujo FT531 que proporciona una salida de 0 a 20 mA, para medir el caudal que es bombeado desde el tanque colector hacia el reservorio B1.
- Se genera una señal de control para regular la válvula proporcional VF531 y de esta manera se controle el caudal bombeado.
- El sensor de nivel LS544 controla que el nivel de agua en el tanque colector sea adecuado, funciona como seguridad para el funcionamiento la bomba P1.

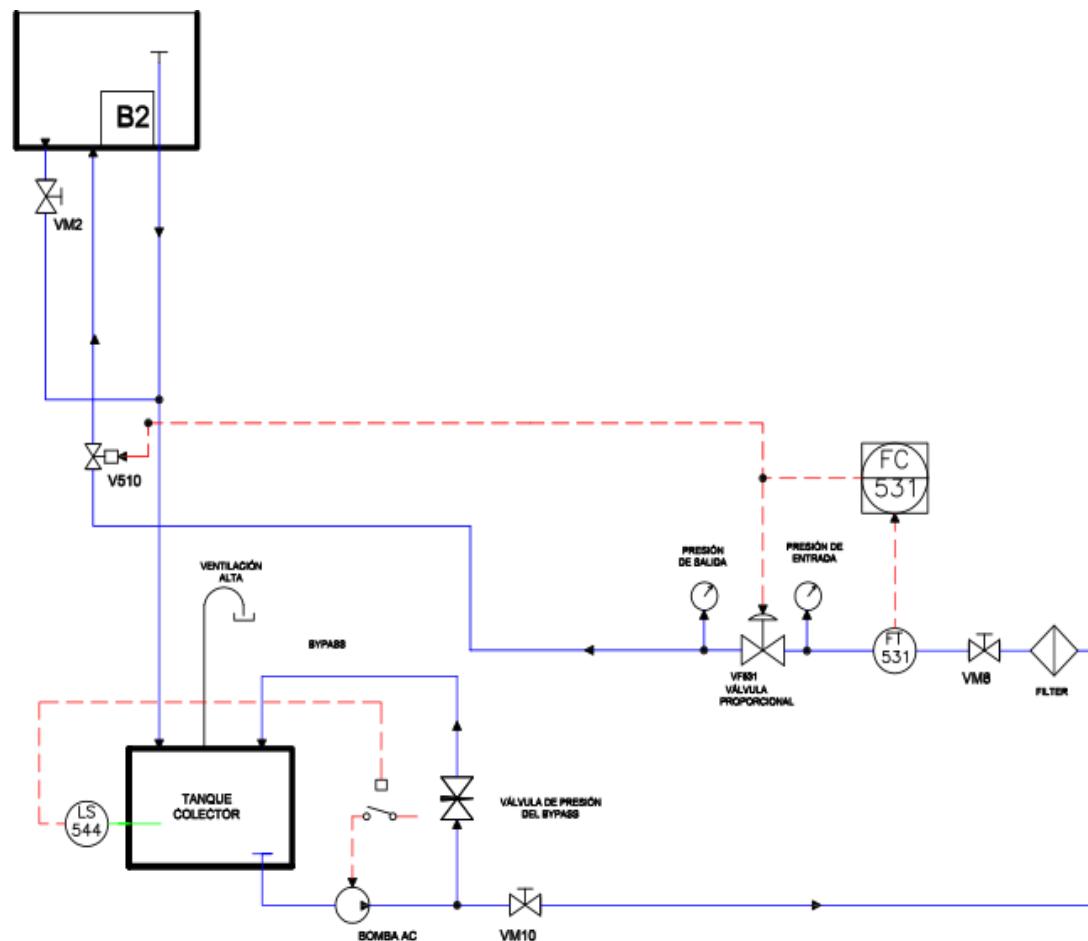


Figura 21. Lazo de control de flujo, técnica PI

Control del lazo de nivel 541, técnica de control PI

El control de nivel del lazo 541 se desarrolla en lazo cerrado, ver Figura 22, aplicando la estrategia del control PI. A continuación, se detalla el funcionamiento del lazo de nivel 541.

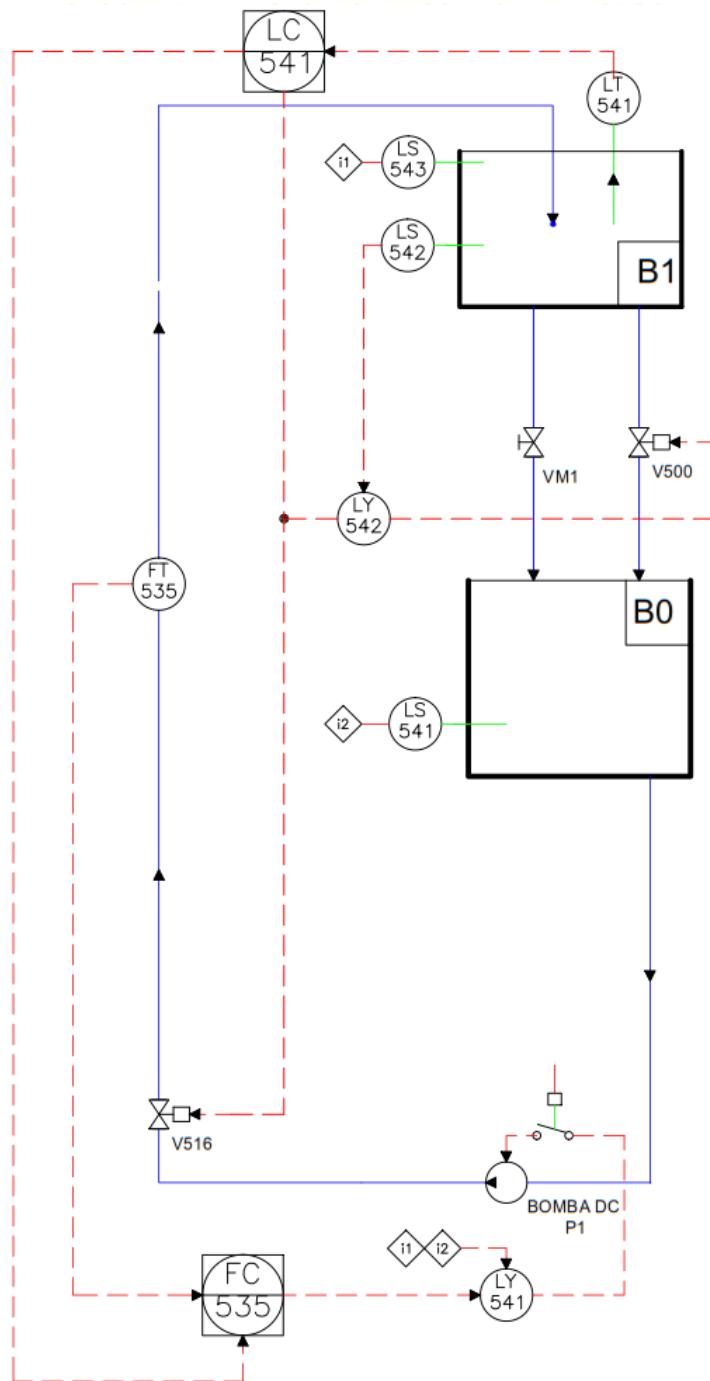


Figura 22. Lazo de control de nivel, técnica PI

- El transmisor de nivel LT541 se utiliza para medir el nivel de agua en el reservorio B1, este transmisor entrega una señal de 0 a 10V proporcional al nivel del agua.
- La electroválvula V516 permite la circulación del agua bombeada por la Bomba DC P1 hacia el reservorio B1.
- La electroválvula V500 permite la circulación del agua almacenada en el tanque B1 hacia el reservorio B0, esta permanecerá activada durante el proceso.
- El sensor de nivel LS541 controla que el nivel de agua en el reservorio B0 sea adecuado para que la bomba funcione correctamente.
- El regulador LC541 genera una señal para controlar la variación del PWM de la bomba DC P1.

Control del lazo de nivel 541, estrategia de control en cascada de nivel-flujo

El control del lazo de nivel 541 de la estación PS-2800 se desarrolla aplicando la estrategia de control en cascada mediante las variables nivel y flujo, el sistema que se utiliza para la aplicación de la estrategia de control se visualiza en la Figura 23.

- El transmisor de nivel LT541 se emplea para medir el nivel de agua en el reservorio B1, el transmisor entrega una señal de 0 a 10V proporcional al nivel del agua.
- La electroválvula V516 permite la circulación del agua bombeada por la Bomba DC P1.
- El sensor de nivel LS541 controla que el nivel de agua en el reservorio B0 sea adecuado para que la bomba funcione correctamente.

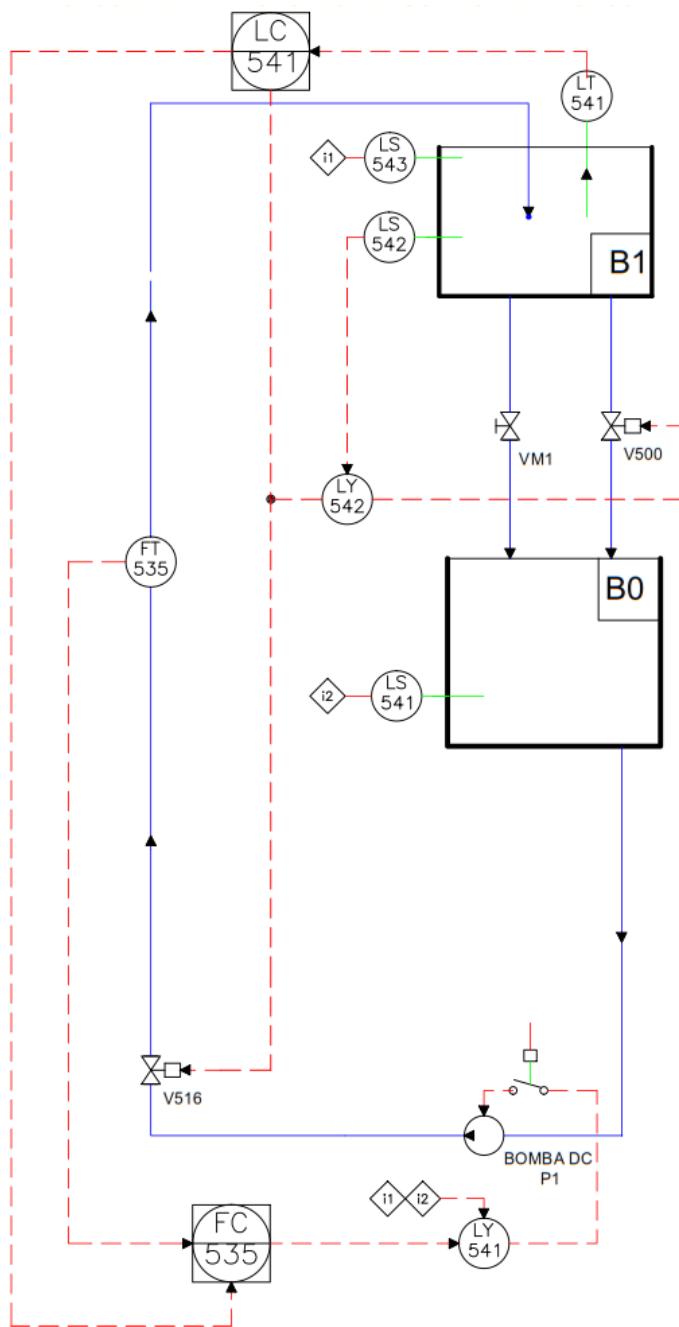


Figura 23. Lazo de control, estrategia cascada de nivel-flujo

- El regulador LC541 genera una señal de setpoint para el regulador secundario FC535, de esta forma se crea la estructura de control cascada.
- Se utiliza el transmisor de flujo FT535 que proporciona una salida de 0 a 20 mA, para medir el caudal que es bombeado desde el reservorio B0 hacia el reservorio B1.

- Se genera una señal de control tipo PWM que regule la velocidad de giro de la bomba DC P1, y de esta manera se regule el caudal bombeado de acuerdo a la consigna establecida por el controlador primario

Control del lazo de flujo 535, estrategia de control por razón de flujos

El control del lazo de flujo 535, se desarrolla aplicando la estrategia de control por razón de flujos, el sistema que se utiliza para la aplicación de la estrategia de control se visualiza en la Figura 24.

- Las electroválvulas V500 y V516 permiten la circulación de agua desde el reservorio B0 al reservorio B1, la electroválvula V510 y la válvula VM2 permiten la circulación de agua desde el tanque colector al reservorio B2.
- Se utiliza el transmisor de flujo FT535 que proporciona una salida de 0 a 20 mA, para medir el caudal que es bombeado desde el reservorio B0 hacia el reservorio B1.
- El regulador FC535 genera una señal de control tipo PWM que regule la velocidad de giro de la bomba DC P1, y de esta manera se regule el caudal bombeado de acuerdo a la consigna establecida como setpoint por el analizador de flujo FY dependiendo de la relación de flujo establecida.
- Se utiliza el transmisor de flujo FT531 que proporciona una salida de 0 a 20 mA, para medir el caudal que es bombeado desde el tanque colector hacia el reservorio B2.
- El regulador FC531 genera una señal de control tipo de 0 a 10V que regule la apertura de la válvula proporcional VF531, regulando de esta manera el caudal bombeado de acuerdo a la consigna establecida como setpoint por el analizador de flujo FY dependiendo de la relación de flujo establecida.

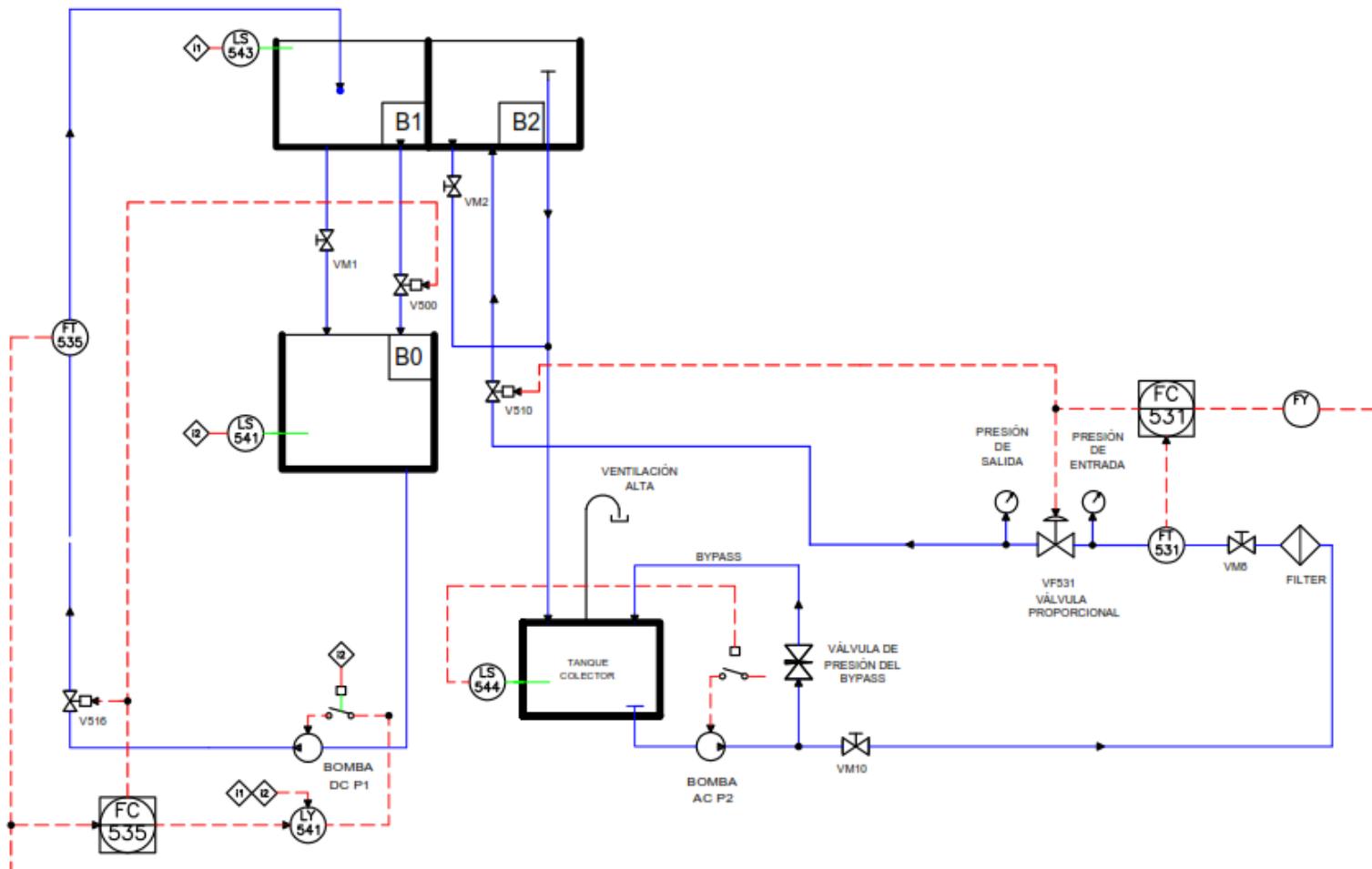


Figura 24. Lazo de control, razón de flujo

Control del lazo de flujo 535, estrategia de control por superposición de flujo constante-nivel

El control del lazo de flujo 535 de la estación PS-2800, se desarrolla aplicando la estrategia de control por superposición mediante la variable de flujo y nivel, el sistema que se utiliza para la aplicación de la estrategia de control se observa en la Figura 25.

- El transmisor de nivel LT541 se utiliza para medir el nivel de agua en el reservorio B1, este transmisor entrega una señal de 0 a 10V proporcional al nivel del agua.
- La electroválvula V516 permite la circulación del agua bombeada por la Bomba DC P1.
- El sensor de nivel LS541 controla que el nivel de agua en el reservorio B0 sea adecuado para que la bomba no sea dañada por falta de agua.
- El regulador LC541 genera una señal control que es enviada a un selector de baja LS. A su vez, el regulador FC535 genera una señal de control que, conmutada con la señal de control de nivel, de las dos señales de control la de menor valor es la señal de control para el actuador.
- Se utiliza el transmisor de flujo FT535 que proporciona una salida de 0 a 20 mA, para medir el caudal que es bombeado desde el reservorio B0 hacia el reservorio B1.
- Se genera una señal de control tipo PWM que regule la velocidad de giro de la bomba DC P1, y de esta manera se regule el caudal bombeado de acuerdo a la consigna establecida el selector entre la señal de control de nivel y la señal de control de flujo.

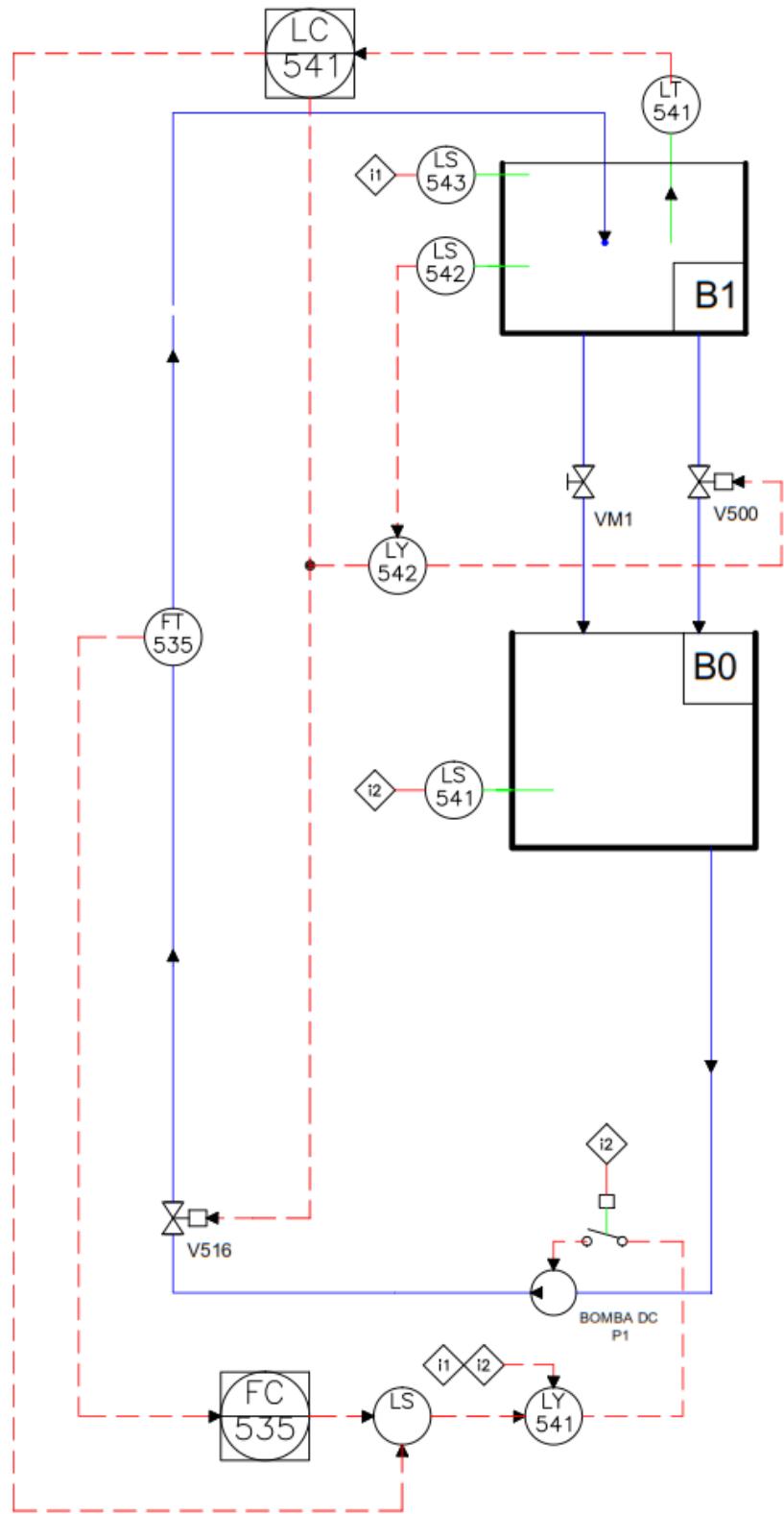


Figura 25. Lazo de control, superposición de flujo constante–nivel mínimo

Control del lazo de temperatura 511, estrategia de control por rango partido de temperatura-flujo de refrigeración

El control del lazo de temperatura 511 se desarrolla aplicando la estrategia de control por rango partido mediante las variables de temperatura y flujo, el sistema que se utiliza para la aplicación de la estrategia de control se visualiza en la Figura 26.

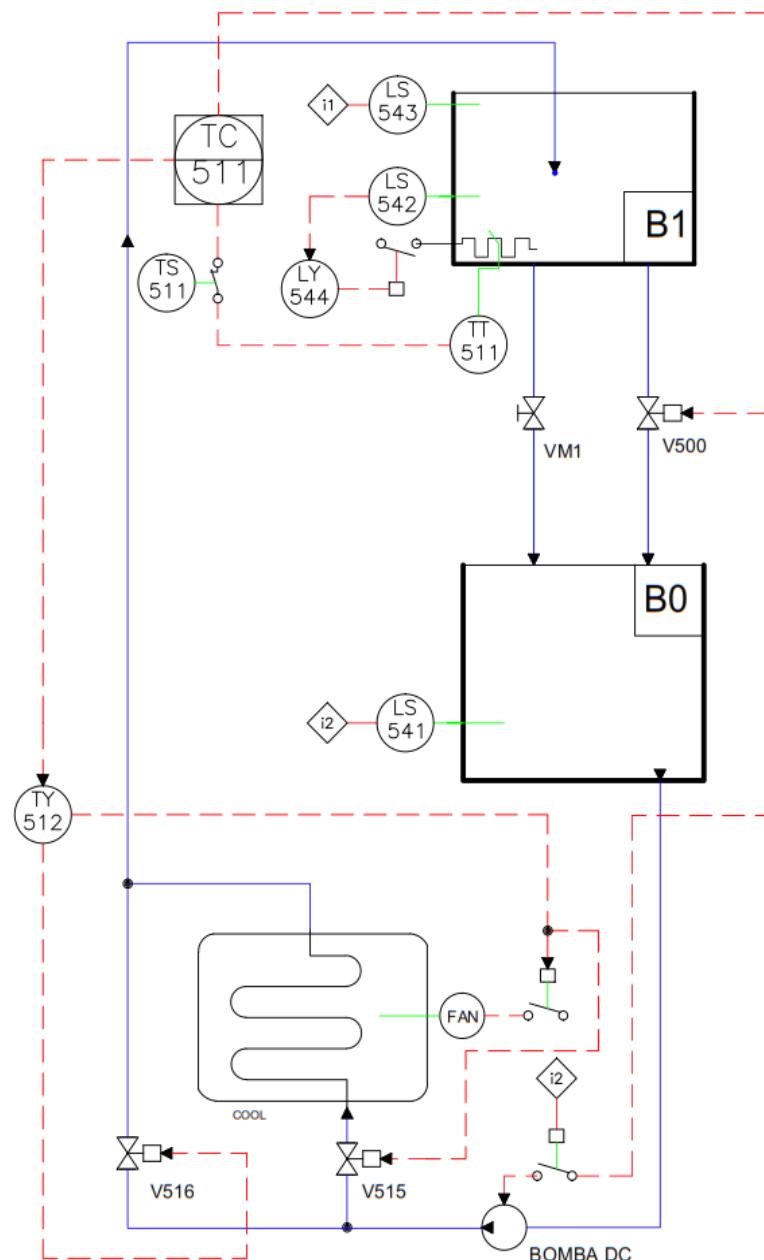


Figura 26. Lazo de control, rango partido de temperatura-flujo de refrigeración

- Se utiliza como actuador el calentador eléctrico 120 VAC, que es activado o desactivado según la consigna de temperatura deseada, mientras el nivel de agua sea menor al nivel mínimo del reservorio B1 el calentador permanece apagado, este nivel se verifica mediante el sensor LS541.
- La bomba DC P1 funciona dependiendo de la consigna de temperatura, trabaja conjuntamente con la etapa de enfriado para disminuir la temperatura del reservorio B1, la bomba permanece encendida mientras el nivel de agua en el reservorio B0 sea mayor al nivel mínimo de bombeo, se verifica este nivel mediante el sensor LS541.
- Se mide la temperatura del reservorio B1 mediante el transmisor de temperatura TT511 que proporciona una salida de 4 a 20 mA.
- El regulador de temperatura TC511 genera una señal de control para el analizador de rango partido TY512 que activa las electroválvulas V515 y el enfriador FAN dependiendo de la temperatura deseada en el reservorio B1

2.3.2.4. Reprogramación del PLC Allen Bradley.

La programación de los algoritmos de control se realizó en lenguaje FBD, el cual permite al usuario programar elementos (bloque de funciones dentro del PLC) que están interconectados entre sí, generalmente utilizan símbolos lógicos para representar al bloque de función. Las salidas lógicas no requieren incorporar una bobina de salida, porque la salida es representada por una variable asignada a la salida del bloque.

El diagrama de funciones lógicas, resulta especialmente cómodo de utilizar, debido a la facilidad de crear bloques que integren la lógica necesaria para el control de un proceso. En la Figura 27 se visualiza las principales partes del diagrama de bloques de funciones para la programación en controladores Logix5000.

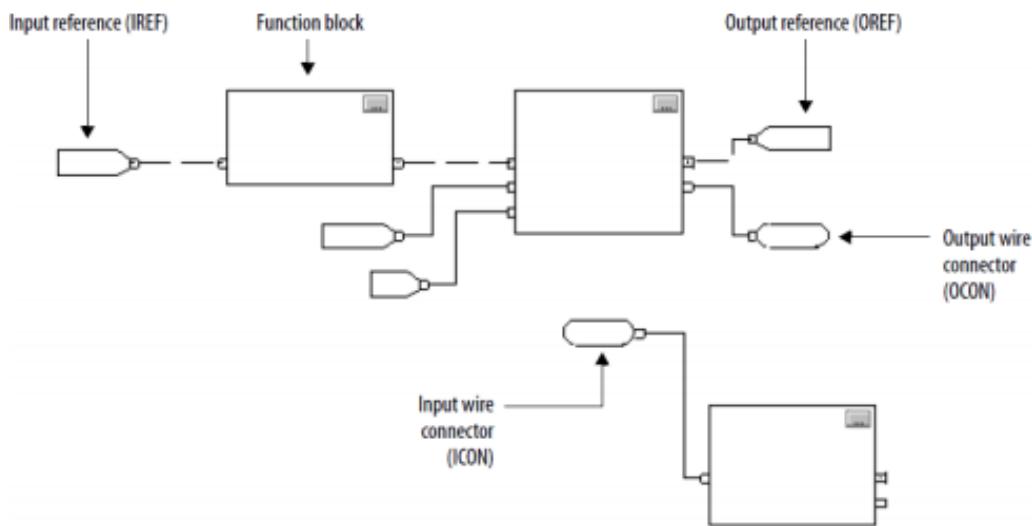


Figura 27. Diagrama de bloques de funciones

Fuente: (Rockwell Automation, 2014)

El flujo de información entre bloques es compartido, adicionalmente el software de programación de autómatas de Allen Bradley, RSLOGIX permite la creación de variables locales y globales además de la construcción de bloques de función en todos los lenguajes disponibles en el compilador.

Parte de la integración de nuevas alternativas para la programación de autómatas, se planteó utilizar la programación del software RSLOGIX5000 mediante bloques de función, esta alternativa permitió la creación de funciones adecuadas para cada proceso de control, ya que el software admite segmentar la programación de los algoritmos de control de una manera adecuada, y ejecutarlos dependiendo de determinadas situaciones.

2.3.2.5. Desarrollo de Guías Multimedia.

Como parte del proyecto de reingeniería se realizó un diseño e implementación de prácticas de laboratorio para el sistema de entrenamiento PS-2800, las mismas que se detalla en el capítulo VI del presente proyecto. Se consideró a la etapa desarrollo de guías una tarea dependiente de otras actividades, debido a que es necesario contar con los recursos disponibles definitivos antes de la implementación.

2.4. Evaluación de soluciones

2.4.1. Criterios de evaluación

La evaluación de las posibles soluciones se desarrolló en función de 4 criterios que se detallan a continuación, los mismos que se calificaron con una puntuación de 1 a 4 en función de la importancia o utilidad que representa dicha solución, la ponderación para la evaluación es la siguiente:

1=“excelente”

2=“muy bueno”

3=“regular”

4=“malo”

- Criterio 1.- Importancia que tiene el elemento para el correcto funcionamiento de la estación, se considera importante si es un requisito en el presente proyecto.
- Criterio 2.- Factibilidad para realizar dichos solución de reingeniería o en su defecto factibilidad para la importación de los elementos.
- Criterio 3.- Costo de implementación de la solución
- Criterio 4.- Tiempo de espera para la ejecución e implementación de la solución

2.4.2. Resultados de la evaluación

Los resultados de la evaluación de las soluciones en función de los criterios anteriormente citados se visualizan en la Tabla 13 donde se acordó realizar todas las alternativas propuestas a excepción de la alternativa número 6 (Retiro del soporte de

aluminio del robot artesano), debido a la importancia que estas representan para la ejecución e implementación del proyecto reingeniería de la estación PS-2800

La alternativa número 6 no se consideró, ya que no afecta al desarrollo del proyecto, además será objeto de uso para próximos estudiantes que deseen incorporar el brazo robótico nuevamente a la estación PS-2800.

Tabla 13
Evaluación de soluciones

No	Alternativa de solución	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4	Total	Orden prioridad
1	Reposición del transmisor y receptor de infrarrojos del transmisor de flujo FT535	1	3	2	3	9	3
2	Reposición del transmisor de nivel LT541	1	3	3	3	10	2
3	Reposición de la bomba centrifuga DC PUMP P1	1	3	3	4	11	1
4	Reposición del botón paro de emergencia	2	1	1	2	6	7
5	Corrección de la electroválvula V500	1	1	1	1	4	8
6	Retiro del robot cartesiano	3	1	1	1	5	9
7	Retiro del soporte de aluminio del robot artesiano	4	2	2	3	11	-
8	Tarjeta Generadora PWM mediante la plataforma de Arduino.	1	2	3	2	8	4
9	Integración de pantalla digital SIEMENS SIMATIC PANEL OP177B.	1	1	2	2	6	10
10	Adaptación mecánica de los lazos de control.	1	2	2	3	8	6
11	Estrategia 1: Control del lazo de temperatura 511, control tipo ON-OFF con histéresis.	1	2	1	2	6	11
12	Estrategia 2: Control del lazo de Flujo 535, control tipo PI.	1	2	1	2	6	12
13	Estrategia 3: Estrategia de control en cascada de nivel-flujo	1	3	1	3	8	14
14	Estrategia 4: Estrategia de control por superposición de flujo constante-nivel	1	3	1	3	8	16
15	Estrategia 5: Estrategia de control por rango partido de temperatura-flujo de refrigeración	1	3	1	3	8	15
16	Estrategia 6: Estrategia de control por razón de flujos	1	2	1	3	7	13
17	Estrategia 7: Estrategia de control Anticipativo de Temperatura – Flujo	1	3	1	3	8	17
18	Reprogramación del PLC Allen Bradley.	1	2	1	3	8	5
19	Desarrollo de Guías Multimedia.	1	2	1	3	8	18

CAPÍTULO III

PROCESO DE ADAPTACIÓN

En el presente capítulo se describe el proceso de adaptación que se desarrolló en la estación de proceso PS-2800, con el fin de obtener una estación de prácticas en el control de variables típicamente industriales, incorporando tecnologías modernas. El proceso de adaptación se realizó en 4 etapas, mecánica, eléctrica, instrumentación y etapa de control, las cuales se detallan en la Figura 28, finalmente en el presente capítulo se efectuó la implementación de las técnicas y estrategias de control.

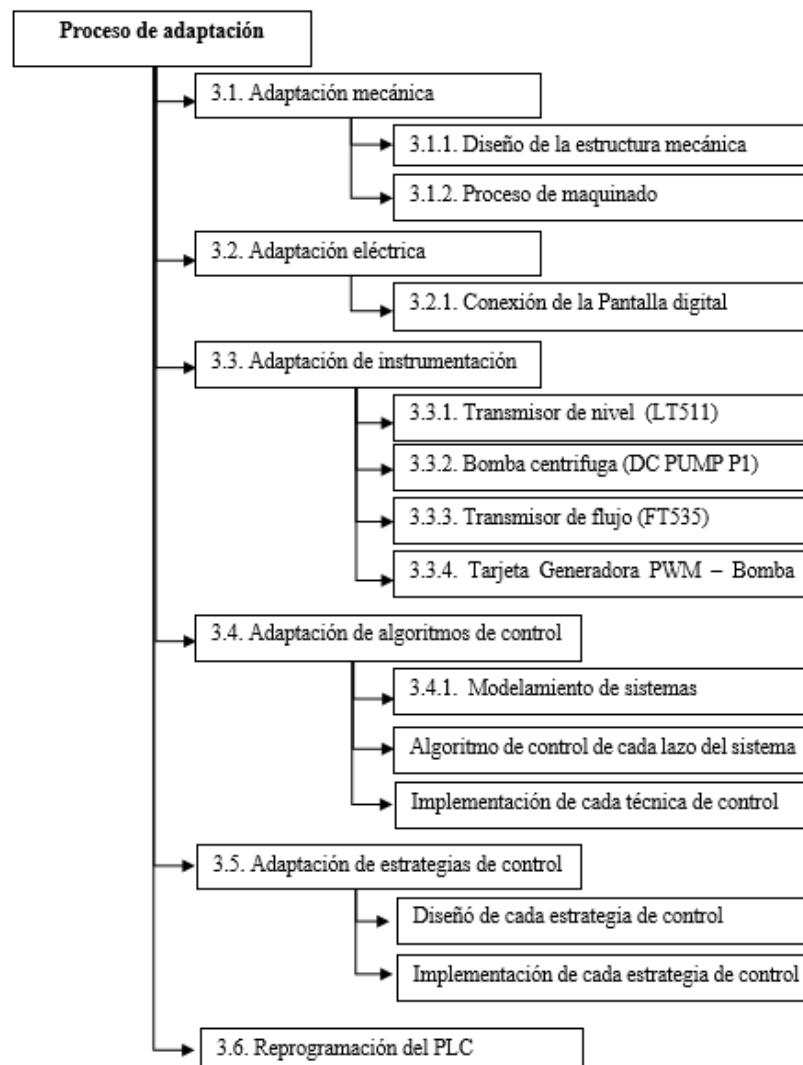


Figura 28. Descripción del capítulo III

3.1. Adaptación mecánica

3.1.1. Diseño de la estructura mecánica.

En reingeniería de la estación PS-2800 uno de los principales requisitos es la integración de una pantalla digital que permita visualizar, monitorear y operar las variables de nivel, temperatura y caudal de los diferentes lazos de control de la estación, razón por la cual se planteó un nuevo diseño para el tablero de control.

El tablero de control en su estado de fábrica presentaba las medidas que se observan en la Figura 29, partiendo de esas características se procedió a diseñar y modificar el tablero de control, integrando la pantalla digital y asignando una nueva ubicación a los botones y luces indicadores de diámetro 22mm/26mm según estipulan las normas internacionales IEC, como se visualiza en la Figura 30.

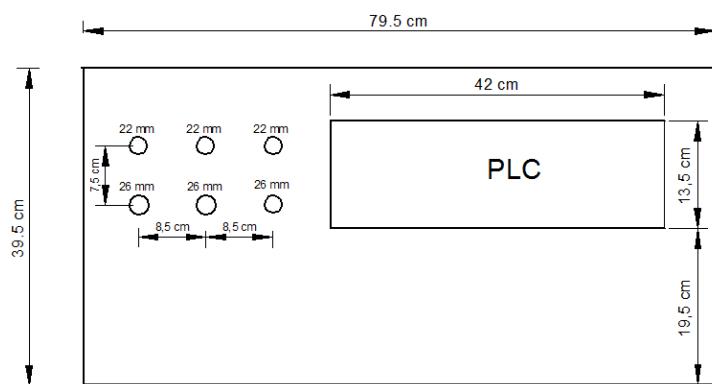


Figura 29. Medidas del tablero de control, estado de fábrica

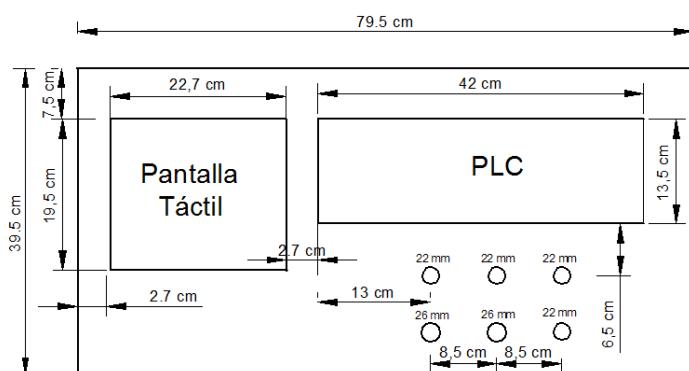


Figura 30. Tablero de control con adaptación de la pantalla digital

El diseño de la estructura mecánica de la estación de proceso PS-2800 se desarrolló en el software Autodesk Inventor, el software permitió obtener un bosquejo de la estación luego del proceso de reingeniería, en la Figura 31, Figura 33 y Figura 32 se puede observar a diferentes planos la estación.

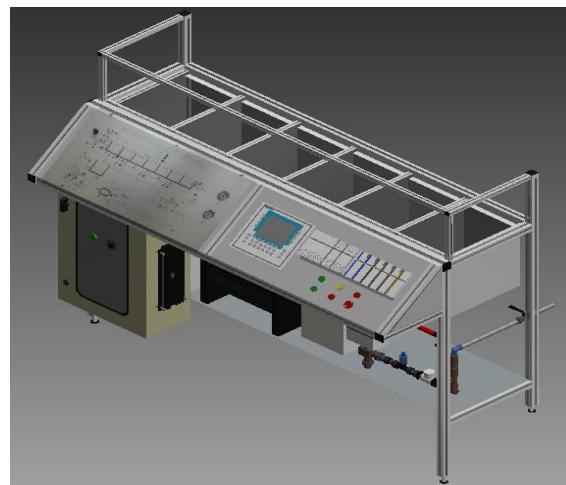


Figura 31. Diseño mecánico de la estación PS-2800, vista lateral

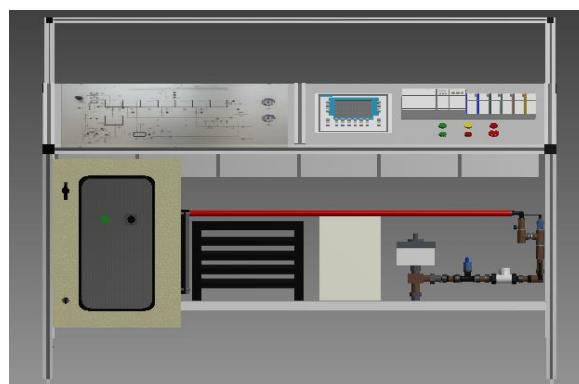


Figura 32. Diseño mecánico de la estación PS-2800, vista frontal

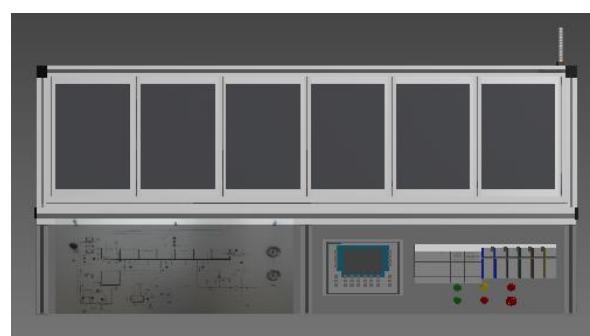


Figura 33. Diseño de la estación PS-2800, vista superior

3.1.2. Proceso de maquinado

En el proceso de maquinado se realizó la adaptación mecánica de la placa de aluminio del tablero de control, permitiendo la instalación de la pantalla táctil, el cambio de lugar de los botones y luces indicadores del tablero de control, y el retiro del brazo robótico de la estación como se observa en la Figura 34 y Figura 35.



Figura 34. Maquinado del tablero de control



Figura 35. Adaptación mecánica en la estación PS-2800

3.2. Adaptación eléctrica

3.2.1. Conexión del panel táctil SIMATIC OP177B

Como paso previo a la puesta en marcha del panel táctil SIMATIC OP177B PN/DP se realizó la conexión de la fuente de alimentación de 24Vdc/3.2A instalada en el tablero de control de la estación PS-2800, la conexión del panel se muestra en la Figura 36. Se debe conectar la alimentación (24Vdc, GND) hacia la bornera ubicada en la parte posterior del panel táctil, las características técnicas del panel determinan que el consumo máximo de corriente es 500 mA, para lo cual se debe asegurar que dicha corriente sea suministrada por la fuente de alimentación de la estación PS-2800.

**DIAGRAMA ALIMENTACIÓN DE CONEXIÓN
BORNERAS**

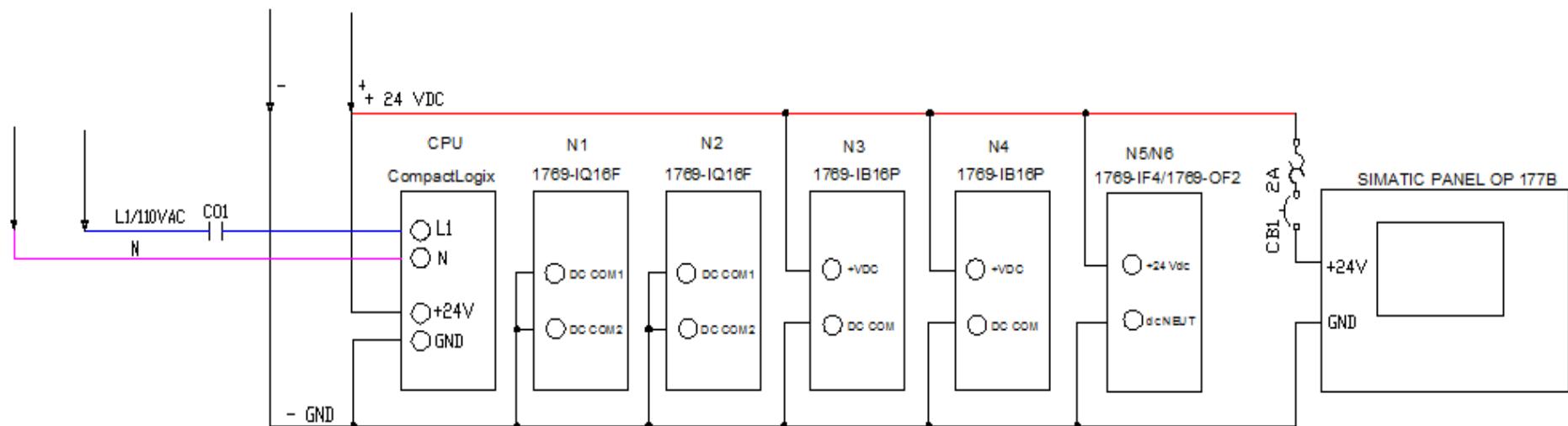


Figura 36. Diagrama de conexión eléctrica del PLC y la pantalla digital.

3.3. Adaptación de instrumentación

3.3.1. Transmisor de nivel (LT541)

Se realizó el reemplazo del LT541 por un transmisor de la marca Banner localizado en el reservorio B1, ver Figura 37, ya que la estación no disponía de este dispositivo para la medición del nivel, las características técnicas del transmisor se describen en el apartado 2.3.1.

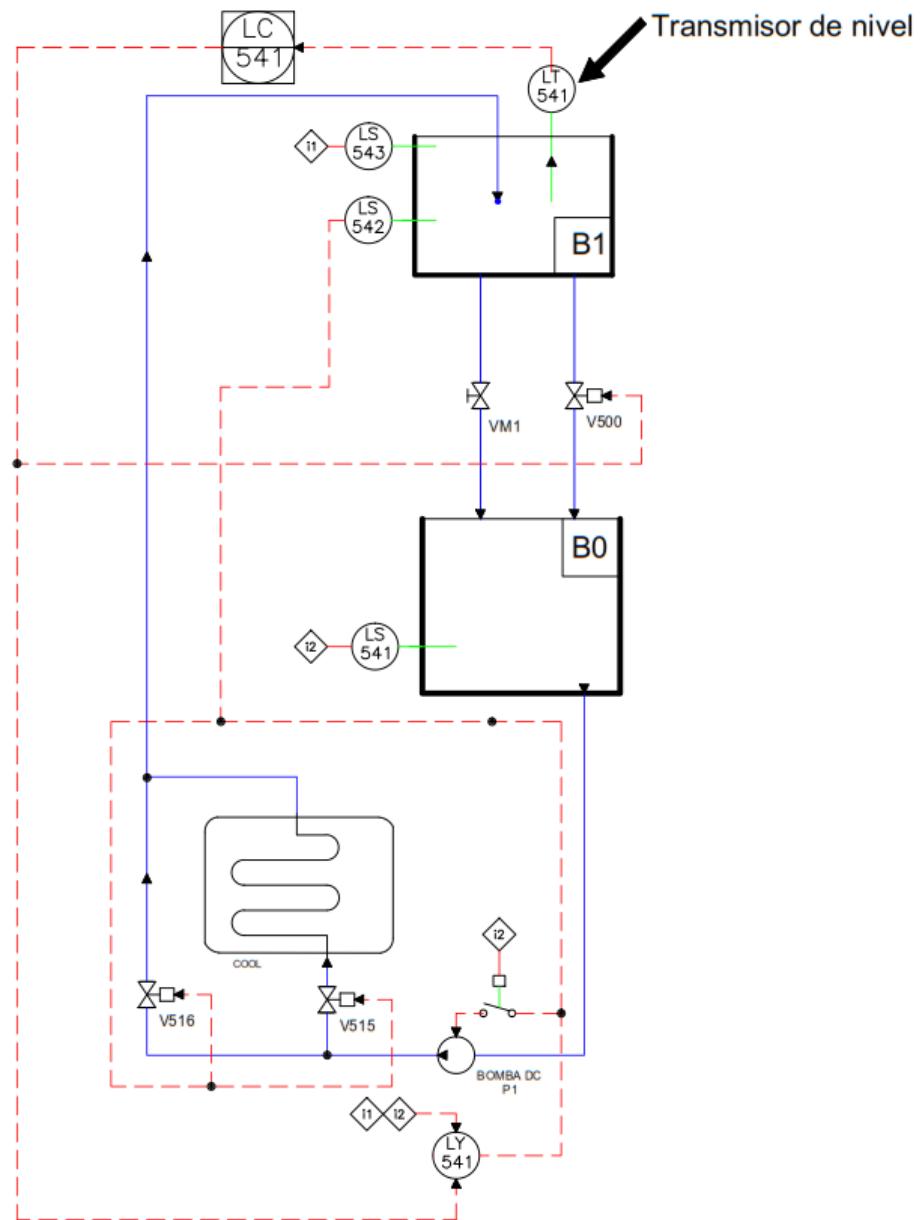


Figura 37. Ubicación del LT541 en el lazo de control de nivel

3.3.2. Bomba centrífuga (DC PUMP P1)

Se sustituyó la bomba DC PUMP P1 del modelo Jabsco mini puppy, Figura 38, por una bomba Jabsco wáter puppy, las características de la bomba centrífuga instalada en la estación se detallan en el apartado 2.3.1.

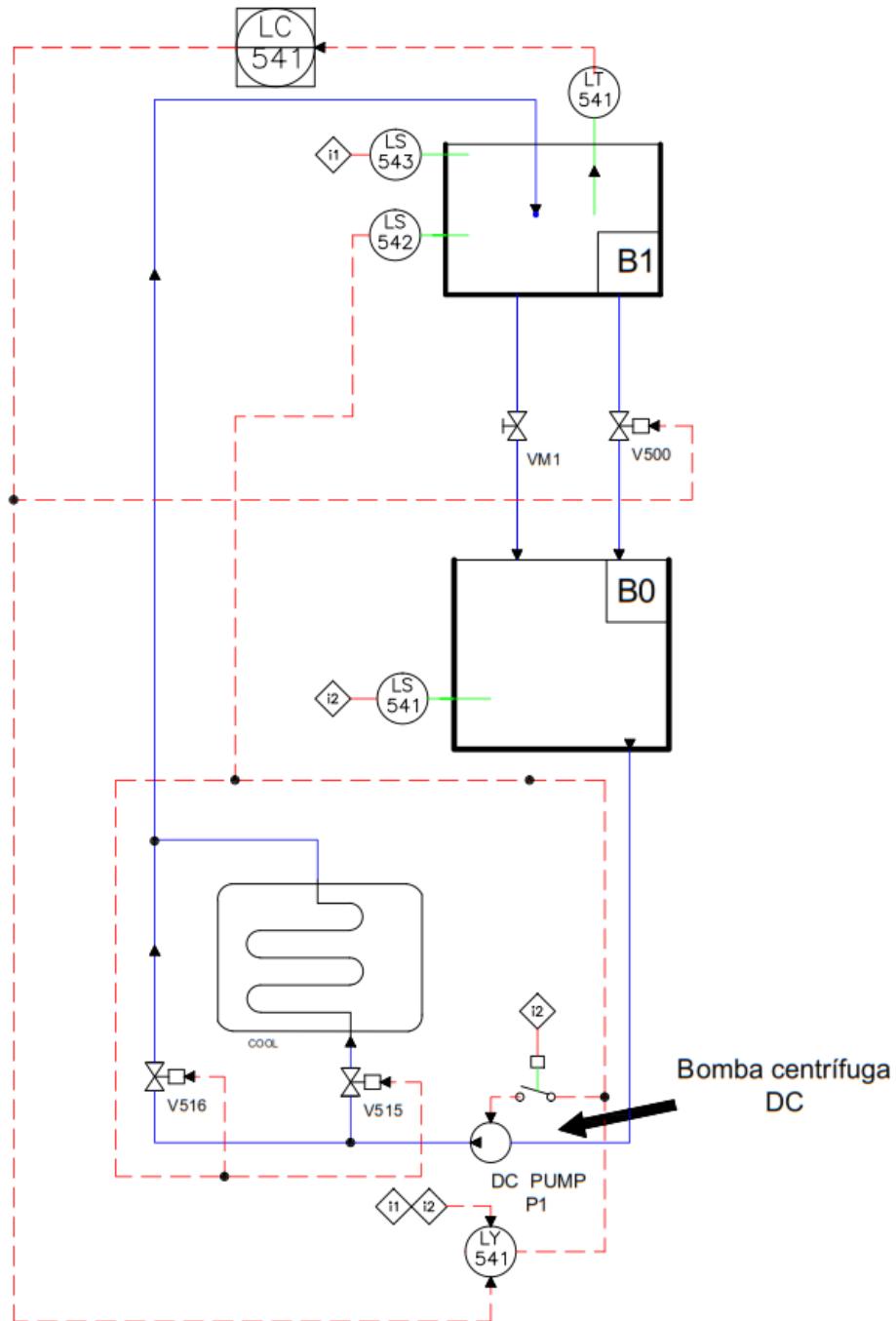


Figura 38. Ubicación de la bomba DC PUMP P1 en el lazo de nivel

3.3.3. Transmisor de flujo (FT535)

Se procedió a reemplazar el emisor y detector de infrarrojos del transmisor FT535, ubicado en la línea de tubería hacia el reservorio B1, ver Figura 39, ya que los elementos internos del transmisor no se encontraban funcionales, las características de los elementos instalados de destallan en el apartado 2.3.1.

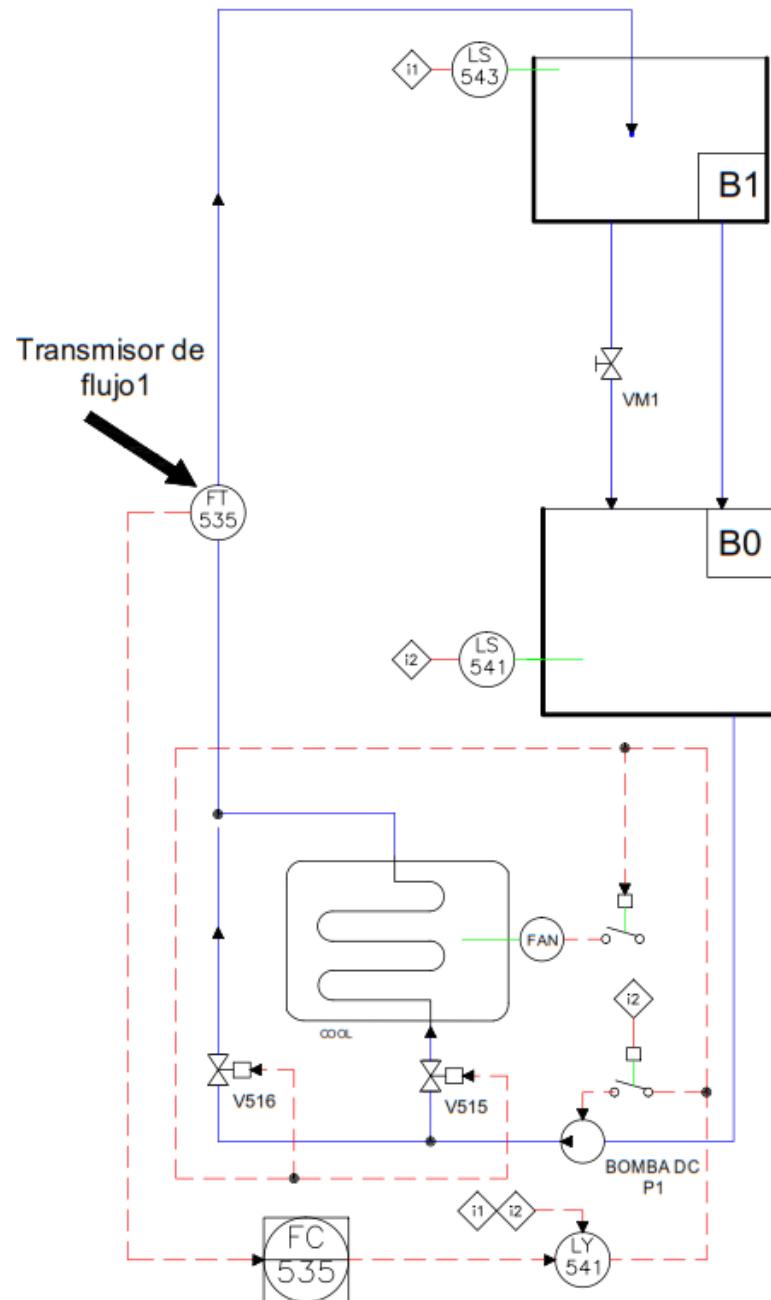


Figura 39. Ubicación del FT535 en el lazo de flujo 535

3.3.4. Tarjeta Generadora PWM – Bomba DC P1.

Se realizó el diseño e implantación de la tarjeta generadora de PWM, para lo cual se utilizó la plataforma de Arduino y el circuito eléctrico que se detalla en el ANEXO3, a continuación, se describen las características y consideraciones que se realizó para el diseño de la tarjeta.

Características de diseño de la tarjeta.

- La señal de control del ciclo de trabajo de la tarjeta es de 0 a 5V, debido a que el convertidor análogo-digital de la tarjeta Arduino solo permite voltajes máximos de 5V.
- La tarjeta controladora permite el control del voltaje de salida mediante el uso de PWM (Modulación por Ancho de Pulso). La señal de control generada por la tarjeta Arduino es utilizada para activar o desactivar un transistor de potencia, la frecuencia de 20KHz necesaria para evitar ruidos y vibraciones indebidas es de 20KHz.
- La tarjeta contiene un regulador de voltaje para su funcionamiento, debido a que en la estación PS-2800 no se cuenta con una fuente de 5VDC.
- Debido a la naturaleza inductiva de la carga a controlar, se consideró la integración de diodos en anti-paralelo para proteger al circuito de la etapa de potencia del controlador.
- El PCB del generador PWM fue diseñado para coincidir con la infraestructura actual de la estación, además debe contener borneras y conectores adecuados para el actual cableado de la estación.
- Todos los componentes activos y pasivos del sistema fueron dimensionados para las necesidades de consumo de corriente y voltaje.

Consideraciones de diseño de la tarjeta.

- El tamaño de la tarjeta generadora de PWM es de 7cm x 8cm, para ser colocada en sustitución de la tarjeta generadora de fábrica.
- La tarjeta controladora contiene entradas para una señal de control (analógica 0 a 5V), alimentación (24VDC), conexión para transistor de potencia (Emisor, Base, Colector), salida para el motor (M+, M-).
- Debe contener un sistema de protección para los circuitos de potencia, se integró 4 diodos rectificadores de 6A en anti-paralelo para evitar el sobrecalentamiento del cableado y de la placa.
- El PCB de la placa se diseñó para soportar 10A en la etapa de potencia, para lo cual se dimensionó el ancho de las pistas en la etapa de diseño de PCB.
- Se utilizó la tarjeta Arduino mini debido a sus pequeñas dimensiones, permitiendo realizar una PCB que puede ser insertada en la estructura física de la estación PS-2800.

3.4. Adaptación de algoritmos de control

En esta sección se describe el diseño de los algoritmos de control para los diferentes lazos de la estación de procesos PS-2800, para lo cual se realizó los siguientes pasos en cada uno de los lazos de control.

- Modelamiento de sistemas.
- Especificaciones técnicas del algoritmo de control.
- Lógica de control a implementarse.
- Diseño del algoritmo de control.

3.4.1. Modelamiento de sistemas

El modelamiento de los diferentes subsistemas de control de la estación PS-2800 se realizó mediante el método de estimación en el software de Matlab a través de las funciones IDDATA e IDENT, a partir de los datos obtenidos de los subsistemas en lazo abierto.

3.4.1.1. Modelamiento del lazo de flujo 531.

En primera instancia se procedió a la adquisición de datos del subsistema de flujo 531, considerando como entrada a la válvula proporcional VF531 y como salida al transmisor FT531 como se observa en la Figura 40; se consideró las especificaciones de operación de los elementos del subsistema.

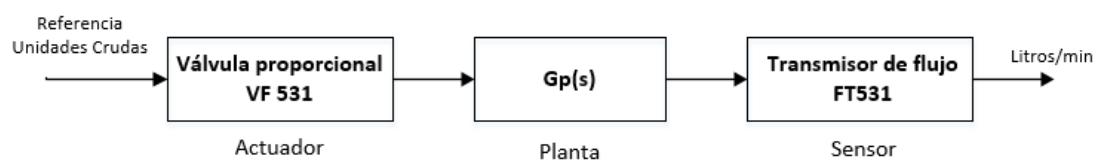


Figura 40. Lazo abierto del subsistema de flujo 531

A continuación, se enumera los pasos a seguir para obtener la estimación de la planta mediante software de Matlab.

1. Una vez identificada la salida y entrada del sistema se genera una serie de estímulos a una amplitud constante y a diferente periodo.
2. Procedemos a adquirir la respuesta que presenta el subsistema frente a dicho estímulo.
3. Para la obtención de los datos de respuesta del subsistema se utiliza la opción Trend del software RSLOGIX5000 como se detalla en el anexo 5.

4. En el software de Matlab se ingresa los datos de entrada, salida y tiempos de muestreo obtenidos del sistema, considerando a 0 segundos como tiempo inicial de la primera muestra tomada.
5. Se exporta los datos ingresados en matlab hacia la función ident para realizar el modelamiento de la planta como se describe en el anexo 6.
6. Finalmente se escoge la mejor aproximación que representa la respuesta de la planta frente a un estímulo.

Debido a que el lazo de control 531 está gobernado por una electroválvula proporcional (servomotor), se considera que la función de transferencia de la planta tiene el mismo orden que el actuador, es decir será de segundo orden. (Eras & Arguero, 2010).

La estimación de la función de trasferencia del lazo 531 mediante matlab es:

$$G_{P531}(s) = \frac{0.1093}{s^2 + 0.7076 s + 0.1252}$$

3.4.1.2. Modelamiento de la planta del lazo de flujo 535.

Para el modelamiento del lazo de flujo 535 se realizó distintos estímulos a la entrada de la planta en lazo abierto, fundamento como entrada a la bomba centrifuga DC PUMP P1 y como salida al transmisor FT535, considerando las especificaciones de operación de los elementos que se localizan en el subsistema; en la Figura 41 se visualiza el diagrama en lazo abierto del subsistema.

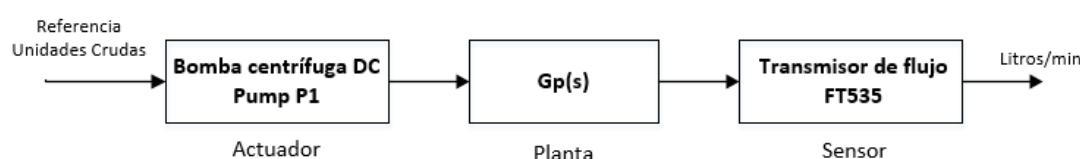


Figura 41. Lazo abierto del subsistema de flujo 535

Realizando los pasos explicados en el literal 3.4.1.1, modelamiento de sistemas mediante el software de Matlab, la estimación de la función de trasferencia de la planta del lazo de control FT535 es:

$$G_{P535}(s) = \frac{0.045706}{s^2 + 0.3472 + 0.0304}$$

3.4.1.3. Modelamiento de la planta de temperatura 511.

El actuador del lazo de temperatura 511 presenta solo dos posiciones apagado o encendido, razón por la cual no es necesario realizar el modelamiento de la planta de temperatura para el desarrollo de la técnica de control On-off con histéresis descrito en el apartado 3.4.5.

Sin embargo, para el diseño de la estrategia de control por rango partido es necesario desarrollar el modelamiento del lazo de temperatura cuando la planta se encuentre en el proceso de calentamiento y en el proceso de enfriamiento.

3.4.1.4. Modelamiento de la planta del lazo de nivel 541.

Para el modelamiento de la planta de nivel de la estación el subsistema debe estar en lazo abierto y la electroválvula V500 activada; posteriormente se analiza el valor mínimo de PWM para la bomba DC P1 que permita mantener el nivel de agua del reservorio B1 estable y se realiza distintos estímulos a la entrada de la planta. Se consideró como entrada para el modelamiento a la bomba centrifuga DC PUMP P1 y como salida al transmisor LT541 como se observa en el diagrama de la Figura 42.

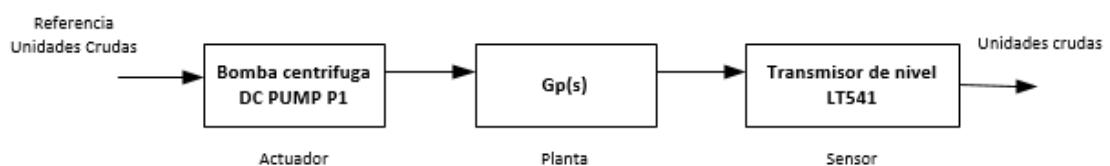


Figura 42. Lazo abierto del subsistema de nivel 541

Las especificaciones de operación de los elementos del subsistema se detallan en el apartado 2.1.1; considerando las especificaciones y los valores mínimos para mantener el nivel en el reservorio B1, se procedió a realizar distintos estímulos como se explica en el literal 3.4.1.1, mediante el software de matlab la estimación de la función de trasferencia de la planta del lazo de nivel 541 es:

$$G_{P541}(s) = \frac{0.002188}{s^2 + 0.4955 + 0.0014}$$

3.4.1.5. Modelamiento planta de temperatura proceso de calentamiento.

Anteriormente se explicó porque no es necesario realizar el modelamiento de la planta de temperatura del lazo 511 cuando el actuador es de dos posiciones; si bien es correcta dicha afirmación existe otra posibilidad de utilizar el actuador (niquelina), aprovechando los recursos que ofrece el lenguaje de programación FBD y mediante la instrucción SRTP (Tiempo Proporcional de Rango Partido) se convierte al actuador ON/OFF en un equivalente proporcional, y mediante la instrucción SRTP permite controlar el tiempo de encendido y de apagado de la niquelina, en el literal 3.6.1 se explica detalladamente el uso de la instrucción, razón por la cual es necesario realizar el modelamiento del sistema.

Para el modelamiento de la planta de temperatura en el proceso de calentamiento, el subsistema debe estar en lazo abierto y la altura del nivel de agua debe sobrepasar el interruptor de nivel LS542; posteriormente se analiza la temperatura ambiente del agua del reservorio B1 y se procede a tomar las muestras del proceso. Se consideró como entrada para el modelamiento a la niquelina y como salida al transmisor TT511 como se observa en el diagrama de la Figura 43.

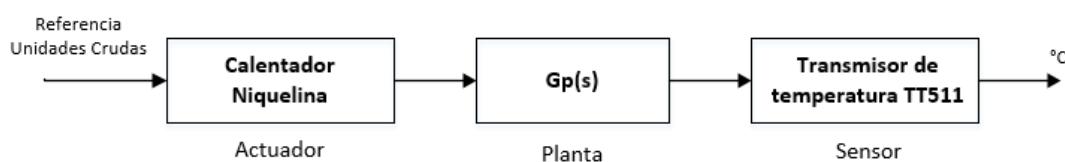


Figura 43. Lazo abierto del subsistema de temperatura, calentamiento.

Realizando los pasos explicados en el literal 3.4.1.1, modelamiento de sistemas mediante el software de Matlab, la estimación de la función de trasferencia de la planta del lazo de temperatura acción de calentamiento es:

$$G_{P511_calentar}(s) = \frac{0.002188}{s^2 + 0.4955 + 0.0014}$$

3.4.1.6. Modelamiento planta de temperatura proceso de enfriamiento.

En el desarrollo de la estrategia de rango partido es necesario obtener la planta de temperatura cuando se encuentra tanto en el proceso de calentamiento como de enfriamiento, para este último proceso es necesario la apertura de la electroválvula V515 para que el flujo ingrese a la etapa de enfriamiento.

Para el modelamiento de la planta de temperatura en el proceso de enfriamiento, el subsistema debe estar en lazo abierto y la altura del nivel de agua debe sobrepasar el interruptor de nivel LS542; posteriormente se analiza la temperatura ambiente del agua del reservorio B1 y se procede a tomar las muestras del proceso. Se consideró como entrada para el modelamiento a la bomba DC P1 y como salida al transmisor TT511 como se observa en el diagrama de la Figura 44.

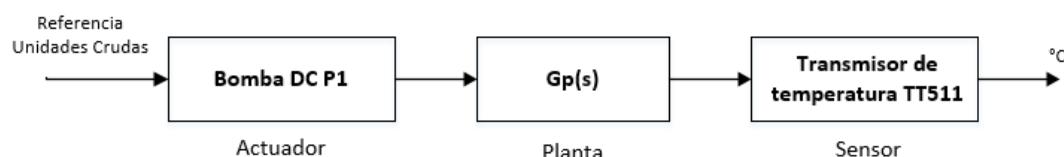


Figura 44. Lazo abierto del subsistema de temperatura, enfriamiento.

Realizando los pasos explicados en el literal 3.4.1.1, modelamiento de sistemas mediante el software de Matlab, la estimación de la función de trasferencia de la planta del lazo de temperatura acción de enfriamiento es:

$$G_{P511_enfriamiento}(s) = \frac{7.76 * 10^{-6}}{s (s + 0.05936) (s + 0.06132)}$$

3.4.2. Algoritmo de control del lazo de flujo 531

3.4.2.1. Especificaciones técnicas del algoritmo de control.

Una vez realizado el modelamiento de cada lazo de control, se desarrolla un algoritmo que permite controlador el flujo que atraviesa por el lazo de control 531, en la Figura 45 se observa el diagrama de control, a continuación, se detalla las especificaciones técnicas para el diseño del algoritmo de control.

Rango de flujo de control (SP): 4.5 L/min a 7 L/min.

Rango de flujo del proceso (Span): 2.5 L /min.

Alarma alta de control: 0.3 L/min sobre el valor del SP.

Alarma baja de control: 0.3 L/min bajo el valor del SP.

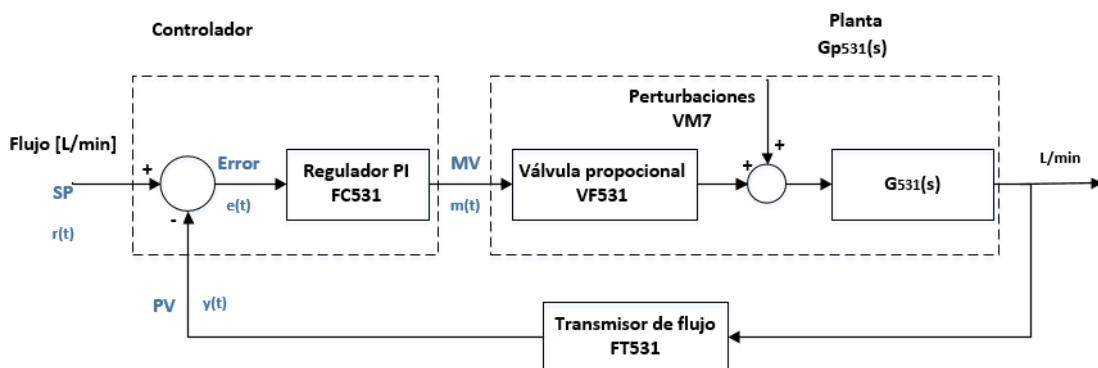


Figura 45. Diagrama de control para el lazo de flujo 531

Siendo:

SP: Set Point

r(t): Señal de referencia

PV: Variable del proceso

y(t): Señal de salida

MV: Variable manipulada

m(t): Señal de control

Error: SP-PV

3.4.2.2. Técnica de control a implementarse.

La técnica de control que se determinó para el lazo 531 es la acción de control proporcional integral (PI), debido a que el principal requerimiento es tener un error en estado estacionario que tienda a cero y un control del sobre impulso, por consiguiente, dicha técnica es la más apropiada para el proceso.

No se eligió implementar la acción derivativa del controlador PID debido a que el lazo de control de flujo 531 presenta perturbaciones frecuentes de pequeña magnitud debido a turbulencias y vibraciones en el lazo, esto induciría que la acción derivativa trate de anticiparse a dichas perturbaciones (errores) e introduzca una acción de control, provocando una amplificación de las señales de ruido y saturación en el actuador, lo que resultara inadecuado para el lazo de control de flujo 531.

3.4.2.3. Diseño del algoritmo de control PI para el lazo de Flujo 531.

Una vez seleccionada la lógica de control a implementarse se procedió a diseñar el regulador PI, partiendo de su función de transferencia. El diseño se basa en el dominio de la frecuencia, utilizando como referencia el diagrama de bode del controlador de atraso de fase.

$$G_c(s) = K_c + \frac{K_i}{s}$$

$$G_c(jw_1) = K_c + \frac{K_i}{jw_1} \quad (3.1)$$

“El objetivo del controlador es mover el cruce de ganancia a la frecuencia donde el margen de fase deseado se realice, manteniendo la curva de fase relativa sin cambio en la nueva ganancia de cruce.” (Kuo, 1996, pág. 773).

El diagrama de bode representa la función de transferencia en función de la frecuencia, las medidas de estabilidad relativa del margen de ganancia y margen de fase como se observa en la Figura 46.

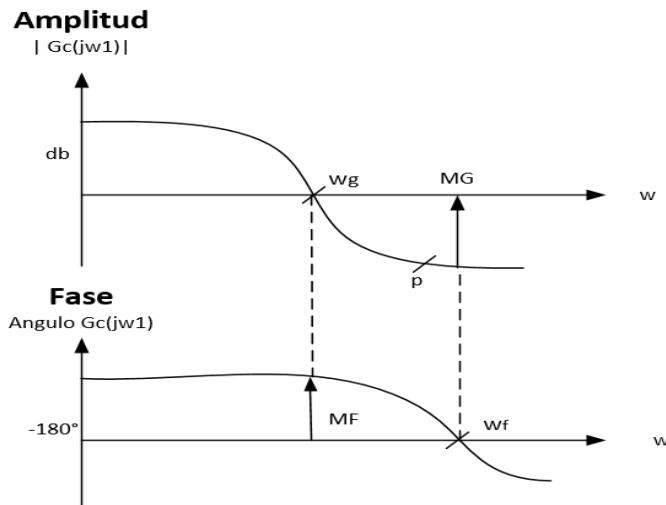


Figura 46. Diagrama de Bode para el diseño de un regulador.

Siendo:

MP: Sobre impulso

MG: Margen de ganancia

MF: Margen de fase

ϵ : Épsilon

w_g : Frecuencia de cruce de ganancia

w_f : Frecuencia de cruce de fase

w_1 : Nueva frecuencia de cruce de ganancia (punto p)

T_s : Tiempo de estabilidad

Para que el sistema sea estable se debe cumplir las siguientes ecuaciones:

$$w_g < w_f \quad (3.2)$$

$$w_g = \frac{8}{T_s * \tan(MF)} \quad (3.3)$$

En el diseño del algoritmo de control en primera instancia se detalla las especificaciones del sobre impulso y el tiempo de estabilidad que se desea lograr para el control del proceso, además se especifica los requerimientos de estabilidad para el proceso, a continuación, se describen los pasos para el diseño mediante el dominio de la frecuencia.

- Especificaciones de diseño del regulador PI

$$M_p \leq 10\%$$

$$T_o = 25 \text{ s}$$

$$T_s \leq 20 \text{ s}$$

Siendo:

M_p : Sobreimpulso

T_o : Tiempo de estabilidad de la planta en lazo abierto

T_s : Tiempo de estabilidad del sistema controlado.

- Requerimiento de estabilidad de sistemas de control

$$MF \approx 100 \varepsilon \quad (3.4)$$

$$w_g < w_1 \quad (3.5)$$

1. Se procede a calcular el margen de fase deseado y la frecuencia de cruce de ganancia a partir de las especificaciones de diseño

$$MP = 100 e^{\frac{-\pi\varepsilon}{\sqrt{1-\varepsilon^2}}} \quad (3.6)$$

$$\% MP \leq 10\%$$

$$10 \leq 100 e^{\frac{-\pi\varepsilon}{\sqrt{1-\varepsilon^2}}} \quad (3.7)$$

$$\varepsilon > 0.6$$

$$MF \geq 60$$

$$\mathbf{MF \approx 70}$$

Al resolver la ecuación 3.5 y 3.3 obtenemos:

$$w_1 > \frac{8}{T_s * \tan(MF)} \quad (3.8)$$

$$w_1 > 0.14$$

$$w_1 \approx 0.2 \text{ rad/s}$$

2. Se localiza en las trazas de bode, la frecuencia en la que se obtiene el margen de fase deseado a partir de la frecuencia de cruce de ganancia w_1 , como se observa en la Figura 47.

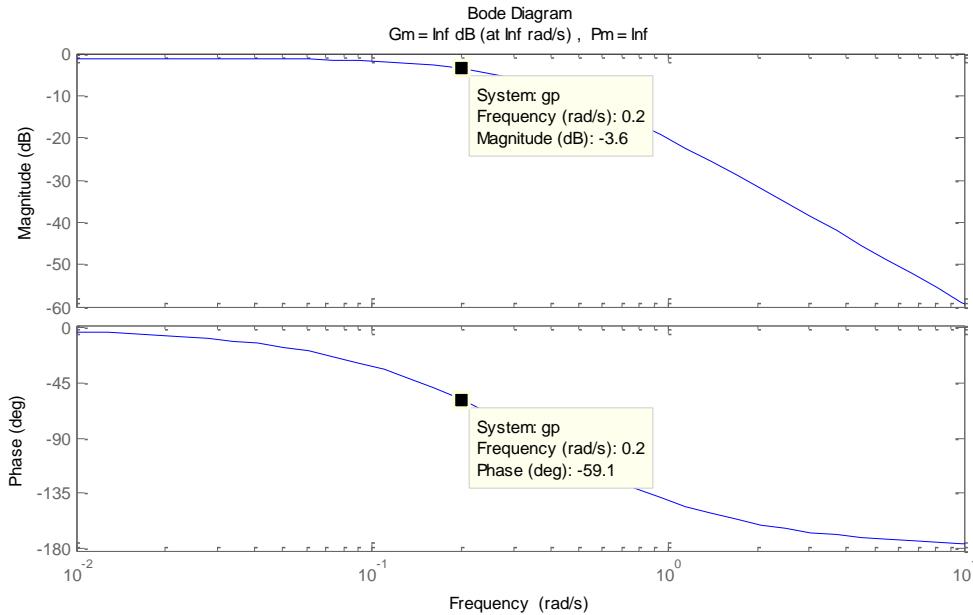


Figura 47. Diagrama de bode del lazo de control 531

3. Mediante el comando de *bode* en Matlab, utilizando la función de transferencia de la planta y frecuencia de cruce da ganancia “[G,Q]=bode(gp,w1)”, determinamos el valor de la ganancia del módulo y del ángulo que debería tener la planta a partir de la frecuencia de corte de ganancia calculada anteriormente.

Considerando:

$$G_p = |G_p(jw_1)|$$

$$\varphi_p = \angle G_p(jw_1)$$

Obtenemos como resultado:

$$G_p = 0.6617$$

$$\varphi_p = -58.95^\circ$$

4. El Punto p ($w=0.2$ rad/s) en la Figura 47 representa la ganancia que debe tener la planta para llevar a la curva de magnitud hacia 0 dB en la nueva frecuencia de cruce de ganancia, el controlador debe proveer la cantidad de atenuación igual a la curva de magnitud en w_1 .

$$20 \log|G_p(jw_1)| + 20 \log|G_p(jw_1)| = 0 \text{ dB}$$

$$p = 20 \log|G(jw_1)| \text{ dB} \quad (3.9)$$

$$p = 20 \log(0.6617) \text{ dB}$$

$$\mathbf{p = -3.58}$$

5. Se calcula el desplazamiento de la fase en la frecuencia de cruce de ganancia hasta llegar al margen de fase deseado de acuerdo a la Figura 48.

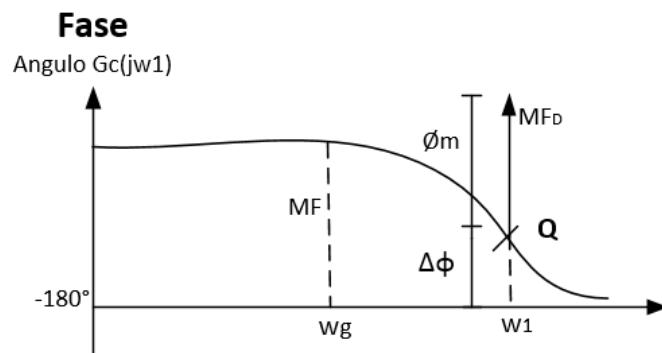


Figura 48. Desplazamiento de la fase

$$\Delta\phi = Q - (-180) \quad (3.10)$$

$$\Delta\phi = -58.95 + 180 = 121.05^\circ$$

$$\phi_m = M_{F_D} - \Delta\phi \quad (3.11)$$

$$\phi_m = 70^\circ - 121.05^\circ = -51.05^\circ$$

$$\phi_m = -0.89 \text{ rad/seg}$$

6. Determinar las constantes del regulador PI

$$\log|G_c(jw_1)| + 20 \log|G_p(jw_1)| = 0$$

$$20 \log|G_c(jw_1)| = -20 \log|G_p(jw_1)|$$

$$|G_c(jw_1)| = \frac{1}{|G_p(jw_1)|} \quad (3.12)$$

Siendo:

$$\begin{aligned} G_c(jw_1) &= |G_c(jw_1)| * (\cos \phi_m + j \sin \phi_m) \\ G_c(jw_1) &= \frac{1}{|G_p(jw_1)|} * (\cos \phi_m + j \sin \phi_m) \end{aligned} \quad (3.13)$$

Igualando las ecuaciones 3.1 y 3.13:

$$\begin{aligned} \frac{\cos \phi_m}{|G_p(jw_1)|} + \frac{j \sin \phi_m}{|G_p(jw_1)|} &= K_c + \frac{K_i}{jw_1} \\ K_c &= \frac{\cos(\phi_m)}{|G_p(jw_1)|} \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$\mathbf{Kc = 0.9}$$

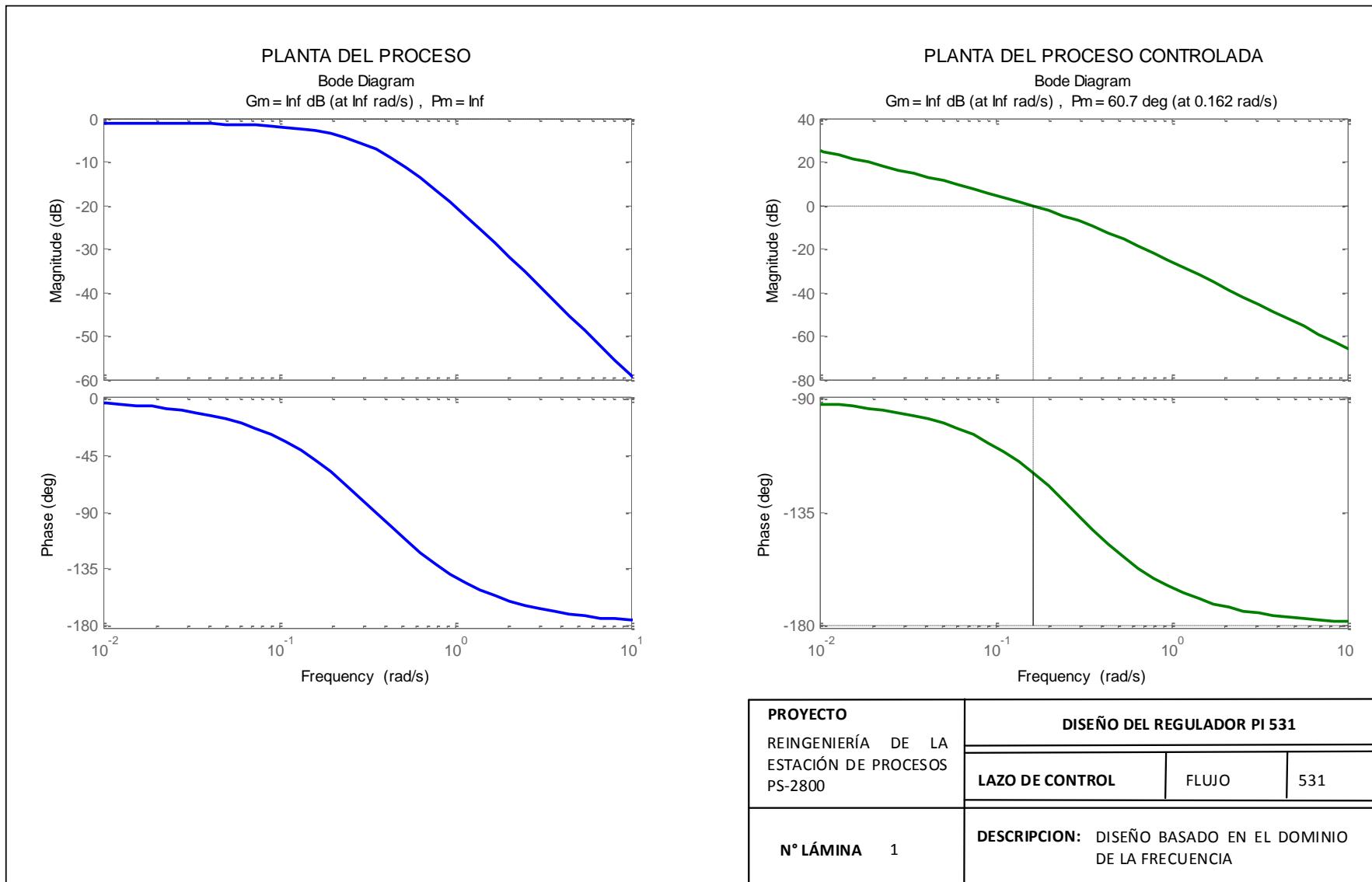
$$K_i = \frac{-w_1 * \sin(\phi_m)}{|G_p(jw_1)|} \quad (3.15)$$

$$\mathbf{Ki = 0.23 \left[\frac{1}{seg} \right]}$$

- Parámetros sintonizados del regulador PI del lazo 531 en el controlador:

$$K_c = 0.25$$

$$K_i = 0.2 \left[\frac{1}{seg} \right] = 12 \left[\frac{1}{min} \right]$$



3.4.3. Algoritmo de control del lazo de flujo 535

3.4.3.1. Especificaciones técnicas del algoritmo de control.

Los elementos del lazo de control 535 de la estación PS-2800 presentan las siguientes especificaciones técnicas para el desarrollo del algoritmo de control, en la Figura 49 se observa el diagrama de control para el lazo de flujo 535.

Rango de flujo de control (SP): 12 L/min a 6 L/min.

Rango de flujo del proceso (Span): 6 L/min.

Alarma alta de control: 0.3 L/min sobre el valor del SP.

Alarma baja de control: 0.3 L/min bajo el valor del SP

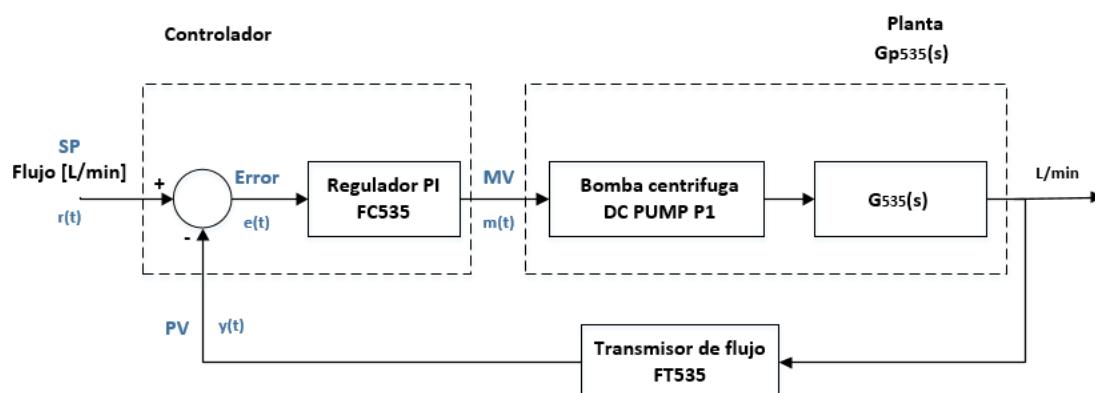


Figura 49. Diagrama de control para el lazo de flujo 535

3.4.3.2. Técnica de control a implementarse.

Se eligió la acción de control proporcional integral debido a que el flujo es la variable involucrada en el proceso del lazo de control 535, en el literal 3.4.2.2 se detalla la justificación de elegir la acción de control PI para procesos de flujo.

Para el diseño del regulador PI se sigue los pasos explicados anteriormente en el literal 3.4.2.3, partiendo de las especificaciones de diseño para calcular el margen de fase deseado y la frecuencia de cruce de ganancia.

$$G_c(jw_1) = K_c + \frac{K_i}{jw_1}$$

3.4.3.3. Diseño del algoritmo de control PI para el lazo de Flujo 535.

- Especificaciones de diseño del regulador:

$$M_p \leq 10\%$$

$$T_o = 45 \text{ s}$$

$$T_s \leq 40 \text{ s}$$

En primera instancia se resuelve las ecuaciones 3.6 y 3.8 a partir de las especificaciones de diseño.

$$10 \leq 100e^{\frac{-\pi\varepsilon}{\sqrt{1-\varepsilon^2}}}$$

$$\varepsilon > 0.6$$

$$MF \geq 60$$

$$\mathbf{MF \approx 70}$$

$$w_1 > \frac{8}{T_s * \tan(MF)}$$

$$w_1 > 0.072$$

$$\mathbf{w_1 \approx 0.08 \text{ rad/s}}$$

Se selecciona en la traza de bode, la frecuencia de cruce de ganancia como se observa en la Figura 50 y se determina el valor de la ganancia del módulo y del ángulo que debería tener la planta en función de la frecuencia de cruce de ganancia.

$$G_p = |G_p(jw_1)| = 1.24$$

$$\varphi_p = \angle G_p(jw_1) = -49.17$$

Se determina el desplazamiento de la fase en la frecuencia de cruce de ganancia hasta llegar al margen de fase deseado mediante las ecuaciones 3.10 y 3.11.

$$\Delta\phi = Q - (-180)$$

$$\Delta\phi = -49.17 + 180 = 130.8^\circ$$

$$\phi_m = M F_D - \Delta\phi$$

$$\phi_m = 70 - 130.8^\circ = -89.2^\circ$$

$$\phi_m = -1.06 \text{ rad/seg}$$

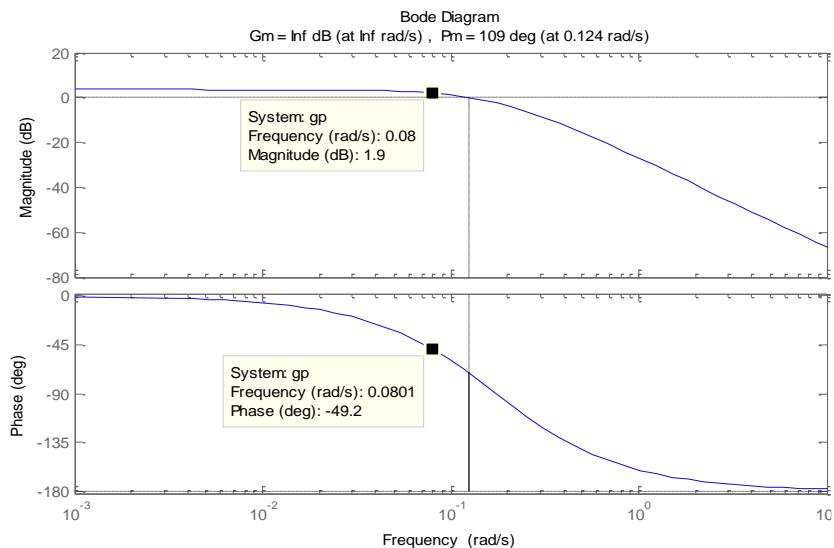


Figura 50. Diagrama de bode del lazo de control 535

Se calcula las constantes del regulador PI, mediante las ecuaciones 3.14 y 3.15.

$$K_c = \frac{\cos(\phi_m)}{|G_p(jw_1)|}$$

$$\mathbf{K_c = 0.4}$$

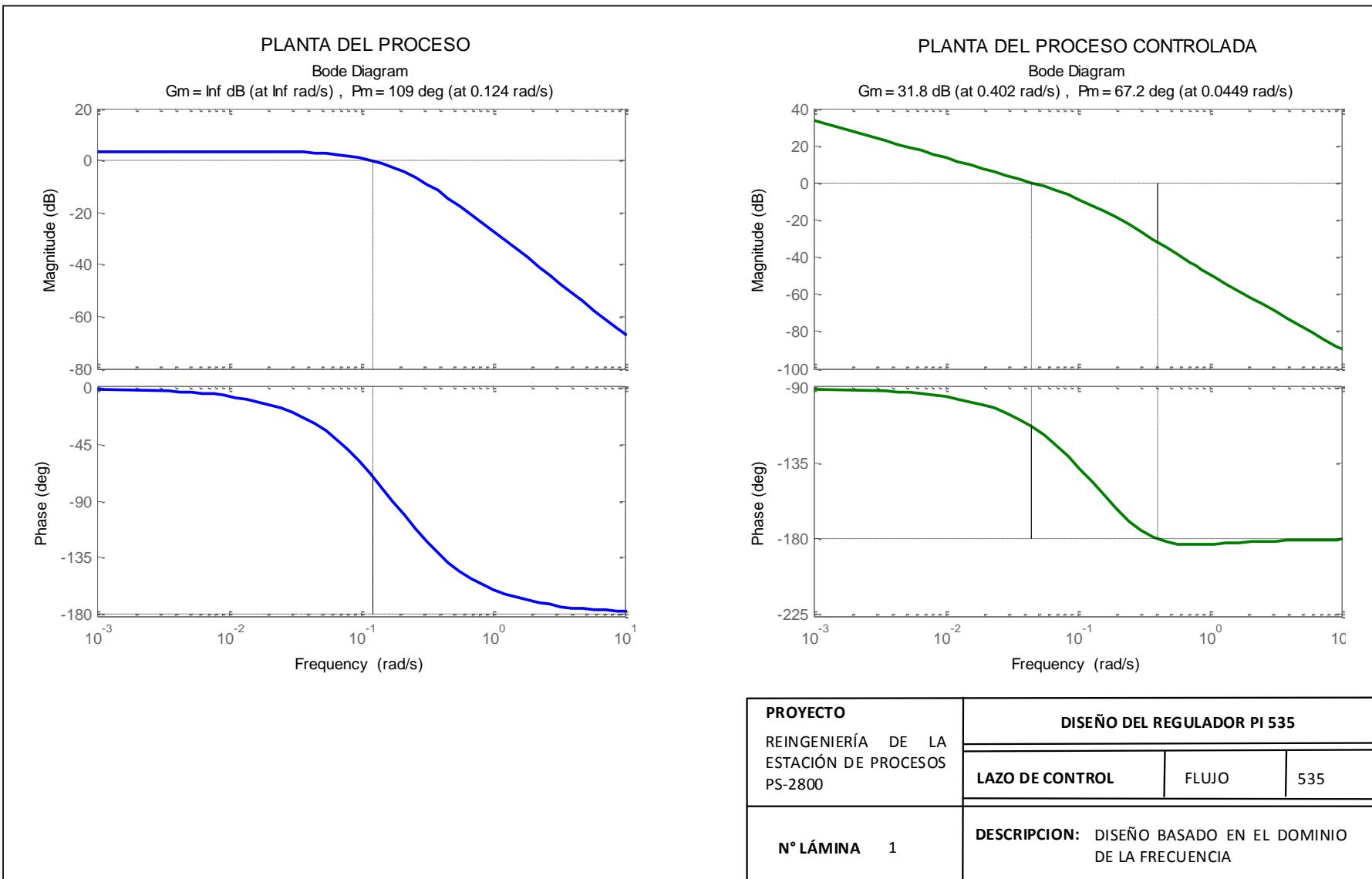
$$K_i = \frac{-w_1 * \sin(\phi_m)}{|G_p(jw_1)|}$$

$$\mathbf{K_i = 0.06 \left[\frac{1}{\text{seg}} \right]}$$

- Parámetros sintonizados del regulador PI del lazo 535 en el controlador:

$$K_c = 0.25$$

$$K_i = 0.135 \left[\frac{1}{\text{seg}} \right] = 8 \left[\frac{1}{\text{min}} \right]$$



3.4.4. Algoritmo de control del lazo de nivel 541

3.4.4.1. Especificaciones técnicas del algoritmo de control.

El lazo de control 541 la estación PS-2800 presenta las siguientes especificaciones técnicas para el desarrollo del algoritmo de control, además en la Figura 51 se observa el diagrama de control para el lazo de nivel.

Rango de nivel de control (SP): 9 cm a 23 cm

Rango de nivel del proceso (Span): 14 cm

Alarma alta de control: 0.2 cm sobre el valor del SP.

Alarma baja de control: 0.2 cm bajo el valor del SP.

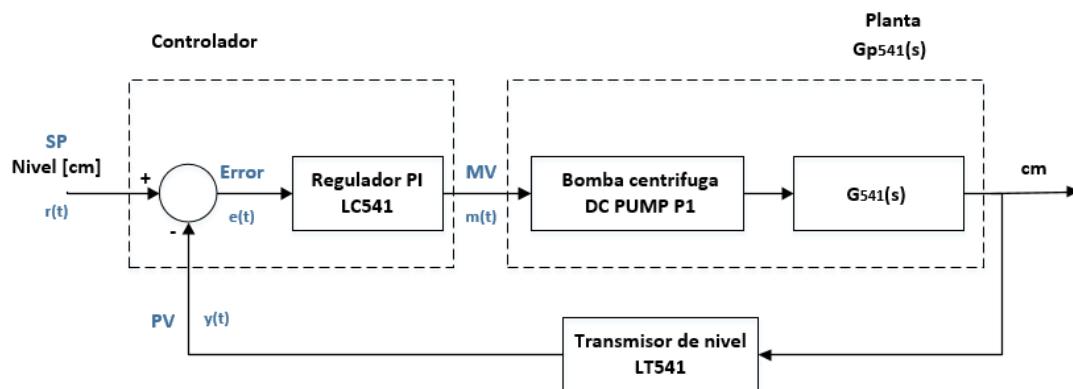


Figura 51. Diagrama de control para el lazo de nivel 541

3.4.4.2. Lógica de Control a implementarse

Se utilizó en el lazo de control de nivel un regulador PI, con una ganancia proporcional alta, debido a que se busca una respuesta rápida cuando el nivel del tanque no se encuentre en el valor de referencia, además se incluyó la acción de control integral para obtener un error en estado estacionario que tienda a cero, ya que la acción integral busca corregir los errores pequeños y en función del signo del error la señal de control será creciente o decreciente.

Se planeaba utilizar la acción de control derivativa para proporcionar sensibilidad al control y permite corregir al error en función de la velocidad de cambio, pero debido a la característica de la planta se determinó que no es viable añadir la acción derivativa al regulador.

3.4.4.3. Diseño del algoritmo de control PI para el lazo de Nivel 541

Una vez seleccionada la lógica de control a implementarse se procede a diseñar el regulador PI, partiendo de su función de transferencia. Para el diseño del regulador se sigue los pasos explicados anteriormente en el literal 3.4.2.3, iniciando con las especificaciones de diseño para calcular el margen de fase deseado y la frecuencia de cruce de ganancia.

$$G_c(j\omega_1) = K_c + \frac{K_i}{j\omega_1}$$

El tiempo de estabilidad que se seleccionó para el diseño es de 500 segundos, ya que es el tiempo aproximado que se demora la planta hasta alcanzar el máximo nivel controlado, mediante el máximo valor de la variable manipulada.

- Especificaciones de diseño del regulador:

$$M_p \leq 10\%$$

$$T_O = 800 \text{ s}$$

$$T_s \leq 500 \text{ s}$$

Se resuelve las ecuaciones 3.6 y 3.8 a partir de las especificaciones de diseño.

$$10 \leq 100e^{\frac{-\pi\varepsilon}{\sqrt{1-\varepsilon^2}}}$$

$$\varepsilon > 0.6$$

$$MF \geq 60$$

$$MF \approx 70$$

$$w_1 > \frac{8}{T_s * \tan(MF)}$$

$$w_1 > 0.0058$$

$$w_1 \approx 0.02 \text{ rad/s}$$

Se selecciona en la traza de bode, la frecuencia de cruce de ganancia como se observa en la Figura 52 y se determina el valor de la ganancia del módulo y del ángulo que debería tener la planta en función de la frecuencia de cruce de ganancia.

$$G_p = |G_p(jw_1)| = 0.22$$

$$\varphi_p = \angle G_p(jw_1) = -84.23$$

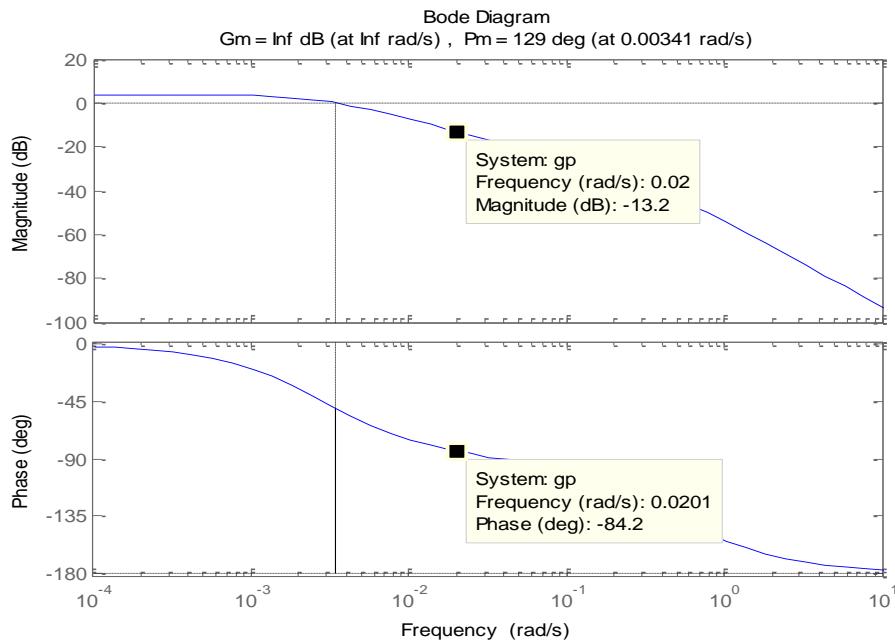


Figura 52. Diagrama de bode del lazo de control 541

Se determina el desplazamiento de la fase en la frecuencia de cruce de ganancia hasta llegar al margen de fase deseado mediante las ecuaciones 3.10 y 3.11.

$$\Delta\phi = Q - (-180)$$

$$\Delta\phi = -84.23 + 180 = 95.77^\circ$$

$$\begin{aligned}\phi_m &= MF_D - \Delta\phi \\ \phi_m &= 70 - 95.77^\circ = -25.77^\circ \\ \phi_m &= -0.45 \text{ rad/seg}\end{aligned}$$

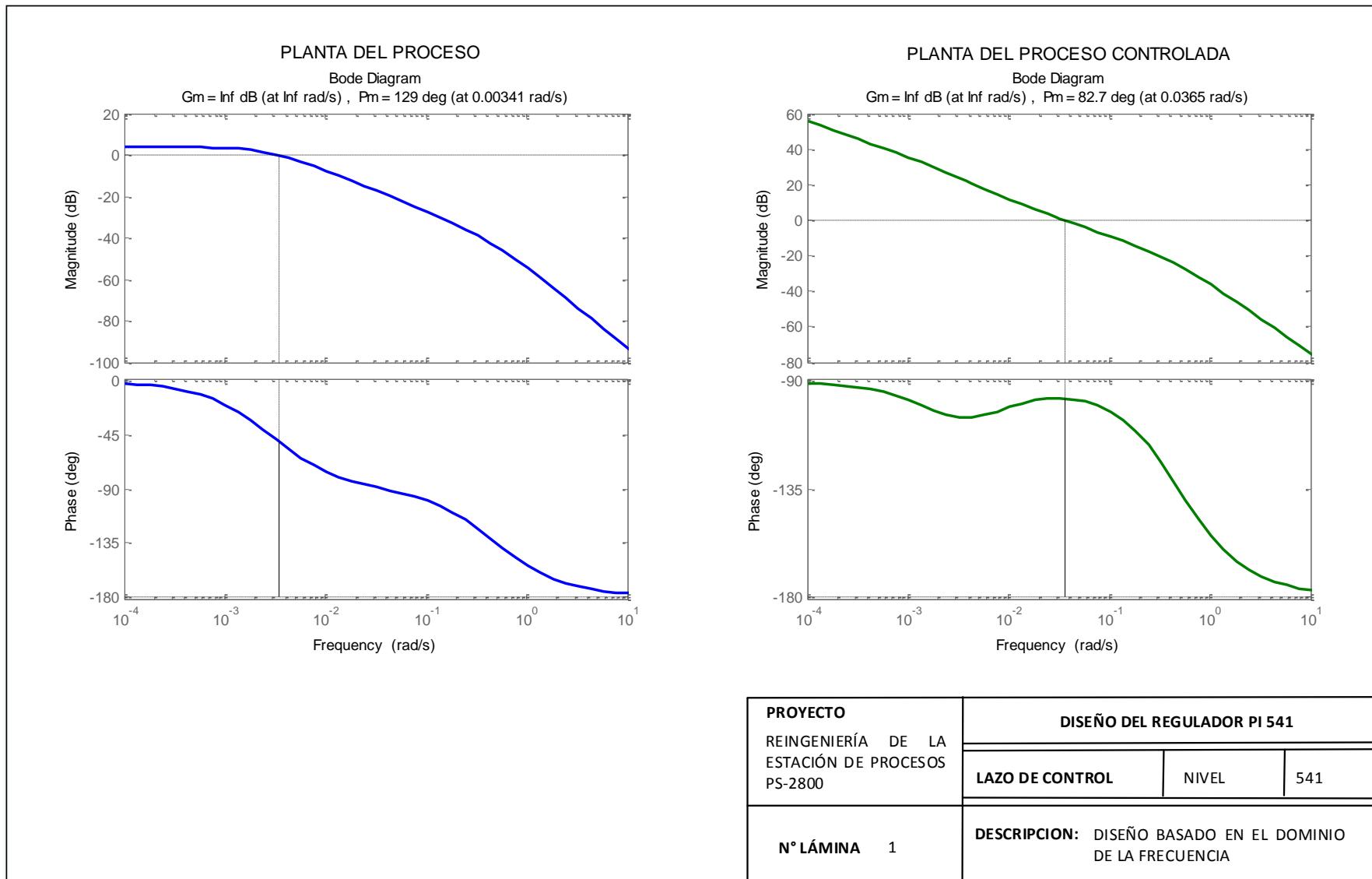
Se calcula las constantes del regulador PI, mediante las ecuaciones 3.14 y 3.15:

$$\begin{aligned}G_c(jw_1) &= K_c + \frac{K_i}{jw_1} + K_d * jw_1 \\ K_c &= \frac{\cos(\phi_m)}{|G_p(jw_1)|} \\ \mathbf{Kc} &= \mathbf{4.09}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}K_i &= \frac{-w_1 * \sin(\phi_m)}{|G_p(jw_1)|} \\ \mathbf{Ki} &= \mathbf{0.04} \left[\frac{1}{\text{seg}} \right]\end{aligned}$$

- Parámetros sintonizados del regulador PI del lazo 541 en el controlador:

$$\begin{aligned}K_c &= 10 \\ K_i &= 0.15 \left[\frac{1}{\text{seg}} \right] = 9 \left[\frac{1}{\text{min}} \right] \\ K_d &= 0 [\text{min}]\end{aligned}$$



3.4.5. Algoritmo de control del lazo de temperatura 511 con actuador On/Off

3.4.5.1. Especificaciones técnicas del algoritmo de control.

El lazo de control 511 la estación PS-2800 presenta las siguientes especificaciones técnicas para el desarrollo del algoritmo de control, en la Figura 53 se observa el diagrama de control para el lazo de temperatura.

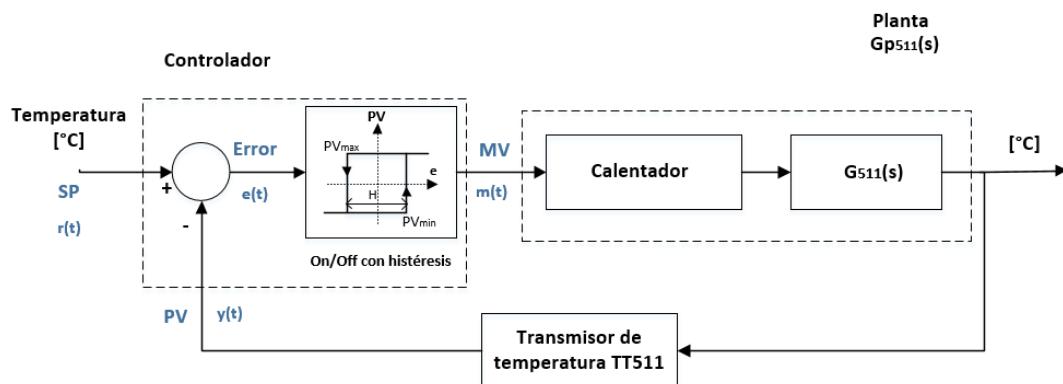


Figura 53. Diagrama de control para el lazo de temperatura 511

Rango de temperatura de control (SP): 25°C a 50°C

Rango de temperatura del proceso (Span): 25°C

Alarma alta de control: 0.2°C sobre el valor del SP.

Alarma baja de control: 0.2°C bajo el valor del SP.

3.4.5.2. Técnica de control a implementarse.

Se escogió la técnica de control On-off con histéresis debido a que el subsistema de temperatura presenta un comportamiento lento y el actuador es solo de dos posiciones apagado o encendido, es decir máxima salida o mínima salida.

Los sistemas que presentan “magnitudes continuas en su entrada, y de tipo lógico en su salida, generalmente realizan su control mediante funciones de comparación, es decir comparando una magnitud de consigna con una de realimentación” (Balcells & Romeral, 1997, p.60).

La histéresis que se añade a la técnica de control On-off básico permite que no se desgaste los contactos del calentador, ya que la comutación sería muy rápida debido a la indefinición que presenta el controlador cuando el error está en los límites cercanos al cero, razón por lo cual es necesaria la incursión de la histéresis (H).

3.4.5.3. Diseño del algoritmo de Control ON-OFF con histéresis.

El funcionamiento de la técnica de control On-off con histéresis se describe gráficamente en la Figura 54, en la cual se visualiza que existe una zona en la que el valor de la variable PV cambia de máxima salida a mínima salida dependiendo del sentido en el que varía el error.

Si el error aumenta positivamente a partir de cero, PV_{\min} cambia a PV_{\max} en el momento en el que el error llegue a un determinado valor; bajo este mismo principio PV_{\max} cambia a PV_{\min} cuando el error disminuya negativamente a partir de cero, hasta alcanzar un determinado valor en el eje negativo del error.

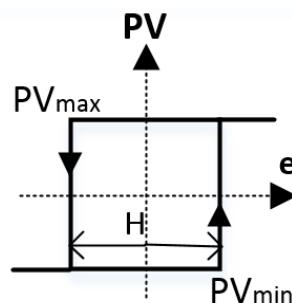


Figura 54. Control On-Off con histéresis

Las ecuaciones 3.16 y 3.17 representan el comportamiento del algoritmo de control, como se puede observar en la Figura 55, la variable manipulada cambia de nivel cuando la variable de proceso supere el valor de la franja de la histéresis, considerando el signo del error mencionado anteriormente. Se considera el valor 0.3°C para la zona de histéresis, el cual fue determinado a través de pruebas experimentales realizadas en el subsistema de temperatura 511.

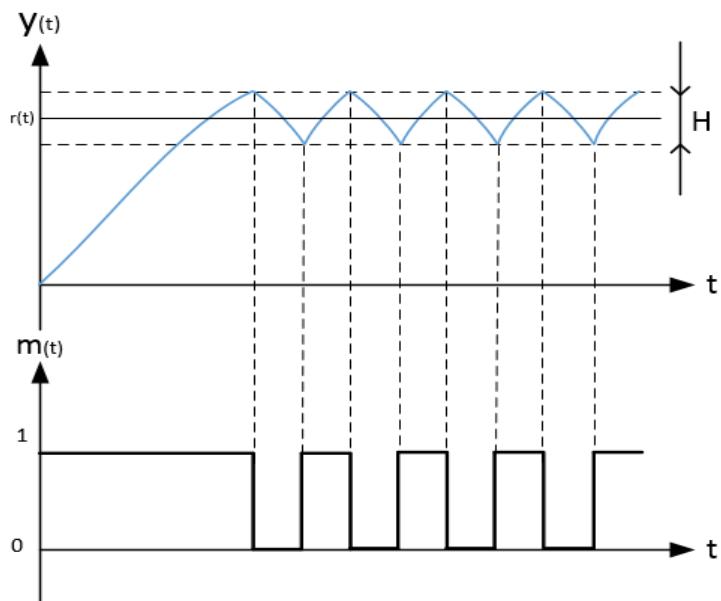


Figura 55. Comportamiento del algoritmo de control On-off con histéresis

$$\text{si: } r(t) > y(t) + \frac{H}{2} \quad (3.16)$$

$$m(t) = 1$$

$$\text{si: } r(t) < y(t) - \frac{H}{2} \quad (3.17)$$

$$m(t) = 0$$

Sin embargo, cuando la variable manipulada $m(t)$ es igual a 1 la niquelina debería permanecer prendida hasta que $m(t)$ cambie a 0, pero debido a que la niquelina luego de cambiar de su estado de encendido a apagado sigue calentando el líquido por un determinado tiempo, provocando que la temperatura siga incrementándose hasta superando la zona de histéresis.

Para solucionar dicho inconveniente se procedió a realizar la modulación del ancho de pulso de la variable manipulada cuando se encuentre activada y dentro de la zona de histéresis, se consideró para el diseño un ciclo de trabajo del 10% y un periodo de 2 segundos, como se visualiza en la Figura 56.

$$DC(\%) = \frac{T}{T} * 100 \quad (3.18)$$

Siendo:

- DC (%): ciclo de trabajo en porcentaje
 T: ancho de pulso de la onda rectangular (segundos)
 T: periodo de la onda rectangular (segundos)

$$10 = \frac{T}{2} * 100$$

$$T = 0.2 \text{ seg}$$

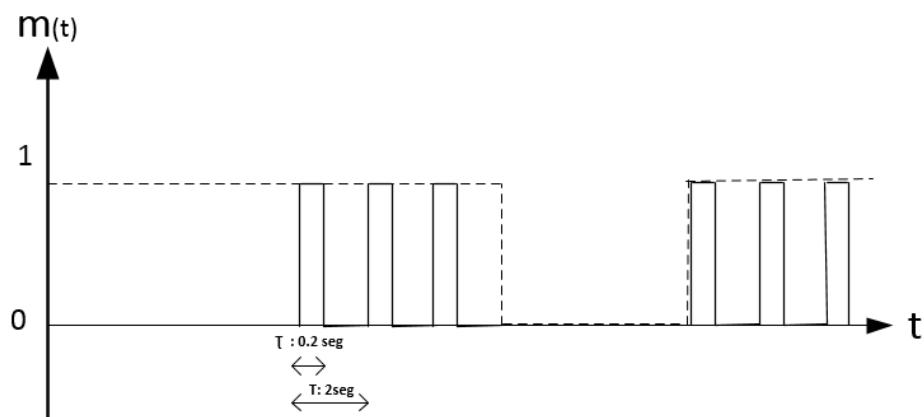


Figura 56. Ancho de pulso de la variable manipulada

3.4.6. Algoritmo de control del lazo de temperatura, proceso de calentamiento

3.4.6.1. Especificaciones técnicas del algoritmo de control.

El lazo de control de temperatura 511 en el proceso de calentamiento presenta las siguientes especificaciones técnicas para el desarrollo del algoritmo de control, además en la Figura 51 se observa el diagrama de control del sistema.

Rango de temperatura de control (SP): 30 °C a 45 °C

Rango de temperatura del proceso (Span): 15 °C

Alarma alta de control: 0.3 °C sobre el valor del SP.

Alarma baja de control: 0.3 °C bajo el valor del SP.

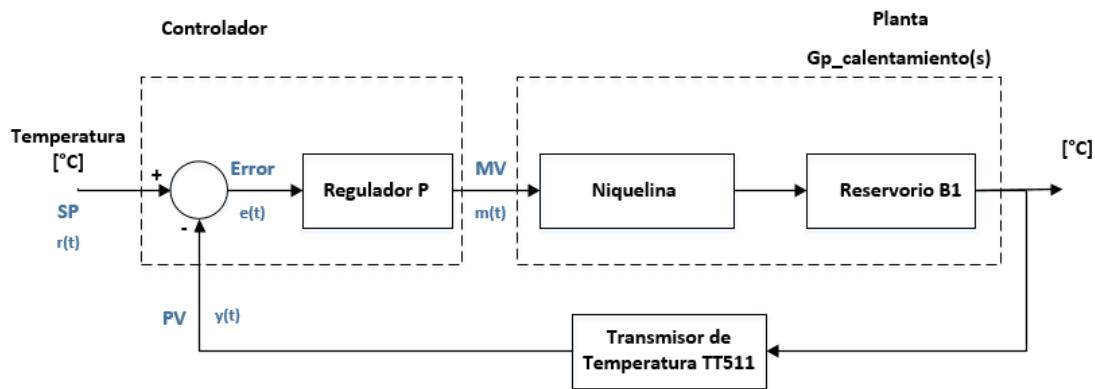


Figura 57. Diagrama de control de lazo 511, proceso de calentamiento

3.4.6.2. Lógica de Control a implementarse

Se utilizó un regulador del tipo P, con una ganancia proporcional alta, debido a que se busca una respuesta rápida cuando la temperatura del agua en el reservorio B1 no se encuentre en el valor de referencia, en este regulador no interesa llegar a un Set Point, solo interesa la respuesta rápida ante la emergencia mencionada anteriormente, razón por la cual se preside de la contaste integral.

3.4.6.3. Diseño del algoritmo de control P para el lazo de temperatura 511

Una vez seleccionada la lógica de control a implementarse se procede a diseñar el regulador proporcional, partiendo de su función de transferencia. Para el diseño del regulador se sigue los pasos explicados en el literal 3.4.2.3, a partir de las especificaciones de diseño para calcular el margen de fase deseado y la frecuencia de cruce de ganancia.

$$G_c(s) = K_c \quad (3.19)$$

- Especificaciones de diseño del regulador:

$$M_p \leq 10\%$$

$$T_0 = 800 \text{ s}$$

$$T_s \leq 600 \text{ s}$$

Se resuelve las ecuaciones 3.6 y 3.8 a partir de las especificaciones de diseño.

$$10 \leq 100e^{\frac{-\pi\varepsilon}{\sqrt{1-\varepsilon^2}}}$$

$$\varepsilon > 0.6$$

$$MF \geq 60$$

$$\mathbf{MF \approx 70}$$

$$w_1 > \frac{8}{T_s * \tan(MF)}$$

$$w_1 > 0.004$$

$$\mathbf{w_1 \approx 0.01 \text{ rad/s}}$$

Se selecciona en la traza de bode, la frecuencia de cruce de ganancia como se observa en la Figura 58 y se determina el valor de la ganancia del módulo y del ángulo que debería tener la planta en función de la frecuencia de cruce de ganancia.

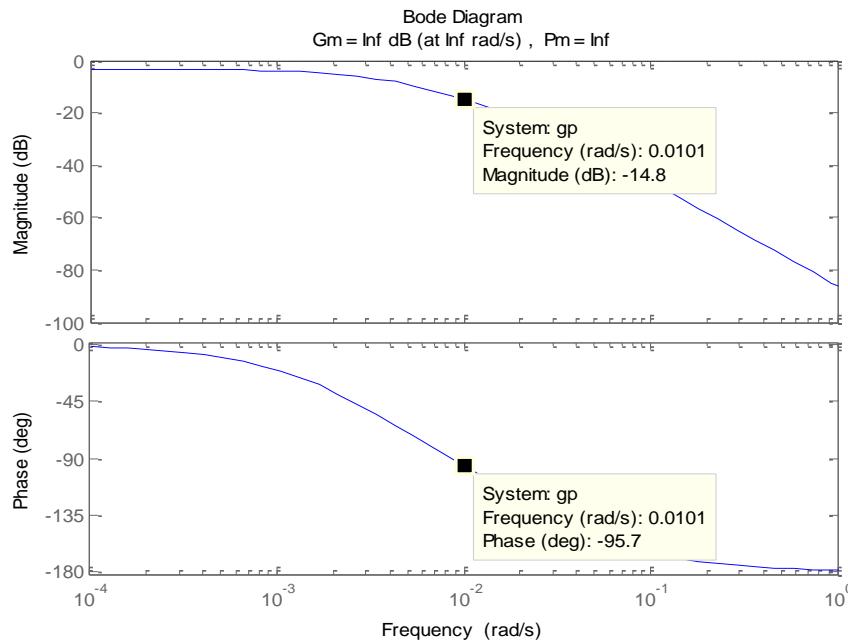


Figura 58. Diagrama de bode planta de temperatura en calentamiento

$$G_p = |G_p(jw_1)| = 0.18$$

$$Q_p = \angle G_p(jw_1) = -95.47$$

Se determina el desplazamiento de la fase en la frecuencia de cruce de ganancia hasta llegar al margen de fase deseado mediante las ecuaciones 3.10 y 3.11.

$$\Delta\phi = Q - (-180)$$

$$\Delta\phi = -95.17 + 180 = 84.83^\circ$$

$$\phi_m = MF_D - \Delta\phi$$

$$\phi_m = 70 - 84.83^\circ = -14.83^\circ$$

$$\phi_m = -0.25 \text{ rad/seg}$$

Se calcula la constante del regulador P, mediante la ecuación 3.14 y 3.19:

$$G_c(jw_1) = K_c$$

$$K_c = \frac{\cos(\phi_m)}{|G_p(jw_1)|}$$

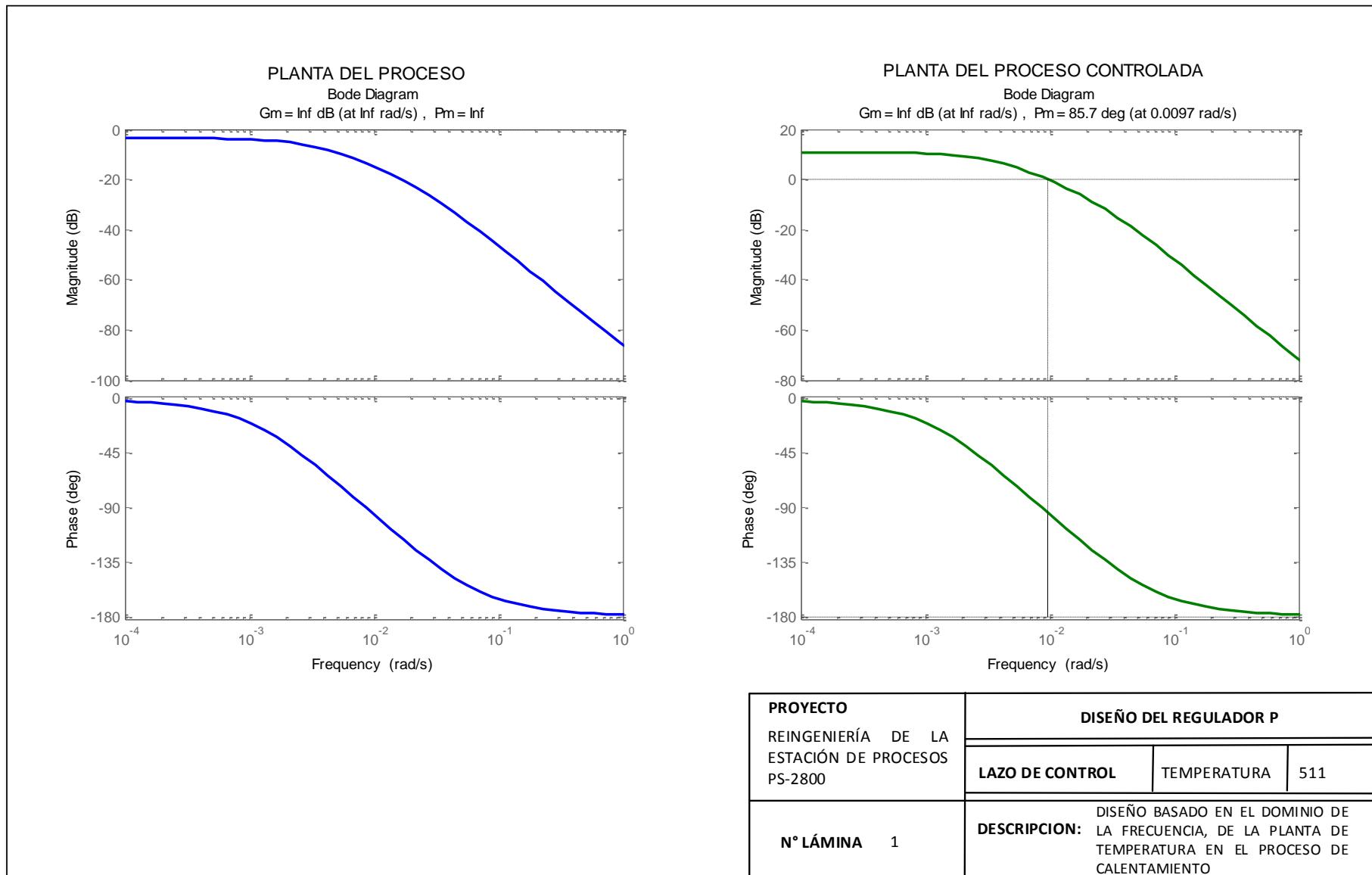
$$\mathbf{Kc = 5.26}$$

- Parámetros sintonizados del regulador P en el controlador del lazo de temperatura 511 en el proceso de calentamiento:

$$K_c = 7$$

$$K_i = 0 \text{ rep/min}$$

$$K_d = 0 \text{ min}$$



3.4.7. Algoritmo de control del lazo de temperatura, proceso de enfriamiento

3.4.7.1. Especificaciones técnicas del algoritmo de control.

El lazo de control de temperatura 511 en el proceso de enfriamiento presenta las siguientes especificaciones técnicas para el desarrollo del algoritmo de control, además en la Figura 51 se observa el diagrama de control del sistema.

Rango de temperatura de control (SP): 30°C a 45°C

Rango de temperatura del proceso (Span): 15°C

Alarma alta de control: 0.3°C sobre el valor del SP.

Alarma baja de control: 0.3°C bajo el valor del SP.

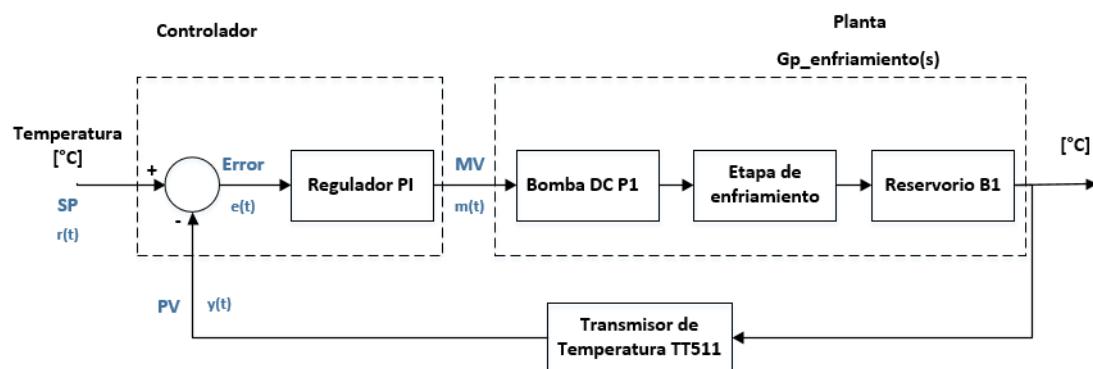


Figura 59. Diagrama de control de lazo 511, proceso de enfriamiento

3.4.7.2. Lógica de Control a implementarse

Se utilizó un regulador del tipo PI, con una ganancia proporcional alta, debido a que se busca una respuesta rápida cuando la temperatura del agua en el reservorio B1 no se encuentre en el valor de referencia, además se añade la constante integral para que el control no tenga cambios muy bruscos, ya que la señal de salida del controlador maneja la variación de PWM para la bomba DC P1.

3.4.7.3. Diseño del algoritmo de Control PI para el lazo de temperatura 511

Una vez seleccionada la lógica de control a implementarse se procede a diseñar el regulador PI, partiendo de su función de transferencia y de las especificaciones de diseño.

$$G_c(s) = K_c + \frac{K_i}{s}$$

- Especificaciones de diseño del regulador:

$$M_p \leq 10\%$$

$$T_0 = 1000 \text{ s}$$

$$T_s \leq 700 \text{ s}$$

Realizando los pasos anteriormente explicados en el literal 3.4.2.3 para el diseño del regulador PI y mediante el software de matlab obtenemos como parámetros los siguientes valores, los cuales son implementados en el controlador del lazo:

$$K_c = 9.1$$

$$K_i = 13.6 \text{ rep/min}$$

$$K_c = 0 \text{ min}$$

3.5. Adaptación de estrategias de control

Las estrategias de control determinan la estructura que siguen las señales en el lazo de control, la jerarquía y el flujo de información que existe en el proceso es determinado por parte del ingeniero de proceso; las estrategias se utilizan con la finalidad de mejorar la estabilidad del sistema y mejorar el desempeño frente a perturbaciones, mediante el uso y combinación de técnicas de control se procede a diseñar las estrategias de control de nivel, flujo y temperatura como parte del proceso de reingeniería de la estación PS-2800.

3.5.1. Control de nivel 541 – Estrategia por cascada

Para el desarrollo de la estrategia de cascada se consideró el lazo de control nivel 541 y el lazo de control de flujo 535; la estrategia permite controlar el nivel de agua en el reservorio B1 en función del flujo que atraviesa por la línea de tubería hacia dicho reservorio, en la Figura 23 se detalla el diagrama P&ID de la estrategia de control.

3.5.1.1. Diseño de la estrategia de control.

La estrategia de control en cascada consta de dos lazos de realimentación, un lazo externo denominado maestro y un lazo interno conocido como esclavo que regula la variable intermedia del proceso, el regulador externo LC541 fija el valor del setpoint del regulador interno FC535. El objetivo de la estrategia es tener un control del proceso más estable y rápido frente a perturbaciones, en la Figura 60 se observa el diagrama de bloques del sistema de control.

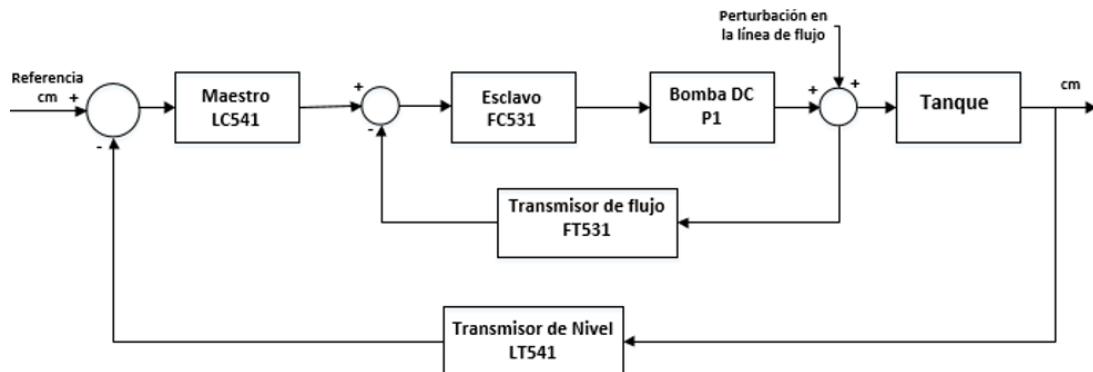


Figura 60. Diagrama de bloques del sistema de control en cascada

Por ejemplo, si suponemos que disminuye de pronto el flujo que bombea DC P1, consecuentemente el flujo que llega al reservorio B1 será menor al que se necesita para mantener el SP del nivel de agua. Con el regulador de nivel PI 541 por retroalimentación simple no se hará ninguna corrección hasta después que el transmisor de nivel LT541 detecte la pérdida de nivel que hubo en el reservorio y actué sobre la bomba P1, de esta forma todo el proceso se ve alertado por la perturbación.

Mediante la estrategia de control en cascada el regulador de flujo FC535 se detecta inmediatamente la disminución de flujo e incrementa la velocidad de bombeo de P1 (PWM) controlando que el flujo vuelva a su valor de referencia, logrando que el nivel del reservorio B1 no se vea afectado por dicha perturbación.

3.5.2. Control de Flujo 531 - Estrategia por razón de flujos

En el desarrollo de la estrategia intervienen los lazos de control de flujo 531 y flujo 535, la estrategia por razón de flujos permite regular la relación que existe entre dos flujos que viajan a través de diferentes líneas de tubería, manipulando solo una corriente de flujo, en la Figura 24 se detalla el diagrama P&ID de la estrategia.

3.5.2.1. Diseño de la estrategia de control.

La estrategia consiste en colocar un setpoint y medir el flujo del proceso del lazo de control 531, mediante la relación establecida se obtiene el valor de setpoint para el control de flujo del lazo 535, el cambio de la variable PV₅₃₁ es directamente proporcional al cambio de flujo del lazo 535 (PV₅₃₅), en la ecuación 3.20 se describe la razón usada entre los dos flujos; además el diagrama de bloques del sistema de control se visualiza en la Figura 61.

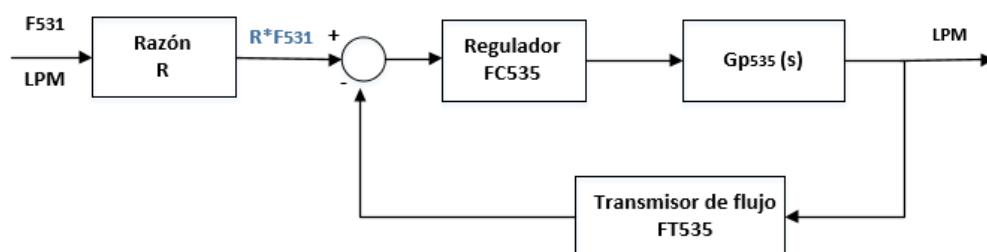


Figura 61. Diagrama de bloques del sistema de control por razón de flujos

$$R = \frac{A}{B} = \frac{\text{Flujo 535}}{\text{Flujo 531}}$$

$$R = \frac{PV_{535}}{PV_{531}} \quad (3.20)$$

Siendo:

- PV₅₃₅: La variable de proceso de lazo de flujo 535
 PV₅₃₁: La variable de proceso de lazo de flujo 5331
 R: La relación o razón entre los dos flujos

En el diseño de la estrategia de control por razón de flujos se consideró los parámetros de control de los reguladores FC531 y FC535, teniendo presente que el valor de la razón es determinado por el operador en un rango establecido por parte de los parámetros de control de cada regulador.

3.5.3. Control de nivel 541 - Estrategia por superposición

En el desarrollo de esta estrategia intervienen el lazo de nivel 541 y el lazo de flujo 535, la estrategia permite mantener un flujo constante a través del lazo 535, mientras el nivel del reservorio B1 se encuentre dentro de un límite establecido, el diagrama de bloques del sistema de control se visualiza en la Figura 62.

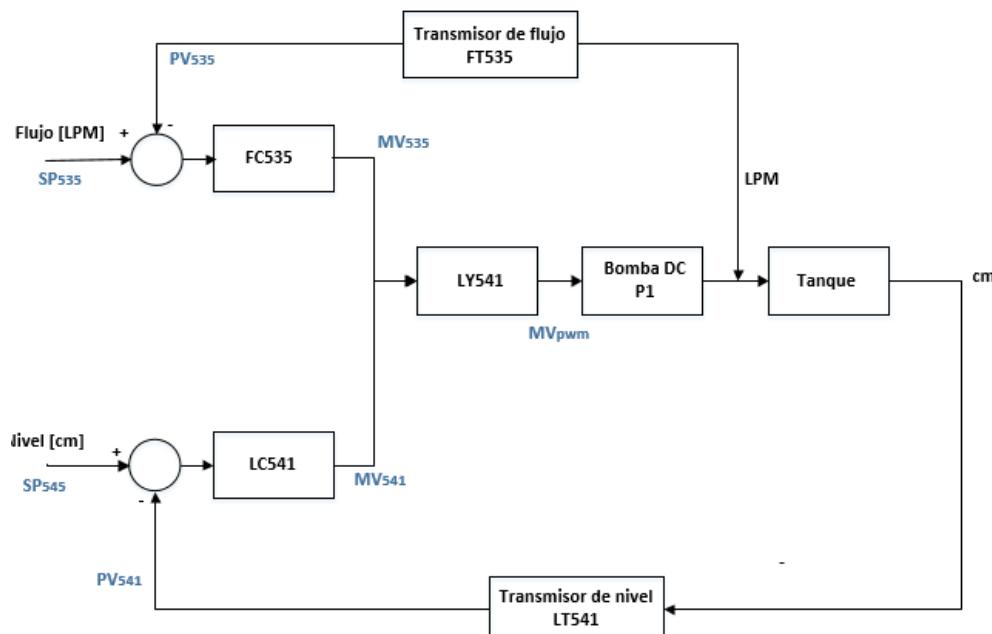


Figura 62. Diagrama de bloques del sistema de control por superposición

El control de nivel mediante la estrategia de control por superposición permite en situaciones reales mantener el nivel de reserva de un tanque en parámetros que eviten que el tanque se quede sin agua, permitiendo que la bomba siga en funcionamiento, en la Figura 25 se detalla el diagrama P&ID de la estrategia.

3.5.3.1. Diseño de la estrategia de control.

La estrategia consiste en establecer dos parámetros de consigna, el setpoint de flujo SP_{535} y el setpoint de nivel SP_{541} , el primer parámetro establece el flujo que debe alcanzar el líquido a través del lazo de 535, es decir la variable PV_{535} , el segundo parámetro establece el nivel de líquido máximo que puede alcanzar el reservorio B1 es decir la variable PV_{541} , adicionalmente se tiene dos controladores FC535 y LC541 que generan dos señales de control que son comparadas por un selector de baja LY541 que escoge la menor señal generada por ambos controladores.

El flujo PV_{535} se mantiene en su consigna establecida SP_{535} hasta que el nivel del tanque PV_{541} alcance su valor de consigna SP_{541} , en ese instante el controlador comuta y asigna como señal de control a la menor señal que se produzca en ambos controladores y esta es enviada como señal de control de la bomba DC P1.

La estrategia responde a la siguiente definición matemática:

$$MV_{\text{pwm}} = \begin{cases} MV_{541}, & \text{si : } MV_{541} < MV_{535} \\ MV_{535}, & \text{si : } MV_{535} < MV_{541} \end{cases}$$

Siendo:

- | | |
|--------------|--|
| PV_{535} : | La variable de proceso de lazo de flujo 535 |
| PV_{541} : | La variable de proceso de lazo de nivel 541 |
| SP_{535} : | La consigna de proceso de lazo de flujo 535 |
| SP_{541} : | La consigna límite en el proceso del lazo de nivel 541 |
| MV_{535} : | La variable manipulada del lazo de flujo 535 |
| MV_{541} : | La variable manipulada del lazo de flujo 541 |

3.5.4. Control de temperatura 511 - Estrategia por rango partido

La estrategia consiste en controlar dos actuadores de la estación simultáneamente el calentador y la bomba DC P1, para conseguir que la temperatura del lazo 511 (PV_{511}) alcance la consigna establecida (SP_{511}), para ello se ha utilizado el control en rango partido, el cual hace que los controladores TC511 y FC535 generen señales de control MV_{511} y MV_{535} de acuerdo a las condiciones de temperatura del proceso, el diagrama de bloques del sistema de control se visualiza en la Figura 63.

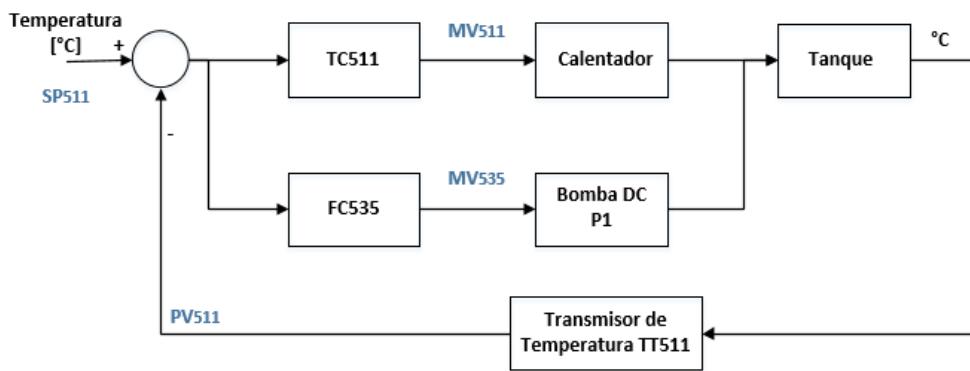


Figura 63. Diagrama de bloques del sistema de control por rango partido

Para el caso del actuador del proceso de temperatura se ha utilizado el concepto de control proporcional de tiempo variable (también conocido como PWM) que consiste en variación el ciclo de trabajo del calentador, esto permite conseguir el efecto de un actuador proporcional a partir de un actuador ON-OFF. El calentador ON-OFF es utilizado para elevar la temperatura del proceso, mientras que la Bomba DC P1 genera un flujo de líquido que hace que la temperatura del proceso desciende proporcionalmente al flujo del lazo (PV_{535}), en la Figura 26 se detalla el diagrama P&ID de la estrategia.

3.5.4.1. Diseño de la estrategia de control.

La estrategia necesita un parámetro de consigna SP_{511} que es utilizado para los actuadores en paralelo, generando un efecto de calentamiento MV_{511} y un efecto de refrigeración MV_{535} en el agua del reservorio B1.

El control de temperatura TC511 recibe la variable de proceso PV₅₁₁ y genera una variable de control MV₅₁₁ que corresponde al ciclo de trabajo del calentador ON-OFF, simultáneamente el controlador FC535 recibe las mismas variables de proceso (SP₅₁₁ y PV₅₁₁) y genera una variable de control para la Bomba DC P1 (MV₅₃₅) que produce un flujo de refrigeración en el tanque.

3.6. Reprogramación del PLC a través de lenguaje FBD

La reprogramación de lazos de control en el PLC se realizó a través del lenguaje FBD que permite una clara visualización del flujo de información entre los diferentes elementos de la estación de procesos, además determina de forma eficiente los datos de entrada y datos de salida en cada bloque de programación, adicionalmente permite el uso de bloques personalizados conocidos como “Add-On instructions” que son funciones creadas a gusto del programador y que pueden reutilizarse en las diferentes rutinas del programa.

Las instrucciones del lenguaje FBD en los controladores de la serie Logix5000 poseen configuraciones más avanzadas que las instrucciones encontradas en el lenguaje LADDER, dicha ventaja es aprovechada en la construcción de la lógica de control de las diferentes estrategias implementadas como parte del proyecto de investigación. Las ventajas de utilizar un lenguaje de programación no común, en procesos de control se detallan a continuación:

- Se favorece la comprensión del proceso a través de su visualización gráfica, la representación de señales es más sencilla debido a que las mismas se muestran como dibujos, y el valor de dichas señales se visualizan junto al elemento que lo representa.
- Es posible analizar el desempeño y funcionamiento de cada bloque del sistema y adicionalmente verificar su contribución al proceso.

- Permite identificar rápidamente problemas u oportunidades de mejora en el código o lógica de programación.
- Se identifican bloques redundantes, flujos de reproceso, conflicto de señales, cuellos de botella y puntos de decisión.

Las instrucciones presentes en el lenguaje LADDER tienen su equivalente en lenguaje FBD, debido a esto no se profundizó demasiado en dichas instrucciones, si se desea una mayor explicación acerca de todas las instrucciones en lenguaje FBD se puede referir al manual de programación “Logix5000 Controllers Function Block Diagram”.

3.6.1. Bloques Implementados en la programación del PLC

El set de instrucciones del lenguaje FBD posee instrucciones similares al set del lenguaje LADDER, pero existen varias instrucciones del lenguaje LADDER que han sido descartadas en el lenguaje FBD, debido a esto y aprovechando la funcionalidad de crear funciones personalizadas, se ha implementado un conjunto de instrucciones que permiten una programación mejor estructurada de la lógica de control diseñada.

Varias de las instrucciones creadas corresponden a bloques que escalan las señales en unidades crudas a señales en unidades de ingeniería. Un claro ejemplo son las siguientes instrucciones que permiten obtener flujo (LPM), temperatura (°C) y nivel (cm) a partir de las mediciones directas desde el PLC.

La instrucción UC_LPM recibe los valores en unidades crudas de los transmisores de flujo FT531 o FT535 y los convierte a un valor en unidades de flujo, en este caso litros por minuto. Esta instrucción es usada debido a que dentro de la lógica de programación todos los controladores tienen sus parámetros en unidades crudas y posteriormente se presentan al usuario usando esta conversión para el caso de las variables de flujo, ver Figura 64.

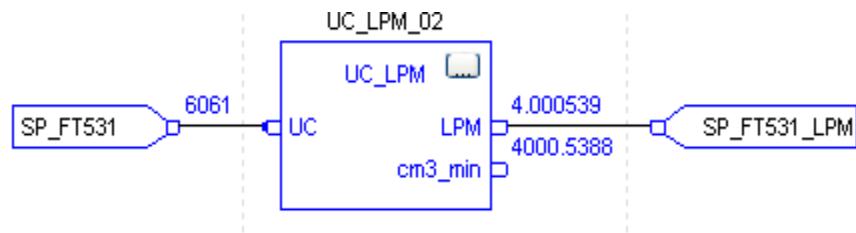


Figura 64. Add-On Instruction “UC_LPM”

La instrucción UC_Grados convierte el valor en unidades crudas generado por el transmisor de temperatura TT511 a un valor en unidades de temperatura, en este caso grados centígrados ($^{\circ}\text{C}$), el bloque de la instrucción se visualiza en la Figura 65.

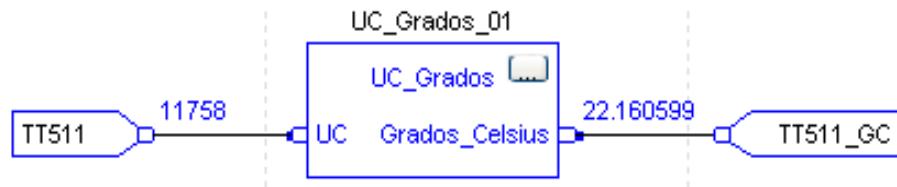


Figura 65. Add-On Instruction “UC_Grados”

La instrucción UC_cm convierte un valor en unidades crudas generado por el transmisor de nivel LT541 a un valor en unidades de nivel, en este caso litros por minuto (LPM), el bloque de la instrucción se visualiza en la Figura 66.

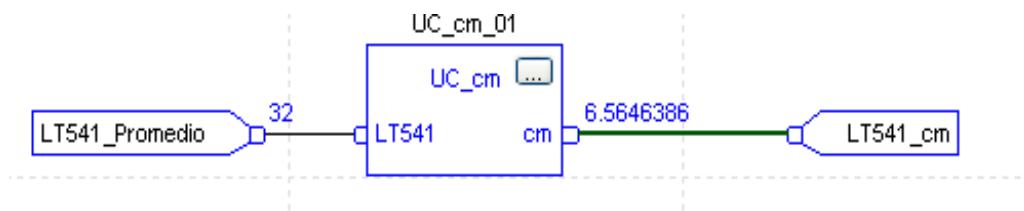


Figura 66. Add-On Instruction “UC_cm”

La instrucción LPM_UC convierte un valor en unidades de flujo (LPM) a un valor en unidades crudas. La instrucción es usada debido a que en la lógica de programación la interfaz tiene sus parámetros en unidades de ingeniería y es necesario convertir dichos valores a unidades crudas que el controlador pueda interpretar, ver Figura 67.

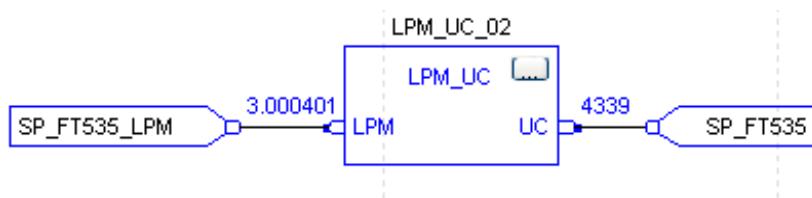


Figura 67. Add-On Instruction “LPM_UC”

La instrucción Grados_UC convierte un valor en unidades de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) a un valor en unidades crudas, el bloque de la instrucción se visualiza en la Figura 68.



Figura 68. Add-On Instruction “Grados_UC”

La instrucción PROM permite obtener un promedio de las mediciones de un sensor o variable, dentro del programa esta instrucción es utilizada para dar estabilidad a las señales que presentan demasiada inexactitud en su medición, ver Figura 69.



Figura 69. Add-On Instruction “PROM”

La instrucción MOVE_BITS permite descomponer una variable de tipo INT o DINT en varias variables tipo BOOL, esta instrucción es usada para enviar datos desde el HMI al PLC debido a que la conexión entre la interfaz y el controlador solo permite el manejo de variables enteras o reales, además es usada para enviar las instrucciones de encendido y apagado de lazos de control, alarmas y demás órdenes desde la interfaz, ver Figura 70.

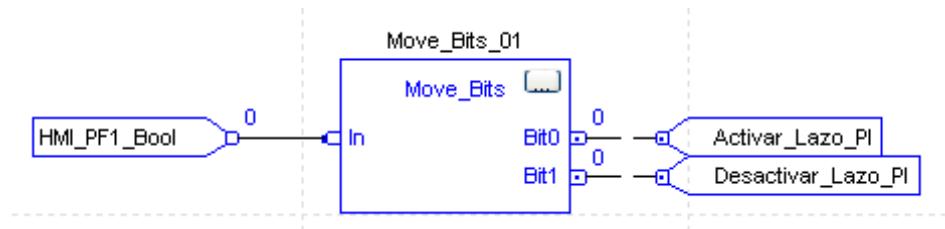


Figura 70. Add-On Instruction “Move_Bits”

La instrucción ESCALAR convierte un valor en unidades crudas a un valor porcentual, es usada debido a que dentro de la lógica de programación todos los controladores tienen sus parámetros en unidades crudas y posteriormente se presentan al usuario, la instrucción convierte el rango proporcional de un actuador en porcentaje para que sea entendido fácilmente por el usuario, ver Figura 71.

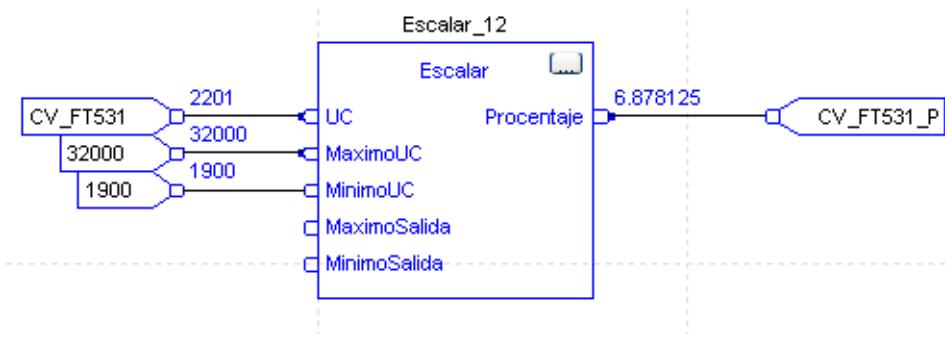


Figura 71. Add-On Instruction Escalar

La instrucción LATCH_UNLATCH permite activar y desactivar una variable del tipo BOOL usando dos bits diferentes, esta instrucción se diseñó debido a que en el lenguaje FBD los las bobinas LATCH y UNLATCH no estaban disponibles, ver Figura 72.

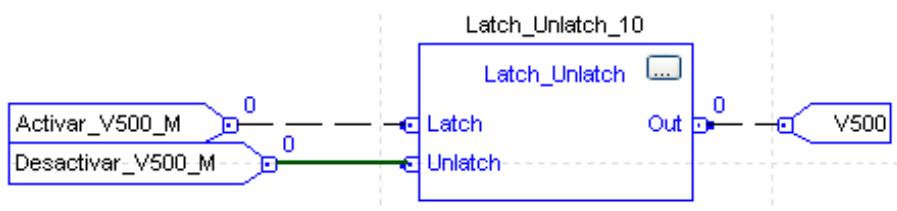


Figura 72. Add-On Instruction Latch-unlatch

La instrucción SRTP (Tiempo Proporcional de Rango Partido) recibe un valor porcentual y lo convierte en un tren de pulsos con ciclo de trabajo igual al valor de entrada, es usada para convertir un actuador ON/OFF en un equivalente proporcional. Dentro del programa se utiliza para controlar de manera proporcional el calentador del reservorio B1 en la estrategia de rango partido, ver Figura 73.

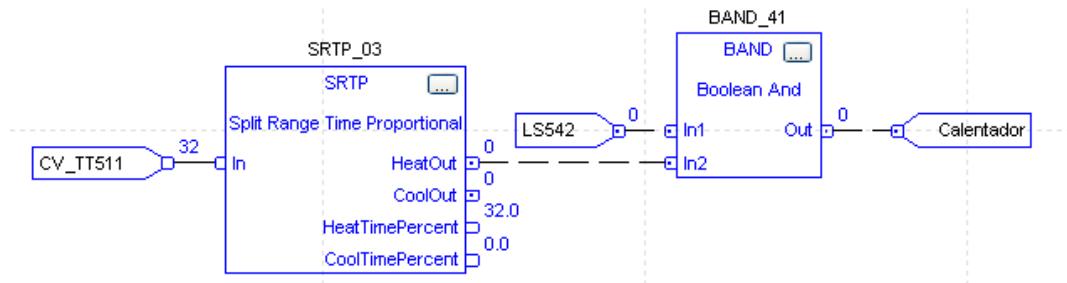


Figura 73. Instrucción SRTP (Tiempo proporcional de rango partido)

La instrucción PIDE recibe todas las variables de procesos del lazo de control y realiza la función de regulador PID, esta instrucción permite el ingreso de la variable de proceso PV, además de las variables de consigna SP. Dentro de su configuración se debe incluir los valores máximos y mínimos de SP y PV, así como también los valores máximos y mínimos de la variable manipulada CV. Adicionalmente se tiene parámetros de activación y de modo de funcionamiento del controlador, ver Figura 74.

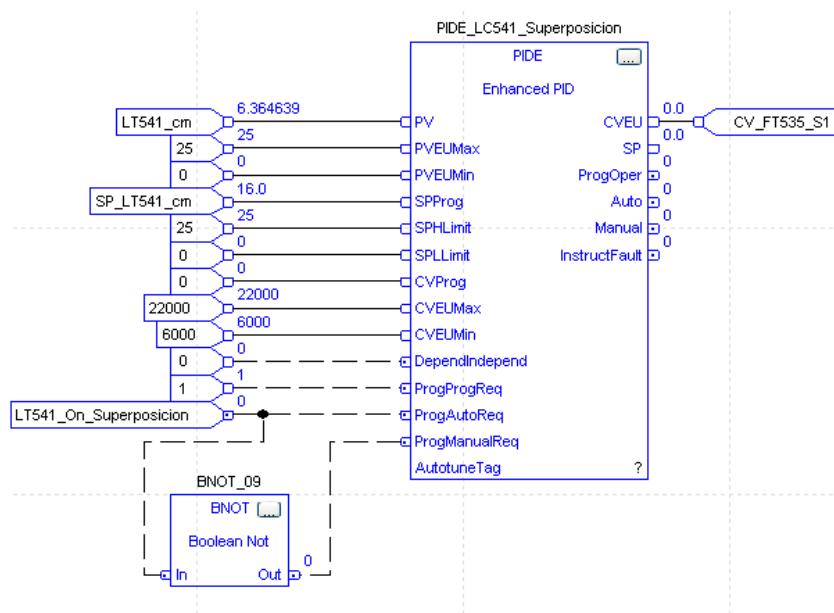


Figura 74. Instrucción PIDE

3.6.2. Descripción y funcionamiento de las rutinas implementadas

En esta sección se detalla el funcionamiento de cada una de las rutinas y subrutinas implementadas en el controlador Allen Bradley CompactLogix 5000 que permiten el funcionamiento de la estación PS-2800 para el control de procesos industriales. La programación de las subrutinas para la implementación de las técnicas y estrategias de control se detalla mediante su respectivo diagrama de flujo.

3.6.2.1. Rutina de Encendido PS-2800 – Reset_Variables

Esta rutina se ejecuta cada vez que se realiza el encendido del controlador, se utiliza para apagar todos los actuadores de la estación, además evita activaciones inesperadas de procesos que no hayan sido desactivados antes de apagar la estación o en el caso de que la alimentación del controlador haya sido cortada sorpresivamente. La rutina también maneja la falla que se produce al apagar el controlador cuando el mismo se encuentra en modo de ejecución (modo RUN), dicha falla produce que el controlador entre en modo falla mayor (Major Fault) de no ser manejado en el encendido.

3.6.2.2. Rutina de Programa - Cambio_Unidades

La rutina de programa “Cambio_Unidades” contiene las diferentes instrucciones y la lógica necesaria para convertir los valores generados (en UC) por los diferentes transmisores de la estación (FT535, FT531, LT541 y TT511) a valores entendible por el usuario en unidades de ingeniería como flujo (en LPM), temperatura (en °C) y nivel (en cm). Para ello se utilizan instrucciones personalizadas creadas y explicadas en la sección 3.6.1.

3.6.2.3. Rutina de Programa - Principal

Esta rutina se encarga de ejecutar las diferentes subrutinas programadas para cada proceso de la estación, la ejecución de subrutinas se la realiza utilizando una variable

que indica que subrutinas deben ejecutarse, en la Figura 75 se detalla el diagrama de flujo de la rutina de programa principal, adicionalmente esta rutina ejecuta siempre las subrutinas de programa que se detallan a continuación:

- Cambio de Unidades
- Scripts
- HMI_PS-2800

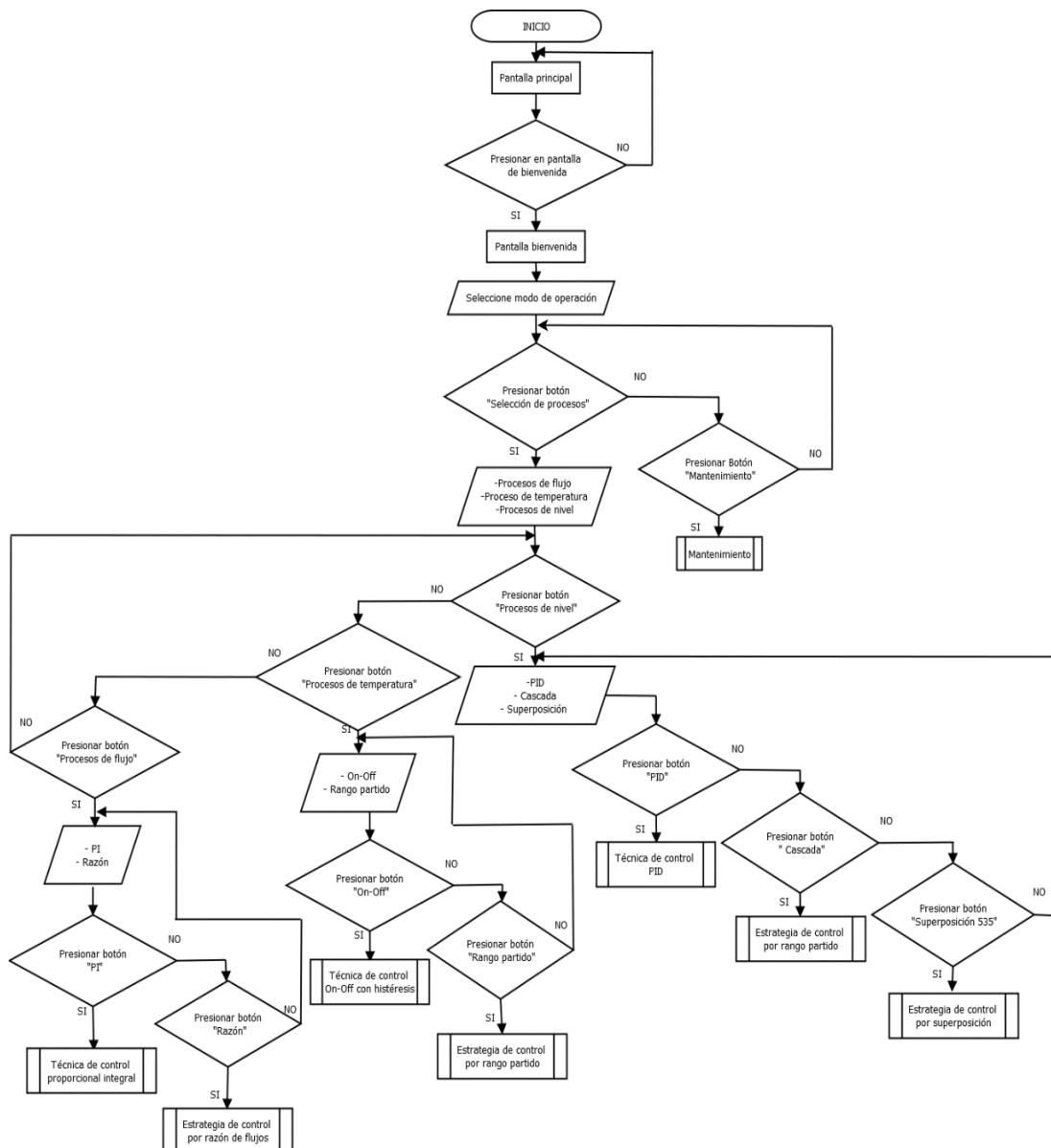


Figura 75. Grafcet de la rutina principal

3.6.2.4. Rutina de Programa - Scripts

Esta rutina de programa es la encargada de gestionar las alarmas de los procesos implementados en la estación, contiene la lógica para la activación de luces piloto instaladas en la estación PS-2800, y la activación de indicadores programados en la interfaz HMI. Es una rutina simple que utiliza bloques de comparación y lógica booleana para su funcionamiento e interacción con el usuario.

3.6.2.5. Rutina de Programa - HMI_PS-2800

La rutina se encarga de recibir las variables de control desde la interfaz HMI y descomponerlas en variables tipo BOOL que activan o desactivan los diferentes procesos de la estación, esta rutina utiliza la instrucción “Move_Bits” explicada en la sección 3.6.1, además implementa la instrucción “LMP_UC” que permite convertir los valores de flujo configurados en la HMI (en LPM) a valore entendibles para el controlador (en Unidades Crudas).

3.6.2.6. Subrutina de Proceso 0 – Parada

La subrutina de programa “Parada” se ejecuta siempre que ningún proceso haya sido seleccionado desde la interfaz HMI, por esta razón esta rutina se denomina rutina 0 y su función es resetear todos los actuadores a un valor de apagado, para que de ser el caso no se produzcan activaciones inesperadas.

3.6.2.7. Subrutina de Proceso 1 – Técnica PI_531

La subrutina de proceso PI_531 se encarga de realizar el control del flujo de lazo 531 mediante la implementación de un regulador de tipo PI, la instrucción PIDE explicada en la sección 3.6.1, es utilizada como controlador principal de esta subrutina, además implementa comparaciones y lógica booleana para su funcionamiento.

En la subrutina PI_531 se utilizan las variables de proceso FT531, SP_FT531 y CV_FT531, asimismo se realiza la activación de la Bomba AC P2 y el control de la

válvula proporcional VF531. Adicionalmente se realiza la activación de indicadores en la interfaz HMI y el reporte de errores y fallas en las luces piloto instaladas en la estación, el diagrama de flujo de la subrutina se visualiza en la Figura 76.

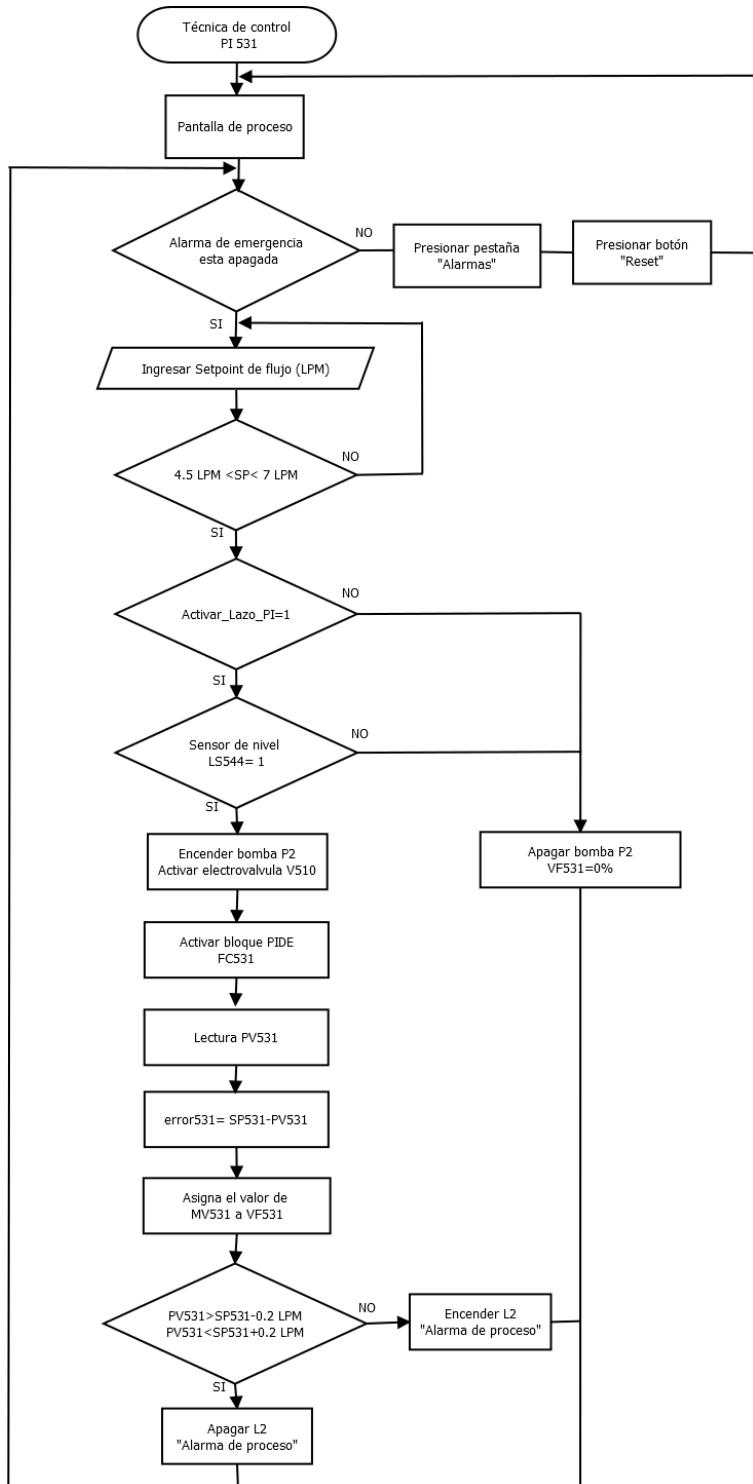


Figura 76. Diagrama de flujo de la estrategia de control PI

3.6.2.8. Subrutina de Proceso 2 - Técnica OnOff_511

La subrutina de proceso OnOff_531 se encarga de realizar el control de la temperatura de lazo 511 mediante la implementación de un regulador de tipo ON/OFF, las instrucciones de comparación y la lógica booleana han sido utilizadas en esta subrutina para su funcionamiento.

En la subrutina OnOFF_511 se utilizan las variables de proceso TT511, SP_TT511 y CV_TT511, además se realiza la activación de la Bomba DC P1 para el llenado del reservorio B1 y se comprueba el nivel de dicho tanque utilizando el transmisor LT541.

Adicionalmente se realiza la activación de indicadores en la interfaz HMI y el reporte de errores y fallas en las luces piloto instaladas en la estación. A través del diagrama de flujo de la Figura 77 se describe la programación de la subrutina de proceso 2.

3.6.2.9. Subrutina de Proceso 3 - PI_541

La subrutina del proceso PI_541, utiliza un regulador tipo PI para mantener el nivel del reservorio B1, el controlador recibe la señal del transmisor de nivel LT541 para verificar la altura en el tanque, el controlador recibe una señal de consigna SP_LT541 que es el nivel a alcanzar en el reservorio, la señal de control CV_LT541 enviada como señal de PWM para regular la velocidad de giro de la bomba DC P1.

La subrutina gestiona la activación de las válvulas V500, V515, además del relé de activación de la bomba DC P1. Adicionalmente se realiza la activación de indicadores en la interfaz HMI y el reporte de errores y fallas en las luces piloto instaladas en la estación. Mediante el diagrama de flujo de la Figura 78 se describe la programación de la subrutina de proceso 3.

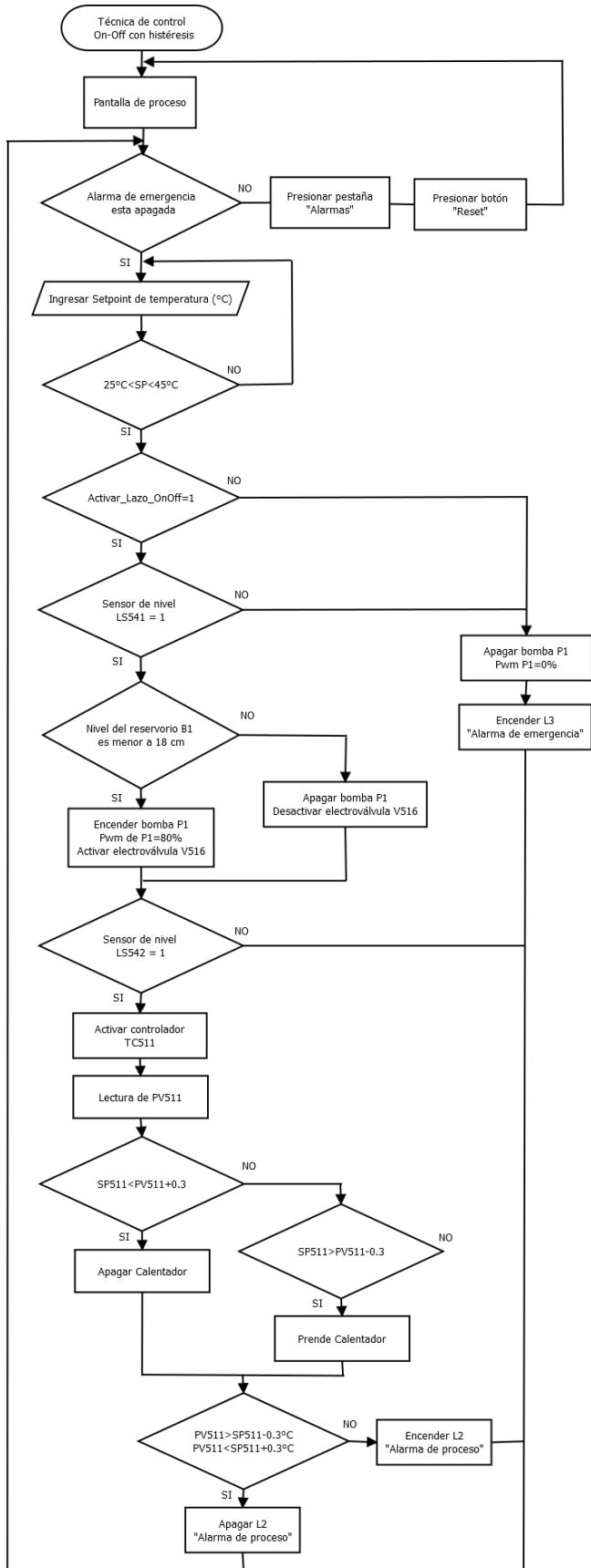


Figura 77. Diagrama de flujo de la técnica de control On/Off con histéresis

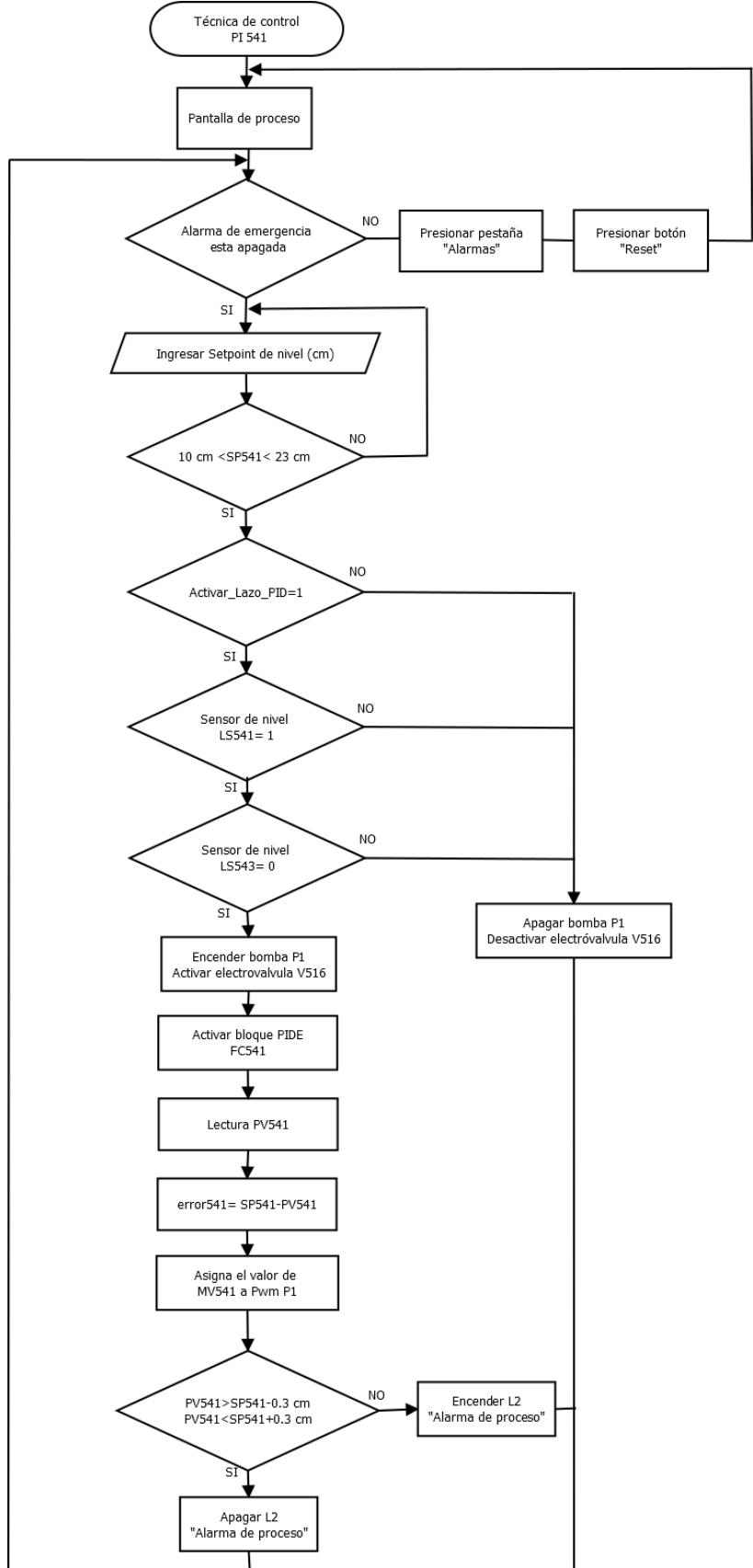


Figura 78. Diagrama de flujo de la técnica de control PI - lazo 541

3.6.2.10. Subrutina de Proceso 4 - Razon_535

La subrutina de proceso Razon_535 implementa la estrategia de control de razón de flujos entre el lazo de flujo 531 (flujo principal) y el lazo de flujo 535 (flujo secundario). Esta rutina recibe los parámetros de consigna de flujo SP_FT531 y el valor de la razón R, mediante los cuales estima los valores de consigna del controlador secundario SP_FT535.

La subrutina posee dos reguladores PI que controlan las variables de proceso de ambos lazos de flujo, además realiza la activación de las válvulas V500, V510, V515; además las bombas DC P1 y Bomba AC P2, y se realiza el control de la válvula proporcional VF531 y el PWM de la bomba DC P1. Adicionalmente se realiza la activación de indicadores en la interfaz HMI y el reporte de errores y fallas en las luces piloto instaladas en la estación. Mediante el diagrama de flujo de la Figura 79 se describe la programación de la subrutina de proceso 4.

3.6.2.11. Subrutina de Proceso 5 - Cascada_541

La subrutina de proceso Cascada_541 realiza la estrategia de control de nivel mediante dos reguladores en cascada (programados utilizando instrucciones PIDE), se realiza el control de flujo del lazo 535 para obtener un nivel estable en el reservorio B1, el regulador primario FC541 recibe la consigna de nivel SP_LT541_Cascada y se realiza el control para obtener una consigna de flujo SP_FT535 que es enviada al regulador secundario FC535, este último genera una señal de control CV_535_cascada que es enviada como señal PWM para controlar la velocidad de giro de la Bomba DC P1.

La subrutina gestiona la activación de las válvulas V500, V515, además del relé de activación de la bomba DC P1. Adicionalmente se realiza la activación de indicadores en la interfaz HMI y el reporte de errores y fallas en las luces piloto instaladas en la estación. Mediante el diagrama de flujo de la Figura 80 se describe la programación de la subrutina de proceso 5.

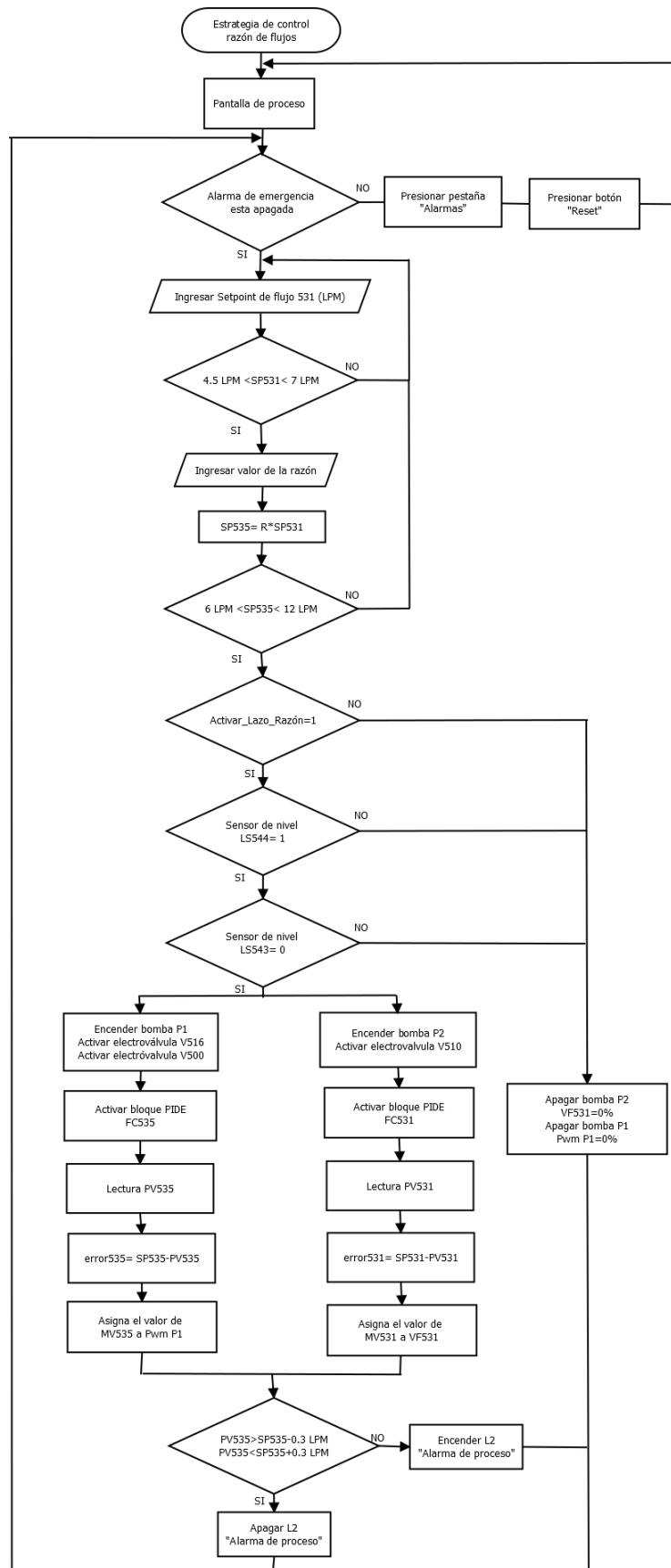


Figura 79. Diagrama de flujo de la estrategia de control por razón de flujos

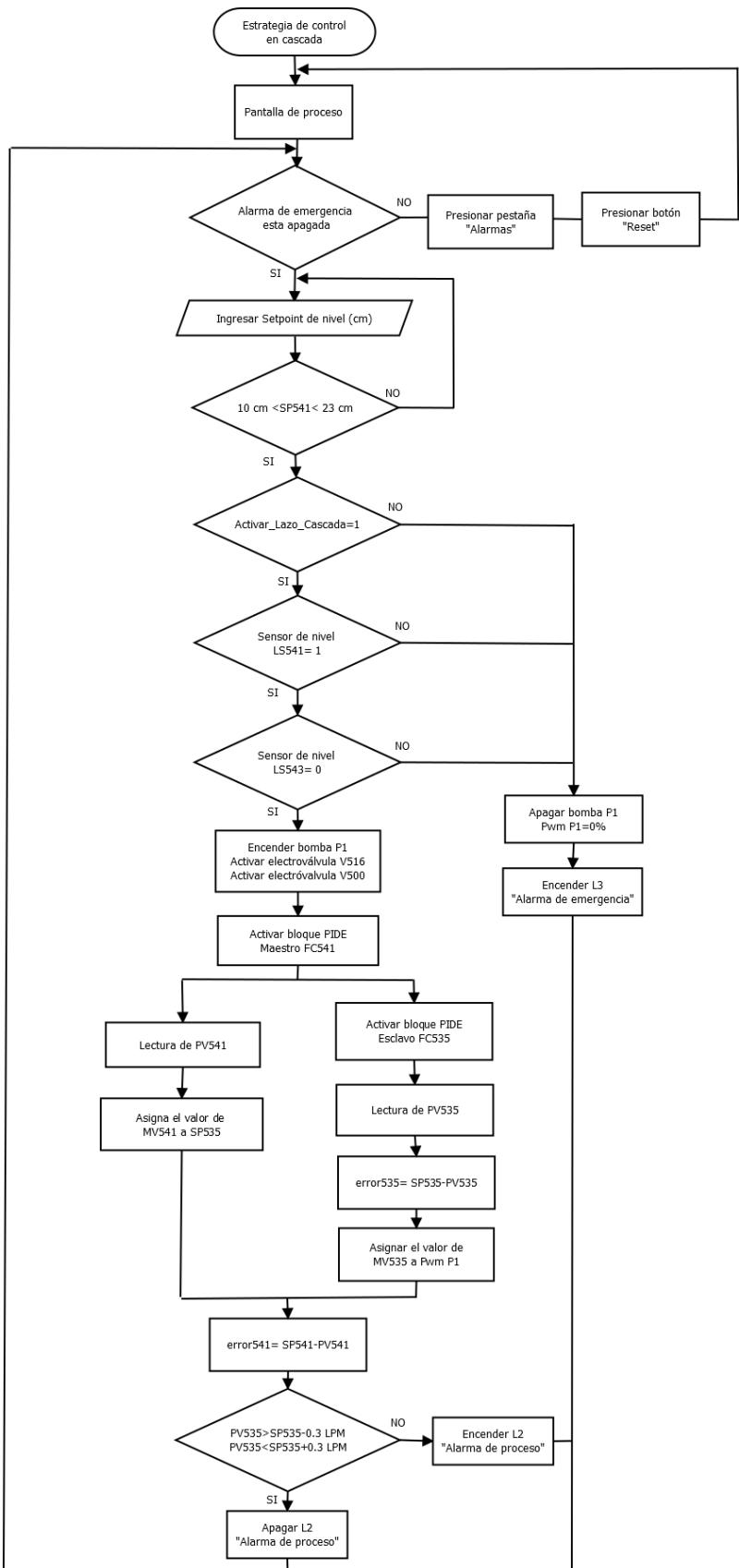


Figura 80. Diagrama de flujo de la estrategia de control en cascada

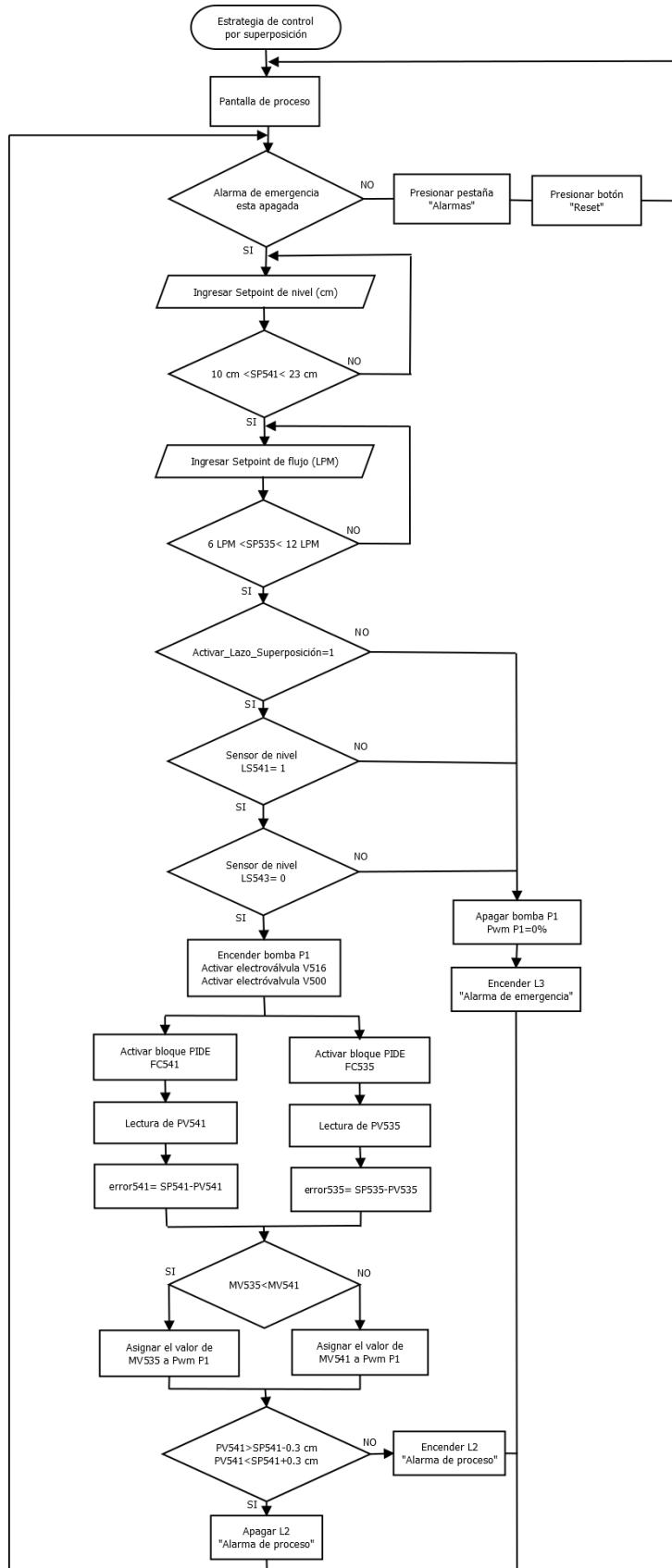


Figura 81. Diagrama de flujo de la estrategia de control por superposición

3.6.2.12. Subrutina de Proceso 6- Superposicion_541

La subrutina del proceso Superposicion_541 utiliza dos reguladores (nivel LT541 y flujo FC535) que trabajan simultáneamente, los dos reguladores generan dos variables de control que son enviadas a un selector de baja LT541 que compara las dos señales y selección la señal más baja como señal de control del PWM de la bomba DC P1.

Los dos reguladores necesitan recibir dos consignas, una consigna de nivel (SP_LC541) que será el nivel máximo que pueda alcanzar el reservorio B1, y una consigna de flujo constante (SP_FC535) que será el flujo del lazo 535 mientras el nivel del tanque B1 se encuentre bajo el valor máximo de nivel. El regulador de nivel FC541 es realimentado con la señal del transmisor LT541 para comprobar el nivel del tanque, mientras que el regulador de flujo FC535 es realimentado con la señal del transmisor de flujo FT535.

La subrutina gestiona la activación de las válvulas V500, V515, además del relé de activación de la bomba DC P1. Adicionalmente se realiza la activación de indicadores en la interfaz HMI y el reporte de errores y fallas en las luces piloto instaladas en la estación. Mediante el diagrama de flujo de la Figura 81 se describe la programación de la subrutina de proceso 6.

3.6.2.13. Subrutina de Proceso 7 - RangoPartido_511

La subrutina del proceso RangoPartido_511 utiliza dos reguladores (temperatura y flujo) en paralelo que manejan dos actuadores por separado, el regulador de temperatura TC511 maneja la activación proporcional de un calentador ON-OFF mediante la utilización de la instrucción SRTP descrita en la sección 3.6.1, al mismo tiempo un regulador de flujo FC535 maneja el caudal desde el reservorio B0 hacia el reservorio B1. El controlador FC511 está encargado de aumentar la temperatura del tanque B1, mientras que el controlador FC535 está encargado de disminuir la temperatura en dicho reservorio.

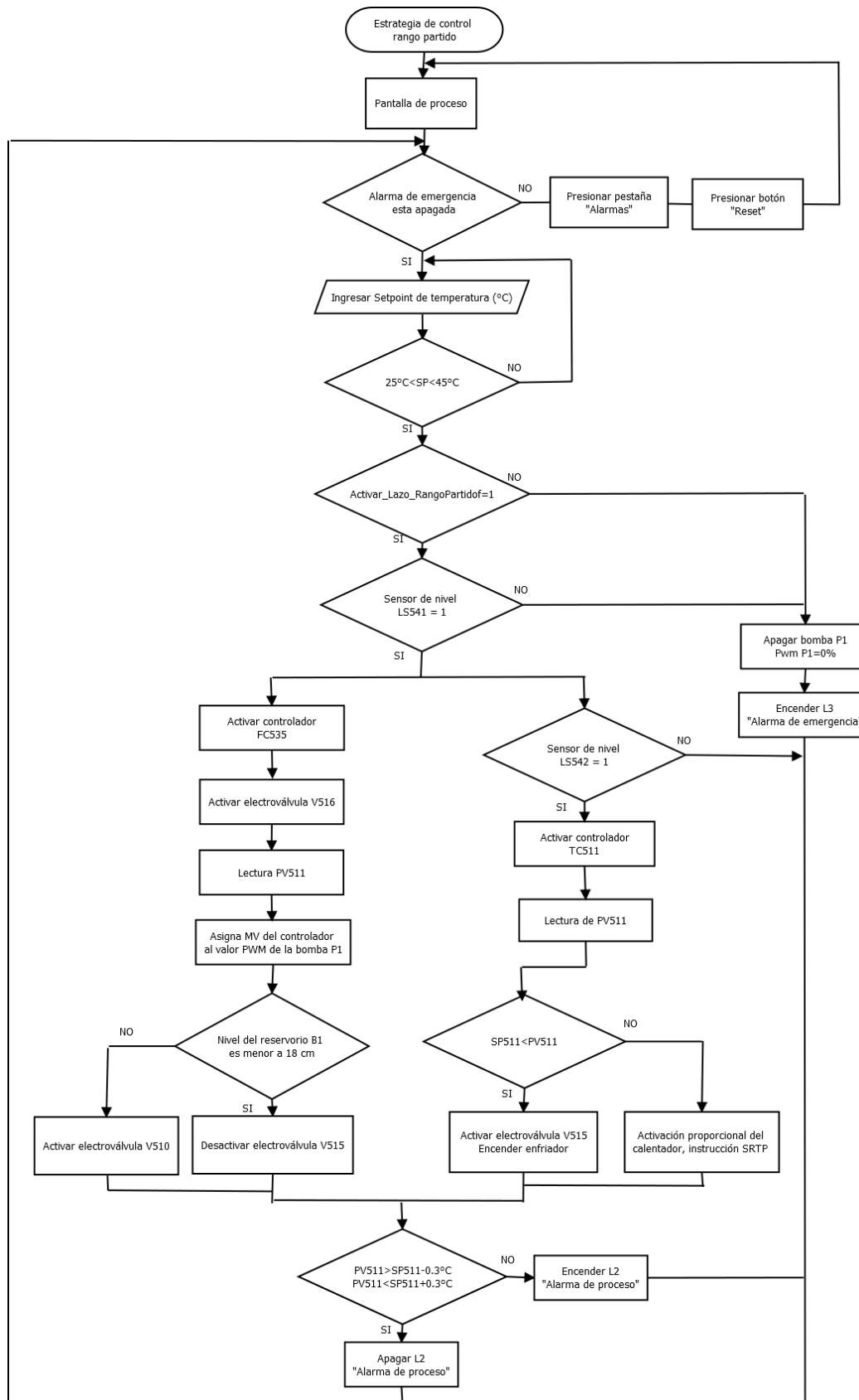


Figura 82. Diagrama de flujo de la estrategia de control por rango partido

Cuando el valor de consigna se ha alcanzado los dos reguladores presentan una variable de control constante, es decir ambos reguladores se estabilizan (CV_FC535 y CV_FT511 constantes). La subrutina gestiona la activación de las válvulas V500, V516, además del relé de activación de la bomba DC P1 y el relé del Calentador ON-OFF. Para regular el nivel del reservorio B1 se utiliza el transmisor de nivel LT541 que mantiene el nivel del tanque a una altura constante durante el proceso de temperatura. Adicionalmente se realiza la activación de indicadores en la interfaz HMI y el reporte de errores y fallas en las luces piloto instaladas en la estación. Mediante el diagrama de flujo de la Figura 82 se describe la programación de la subrutina de proceso 7.

3.6.2.14. Subrutina de programa 8 - Mantenimiento

La subrutina de programa 8 - Mantenimiento gestiona la activación de todas las válvulas de la estación PS-2800, esto permite comprobar el correcto funcionamiento de los actuadores digitales de la estación, es posible activar el ventilador y el radiador de enfriamiento.

La subrutina permite además controlar los actuadores que dependen de condiciones para su funcionamiento, por ejemplo, el calentador ON-OFF y la bomba AC P2 que necesitan de un nivel mínimo para operar. Los transmisores de la estación (TT511, FT531, FT535 y LT541) también están disponibles para su verificación y los actuadores proporcionales Bomba DC P1 y válvula proporcional VF531, pueden configurarse de acuerdo al criterio del usuario.

Todas las funcionalidades de los procesos implementados se encuentran disponibles mediante la interfaz HMI diseñada y construida tomando en cuenta los requerimientos de los usuarios finales de la estación de procesos PS-2800. El diseño e implementación de la estación se describe a detalle en el CAPITULO IV del presente documento.

CAPÍTULO IV

INTERFACES DEL SISTEMA

En el capítulo 4 se describe el diseño e implementación de las interfaces del sistema de la pantalla digital; las cuales permiten operar, monitorear y visualizar los lazos de control de temperatura, nivel y flujo. En primera instancia se procede a detallar la integración del panel SIMATIC OP177B de la marca Siemens con un PLC Allen Bradley, posterior a la integración se describe el diseño e implementación de las interfaces para cada técnica y estrategia de control, y finalmente se evalúa el funcionamiento de las interfaces del sistema, la descripción del capítulo se detalla en la Figura 83.

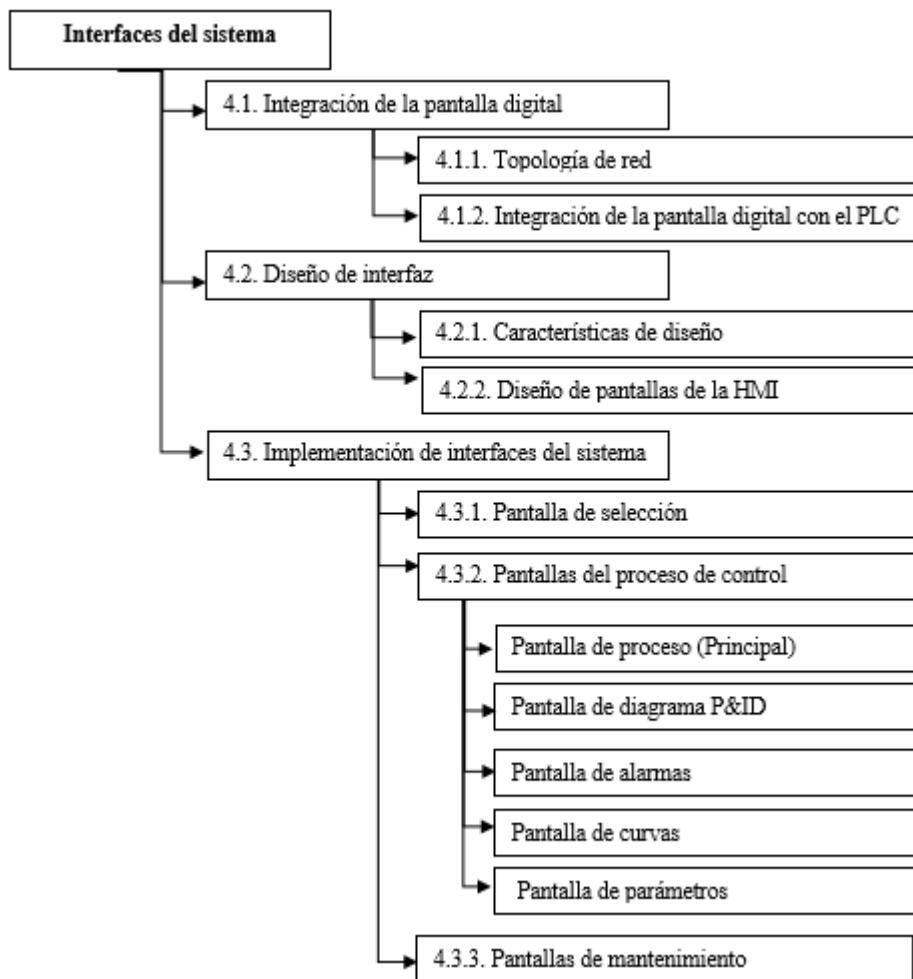


Figura 83. Descripción del capítulo IV

4.1. Integración de la pantalla digital

4.1.1. Topología de red

La conexión de red de equipos de la estación PS-2800 se realizó mediante cable de UTP con conectores RJ45, en la Figura 84 se puede apreciar la topología de red de los equipos de la estación PS-2800. La conexión de red del panel SIMATIC se efectuó mediante el cable de red UTP con conectores RJ45, el puerto de conexión de red se muestra en la Figura 85. El direccionamiento de los dispositivos de la estación se detalla en la Tabla 14.

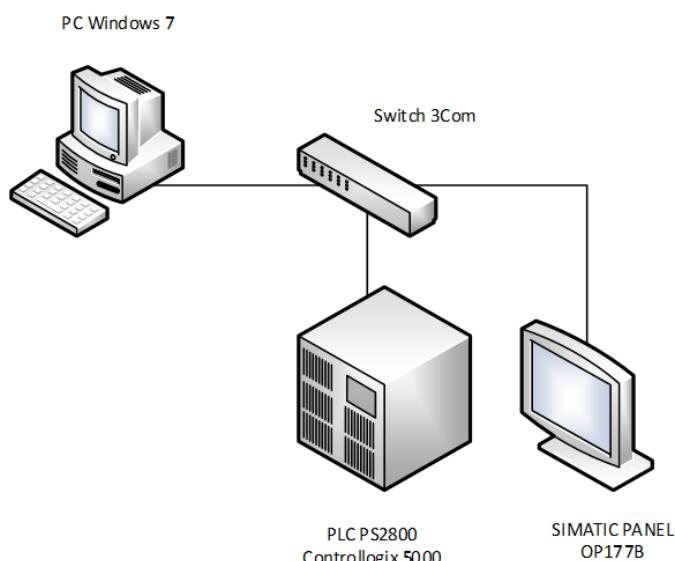


Figura 84. Topología de red de los equipos en la estación PS-2800

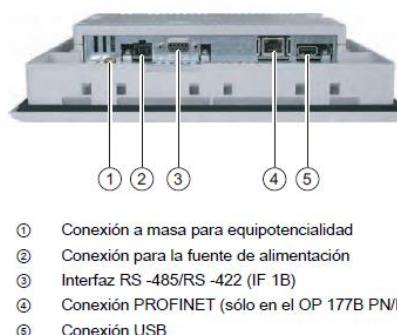


Figura 85. Puertos de conexión del panel OP177B

Fuente: (SIEMENS, 2016)

Tabla 14**Direcciones IP de los dispositivos de la estación PS-2800**

Equipo	Dirección IP	Mascara de red	Tipo de conexión
CompactLogix L43	192.168.1.8	255.255.255.0	UTP, RJ45
SIMATIC OP177B	192.168.1.2	255.255.255.0	UTP, RJ45
PC	192.168.1.5	255.255.255.0	UTP, RJ45

4.1.2. Integración de la pantalla digital con el controlador CompactLogix

El intercambio de datos entre el controlador CompactLogix y el panel SIMATIC OP177B, se realizó mediante el sistema EtherNet/IP I/O communication de Allen Bradley, el panel gestiona el intercambio (lectura/escritura) de datos con una tasa de actualización establecida para cada variable compartida entre el controlador y el panel.

La implementación de la conexión del controlador de Allen Bradley y el panel táctil de Siemens requiere de un conjunto de aplicaciones de software para configurar y programar cada uno de los dispositivos vinculados en el proyecto, el software necesario se detalla en la Tabla 15.

Tabla 15**Requisitos para la integracion de la pantalla digital con el PLC**

Software Utilizado	Descripción
Microsoft Windows XP SP3	Sistema Operativo base para la ejecución de RSLOGIX 5000
RSLOGIX 5000	Entorno de programación del PLC CompactLogix
RSLINX Classic	Configuración de Conexiones entre el PC y el PLC CompactLogix
Microsoft Windows 7 o superior	Sistema Operativo base para la ejecución de TIA PORTAL V13
TIA PORTAL V13	Entorno de programación para los sistemas de automatización Siemens.
WinCC Advanced	Entorno de desarrollo de interfaces HMI para el panel táctil OP177B.

4.2. Diseño de interfaz

4.2.1. Características de diseño

- Construir una interfaz HMI que permita el monitoreo, visualización y control de las variables de proceso de los lazos de control de flujo, nivel y temperatura a implementarse en la estación PS-2800.
- La interfaz está destinada a ser usada por estudiantes de pregrado de la carrera de Automatización y Control de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE. Adicionalmente, la interfaz también está enfocada en el uso por parte de docentes afines a la línea de investigación del proyecto y/o personal con conocimientos de control industrial de procesos.
- La interfaz permite conocer en tiempo real el estado de las variables de proceso a controlar, además admite configurar el valor deseado de cada variable de proceso involucrada en la estrategia de control.
- La interfaz permite el control, monitoreo y supervisión de la instrumentación instalada en la estación PS-2800. Además, se admite manipular parámetros (alarmas, constantes K_p, K_i, K_d) de la lógica de controladores FC531, FC535 TC511 y LC541.
- La interfaz presenta curvas con la tendencia de las variables de proceso, control y consigna (PV, CV y SP), diferenciadas adecuadamente mediante colores.
- La interfaz presenta los diagramas P&ID de los procesos implementados además admite la visualización de alarmas del proceso o del sistema (como problemas de conexión o falla en el controlador).

- La interfaz permite la selección de los procesos implementados en la estación PS-2800 mediante un sistema de menú, además tiene la capacidad de verificar el funcionamiento de actuadores y sensores de la estación mediante la pantalla de mantenimiento.

4.2.2. Diseño de pantallas de la HMI

4.2.2.1. Arquitectura de la interface de la HMI

La arquitectura de la interface HMI se ha dividido por su tipo de funcionalidad, en pantallas de proceso y en pantallas de mantenimiento. Las pantallas de proceso se dividen a su vez, en pantallas de Proceso, P&ID, Alarmas, Curvas e Ingeniería. Como se muestra en la Figura 86, las pantallas de proceso se han dividido de acuerdo al tipo de variable de proceso (nivel, temperatura y flujo).

Dependiendo del tipo de proceso, si se tiene dos reguladores en el caso de las estrategias de control se presenta pantallas adicionales de curvas y de parámetros de los reguladores secundarios. Las pantallas de proceso y curvas poseen las variables de proceso del lazo secundario y se presentan las alarmas respectivas al tipo de proceso que se ha seleccionado inicialmente.

Para el caso de las pantallas de mantenimiento se ha dividido a los actuadores y sensores de la estación en análogos y discretos, de esta forma se puede controlar electroválvulas, bombas calentadoras y al mismo tiempo verificar su funcionamiento individualmente.

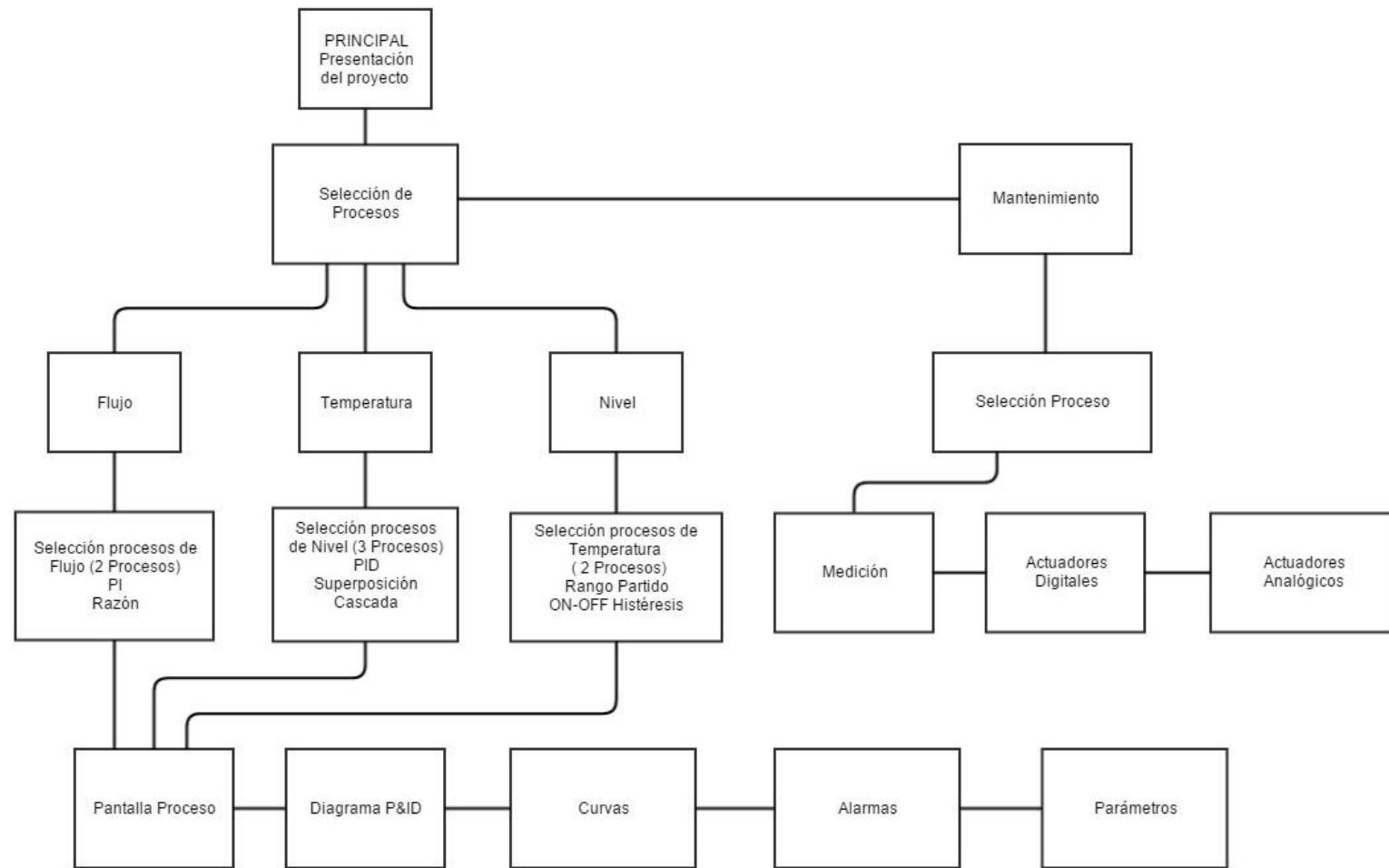


Figura 86. Arquitectura de las pantallas del HMI

4.2.2.2. Diseño de las pantallas de selección

La pantalla de selección permite elegir si se desea acceder a los procesos de control (PB Procesos) o a la sección de mantenimiento (PB Mantenimiento); si se accede a la sección de procesos se despliega un menú de botones que contiene los procesos de flujo, temperatura y nivel de la estación PS-2800 (PB procesos de flujo, PB procesos de nivel, PB procesos de temperatura).

Al seleccionar el proceso se despliega un submenú que permite acceder a las técnicas o estrategias de control detalladas en el capítulo 3; además en la parte superior derecha se encuentra la hora del sistema como se observa en la Figura 87. Las características de la pantalla de selección se detallan en la Tabla 16.

Tabla 16
Características de la pantalla de selección

Campo	Fuente	Estilo	Tamaño	Color	
Nombre de la estación	Tahoma	Normal	17px	255,255,255	
Seleccione modo	Tahoma	Normal	15px	255,255,255	
PB Procesos	Tahoma	Negrita	13px	0,128,192	
PB Mantenimiento	Tahoma	Negrita	13px	0,128,192	
PB Procesos de flujo	Tahoma	Negrita	12px	0,128,192	
PB Procesos de nivel	Tahoma	Negrita	12px	0,128,192	
PB Procesos de temperatura	Tahoma	Normal	12px	0,128,192	
PB Técnica On-Off	Tahoma	Normal	12px	0,128,192	
PB Técnica PI	Tahoma	Normal	12px	0,128,192	
PB Técnica PID	Tahoma	Normal	12px	0,128,192	
PB Estrategia cascada	Tahoma	Normal	12px	0,128,192	
PB Estrategia razón	Tahoma	Normal	12px	0,128,192	
PB Estrategia superposición	Tahoma	Normal	12px	0,128,192	
PB Estrategia rango partido	Tahoma	Normal	12px	0,128,192	
hh:mm:ss	Tahoma	Normal	13px	255,255,255	
Fondo de pantalla				0,0,0	
Botón Activo				0,192,255	
Texto pestaña activa				0,0,0	
Texto pestaña inactiva				255,255,255	

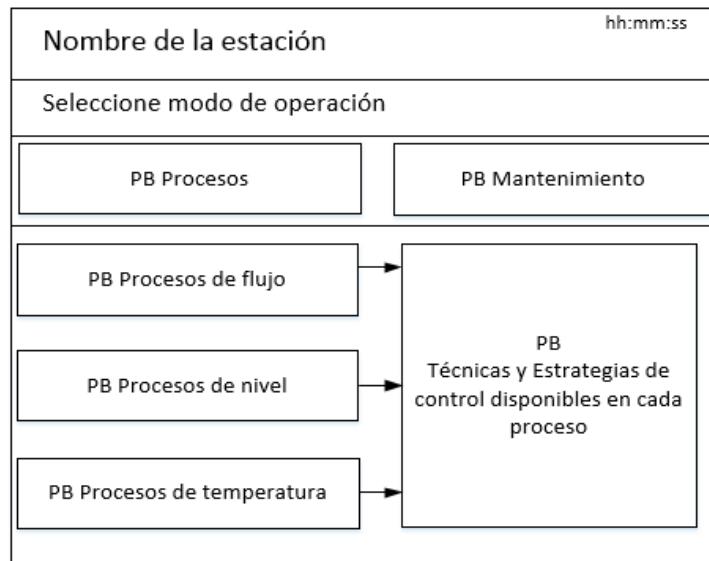


Figura 87. Diseño de la pantalla de selección

4.2.2.3. Diseño de la pantalla de proceso

Contiene los valores de las variables de procesos (PV, SP), los valores de PV y SP se muestran interactivamente en dos gráficos de barras que permiten determinar de forma visual los valores de dichas variables, para el control de sistemas que utilizan estrategias de control se colocan los valores de SP y PV de los reguladores que actúan en el proceso como se observa en la Figura 88.

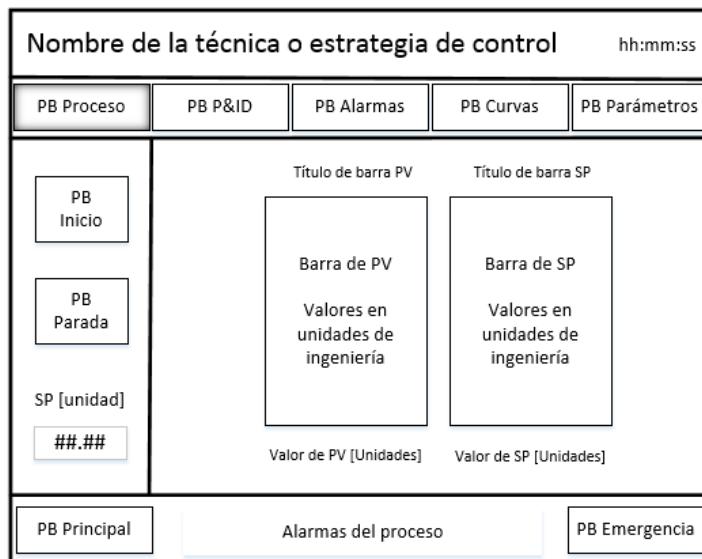


Figura 88. Diseño de la pantalla de proceso

En la pantalla de procesos se incluye un cuadro de texto para el ingreso del SP del proceso, además contiene los botones de inicio (PB inicio), parada (PB parada) y emergencia (PB emergencia) y un botón que permite regresar a la pantalla principal (PB Principal); en la parte superior derecha se encuentra la hora del sistema, ver Figura 88. Las características de la pantalla de proceso se detallan en la Tabla 17.

Tabla 17
Características de la pantalla de procesos

Campo	Fuente	Estilo	Tamaño	Color
Título de pantalla	Tahoma	Normal	13px	255,255,255
Título de barras	Tahoma	Normal	12px	255,255,255
Texto en Botones PB	Tahoma	Normal	12px	0,0,0
Título de SP	Tahoma	Normal	12px	255,255,255
Valor de SP	Tahoma	Normal	12px	255,255,255
Valor de PV	Tahoma	Normal	12px	255,255,255
Alarmas del proceso	Tahoma	Normal	12px	255,255,255
hh:mm:ss	Tahoma	Normal	13px	255,255,255
Texto pestaña activa	Tahoma	Normal	13px	0,0,0
Texto pestaña inactiva	Tahoma	Normal	13px	255,255,255
PB Inicio activado				0,255,0
PB Parada activado				255,0,0
PB Inicio desactivado				0,192,192
PB Parada desactivado				0,192,192
PB Principal				0,192,192
PB Emergencia				255,0,0
Fondo de pantalla				0,0,0
Pestaña activa				0; 192; 255
Pestaña inactiva				0; 128; 192
Color barra PV				0,255,0
Color barra SP				255,0,0
Alarma de proceso activada				255,0,0
Alarma de proceso desactivada				0,255,0

4.2.2.4. Diseño de la pantalla del diagrama P&ID

En esta pantalla se presenta el plano P&ID del proceso a controlar, además se muestra los actuadores y el valor de los sensores en tiempo real del lazo de control, ver Figura 89.

Los actuadores cambian su estado de apagado (color plomo) ha encendido (color verde). Las características de la pantalla de proceso se detallan en la Tabla 18.

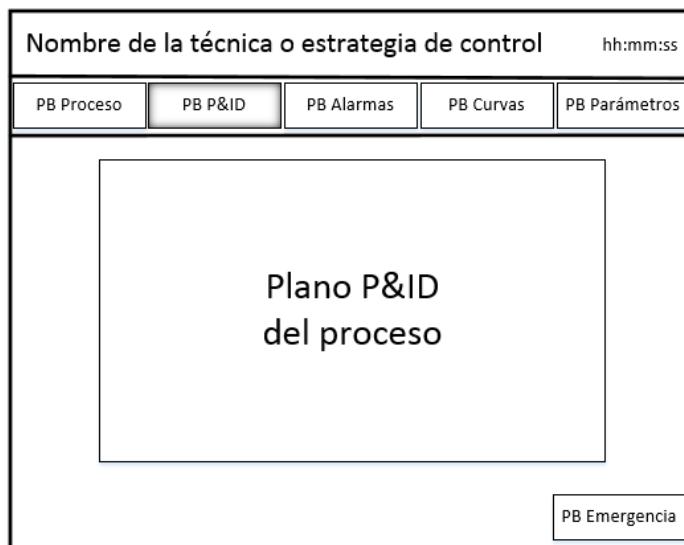


Figura 89. Diseño de la pantalla del diagrama P&ID

Tabla 18

Características de la pantalla de diagrama P&ID

Campo	Fuente	Estilo	Tamaño	Color
Título de pantalla	Tahoma	Normal	13px	0,0,0
PB Emergencia	Tahoma	Negrilla	13px	255,0,0
hh:mm:ss	Tahoma	Negrilla	13px	255,255,255
Texto de elementos	Tahoma	Normal	10 px	0,0,0
Valor de actuadores	Tahoma	Normal	10 px	255,255,255
Valor de sensores	Tahoma	Normal	10 px	255,255,255
Texto pestaña activa	Tahoma	Normal	13px	0,0,0
Texto pestaña inactiva	Tahoma	Normal	13px	255,255,255
Fondo valor de actuadores				0,0,0
Fondo valor de sensores				0,0,0
Fondo Pantalla				255,255,255
Pestaña activa				0; 192; 255
Pestaña inactiva				0; 128; 192
Actuador activado				0,255,0
Actuador desactivado				255,255,255
Sensor activado				0,255,0
Sensor desactivado				255,255,255

4.2.2.5. Diseño de la pantalla de alarmas

Se incluye un botón de navegación para regresar al menú principal, además de los botones de emergencia y un botón de reset en caso de algún error en el proceso. Se muestra una ventana de avisos del sistema, y se diferencia el tipo de alarma por el color de dicha alarma.

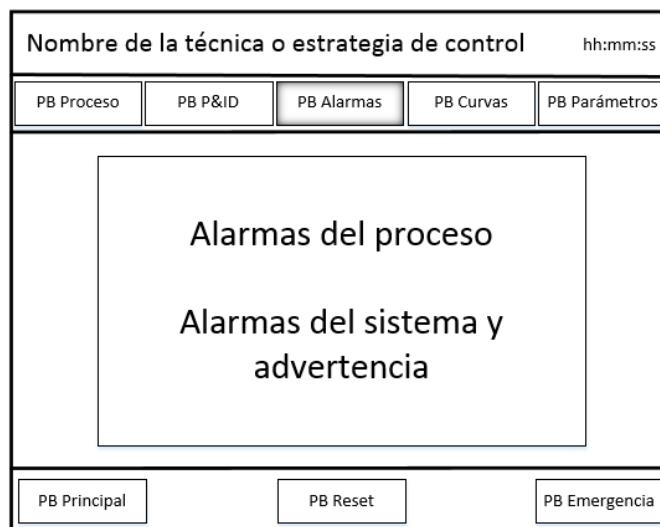


Figura 90. Diseño de la pantalla de alarmas y advertencias de proceso

Tabla 19

Características de la pantalla de alarmas y advertencias de proceso

Campo	Fuente	Estilo	Tamaño	Color	
Título de pantalla	Tahoma	Normal	13px	255,255,255	
Texto Botones PB	Tahoma	Normal	12px	0,0,0	
hh:mm:ss	Tahoma	Normal	13px	255,255,255	
Texto de alarmas	Tahoma	Normal	11px	0,0,0	
Texto pestaña activa	Tahoma	Normal	13px	0,0,0	
Texto pestaña inactiva	Tahoma	Normal	13px	255,255,255	
PB Reset				0,192,192	
PB Principal				0,192,192	
PB Emergencia				255,255,255	
Fondo Pantalla				0,0,0	
Fondo cuadro de alarmas				255,255,255	
Pestaña activa				0; 192; 255	
Pestaña inactiva				0; 128; 192	

Además, en la pantalla de alarmas se presenta la hora, la fecha, y el elemento causante del evento de aviso, adicionalmente se presenta el botón de reset de alarmas en caso de fallas graves como se visualiza Figura 90. Las características de la pantalla de proceso se detallan en la Tabla 19.

4.2.2.6. Diseño de la pantalla de curvas del proceso

Se muestra un gráfico en tiempo real de la respuesta de las diferentes variables de proceso, el tiempo total visualizado puede configurarse en los parámetros del HMI, se presentan los valores de variable del proceso. Se tiene además botones de navegación entre pantallas y un apartado de alarmas de proceso, se incluye el botón de parada de emergencia, ver Figura 91.

Dependiendo del tipo de proceso (si se tiene más de un controlador) se diseña la pantalla con la posibilidad de diferenciar las curvas de cada controlador, para trasladarse de una curva a otra se presiona el botón con una flecha. Las características de los elementos de la pantalla de curvas se detallan Tabla 20.

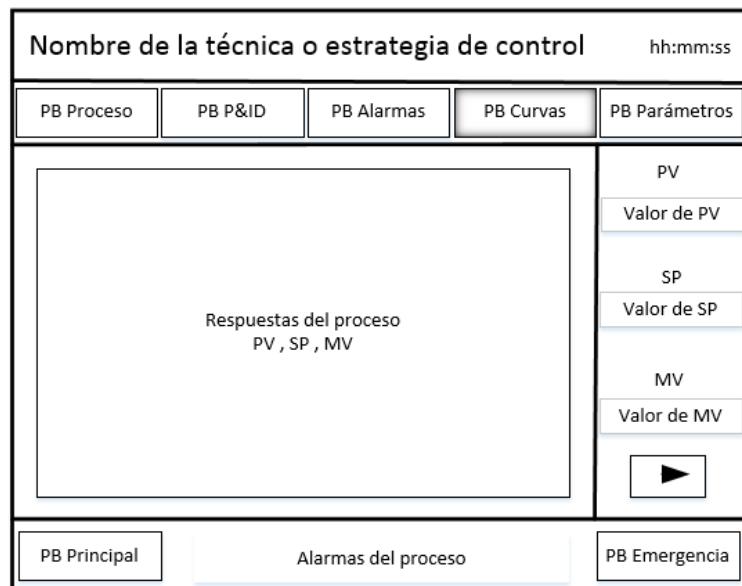
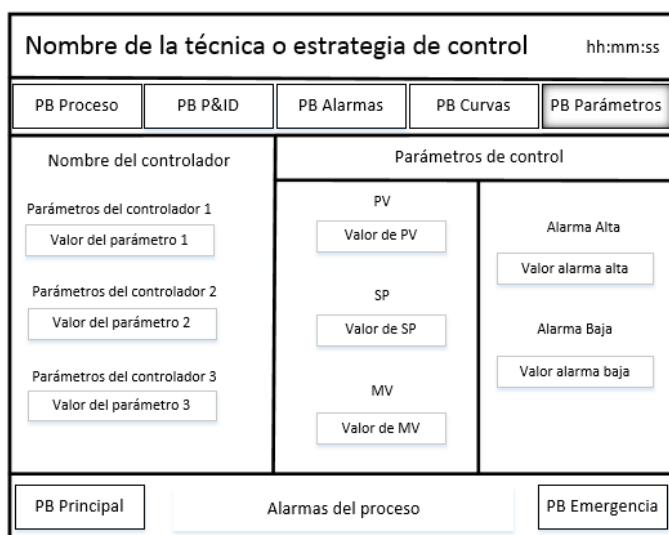


Figura 91. Diseño de la pantalla de curvas del proceso

Tabla 20**Características de la pantalla de curvas de proceso**

Campo	Fuente	Estilo	Tamaño	Color
Título de pantalla	Tahoma	Normal	13px	255,255,255
Texto en Botones PB	Tahoma	Normal	12px	0,0,0
hh:mm:ss	Tahoma	Normal	13px	255,255,255
Texto pestaña activa	Tahoma	Normal	13px	0,0,0
Texto pestaña inactiva	Tahoma	Normal	13px	255,255,255
Título de controlador	Tahoma	Normal	12px	255,255,255
Subtítulo SP	Tahoma	Normal	12px	255,0,0
Subtitulo PV	Tahoma	Normal	12px	0,255,0
Subtitulo MV	Tahoma	Normal	12px	0; 128; 192
Valor de parámetros de control	Tahoma	Normal	12 px	255,255,255
Color curva SP				255,0,0
Color curva PV				0,255,0
Color curva MV				0; 128; 192
PB Principal				0,192,192
PB Emergencia				255,0,0
PB Flecha				0,192,192
Fondo de pantalla				0,0,0
Pestaña activa				0; 192; 255
Pestaña inactiva				0; 128; 192
Alarma de proceso activada				255,0,0
Alarma de proceso desactivada				0,255,0

4.2.2.7. Diseño de la pantalla de ingeniería**Figura 92. Diseño de la pantalla de parámetros de ingeniería**

Se presentan los parámetros del controlador dependiendo del tipo (PID, On/Off, Cascada, Superposición, etc.), además en la pantalla se visualizan los límites de variación de PV que determinan si se activan las alarmas de proceso. Se muestran además los valores de las variables de proceso y el apartado de alarmas, ver Figura 92. Las características de los elementos de la pantalla de curvas se detallan en la Tabla 21.

Tabla 21**Características de la pantalla de parámetros de ingeniería**

Campo	Fuente	Estilo	Tamaño	Color
Título de pantalla	Tahoma	Normal	13px	255,255,255
Texto en Botones PB	Tahoma	Normal	12px	0,0,0
hh:mm:ss	Tahoma	Normal	13px	255,255,255
Texto pestaña activa	Tahoma	Normal	13px	0,0,0
Texto pestaña inactiva	Tahoma	Normal	13px	255,255,255
Título de controlador	Tahoma	Normal	12px	255,255,255
Subtítulo SP	Tahoma	Normal	12px	255,0,0
Subtitulo PV	Tahoma	Normal	12px	0,255,0
Subtitulo MV	Tahoma	Normal	12px	0; 128; 192
Subtitulo de alarmas de proceso	Tahoma	Normal	12px	0; 192; 255
Subtitulo de parámetros del controlador	Tahoma	Normal	12px	0; 192; 255
Valor de alarmas de proceso	Tahoma	Normal	12px	255,255,255
Valor de parámetros del Controlador	Tahoma	Normal	12px	255,255,255
Valor de parámetros de control	Tahoma	Normal	12px	255,255,255
Fondo de pantalla				0,0,0
Pestaña activa				0; 192; 255
Pestaña inactiva				0; 128; 192
Alarma de proceso activada				255,0,0
Alarma de proceso desactivada				0,255,0

4.2.2.8. Diseño de la pantalla de mantenimiento

En esta pantalla se presentan los diferentes actuadores de la estación agrupados mediante pestañas dependiendo de su tipo, se diferencian entre sensores (medición), actuadores digitales y actuadores analógicos (proporcionales). Las características de los elementos de las pantallas de mantenimiento se detallan en la Tabla 22.

Tabla 22
Características de las pantallas de mantenimiento

Campo	Fuente	Estilo	Tamaño	Color
Título de pantalla	Tahoma	Normal	13px	255,255,255
hh:mm:ss	Tahoma	Normal	13px	255,255,255
Texto Botones PB	Tahoma	Normal	12px	0,0,0
Texto pestaña activa	Tahoma	Normal	13px	0,0,0
Texto pestaña inactiva	Tahoma	Normal	13px	255,255,255
Nombre de sensor y actuadores	Tahoma	Normal	12px	0; 192; 255
Valor de sensor y actuador	Tahoma	Normal	12px	0,0,0
PB Reset				0,192,192
PB Principal				0,192,192
PB Emergencia				255,255,255
Fondo Pantalla				0,0,0
Pestaña activa				0; 192; 255
Pestaña inactiva				0; 128; 192
Actuadores activados				255,0,0
Actuadores desactivados				0,255,0
Sensores activados				255,0,0
Sensores desactivados				0,255,0

En la pestaña de actuadores digitales se muestran botones para la activación y desactivación y el estado de cada actuador, además cuenta con un botón de emergencia (PB Emergencia) y un botón para la pantalla principal de selección (PB Principal), como se muestra en la Figura 93.

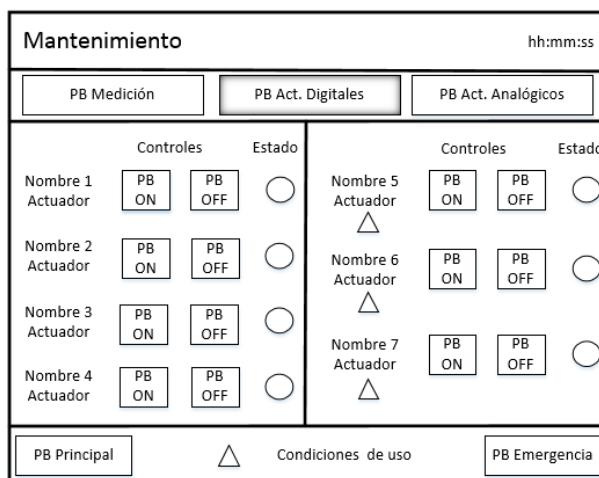


Figura 93. Diseño de la pantalla de mantenimiento-pestaña actuadores digitales

La sección de actuadores analógicos permite manipular y comprobar el funcionamiento de los actuadores analógicos ingresando valores de 0 a 100% dentro de su rango de trabajo como se aprecia en la Figura 94.

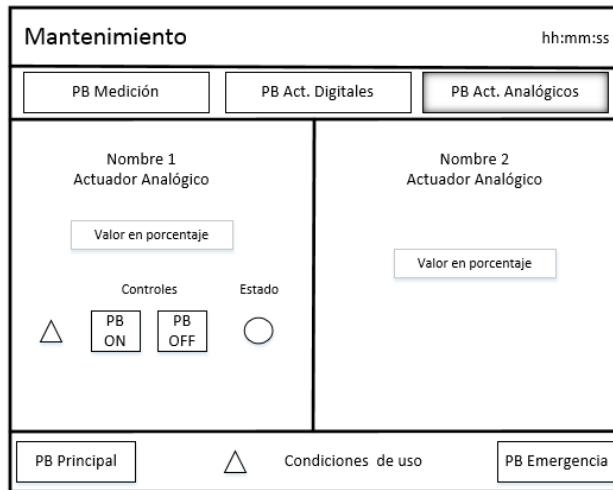


Figura 94. Diseño pantalla de mantenimiento-pestaña actuadores analógicos

En la pestaña de medición se muestran los transmisores de la estación y se visualiza su valor actual en unidades de ingeniería y adicionalmente se puede verificar el estado de los interruptores de nivel de los reservorios de la estación, estas características se presentan en la Figura 95.

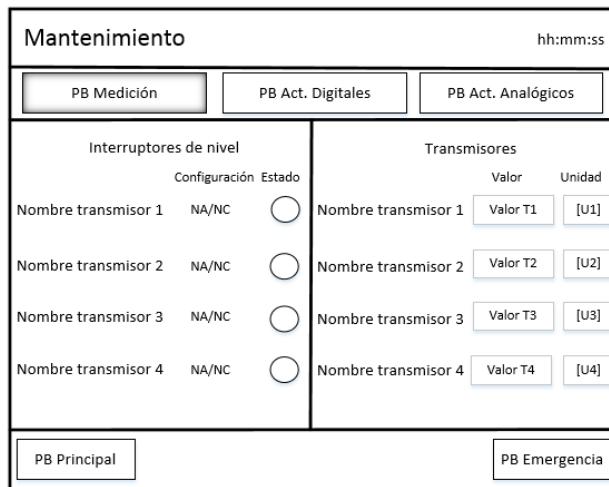


Figura 95. Diseño de la pantalla de mantenimiento-pestaña de medición

4.3. Implementación de las interfaces del sistema

En este apartado se presentan los resultados como capturas de pantalla, luego de la construcción de las interfaces HMI de cada uno de los procesos implementados en la estación PS-2800, la construcción de las pantallas se realizó mediante el Software TIA Portal 13. Adicionalmente la conexión de variables entre el PLC Allen Bradley y el HMI de Siemens fue realizada mediante conexión Ethernet utilizando el protocolo de comunicación Ethernet/IP de Allen Bradley.

4.3.1. Pantalla de selección

Antes de ingresar a la pantalla de selección se visualiza una pantalla de bienvenida que corresponde a la presentación del proyecto, conlleva imágenes referenciales del proyecto y es una pantalla de acceso a la selección de funcionamiento de la estación, ver Figura 96.



Figura 96. Pantalla de bienvenida del proyecto

A dar click sobre la pantalla de bienvenida, se presenta la pantalla correspondiente a la selección de funcionamiento de la estación PS-2800. En la Figura 97 se muestra los dos modos de funcionamiento de la estación de procesos, se tiene en el lado izquierdo la selección de tipo de procesos y a la derecha la opción de verificación de actuadores y sensores instalados.

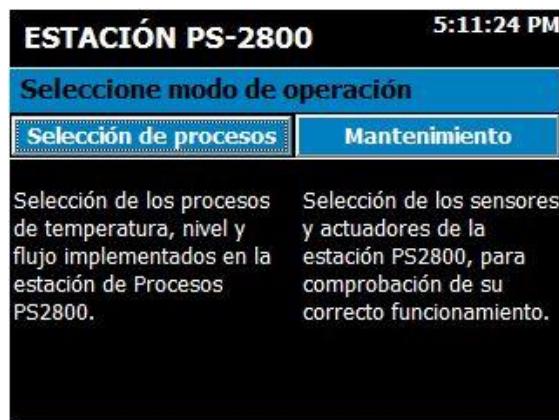


Figura 97. Pantalla de selección de modo de funcionamiento de la estación

Luego de presionar sobre el botón de procesos, se despliega una nueva pantalla que muestra tres tipos de proceso a elegir, en la Figura 98 se muestra una captura de la pantalla de selección de procesos.



Figura 98. Pantalla de selección de tipo de proceso de la estación

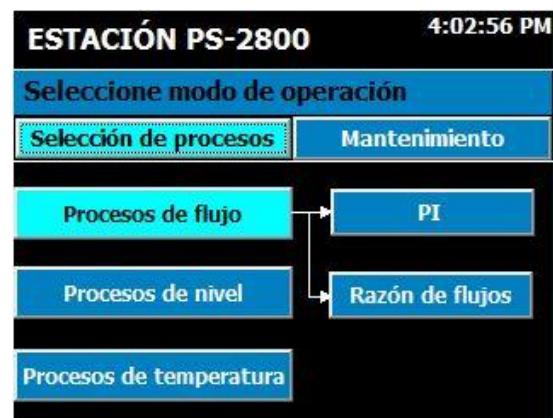


Figura 99. Pantalla de selección de los procesos de flujo

Inmediatamente de que la pantalla de selección de procesos este desplegada, podemos seleccionar entre procesos de temperatura, de flujo y de nivel. Cada proceso posee diferentes técnicas de control implementadas, en el caso del control de flujo; se tiene control PI y estrategia de razón como se muestra en la Figura 99.

Para el proceso de nivel, se ha implementado tres tipos de control, mediante la técnica de control PI, la estrategia de control por cascada, y la estrategia de control por superposición, en la Figura 100 se muestra los tres tipos de control elegibles.

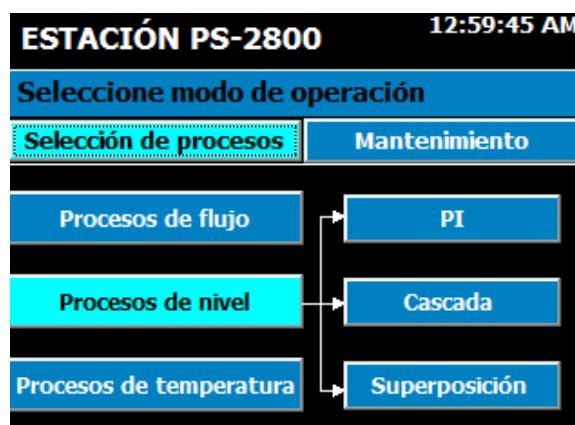


Figura 100. Pantalla de selección de procesos de nivel

Finalmente se han muestran dos tipos de control programados para la variable de temperatura, se tiene control ON/OFF con histéresis y control de rango partido, en la Figura 101 se muestran ambos tipos de control.



Figura 101. Pantalla de selección de procesos de temperatura

Para cada uno de los procesos se ha creado pantallas de Proceso, Diagrama P&ID, Curvas, Alarmas y configuración de parámetros; considerando las características de diseño de las interfaces HMI. En las siguientes secciones se muestra la implementación de dichas pantallas, para cada proceso programado en la estación PS-2800.

4.3.2. Pantallas de Proceso

Para cada una de las estrategias de control que se han implementado en la estación de procesos PS-2800, se ha creado una pantalla de proceso que muestra el estado de las variables de proceso de los controladores, para el caso de las estrategias que integren dos controladores se muestran dos conjuntos de barras de variables de proceso, una para cada controlador. Adicionalmente se presentan los botones de inicio y parada del proceso y finalmente se tiene casillas para el ingreso de las consignas de cada controlador (en el caso de estrategias con dos controladores), ver Figura 102.

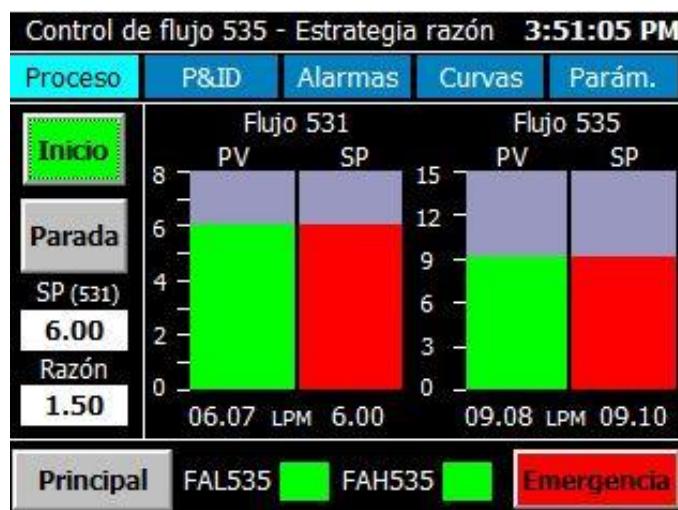


Figura 102. Pantalla de variables de proceso de la estrategia razón de flujos

Además de las pantallas de proceso, se tiene pantallas de diagrama P&ID que permiten determinar el estado de los actuadores y sensores de los distintos lazos de control implementados en la estación PS-2800. En la Figura 103 se muestra la pantalla de diagrama P&ID de la estrategia de control razón de flujos, que posee todos los elementos de instrumentación del lazo, además se representa el estado de dichos elementos mediante colores.

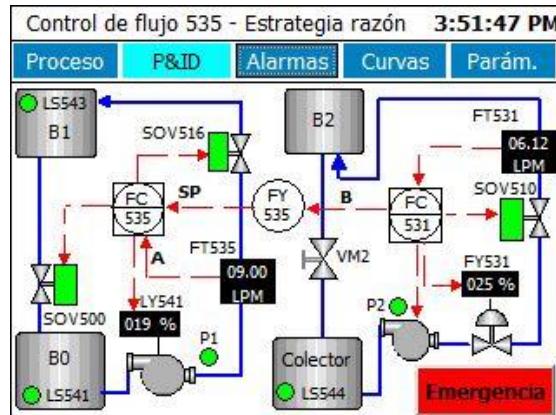


Figura 103. Pantalla diagrama P&ID de la estrategia de razón de flujos

La interfaz posee además una pantalla de configuración de parámetros del regulador (o de los reguladores en el caso de estrategias) que permite cambiar las constantes del regulador PID, y admite configurar el umbral de activación de alarmas del proceso, adicionalmente se tiene indicadores del estado del proceso, como se observa en la Figura 104.

Control de flujo 535 - Estrategia razón 3:53:28 PM		
Proceso	P&ID	Alarms
PI FC531	PI FC535	Parametros
Proporcional 00.12	Proporcional 00.25	Razón: A/B 1.50
Integral 12.00 1/min	Integral 8.10 1/min	HFA SP + 0.3 LPM
Principal	FAL535	LFA SP - 0.3 LPM
	FAH535	
		Emergencia

Figura 104. Pantalla de configuración de parámetros del controlador

Se ha implementado pantallas de visualización de curvas, que permiten comprobar la tendencia del estado de las variables del proceso, de color rojo se tiene el SP del controlador, de color verde se tiene el PV del proceso y finalmente de color azul se tiene el CV presentado en modo de porcentaje. Para el caso de estrategias de control con dos controladores se tiene una pestaña que permite acceder a las curvas de los controladores como se visualiza en la Figura 105 y Figura 106 respectivamente.



Figura 105. Curvas de controlador primario-estrategia de razón de flujos



Figura 106. Curvas del controlador secundario-estrategia de razón de flujos

Finalmente, cada lazo de control presenta una pantalla de alarmas que muestra los avisos del sistema, ver Figura 107.

Control de flujo 535 - Estrategia razón 3:55:01 PM				
Proceso	P&ID	Alarmas	Curvas	Parám.
Time	Date	Text		
3:54:28 PM	2/3/2016	FAL531 - Flujo Insuficiente		
3:53:37 PM	2/3/2016	FAL531 - Flujo Insuficiente		
3:53:32 PM	2/3/2016	FAL531 - Flujo Insuficiente		
3:53:02 PM	2/3/2016	FAL531 - Flujo Insuficiente		
3:52:57 PM	2/3/2016	FAL531 - Flujo Insuficiente		
3:52:25 PM	2/3/2016	FAL531 - Flujo Insuficiente		
3:52:22 PM	2/3/2016	FAL531 - Flujo Insuficiente		
3:52:22 PM	2/3/2016	FAL531 - Flujo Insuficiente		
3:52:20 PM	2/3/2016	FAL531 - Flujo Insuficiente		
Principal		Reset		Emergencia

Figura 107. Pantalla de alarmas de la estrategia de razón de flujos

4.3.3. Pantalla de mantenimiento

Para verificar el funcionamiento de los actuadores y sensores que se encuentran instalados en la estación PS-2800 se ha creado tres pantallas de mantenimiento, clasificadas por su tipo de actuador o sensor.

4.3.3.1. Pantalla de mantenimiento – Medición

La pantalla de medición contempla los sensores analógicos y discretos de la estación, en la sección de interruptores de nivel se detalla la configuración y el estado de cada uno, y en la sección de transmisores se describen el valor y la unidad de los cuatro sensores que se encuentran instalados en la estación, como se observa en la Figura 108.

Mantenimiento		3:38:17 PM			
Medición		Act. Digitales		Act. Analógicos	
Interruptores de Nivel		Transmisores			
Configuración	Estado		Valor	Unidad	
LS541	NA	●	FT531	00.49	LPM
LS542	NA	●	FT535	00.49	LPM
LS543	NC	●	LT541	14.89	cm
LS544	NA	●	TT511	33.48	oC
Principal		Emergencia			

Figura 108. Pantalla de Medición de transmisores e interruptores

4.3.3.2. Pantalla de mantenimiento – Actuadores

La pantalla de actuadores discretos contiene las electroválvulas, la bomba AC P2, el enfriador y el calentador; en la pantalla de actuadores analógicos se muestra la válvula proporcional y la bomba DC P1, como se visualiza en la Figura 109 y Figura 110 respectivamente; para la activación de los actuadores se debe considerar siguientes aspectos:

- Para que funcione el calentador debe estar activado el transmisor LS542, el transmisor nos avisa que existe el suficiente nivel de agua en el reservorio B1.
- Para que funcione el enfriador debe estar activa la electroválvula V515 y la bomba DC P1, ya que el enfriador necesita que atraviesa el líquido por la línea de tubería para poder funcionar y enfriar el líquido.
- Para observar el funcionamiento de la bomba AC P1, primero se debe asignar un valor al actuador analógico VF531, debido a que la válvula proporcional permite el paso del líquido hacia el reservorio B2.



Figura 109. Pantalla de activación de actuadores digitales



Figura 110. Pantalla de activación de actuadores analógicos

CAPÍTULO V

PRUEBAS Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

5.1. Prueba de operación de los componentes de la estación

Al realizar el proceso de reingeniería de la estación PS-2800 es necesario comprobar que todos los sensores, actuadores y demás componentes instalados en la estación se encuentren funcionales y operables en su totalidad, por lo cual es necesario identificar las entradas y salidas que controla el PLC.

Para el desarrollo de la actividad se comprobó que los sensores funcionen adecuadamente dentro del rango de operación, para el transmisor de temperatura TT511 se utilizó como referencia un termómetro de mercurio, el cual nos permitió obtener la transformación de grados centígrados en función de las unidades crudas que envía el sensor al PLC.

En el caso del transmisor de nivel ultrasónico LT541 se utilizó como referencia el medidor de nivel con escala graduada en centímetro instalado en la parte externa del reservorio B1, el mismo que permite medir en forma directa el nivel del líquido. Es de vital importancia indicar que se realizó pruebas con el transmisor de nivel por presión hidrostática arrojando datos favorables para la medición del nivel del líquido, siempre y cuando la temperatura del líquido no supere los 30 grados centígrados, al superar dicha temperatura el transmisor PMC133 presenta una precisión de ± 2 cm con un error aproximado de 15% del valor real , razón por lo cual se decidió utilizar el transmisor de nivel ultrasónico para el desarrollo de los algoritmos de control.

Para la medición del flujo que atraviesa por las líneas de tuberías donde se encuentran instalados los transmisores FT531 Y FT535 se utilizó como referencia un contenedor con escala graduada en litros para convertir las unidades crudas que mide el sensor a unidades de ingeniería en litros por minuto, el direccionamiento de las entradas analógicas del PLC se detallan en la Tabla 23.

Tabla 23**Lista de entradas analógicos, módulo 1769-IF4**

Dirección	Nomenclatura	Descripción
Local:5:I.Ch0Data	FT535	Transmisor de flujo ubicado en la línea de tubería hacia el reservorio B2
Local:5:I.Ch1Data	FT531	Transmisor de flujo ubicado en la línea de tubería hacia el reservorio B1
Local:5:I.Ch2Data	TT511	Transmisor de temperatura ubicado en el reservorio B1
Local:5:I.Ch3Data	LT541	Transmisor de nivel ubicado en el reservorio B1

Para verificar el funcionamiento de los elementos conectados a las salidas analógicas se procedió a cambiar el valor en unidades crudas en el PLC y observar el comportamiento de la válvula proporcional y de la bomba P1, en la sección 2.1.2.2 se detalla las características de operación y las gráficas de los actuadores analógicos en unidades de ingeniería en función de unidades crudas del PLC, el direccionamiento de las salidas analógicas del PLC se detallan en la Tabla 24.

Tabla 24**Lista de salidas del módulo analógico 1769-OF2**

Dirección	Nomenclatura	Descripción
Local:6:O.Ch0Data	VF531	Válvula proporcional
Local:6:O.Ch1Data	PWM bomba P1	Valor que permite variar el PWM de la bomba DC P1

Tabla 25**Lista de entradas digitales, módulo 1769-IQ16F**

Dirección	Nomenclatura	Descripción
Local:2:I.Data.0	Emergency stop	Pulsador de parada de emergencia del tablero de control
Local:2:I.Data.7	LS541	Transmisor de nivel, mínimo en el reservorio B0
Local:2:I.Data.8	LS542	Transmisor de nivel, mínimo en el reservorio B1
Local:2:I.Data.9	LS543	Transmisor de nivel, máximo en el reservorio B1
Local:2:I.Data.10	LS544	Transmisor de nivel, mínimo en el tanque colector

Se han comprobado también el funcionamiento de los elementos digitales que se encuentran conectados al PLC, en la Tabla 26 se detalla la dirección de las entradas y salidas digitales que forman parte del proceso de reingeniería de la estación PS-2800.

Tabla 26**Lista de salidas digitales, módulo 1769-OB16P**

Dirección	Nomenclatura	Descripción
Local:3:O.Data.9	Ventilador	Pulsador de parada de emergencia del tablero de control
Local:3:O.Data.10	Calentador	Niquelina ubicada en el reservorio B1
Local:3:O.Data.11	Enfriador	Ubicado en la línea de tubería hacia el reservorio B1 trabaja conjuntamente con la electroválvula 515
Local:3:O.Data.12	Bomba AC P2	Transmisor de nivel, máximo en el reservorio B1
Local:4:O.Data.0		Luz de emergencia - tablero de control
Local:4:O.Data.1		Luz de alarma del proceso - tablero de control
Local:4:O.Data.8	V500	Electroválvula que permite el desfogue del líquido desde el reservorio B1 hacia el reservorio B0
Local:4:O.Data.9	V510	Permite el ingreso del líquido hacia el reservorio B2 desde el tanque colector
Local:4:O.Data.12	V515	Permite el ingreso del líquido hacia el reservorio B1 desde el reservorio B0
Local:4:O.Data.13	V516	Permite el ingreso del líquido hacia el reservorio B1 desde el reservorio B0 pasando por el enfriador.
Local:4:O.Data.15	Bomba DC P1	Encendido de la bomba DC P1, trabaja conjuntamente con la salida analógica del canal 1

5.2. Prueba de funcionamiento de los lazos de control**5.2.1. Control de temperatura 511-Técnica de control ON-OFF con histéresis**

En la sección 3.4.5 se detalla el diseño y especificaciones del algoritmo de control del lazo de temperatura 511 mediante la técnica de control ON-OFF con histéresis, el lazo de control del proceso se visualiza en la Figura 20.

Una vez realizado el diseño y las diferentes pruebas de funcionamiento de la técnica de control se procede a obtener los parámetros de control del proceso, ver Tabla 27, además se efectuó un gráfico en el cual se visualiza la respuesta del sistema real frente a una entrada referencia en la lámina 1.

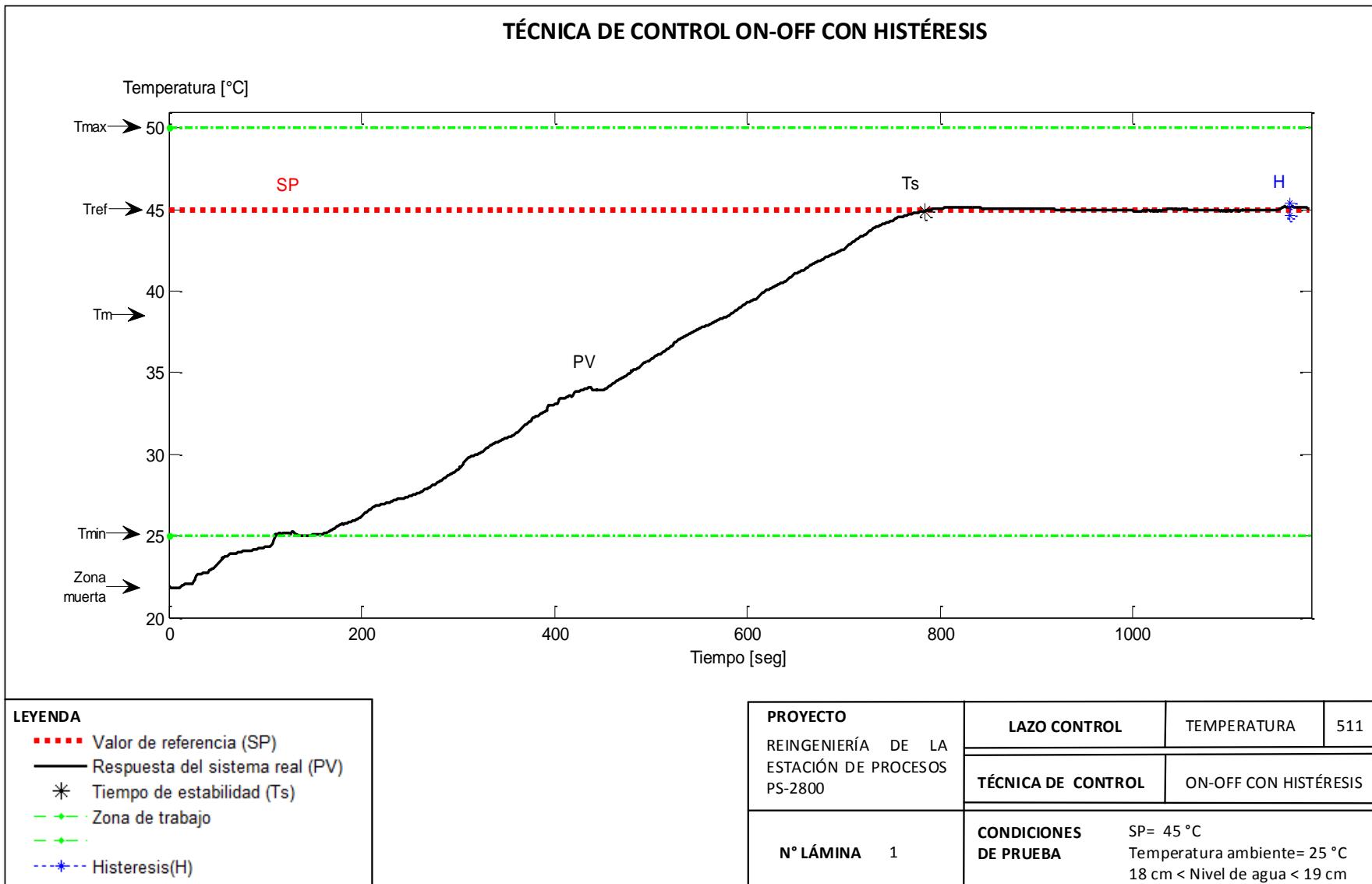


Tabla 27**Técnica OnOff - parámetros de control del lazo de temperatura 511**

Parámetro	Valor	Unidad
Temperatura máxima (Tmax)	50	°C
Temperatura media (Tm)	37.5	°C
Temperatura mínima (Tmin):	25	°C
Temperatura ambiente (Ta):	18 a 22	°C
Temperatura referencia (Tref):	45	°C
Zona histéresis:	0.3	°C
Zona muerta:	menor a 20	°C
Error:	0.2	°C

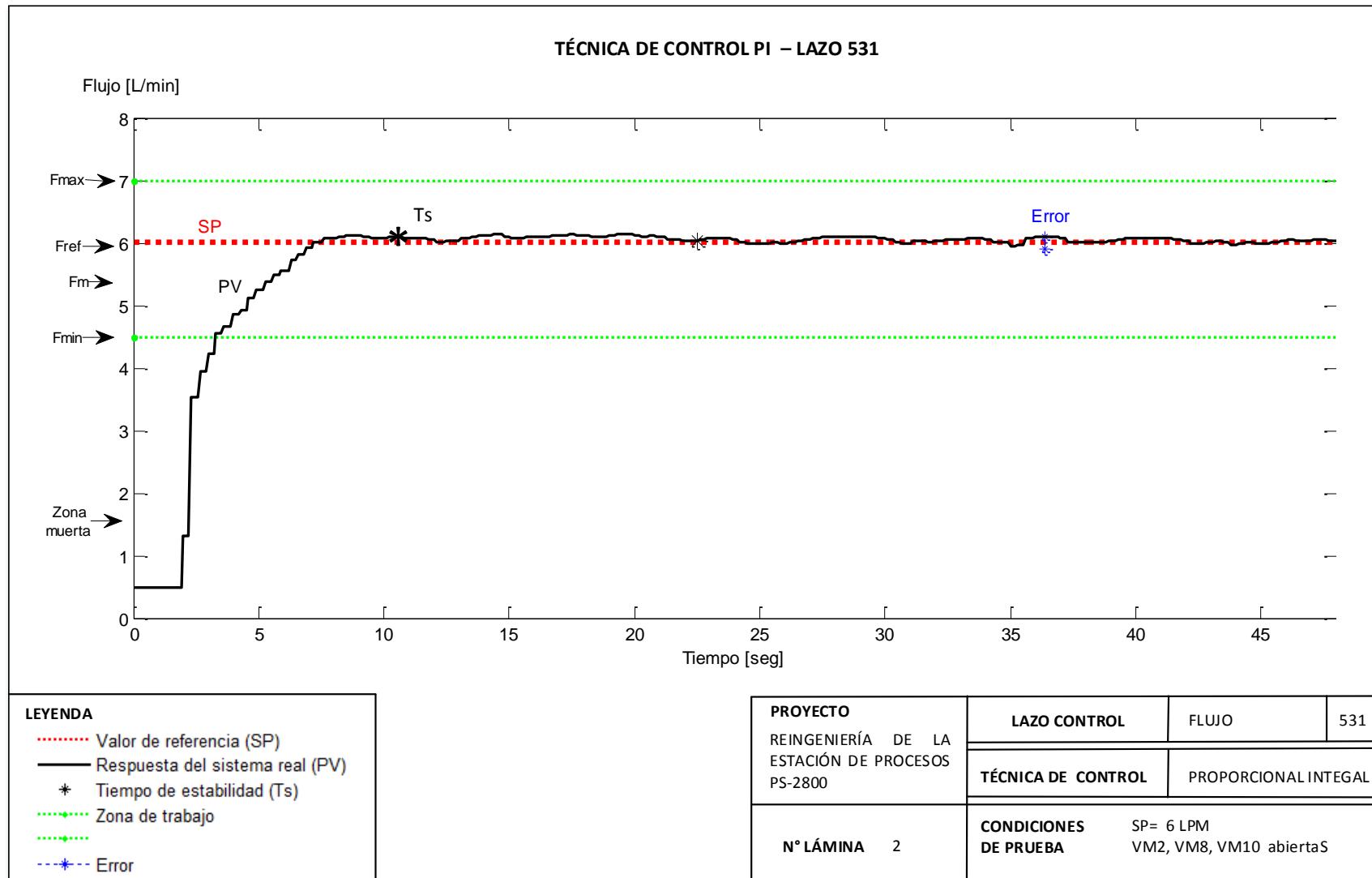
5.2.2. Control de flujo 531 - Técnica de control PI

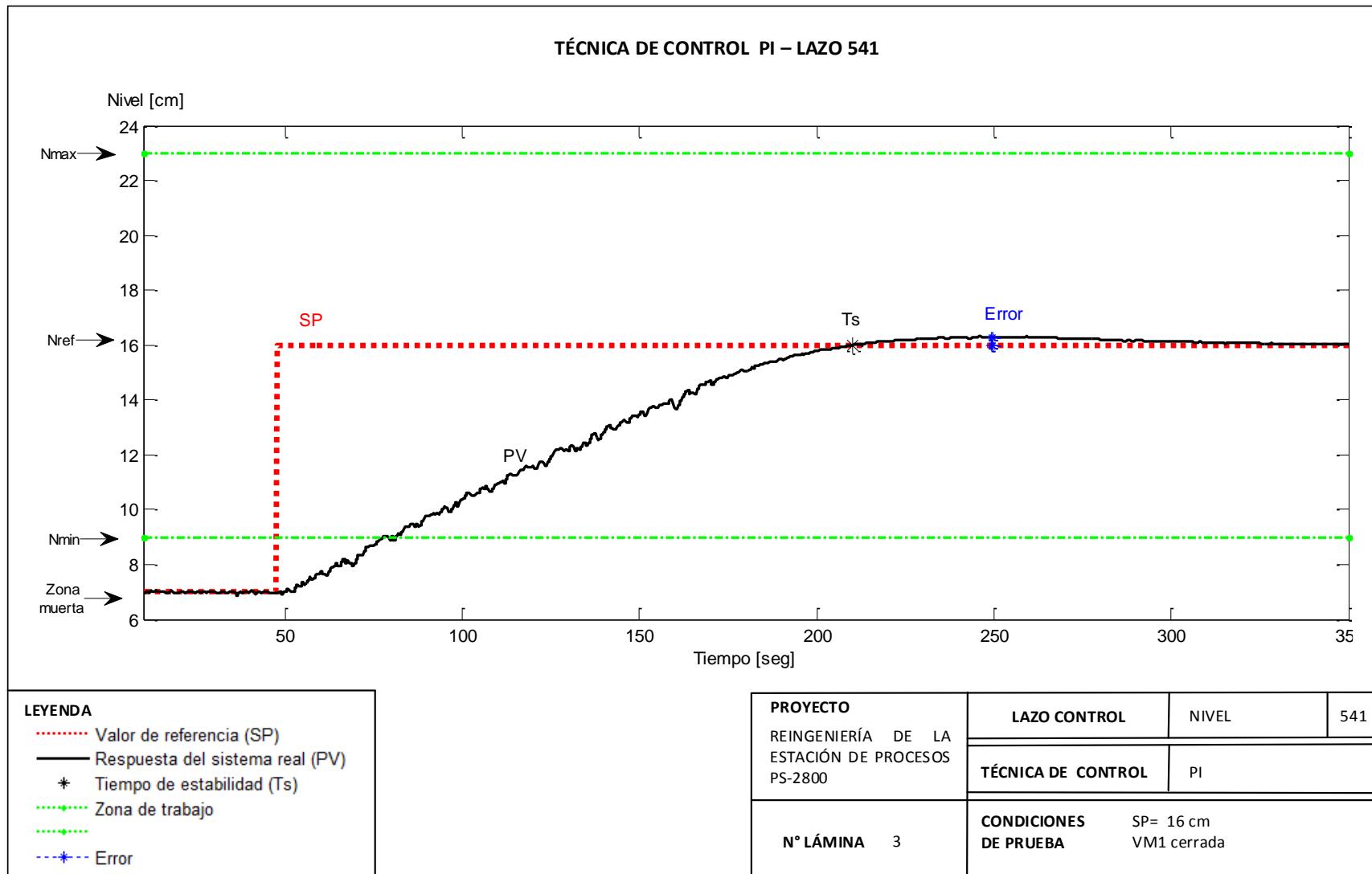
En la sección 3.4.2 se detalla el diseño y las especificaciones del algoritmo de control para el lazo de flujo 531 mediante la técnica de control proporcional integral, el lazo de control se visualiza en la Figura 21, a continuación, se detallan los parámetros de control obtenidos en el lazo de flujo, ver Tabla 28.

Los parámetros de control conseguidos del proceso mediante la técnica de control PI cumplen con las especificaciones de diseño, en la lámina 2 se observa la respuesta del sistema real frente a una entrada de referencia.

Tabla 28**Técnica PI - parámetros de control del lazo de flujo 531**

Parámetro	Valor	Unidad
Flujo máximo (Fmax):	7	L/min
Flujo medio (Fm):	5.87	L/min
Flujo mínimo (Fmin):	4.5	L/min
Flujo referencia (Fref):	6	L/min
Tiempo de estabilidad (T_s):	22	seg
Sobre impulso (Mp):	menor al 10	%
Zona muerta:	0 a 3	L/min
Zona de saturación:	mayor a 7.5	L/min
Error (SP-PV):	± 0.3	L/min





5.2.3. Control de nivel 541- Técnica de control PI

En la sección 3.4.4 se detalla el diseño y las especificaciones del algoritmo de control para el lazo de nivel 541 mediante la técnica de control PI, el lazo de control se visualiza en la Figura 22, a continuación, se detallan los parámetros de control obtenidos en el lazo de nivel, ver Tabla 29.

Los parámetros de control obtenidos del proceso mediante la técnica de control PI cumplen con las especificaciones de diseño, además en la lámina 3 se observa la respuesta del sistema real frente a una entrada de referencia. El tiempo de estabilidad hace referencia a la mayor de nivel de SP que el usuario puede ingresar, es decir 23cm.

Tabla 29

Técnica PI - parámetros de control del lazo de nivel 541

Parámetro	Valor	Unidad
Nivel máximo (Nmax):	23	cm
Nivel medio (Nm):	16	cm
Nivel mínimo (Nmin):	9	cm
Flujo referencia (Nref):	16	cm
Tiempo de estabilidad (T_s):	menor a 500	seg
Sobre impulso (Mp):	menor al 10	%
Zona muerta:	0 a 7	cm
Zona de saturación:	mayor a 23	cm
Error (SP-PV):	± 0.3	cm

5.2.4. Control de nivel 541 – Estrategia por cascada

Al tratarse de una estrategia de control en cascada entre dos reguladores LC541 y FC535 es necesario de detallar los parámetros de control de los lazos en los cuales intervienen los dos controladores.

En la Tabla 30 se detalla los parámetros de control del lazo 541 y en la Tabla 31 se detalla los parámetros de control del lazo 535, además en la lámina 4 se observa la respuesta del sistema real frente a una entrada de referencia

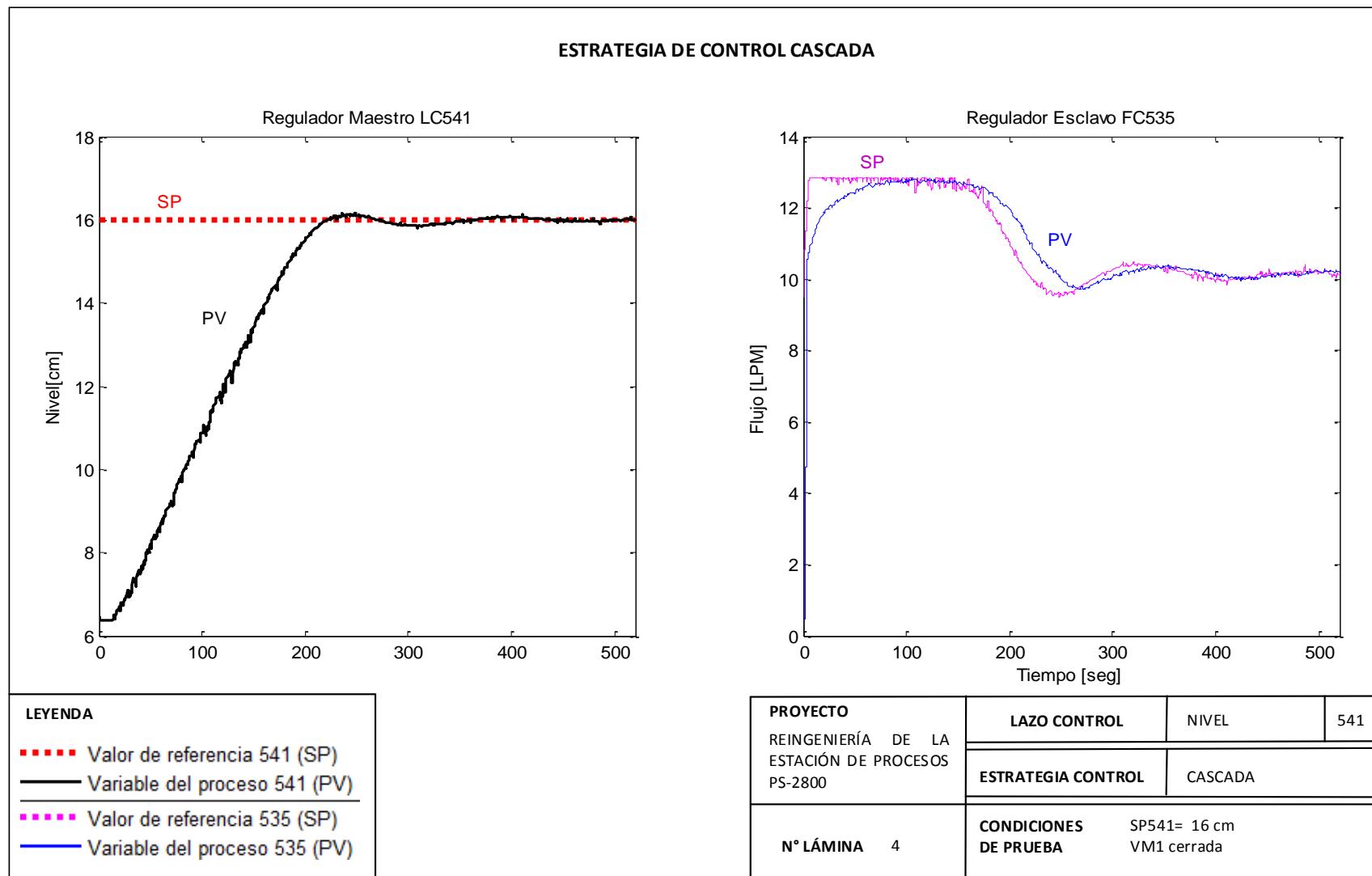


Tabla 30**Estrategia cascada - parámetros de control del lazo de nivel 541**

Parámetro	Valor	Unidad
Nivel máximo (Nmax):	23	cm
Nivel medio (Nm):	16	cm
Nivel mínimo (Nmin):	9	cm
Flujo referencia (Nref):	16	cm
Tiempo de estabilidad (T_s):	menor a 500	seg
Sobre impulso (Mp):	menor al 10	%
Zona muerta:	0 a 7	cm
Zona de saturación:	mayor a 23	cm
Error (SP-PV):	± 0.3	cm

Tabla 31**Estrategia cascada - parámetros de control del lazo de flujo 535**

Parámetro	Valor	Unidad
Flujo máximo (Fmax):	13	L/min
Flujo medio (Fm):	11	L/min
Flujo mínimo (Fmin):	9	L/min
Tiempo de estabilidad (T_s):	45	seg
Sobre impulso (Mp):	menor al 10	%
Zona muerta:	0 a 5	L/min
Zona de saturación:	mayor a 13	L/min
Error (SP-PV):	± 0.3	L/min

5.2.5. Control de flujo 535 – Estrategia por razón de flujos

La estrategia de control por razón de flujos permite controlar el flujo del lazo de control 535 en función del lazo de control 531 de la estación PS-2800, razón por la cual en la Tabla 32 se detalla los parámetros de control de los dos lazos que intervienen en el proceso.

En la lámina 5 se visualiza el comportamiento de los reguladores FC531 y FC535 frente a una razón de referencia igual a 1.75, para asignar un valor a la razón se considera los flujos máximos y mínimos de cada lazo.

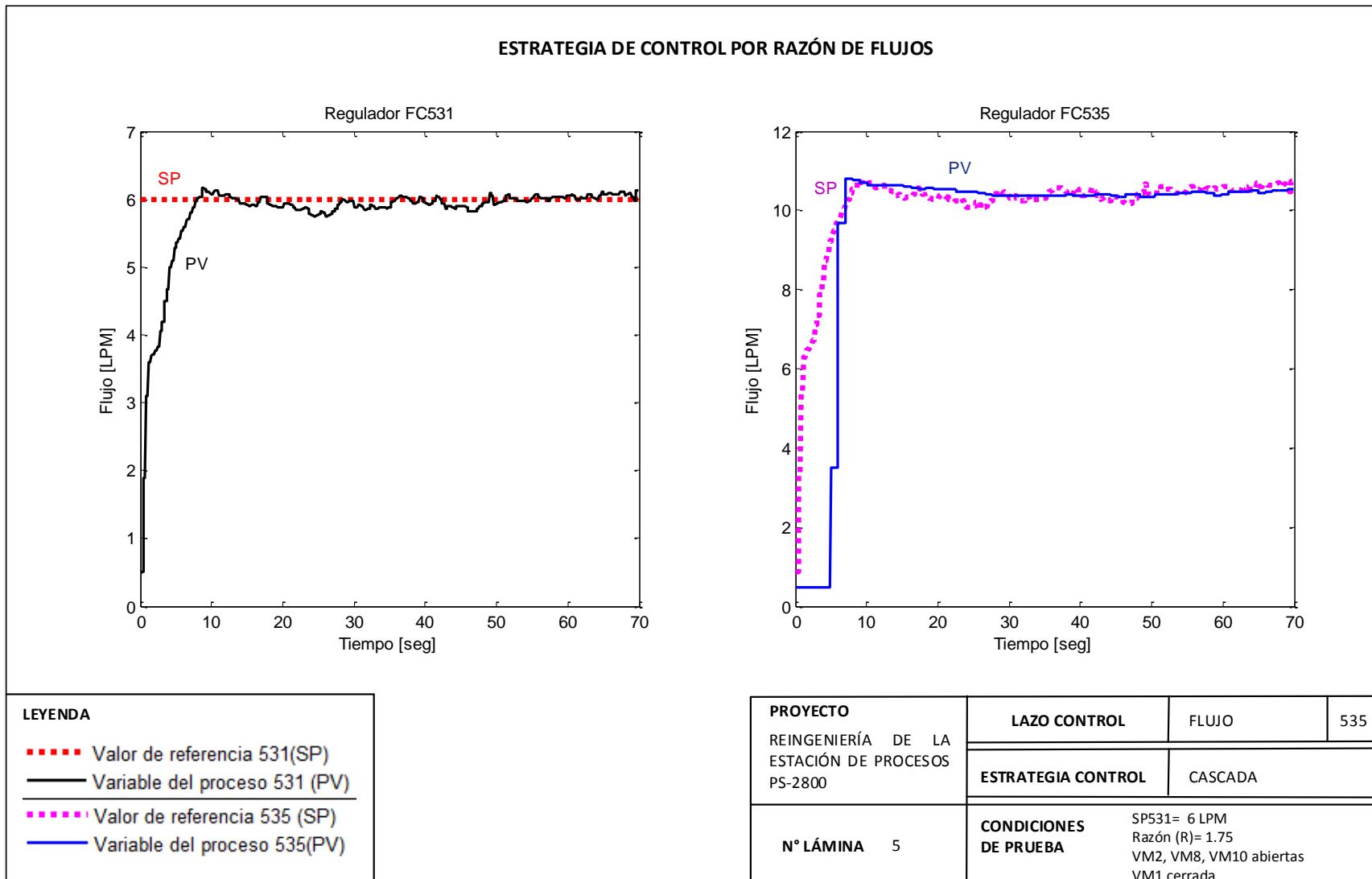


Tabla 32
Estrategia razón - Parámetros de control

Parámetro	Valor (lazo 531)	Valor (lazo 535)	Unidad
Flujo máximo (Fmax):	7	12	L/min
Flujo medio (Fm):	5.87	9	L/min
Flujo mínimo (Fmin):	4.5	6	L/min
Tiempo de estabilidad (T_s):	22	45	seg
Sobre impulso (Mp):	menor al 10	menor al 10	%
Zona muerta:	0 a 3	0 a 5	L/min
Zona de saturación:	mayor a 7.5	mayor a 12.5	L/min
Error (SP-PV):	± 0.3	± 0.3	L/min

5.2.6. Control de nivel 541 – Estrategia por superposición

El control de nivel mediante la estrategia de superposición presenta los parámetros de control que se detallan en Tabla 33 y Tabla 34, además en la lámina 6 se visualiza el comportamiento de los reguladores LC541 y FC535 frente a un valor de referencia de nivel y de flujo,

En la Figura 111 se visualiza el comportamiento que presenta la variable manipulada de cada regulador, cabe recordar que la menor variable manipulada de los controladores será el valor que se le asigne al actuador del lazo de control (Bomba DC P1).

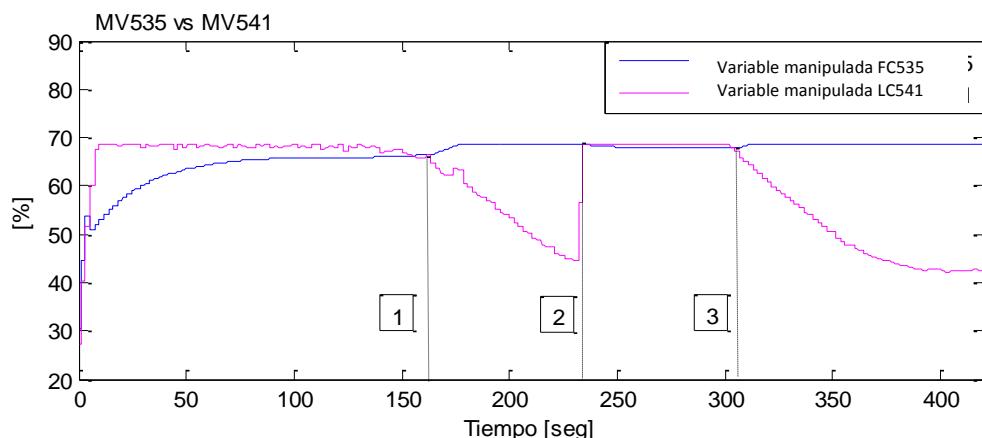


Figura 111. Respuesta de la variable MV de los reguladores FC535 y LC541

Al iniciar el algoritmo de control para el lazo de nivel se observa que MV535 es menor a MV541, razón por la cual se asigna el valor de MV535 al actuador como se observa en el Tramo 0-1 de la Figura 111; posteriormente al incrementar el nivel en el tanque y acercarse al valor de referencia de nivel se observa que el menor valor de la variable manipulada es de MV541, asignando dicho valor al actuador como se detalla en el Tramo 1-2, es decir se superpone MV541 a MV535.

Al cambiar el Setpoint de nivel, MV535 tiene el menor valor de las variables manipuladas y controla a la bomba DC P1 hasta alcanzar un valor cercano al nivel de referencia como se visualiza en el Tramo 2-3, en ese punto empieza a gobernar el regulador MV541 al sistema.

Tabla 33

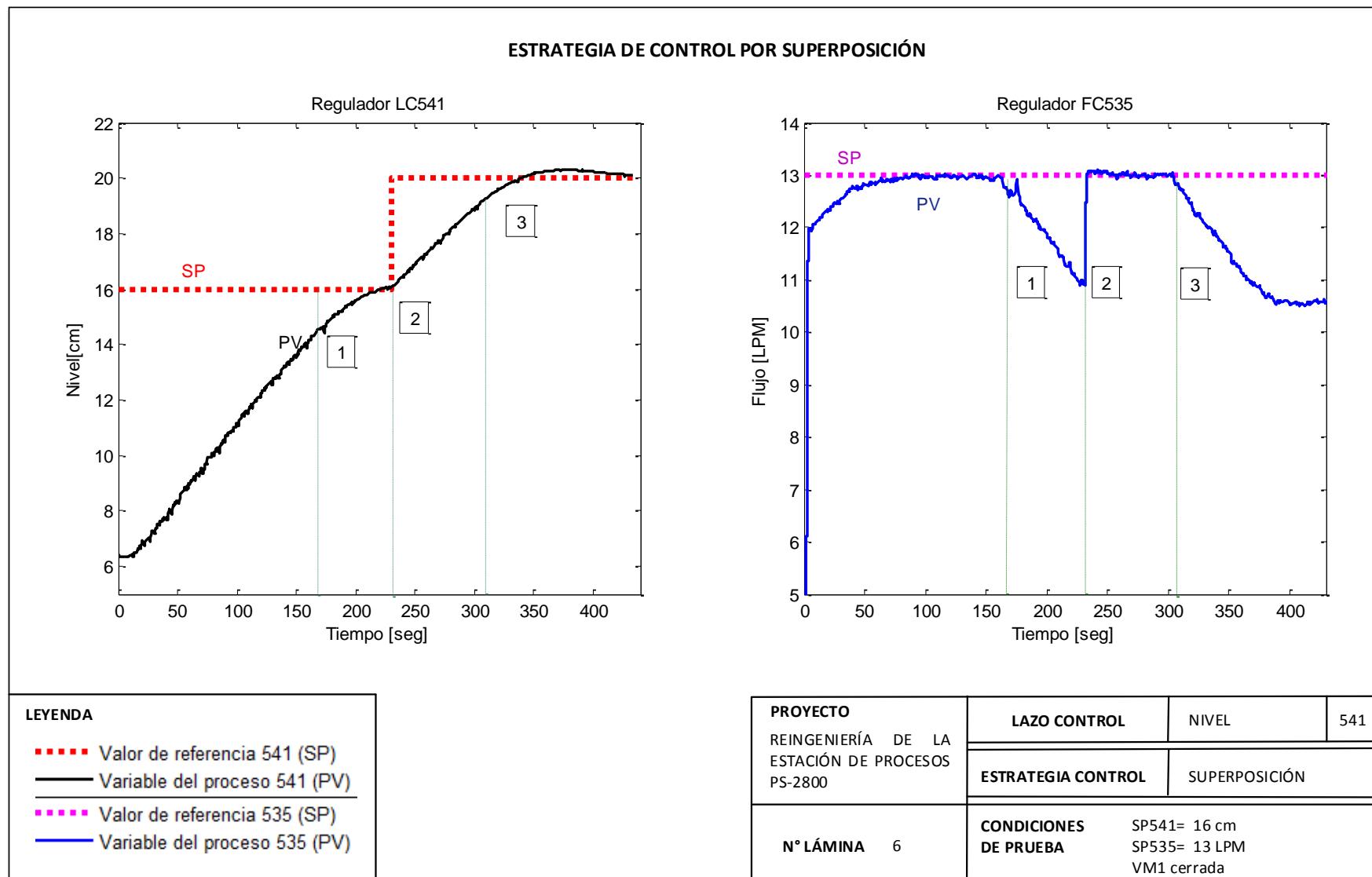
Estrategia superposición - parámetros de control del lazo de nivel 541

Parámetro	Valor	Unidad
Nivel máximo (Nmax):	23	Cm
Nivel medio (Nm):	16	Cm
Nivel mínimo (Nmin):	9	Cm
Flujo referencia (Nref):	16	Cm
Tiempo de estabilidad (T_s):	menor a 500	Seg
Sobre impulso (Mp):	menor al 10	%
Zona muerta:	0 a 7	Cm
Zona de saturación:	mayor a 23	Cm
Error (SP-PV):	± 0.3	Cm

Tabla 34

Estrategia superposición - parámetros de control del lazo de flujo 535

Parámetro	Valor	Unidad
Flujo máximo (Fmax):	13	L/min
Flujo medio (Fm):	11	L/min
Flujo mínimo (Fmin):	9	L/min
Tiempo de estabilidad (T_s):	45	Seg
Sobre impulso (Mp):	menor al 10	%
Zona muerta:	0 a 5	L/min
Zona de saturación:	mayor a 13	L/min
Error (SP-PV):	± 0.3	L/min



5.2.7. Control de temperatura 511 – Estrategia por rango partido

El control de temperatura mediante la estrategia por rango partido presenta los parámetros de control que se detallan en la Tabla 35, además en la lámina 7 se visualiza el comportamiento del lazo de control frente a un valor de referencia.

Tabla 35

Estrategia rango partido - parámetros de control del lazo de temperatura 511

Parámetro	Valor	Unidad
Temperatura máxima (Tmax):	45	°C
Temperatura de referencia (Tref):	40	°C
Temperatura mínima (Tmin):	30	°C
Temperatura ambiente	22	°C
Sobre impulso (Mp):	menor al 15	%
Zona muerta:	0 a 25	°C
Zona de saturación:	mayor a 45	°C
Error (SP-PV):	± 0.5	°C

El comportamiento que presentan los dos actuadores del proceso se visualiza en la Figura 112, en el tramo 0-1 se observa que el calentador alcanza un valor del 100% de su funcionamiento y posteriormente comienza a disminuir dicho porcentaje, la bomba P1 inicia con el 10% de su valor y se incrementa paulatinamente permitiendo un mayor flujo de agua hacia el reservorio B1; en el tramo 1-2 se observa que la bomba funciona a su máxima capacidad debido a que necesita enfriar el agua del reservorio B1, en cambio el calentador reduce su porcentaje de operación.

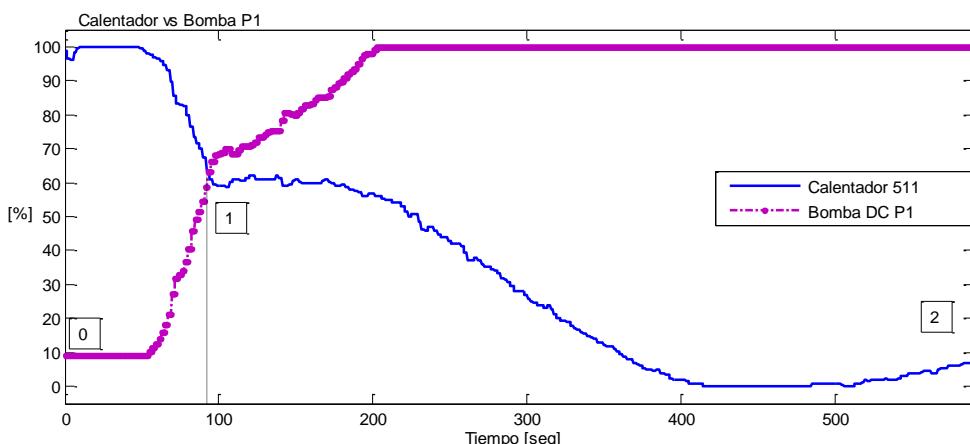
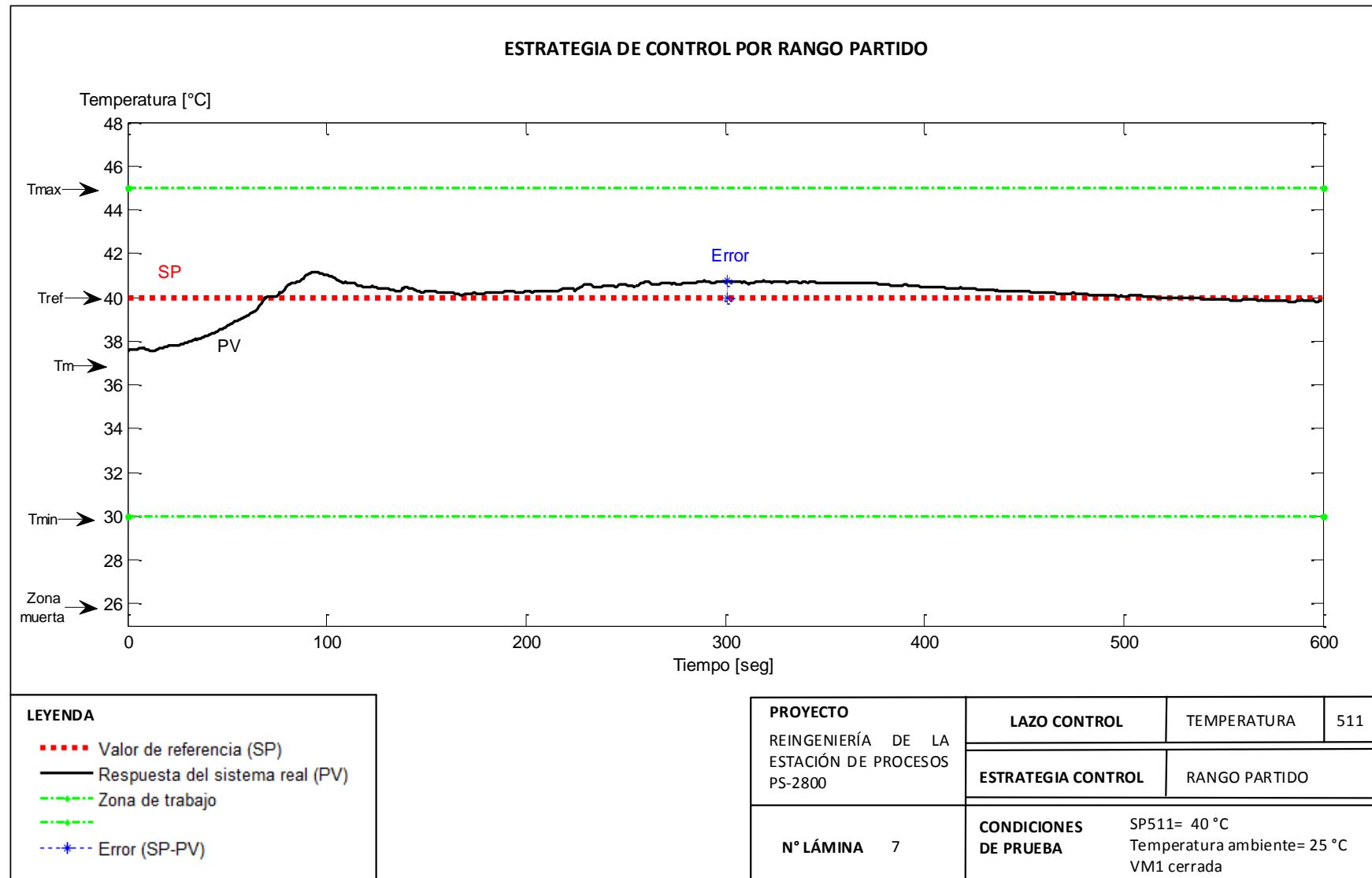


Figura 112. Respuesta de los actuadores de la estrategia de rango partido



CAPÍTULO VI

GUÍAS MULTIMEDIA

En el presente capítulo se desarrollan las guías multimedia que permiten al estudiante tener horas de aprendizaje autónomo en el área del control de procesos. En primera instancia se detalla las características del diseño de las guías, posteriormente se realiza la arquitectura y el diseño de la página web y finalmente se procede a la implementación de las mismas.

A continuación, se presentan los lineamientos necesarios para el desarrollo de guías multimedia dentro del proyecto, además se presentan los recursos necesarios para lograr obtener un entorno web que permita utilizar las funcionalidades implementadas en la estación.

6.1. Características de diseño de guías multimedia

- Construir un conjunto 7 prácticas interactivas para la asignatura de control de procesos, mediante una herramienta multimedia que contribuyen a desarrollar las competencias profesionales del estudiante.
- Las prácticas multimedia están destinadas a ser una herramienta que permita al profesor de la asignatura guiar a los estudiantes para el conocimiento, manejo y explotación de la estación PS-2800 como una estación para el control de procesos básicos y avanzados.
- Las prácticas se enfocan en guiar al estudiante en el uso de la interfaz HMI diseñada e implementada en el Capítulo IV, que le permita configurar los valores característicos de cada variable de proceso involucrada en la estrategia de control.
- El propósito principal de las guías es junto con la estación PS-2800 ser un recurso didáctico que muestre a los estudiantes la aplicación de los

conocimientos relacionados a distintos tipos de procesos típicamente usados en las industrias.

- Las prácticas permiten aprovechar las funcionalidades de la interfaz q permiten el control, monitoreo y supervisión de la instrumentación instalada en la estación PS-2800, además de manipular parámetros (alarmas, constantes Kp, Ki, Kd) de la lógica de los controladores FC531, FC535 TC511 y LC541.
- Las guías multimedia se desarrollan utilizando el programa ARDORA V7, que permite generar contenido HTML ejecutable mediante un explorador web; el contenido referente a cada lazo de control implementado en la estación PS-2800 además de actividades interactivas para que el estudiante asimile de mejor manera los conocimientos involucrados en el control de procesos.
- Los contenidos se presentan mediante un archivo que permite subir la información al aula virtual de la materia contribuyendo a desarrollar las destrezas en técnicas y estrategias de control de procesos.

6.2. Arquitectura del entorno web

Se construyó un conjunto de páginas web mediante la herramienta Ardora que permite exportar los contenidos programados dentro de su interfaz en contenido HTML, dentro de las herramientas es posible agregar el código fuente de las actividades creadas con Ardora e integrarlas en un solo paquete de actividades para su publicación y divulgación entre estudiantes y docentes.

La jerarquía de páginas está sujeta al diagrama de la Figura 113 que presenta las diferentes páginas web a implementarse.

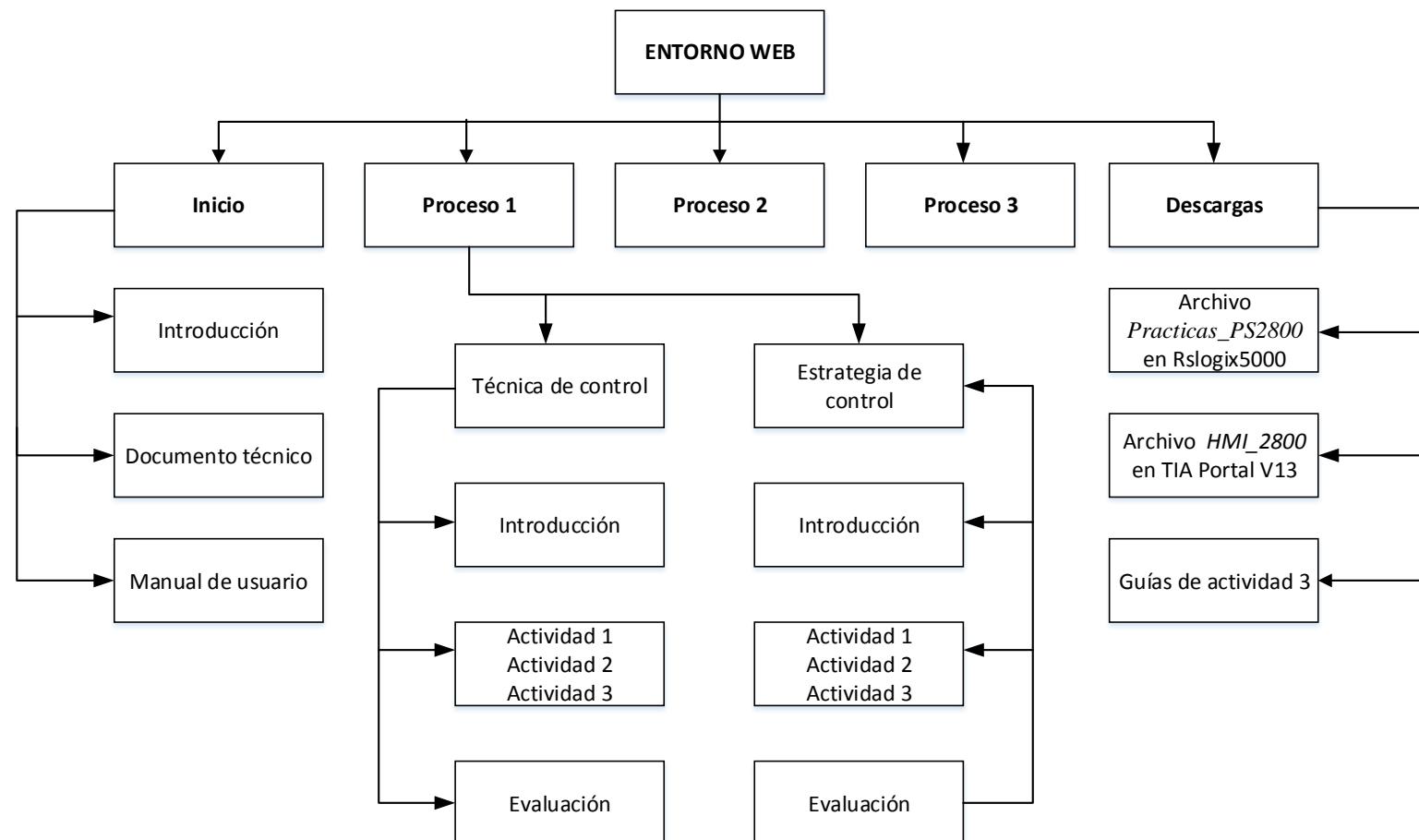


Figura 113. Jerarquía de página web

6.3. Diseño de las páginas web

Se elaboró un conjunto de páginas web de acuerdo a la jerarquía mostrada en la figura anterior, se realizó 3 conjuntos de páginas de acuerdo a su contenido:

- Contenido referencial del proyecto en la pestaña “Inicio”.
- Contenido referente a los procesos de control diseñado e implementados en la estación PS-2800 en las pestañas de “Control de Temperatura”, “Control de Nivel” y “Control de Flujo”.
- Contenido de descargas que permite obtener los archivos de programación del PLC y de la interfaz HMI, además aquí se encuentran las guías para el desarrollo de la actividad 3 de cada lazo y estrategia de control.

El entorno web cuenta con un menú principal que permite el acceso a los diferentes contenidos integrados dentro del entorno, se incluyen submenús para facilitar el acceso a información teórica, actividades o evaluaciones en el caso de contenido didáctico.

6.3.1. Pantalla principal

En la sección principal de la guía multimedia se presenta una pantalla de bienvenida donde se detalla el nombre del proyecto y los autores, además en la parte superior se encuentra ubicado el menú principal del entorno como se observa en la Figura 114.

Figura 114. Menú principal del entorno web

6.3.2. Pestañas de contenidos referentes al proyecto

Se diseñan 3 entornos multimedia para el apartado Inicio, todos mediante páginas multimedia de tipo de libro que presenten la información referencial del proyecto, además del manual de usuario de la estación y el documento técnico completo del Proyecto de Investigación, ver Figura 115.



Figura 115. Submenús del contenido referencial

6.3.3. Pestañas de contenidos referentes a procesos implementados

Se presentan 3 pestañas de acuerdo a los tipos de control implementados en la estación PS-2800 como se observa en la Figura 116, cada pestaña contiene las técnicas o estrategias desarrolladas para cada lazo de control.



Figura 116. Pestañas de procesos de la estación

Adicionalmente cada submenú de técnica o estrategia de control posee tres partes, enfocadas en el desarrollar en los estudiantes destrezas y nociones referentes al control avanzado de procesos, ver Figura 117.

El apartado introducción presenta los recursos técnicos necesarios para comprender el funcionamiento y el comportamiento de los procesos; además se visualiza información como curvas de la instrumentación e información técnica de los dispositivos instalados en la estación.



Figura 117. Partes de cada tipo de estrategia o técnica

Dentro de la herramienta ARDORA 7 se incluyen varios tipos de actividades didácticas para el aprendizaje del estudiante, las actividades están basadas en los contenidos y ejemplos alojados en la página oficial del software Ardora (Bouzán Matanza, 2016)

Para el diseño de las actividades de las técnicas y estrategias de control se considera tres tipos de actividades, que beneficien al estudiante en el aprendizaje del control de procesos de variables industriales, a continuación, se detallan los tres tipos de actividades en función de la dificultad de la misma.

- Actividad 1: Actividades básicas.
- Actividad 2: Actividades intermedias.
- Actividad 3: Actividades avanzadas
- Actividad de evaluación

6.3.4. Pestañas de contenidos referente a descargas

En la sección de descargas contiene tres pestañas que permiten al usuario interactuar con la estación de procesos PS-2800, a continuación, se detallan los tres archivos de la sección:

- Archivo de programación del PLC (Practicas_PS2800) desarrollado en el programa Rslogix 5000 en la versión 20.
- Archivo de programación de la pantalla digital instalada en la estación (HMI_PS2800) desarrollado en el software TIA Portal versión 13.

- Archivos de guías permiten tener una referencia sobre el desarrollo de la actividad 3 de cada una de las técnicas o estrategias de control, el archivo se encuentra disponible para descargarse en pdf.



Figura 118. Contenido de la pestaña de descargas

6.4. Implementación del entorno web

6.4.1. Implementación de actividades

Aprovechando los recursos que ofrece el software Ardora se implementó las actividades básicas, intermedias y avanzadas, a continuación, se detalla el proceso de implementación de cada tipo de actividad.

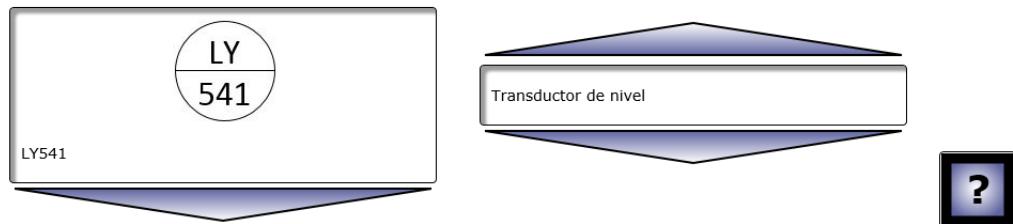
6.4.1.1. Implementación actividad 1

Las actividades básicas hacen referencia a la teoría de control de procesos, además permite conocer los elementos que participan en el lazo de control del sistema a tratarse; finalmente esta actividad permite adquirir nociones básicas sobre el diagrama de bloques de las técnicas y estrategias de control.

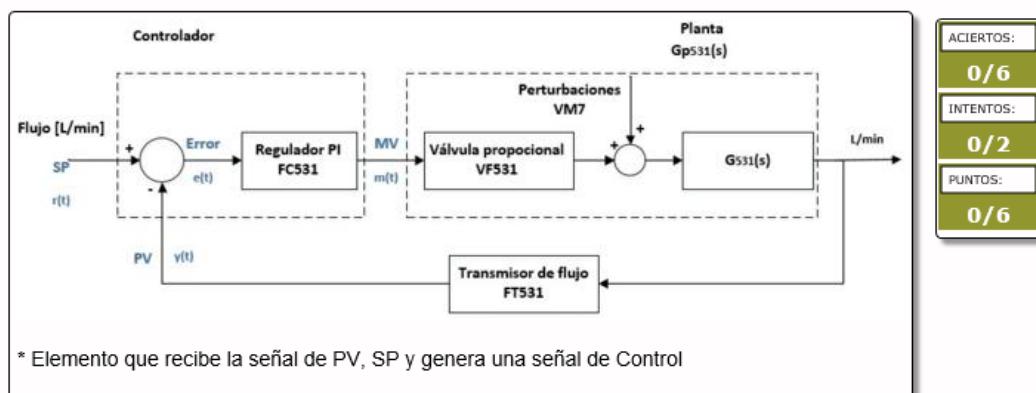
En la Figura 119 se observa la implementación de la actividad 1 empleando los elementos del diagrama P&ID del lazo de control 541; otra opción realizada en el software, es el desarrollo de la actividad 1 utilizando el diagrama de bloques correspondiente al control de flujo mediante la técnica PI, como se observa en la Figura 120, al finalizar cada actividad se muestra el puntaje correspondiente.

Actividad 1. Técnica de control PI 541*Empareje las imágenes del diagrama P&ID del lazo de control con su correspondiente significado*

PUNTOS:
0/8



Autores: Pichasamín Diego, Cóndor David - Tutor: Ing. Alejandro Chacón

Figura 119. Implementación de la actividad 1, control de nivel - técnica PI**Actividad 1. Técnica de control PI 531***Seleccione el elemento del diagrama de bloques que corresponda con la descripción de la parte inferior (*).***Figura 120. Implementación de la actividad 1, control de flujo- técnica PI****6.4.1.2. Implementación actividad 2**

Las actividades intermedias ayudan al estudiante a entender el funcionamiento de las diferentes técnicas y estrategias de control, además hace referencia a los pasos a seguir para el modelamiento de las plantas de proceso y el diseño de los algoritmos de un control, un ejemplo la actividad 2 se visualiza en la Figura 121.

Actividad 2. Técnica de control PI 531

1.- Arrastrar la palabra correcta para completar los pasos a seguir para el diseño e implementación del algoritmo de control para el lazo de flujo 531.

Algoritmo de control del sistema de flujo 531

1.Identificar las características del lazo a controlar; analizando los valores máximos y mínimos de la variable de proceso [] en LPM, los límites de la variable de control [] en % de apertura del actuador y el rango permisible del valor de referencia [] en LPM.

2.Tomar [] de la planta, aplicando distintos estímulos en la [] del sistema y midiendo la respuesta en la [] del sistema.

3.Realizar el [] de la planta del sistema, mediante un software o procedimiento matemático.

PUNTOS:
0/10

?

Figura 121. Implementación de la actividad 2, control de flujo- técnica PI**6.4.1.3. Implementación actividad 3****Actividad 3. Estrategia de control por razón 535**

1. Descargar la guía de actividad 3 de la estrategia de control por razón de flujos.
2. Complete la tabla y seleccione la respuesta correcta en cada ítem.
3. Observe el comportamiento del sistema al ingresar las diferentes opciones de la tabla en la interfaz HMI de la estrategia de control
4. Verifique los valores de la tabla con las especificaciones técnicas de la estrategia de control, ver guía actividad 3.

Ítem	Flujo 531 [LPM]	Flujo 535 [LPM]	Razón
1.-	5	10	<input type="button" value="2 ▾"/>
2.-	6	<input type="button" value="8 ▾"/>	1.5
3.-	<input type="button" value="6 ▾"/>	8	1.25
4.-	6	<input type="button" value="Máximo flujo:12 ▾"/>	2.5
5.-	<input type="button" value="5 ▾"/>	12	2
6.-	6	<input type="button" value="12 ▾"/>	<input type="button" value="2 ▾"/>
7.-	<input type="button" value="7 ▾"/>	10	<input type="button" value="1 ▾"/>
8.-	7	11	<input type="button" value="1.57 ▾"/>

ACIERTOS:
0/1

?

INTENTOS:
0/2

PUNTOS:
0/1

Figura 122. Implementación de la actividad 3, control de flujo estrategia de razón

La actividad avanzada (actividad 3) permite al estudiante comprobar el funcionamiento y comportamiento de los diferentes lazos de control mediante la configuración de sus parámetros de control. Se utiliza como base para el desarrollo de la actividad, la interfaz HMI y la lógica de control programada en el Controlador, un ejemplo se visualiza en la Figura 123.

6.4.1.4. Implementación de la actividad de evaluación

Finalmente, en la actividad de evaluación se realizó una serie de preguntas al usuario, permitiendo afianzar los conceptos sobre las técnicas y estrategias de control en el área de procesos industriales, un ejemplo la evaluación se visualiza en la Figura 122.

Evaluación. Técnica de control On/Off con histéresis

Seleccione la opción/es correcta/as de las siguientes preguntas, por cada respuesta correcta obtiene un punto y por cada respuesta incorrecta se resta un punto.

2.¿ En la técnica de control On/Off con histéresis el valor de la variable PV cambia de máxima salida a mínima salida dependiendo del sentido en el que varía el error?	PUNTOS: 1/10
<input type="checkbox"/> Falso <input checked="" type="checkbox"/> Verdadero	



Figura 123. Implementación de la actividad 3, control de temperatura On/Off

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

- Mediante la adaptación de los elementos funcionales instalados en la estación, y el cambio o reparación de elementos defectuosos detectados en la etapa de caracterización de la estación de procesos PS-2800, se ha logrado obtener un sistema totalmente funcional, que puede ser aprovechado como herramienta de aprendizaje que ayude a comprender de una manera real el comportamiento de diferentes técnicas utilizadas comúnmente en el control de procesos industriales. La interacción física con los actuadores y sensores de la estación permiten al usuario, desarrollar destrezas que comúnmente se establecen como 'ya aprendidas' y que en la práctica no suelen ser tratadas a profundidad debido a la falta de equipamiento especializado en el entrenamiento de técnicas de control avanzado. Es aquí donde la estación PS-2800 permite solventar las falencias prácticas en el momento de la implementación de sistema enfocados en el control de procesos.
- La estación PS-2800 originalmente fue creada para integrarse y trabajar en conjunto con otras estaciones del sistema CIM2000; debido a esto, los requerimientos de control originales de la PS-2800 no aprovechaban todas las capacidades que brinda un sistema que permite operar tres variables de control simultáneamente. Al desarrollar el presente proyecto de reingeniería se ha estudiado la infraestructura de la estación, y a partir de este estudio se han diseñado diferentes configuraciones de lazos de control que han permitido implementar siete estrategias de control sin alterar en absoluto la estructura física original de la estación. La implementación de los nuevos lazos de control se ha desarrollado a nivel de software, en la programación del PLC, mediante la utilización de lenguaje FBD (Diagrama de Bloques de Función) que provee un conjunto de instrucciones (Bloques de función) con funcionalidades muchos más avanzadas que las instrucciones que están disponibles en lenguaje Ladder. Adicionalmente este lenguaje posee la ventaja de ser mucho más gráfico una fácil identificación de los flujos de información entre las instrucciones programadas en una rutina, además

permite implementar instrucciones añadidas (Add-On Instructions) que son diseñadas a gusto del programador y que pueden ser aprovechadas como bloques normales en toda la lógica de control implementada en el PLC.

- Parte fundamental de un sistema de entrenamiento didáctico es su interactividad con el usuario final; inicialmente la estación no contaba con ningún indicador gráfico local que permitiera conocer el estado de las variables involucradas en los diferentes procesos de control de la estación. Debido a esto, se ha instalado en la PS-2800 un panel táctil Siemens y se lo ha integrado con la infraestructura de control mediante la comunicación con el PLC Allen Bradley instalado en el sistema. Esta integración se ha logrado utilizando las capacidades del panel táctil Siemens OP177B que posee una amplia compatibilidad con gran variedad de los autómatas de las principales marcas utilizadas en las industrias a nivel mundial. Para la comunicación e intercambio de datos entre el PLC y el panel táctil, se han programado dentro de la lógica de control del PLC variables que sean compatibles con el protocolo de comunicación que implementa al panel táctil. Cabe recalcar que existen limitaciones de conexión, acceso y ejecución entre el PLC y el panel táctil, para lo cual se han optado por simplificar al máximo las tareas que realiza el panel táctil (como representación de información, animaciones) y encargar la ejecución de estas tareas al PLC.
- Mediante la integración del panel táctil Siemens se agregó la capacidad de monitoreo de las variables de proceso de la estación PS-2800, para ello se ha construido una interfaz HMI simplificada y adaptada al panel táctil, que cuenta con las funciones de monitorio de actuadores y sensores en tiempo real, visualización de tendencias de las variables del proceso mediante curvas, diagramas P&ID interactivos de cada técnica de control implementada en la PS-2800. Además, la interfaz permite la modificación de las constantes de los controladores involucrados en las técnicas de control, permite también la configuración de límites de las variables de proceso, y el reporte de las alarmas o eventos ocurridos durante la ejecución del proceso seleccionado.
- Finalmente, se ha desarrollado un conjunto de prácticas interactivas, enfocadas en el aprendizaje de las técnicas de control que pueden ser ensayadas en la estación

PS-2800, este conjunto de prácticas se presenta mediante una interfaz HTML ejecutable en cualquier navegador web. El conjunto de actividades cuenta con contenido introductorio a cada una de las siete técnicas de control desarrolladas, además permite realizar actividades relacionadas con cada una de los lazos de control y cuenta con contenido descargable que posibilita la interacción directa con la estación mediante su interfaz HMI, de esta manera se tiene un conjunto de herramientas con las que el estudiante puede operar la PS-2800 y constatar el comportamiento de las técnicas de control.

7.2. Recomendaciones

- Buscando una mejora continua en beneficio del proyecto se recomienda a futuros estudiantes que presenten interés en el área de control de proceso, aprovechar los reservorios que no fueron considerados en el presente proyecto e integrar nuevas tecnologías, sensores, actuadores y demás elementos; con el objetivo de repotenciar la estación, y, desarrollar habilidades y destrezas referentes al control de procesos industriales.
- La estación PS-2800 cuentan con aproximadamente 20 años de uso, por consiguiente, se recomienda realizar un mantenimiento preventivo una vez al año a los elementos eléctricos, electrónicos, mecánicos, etc., para evitar fallas en los equipos, desgates de elementos que afecten el tiempo de vida útil de la estación.
- Al ser un líquido el elemento utilizado para el funcionamiento de la estación de procesos PS-2800, es necesario mejorar el sistema de circulación tanto para el ingreso como desfogue del agua, evitando ingresar al agua de forma manual en los tanques; además se recomienda vaciar el agua de los reservorios y tanques cuando no se pretenda utilizar la estación por un largo periodo de tiempo, debido a que el agua estancada crea un ambiente propicio para el crecimiento de microrganismos que pueden afectar las tuberías de la estación o a la salud de los usuarios de la misma.

- En el reservorio B1 de la estación de proceso PS-2800 se encuentra instalado dos transmisores de nivel de diferentes características técnicas y operacionales. El primero es un transmisor por presión hidrostática que fue adquirido en el presente proyecto, pero no cumple con los requerimientos necesarios para el control de los procesos de nivel, ya que su sensibilidad varía considerablemente cuando la temperatura del agua del reservorio B1 supera los 30° C; razón por la cual se recomienda utilizar el trasmisor de nivel ultrasónico cuando se desee controlar procesos que involucren las variables de nivel y temperatura juntas, debido a que este último brinda todas las prestaciones necesarias para la implementación de las diferentes técnicas y estrategias de control.

BIBLIOGRAFÍA

- AG, S. (28 de Septiembre de 2015). *SIMATIC HMI*. Obtenido de https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/21084461/hmi_tp177a_tp177b_op177b_operating_instructions_es_ES_es-ES.pdf?download=true
- Automation, R. (28 de 09 de 2015). *Logix5000 Controllers Function Block Diagram*. Obtenido de http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/pm/1756-pm009_-en-p.pdf
- Balcells, J., & Romeral, J. L. (1997). *Automatas programables*. Barcelona: MARCOMBO, S.A.
- Bishop, R. D. (1993). *Modern control systems analysis and design using MATLAB*. Addison-Wesley, .
- Bouzán Matanza, J. M. (03 de Marzo de 2016). *WebArdora.net*. Obtenido de http://webardora.net/index_cas.htm
- Dorf, R. C., & Bishop, R. H. (2005). *Sistemas de control moderno*. Madrid: Pearson educación S.A.
- Eras, W., & Arguero, D. (2010). Incorporación de la tecnología Allen Bradley a la estación de control de proceso PS2800 del CIM 2000. Quito, Ecuador.
- Johnson, C. D. (1997). *Process control instrumentation technology*. México: Prentice Hall Hispanoamerica S.A.
- Kuo, B. C. (1996). *Sistemas de control automático*. México: Prentice Hall-Inc.

- Ogata, K. (1992). *Ingeniería de control moderna*. México: Prentice Hall Hispanoamericana S.A.
- Perez de Diego, D. (28 de 01 de 2016). *Sensores de distancia por ultrasonido*. Obtenido de http://picmania.garcia-cuervo.net/recursos/redpictutorials/sensores/sensores_de_distancias_con_ultrasonidos.pdf
- Smith, C. A., & Corripio, A. B. (1991). *Controlautomatico de procesos*. México: LIMUSA S.A.