

**PRE-COMISIONAMIENTO Y COMISIONAMIENTO DEL PROTOTIPO DE LA
PLANTA DE DESTILACIÓN CONSTRUIDA EN LA UNIVERSIDAD PONTIFICIA
BOLIVARIANA**

EDINSON FABIAN BARBA AVILA

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA
2019**

**PRE-COMISIONAMIENTO Y COMISIONAMIENTO DEL PROTOTIPO DE LA
PLANTA DE DESTILACIÓN CONSTRUIDA EN LA UNIVERSIDAD PONTIFICIA
BOLIVARIANA**

EDINSON FABIAN BARBA AVILA

**PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
ELECTRÓNICO**

**DIRECTOR DEL PROYECTO
CARLOS GERARDO HERNÁNDEZ CAPACHO**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA
2019**

Nota de aceptación

Firma del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga, 18 de enero de 2019

DEDICATORIA

El presente trabajo primeramente es dedicado a Dios y a todas las personas que él dispuso en mi camino para culminar este gran logro, que no es solo mío si no de todas las personas que me apoyaron y aportaron parte en todo el transcurso de mi vida universitaria. Mi familia ha sido un gran pilar pues de no ser por ellos nada de esto fuese realidad, mis padres aportaron todo lo que necesite de ellos para surgir, mis hermanos como ejemplo, mis tíos y tías como inspiración y ánimo de ser orgullo para ellos, mi abuela que para ella hubiese sido el mayor de los orgullos ver esta meta cumplida de su nieto amado. Mis amigos, aunque son pocos, obtuve apoyo constante y me ayudaron a construirme mental y emocionalmente, mi novia que desde el principio de toda mi tesis estuvo conmigo y me dio su mano para ayudarme a surgir, a los profesores que me enseñaron lo que hoy sé y han hecho de mí una persona abierta al aprendizaje y han ayudado a dar rumbo a mi vida profesional.

AGRADECIMIENTOS

Por parte Institucional:

Magister Carlos Gerardo Capacho Hernández

Especialista Manuel Guillermo Quijano Ortega

Especialista Leidy Johana Olarte Silva

Magister Juan Carlos Villamizar Rincón

Magister Juan Carlos Mantilla Saavedra

Doctor Luis Ángel Silva

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.

Departamento de Ingeniería Mecánica

Ayudantes Técnicos del Sena

Por parte personal

Edinson Barba

Luz Estella Avila

Karen Yesenia Morelo González

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	15
OBJETIVOS	18
OBJETIVO GENERAL.....	18
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	19
1.2. SOLUCIÓN AL PROBLEMA	20
2. MARCO TEÓRICO	21
2.1. ESTADO DEL ARTE.....	21
2.2. MARCO TEÓRICO	23
2.2.1 Pre-comisionado, comisionado y puesta en marcha	23
2.2.2 Destilación	24
2.2.3 Proceso de destilación de etanol	25
2.2.4 Automatización	26
2.2.5 Interacción Humano Máquina (HMI)	30
2.2.6 PLC (Controlador lógico programable)	31
2.2.7 Servidor OPC.....	31
3. METODOLOGÍA	32
3.1. PRECOMISIONAMIENTO DE SISTEMA DE MECÁNICO.....	33
3.2. PROCESO DE CONEXIONES DE COMUNICACIÓN PROGRAMADOR- CONTROLADOR	48
3.3. PROGRAMA INICIAL BASE DE CONFIGURACION DEL CONTROL LOGIX 5571	57
3.4. IDENTIFICACIÓN I/O	66
3.5. PROGRAMA INICIAL PARA ARRANQUE MANUAL DE LA PLANTA.....	70
3.5.1 Arranque de bomba peristáltica	80
3.5.2 Arranque de re-circulador de líquido frio y caliente.....	80
3.6. HMI.....	81
3.7. CARACTERIZACIÓN DE VÁLVULAS, VERIFICACIÓN DE APERTURA Y SELLADO SIN FUGAS.....	96
3.8. CARACTERIZACIÓN DE SENSORES DE LA PLANTA, VERIFICACIÓN CON HERRAMIENTAS DE MEDICIÓN EXTERNAS.....	98
3.9. COMISIONAMIENTO DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO.....	103
3.10. CONFIGURACIÓN DE COMUNICACIÓN OPC MATLAB-PLC	105
4. CÁLCULOS Y RESULTADOS	110
4.1. RESULTADOS SOBRE ESTADO DE ELEMENTOS MECÁNICOS Y ELÉCTRICOS	110
4.2. CÁLCULOS DE LA BOMBA DEL RECIRCULADOR.....	117
4.3. RESULTADO FINAL INTERFAZ HUMANO MÁQUINA	120
4.3.1 RECOMENDACIONES ACERCA LA HMI Y APLICACIONES	127
4.4. DEFINICIÓN DE LAZOS DE CONTROL P&ID	128

4.5. COMISIONAMIENTO DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO DE LA PLANTA DE DESTILACIÓN.....	129
4.5.1 Pruebas de comisionamiento.....	129
4.5.2. Simulación del modelo de la planta en lazo abierto.....	131
4.6. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN OPC.....	132
4.7. DISEÑO DEL CONTROLADOR PID PARA EL LAZO DE TEMPERATURA	133
4.7.1 Base teórica del diseño del controlador PID.	133
4.7.2 Controladores diseñados por el metodo Ziegler and Nichols.....	135
4.7.3 Simulación de controladores diseñados implementándolos con modelo de la planta	135
4.7.4. Resultados experimentales de controladores diseñados e implementados en planta real mediante conexión OPC Matlab-Studio 5000.	139
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	143
5.1. CONCLUSIONES	143
5.2. RECOMENDACIONES.....	144
6. BIBLIOGRAFÍA	145

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Pirámide de Automatización	27
Figura 2. Planta inicial.....	32
Figura 3. Tanque tres antes de inspección.	33
Figura 4. Tanque dos antes de inspección.	34
Figura 5. Tanque uno antes de inspección.	34
Figura 6. Tanque cuatro antes de la inspección.	34
Figura 7. Porosidad uno del tanque cuatro.	35
Figura 8. Fuga hermética uno del tanque cuatro	36
Figura 9. Fuga hermética dos del tanque cuatro.....	36
Figura 10. Porosidad dos del tanque cuatro	36
Figura 11. Fuga hermética uno del tanque tres.	37
Figura 12. Fuga hermética dos del tanque tres.....	37
Figura 13. Fuga hermética tanque tres	37
Figura 14. Tanque dos.....	38
Figura 15. Fuga hermética tanque dos	38
Figura 16. Tanque cuatro puesto a la prueba neumática.....	39
Figura 17. Porosidad tanque cuatro, prueba neumática	40
Figura 18. Porosidad dos del tanque cuatro, prueba neumática.....	40
Figura 19. Fuga hermética tanque cuatro, prueba neumática	40
Figura 20. Tanque tres, prueba neumática.	41
Figura 21. Fuga hermética, prueba neumática	41
Figura 22. Tanque dos, prueba neumática	42
Figura 23. Fuga hermética, prueba neumática	42
Figura 24. Tanque uno, prueba neumática	43
Figura 25. Fuga hermeticidad, prueba neumática.....	43
Figura 26. Tubería uno	44
Figura 27. Tubería dos.....	44
Figura 28. Tubería tres	44
Figura 29. Tubería cuatro	45
Figura 30. Tubería cinco	45
Figura 31. Tubería seis	46
Figura 32. Tubería siete.....	46
Figura 33. Tanque dos explotado.	47

Figura 34. Tanque dos explotado desmontado.....	47
Figura 35. Tanque dos reparado.....	47
Figura 36. Conexión punto a punto PLC a computador.....	48
Figura 37. Centro de redes.....	48
Figura 38. Configuración de conexiones.....	49
Figura 39. Conexión de área local.....	49
Figura 40. Estado de conexión de área local.....	50
Figura 41. Propiedades de área local.....	50
Figura 42. Protocolo IPV4.....	51
Figura 43. Inicio RSlinx.....	51
Figura 44. Configuración de controladores.....	52
Figura 45. Conexión controlador red.....	52
Figura 46. Configuración de controladores dos.....	52
Figura 47. Página inicio RSlinx, módulo Ethernet.....	53
Figura 48. Configuración de puerto.....	53
Figura 49. Direcciones de servidor.....	54
Figura 50. Añadir relación.....	54
Figura 51. Configuración de red DHCP.....	55
Figura 52. RSlinx nuevas configuraciones de red.....	55
Figura 53. Configuración de puerto, modo estático.....	56
Figura 54. Configuración de red dirección automática.....	56
Figura 55. Studio 5000.....	57
Figura 56. Inicio studio 5000.....	57
Figura 57. Referencia de CPU.....	58
Figura 58. Configuración inicial de controlador.....	58
Figura 59. Backplane.....	58
Figura 60. Selección módulo Ethernet.....	59
Figura 61. Configuración módulo Ethernet.....	59
Figura 62. Creación módulo salidas digitales.....	60
Figura 63. Backplane, entradas y salidas digitales.....	60
Figura 64. Propiedades módulo análogo.....	61
Figura 65. Configuración de entrada análogo uno.....	61
Figura 66. Configuración de entrada análogo uno.....	61
Figura 67. Configuración general del módulo de entradas análogas.....	62
Figura 68. Configuración de puertos de entrada cero.....	62

Figura 69. Configuración de puertos de entrada dos.....	62
Figura 70. Creación módulo de entradas análogas dos.....	63
Figura 71. Configuración entrada de sensores de nivel.....	63
Figura 72. Configuración entrada sensor de presión diferencial.....	64
Figura 73. Creación módulo RTD.....	64
Figura 74. Backplane configurado.....	64
Figura 75. Quién activo para el PLC.....	65
Figura 76. Descarga de primer programa.....	65
Figura 77. Rutina principal.....	71
Figura 78. JSR eliminar parámetros.....	71
Figura 79. Crear nueva subrutina.....	72
Figura 80. Configuración subrutina nueva.....	72
Figura 81. Programación ladder para válvulas.....	72
Figura 82. Nueva etiqueta.....	73
Figura 83. Etiqueta tipo base.....	73
Figura 84. Etiqueta tipo alias.....	74
Figura 85. Ladder línea dos válvulas.....	74
Figura 86. Asociar contactos con etiquetas creadas.....	74
Figura 87. Líneas finales de programación de válvulas on/off.....	75
Figura 88. Líneas finales de programación de válvula solenoide.....	75
Figura 89. Programa ladder válvulas neumáticas.....	76
Figura 90. Crear etiqueta global.....	76
Figura 91. Crear etiquetas globales para válvula proporcional.....	77
Figura 92. Subrutina resistencias.....	77
Figura 93. Programa de las resistencias.....	78
Figura 94. Programa habilitadores.....	78
Figura 95. Creación de etiquetas para las RTD.....	78
Figura 96. Etiquetas RTD.....	79
Figura 97. Total etiquetas de sensores.....	79
Figura 98. Subrutina HMI.....	80
Figura 99. Factorytalkview.....	81
Figura 100. Creación de nuevo proyecto Factorytalkview.....	82
Figura 101. Selección display iniciales.....	82
Figura 102. Nueva pantalla.....	82
Figura 103. Nombrar un nuevo display.....	83

Figura 104. Configuración de pantalla, propiedades.....	84
Figura 105. Configuración de pantalla, comportamiento.....	85
Figura 106. Añadir imágenes a la pantalla, paso uno.	85
Figura 107. Imágenes prediseñadas.....	86
Figura 108. Añadir imágenes a la pantalla, paso dos.	86
Figura 109. Avance de display.....	86
Figura 110. Creación de panel.....	87
Figura 111. Botón navegación	87
Figura 112. Propiedades de botón.....	88
Figura 113. Botón de salida	88
Figura 114. Avance dos	89
Figura 115. Comunicación con el PLC, paso 1	89
Figura 116. Comunicación con el PLC, paso 2.....	90
Figura 117. Comunicación con el PLC, paso 3.....	90
Figura 118. Comunicación con el PLC, paso 4.....	90
Figura 119. Comunicación con el PLC, paso 5.....	90
Figura 120. Botón mantenido.....	91
Figura 121. Botón mantenido, estado uno	91
Figura 122. Botón mantenido, estado dos	92
Figura 123. Relación de tag.....	92
Figura 124. Propiedades de entrada numérica	93
Figura 125. Etiqueta de string.....	93
Figura 126. Gráfica de barra	94
Figura 127. Gráfico de tendencia, paso uno	94
Figura 128. Gráfico de tendencia, paso dos	95
Figura 129. Gráfico de tendencia, paso tres	95
Figura 130. Gráfico de tendencia, paso cuatro	95
Figura 131. Caracterización de válvula eléctrica.....	96
Figura 132. Sentidos posibles para válvula de tres vías.	97
Figura 133. Caracterización de Válvula de tres vías.....	97
Figura 134. Baño seco.....	99
Figura 135. Caracterización de RTD alta temperatura.....	99
Figura 136. Caracterización de RTD Baja Temperatura	100
Figura 137. Prueba uno Caracterización de sensor diferencial de presión.....	100
Figura 138. Prueba dos Caracterización de sensor diferencial de presión.	101

Figura 139. Prueba tres Caracterización de sensor diferencial de presión.....	101
Figura 140. Prueba cuatro Caracterización de sensor diferencial de presión.....	101
Figura 141. Unidad de mantenimiento	101
Figura 142. Prueba uno Caracterización de sensor de presión absoluta.....	102
Figura 143. Prueba dos Caracterización de sensor de presión absoluta.....	102
Figura 144. Prueba tres Caracterización de sensor de presión absoluta.....	102
Figura 145. Prueba cuatro Caracterización de sensor de presión absoluta.....	102
Figura 146. Caracterización de sensores de nivel.	103
Figura 147. Acción de encendido del PWM en las resistencias.....	104
Figura 148. Programa generador de señal PWM.....	105
Figura 149. RSlinx topic configuration	106
Figura 150. Creación de servidor y enlace con proyecto en línea.	106
Figura 151. Conexión con el servidor OPC.....	106
Figura 152. Librería de simulink para servidor OPC	107
Figura 153. Herramientas OPC Matlab.....	107
Figura 154. Configuración de módulo de comunicación OPC paso 1.....	108
Figura 155. Configuración de módulo de comunicación OPC paso 2.....	108
Figura 156. Configuración de módulo de comunicación OPC paso 3.....	108
Figura 157. Configuración de módulo de comunicación OPC paso 4.....	109
Figura 158. Configuración de módulo de entradas o salidas de lectura y escritura paso 1	109
Figura 159. Configuración de módulo de entradas o salidas de lectura y escritura paso 2.....	110
Figura 160. Numeración de elementos de la Planta Destiladora	111
Figura 161. Gráfico presión vs flujo (litros por minuto de circulador enfriador). ...	117
Figura 162. Pantalla de inicio HMI	121
Figura 163. Ventana actuadores eléctricos ON/OFF	122
Figura 164. Ventana actuadores neumáticos	122
Figura 165. Ventana variable nivel.....	123
Figura 166. Ventana variable temperatura.....	124
Figura 167. Ventana actuador bomba.....	124
Figura 168. Ventana actuador circulador	125
Figura 169. Ventana variable presión	126
Figura 170. Accionamiento de actuadores resistivos de calor	126
Figura 171. P&ID Planta de destilación.	128

Figura 172. Comportamiento del sistema calefactor al 10% de potencia recibida.	129
Figura 173. Comportamiento del sistema calefactor al 20% de potencia recibida.	130
Figura 174. Comportamiento del sistema calefactor al 30% de potencia recibida.	130
Figura 175. Comportamiento del sistema calefactor al 40% de potencia recibida.	131
Figura 176. Modelo de la planta.....	131
Figura 177. Datos reales de la planta y resultados del modelo simulado	132
Figura 178. Sistema OPC implementado.....	133
Figura 179. Respuesta del sistema de temperatura.	134
Figura 181. Simulación controlador 1	136
Figura 182. Simulación controlador 2	136
Figura 183. Simulación controlador 3	136
Figura 184. Simulación controlador 4	137
Figura 185. Simulación controlador 5	137
Figura 186. Simulación controlador 6	138
Figura 187. Simulación controlador 7	138
Figura 188. Simulación controlador 8	138
Figura 189. Resultado controlador 1	139
Figura 190. Resultado controlador 2.....	140
Figura 191. Resultado controlador 3.....	140
Figura 192. Resultado controlador 4.....	141
Figura 193. Resultado controlador 5.....	141
Figura 194. Resultado controlador 6.....	142
Figura 195. Resultado controlador 7.....	142
Figura 196. Resultado de controlador 8.....	143

TABLA DE TABULACIONES

Tabla 1. Sensores de temperatura.....	66
Tabla 2. Sensores de nivel	67
Tabla 3. Sensores de presión	67
Tabla 4. Sensor inductivo de presencia	68
Tabla 5. Válvulas	68
Tabla 6. Bomba Peristáltica	69
Tabla 7. Refrigerador	70
Tabla 8. Resistencias.....	70
Tabla 9. Elementos Mecánicos de la planta destiladora y sistema de tanques. ...	112
Tabla 10. Elementos eléctricos de la planta destiladora.	114
Tabla 11. Diseño de controlador PID por método Ziegler and Nichols	134
Tabla 12. Controladores experimentados.	135

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: PRECOMISIONAMIENTO Y COMISIONAMIENTO DEL PROTOTIPO DE LA PLANTA DE DESTILACIÓN CONSTRUIDA EN LA UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

AUTOR(ES): Edinson Fabian Barba Avila

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Electrónica

DIRECTOR(A): Carlos Gerardo Hernandez Capacho

RESUMEN

Se llevó a cabo el pre-Comisionamiento y Comisionamiento en la planta de destilación la cual se basó en efectuar pruebas requeridas de revisión y corrección de fallas en toda la planta, dichas pruebas desde la parte mecánica hasta su funcionamiento eléctrico, fueron parte esencial del inicio del proyecto de destilación de la Universidad Pontificia Bolivariana, primeramente revisada la parte mecánica se aplicaron protocolos de corrección de fugas y alineamiento de elementos de la planta además, identificación de entradas y salidas del controlador lógico programable y un proceso de comunicación y programa inicial el cual permitiría visualizar las variables a leer además de permitir accionar los elementos instalados de forma manual, dicho proceso fue fundamental para el siguiente paso que fue probar los instrumentos de la planta y darles el primer arranque a las diferentes válvulas, bombas y controladores del sistema, además de verificación de sellado hermético de las juntas que componen dichos instrumentos, luego se probó cada uno de los sensores añadiendo agua al sistema permitiendo medir nivel, temperatura y presión en el líquido lo que se efectuó el Comisionamiento de la planta donde se realiza la caracterización de los sensores teniendo en cuenta un valor de referencia de la variable medida, para lo cual fue necesario la identificación de los lazos de control posibles para implementar mediante un P&ID, tenido en cuenta a la hora de querer implementar algún controlador, en el caso del presente documento un controlador de temperatura con el fin de identificar la forma de funcionamiento única de la planta de temperatura por sus características físicas, todo lo anterior plasmado en una Interfaz Humano Máquina implementada, que permite al operario visualizar todo el conjunto de variables y señales desde los diferentes transmisores y también hecha para accionamiento manual de los actuadores.

PALABRAS CLAVE:

PLC, HMI, Precomisionamiento, Comisionamiento, OPC, control, PID, P&ID

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: PRECOMMISSIONING AND COMMISSIONING OF PROTOTYPE OF THE DISTILLATION PLANT BUILT IN THE PONTIFICAL UNIVERSITY BOLIVARIAN

AUTHOR(S): Edinson Fabian Barba Avila

FACULTY: Facultad de Ingeniería Electrónica

DIRECTOR: Carlos Gerardo Hernandez Capacho

ABSTRACT

The pre-Commissioning and Commissioning was carried out in the distillation plant, which was based on carrying out required tests for the revision and correction of faults throughout the plant. These tests, from the mechanical part to the electrical part, were an essential part of the start of the project. distillation of the Universidad Pontificia Bolivariana, the mechanical part was first revised, leak correction and alignment of plant elements protocols were applied, as well as the identification of inputs and outputs of the programmable logic controller and a communication process and initial program which would allow visualization the variables to be read as well as allowing the manually installed elements to be operated, this fundamental process for the next step that was to test the plant's instruments and give the first start to the different valves, pumps and controllers of the system, as well as verification of hermetic sealing of the joints that make up said instruments, then then test each of the sensors adding water to the system allowing to measure level, temperature and pressure in the liquid what was carried out the Commissioning of the plant where the characterization of the sensors takes place taking into account a reference value of the measured variable, then it was necessary to identify the possible control loops to implement through a P & ID, taken into account when wanting to implement a controller, in the case of this document a temperature controller in order to identify the unique operation form of the temperature plant due to its physical characteristics, all of the above is embodied in a Human Machine Interface implemented that allows the operator to visualize the whole set of variables and signals from the different transmitters and also made for manual actuation of the actuators.

KEYWORDS:

PLC, HMI, Pre-Commissioning, Commissioning, OPC, control, PID, P&ID

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de tesis desarrolla la metodología de la fase previa al arranque de una planta industrial, para el caso, se muestra cómo proceder bajo qué tipo de norma en el caso de examinación y reparación de artefactos mecánicos como tanques, tuberías, mangueras y demás que fue necesario probar para dar el visto bueno de los elementos y en caso que se necesitara arreglar falencias que no permitían el buen funcionamiento de la planta de destilación que se está desarrollando en la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Además de la parte mecánica se examinó la parte eléctrica la cual se sometió a pruebas de campo donde se verificó el funcionamiento de elementos tales como válvulas, sensores, bombas, calentadores y enfriadores bajo programación con técnicas de automatización básicas que permitieron las pruebas y el arranque de lo anterior, dichas técnicas desarrolladas con programación en Ladder para el controlador de la familia Control Logix de Allen Bradley referencia 5571, con el cual se trabajó el proyecto dejando además un documento completo donde se explican detalladamente los pasos para dar inicio a un proyecto, empezando por la forma en que se comunica el controlador con el programador, el programa base que permite iniciar la programación en la CPU L-71, la identificación de entradas y salidas a los instrumentos de la planta, la programación para arranque de actuadores, instructivo básico sobre realización de interfaces humano máquina en el entorno de Rockwell Automation además, el programa y la forma de conectar por medio de un servidor OPC Matlab con Studio5000, todo lo anterior detallado en el paso a paso. El sistema de calentamiento por ser un proceso de cuidado tiene varias fases igualmente plasmadas en el libro, allí se explica cómo desde ladder realizar una señal pwm para controlar el tiempo de encendido de las resistencias calefactoras con el cual se hacen las pruebas iniciales de temperatura probando el funcionamiento de dicho sistema y permitiendo la apertura a pruebas de identificación de la planta y el diseño de un controlador que se acople al sistema de calentamiento. Todo el sistema de accionamiento y visualización de la planta de destilación se plasmó en una interfaz humano máquina por la cual se puede acceder fácilmente a los datos transmitidos en tiempo real, además de poder controlar manualmente cualquier actuador sometándolo a funcionamiento real que se puede ver reflejado en algunos movimientos o sonidos emitidos al estar en pleno funcionamiento.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Implementar el pre-comisionamiento y comisionamiento del prototipo de la planta de destilación construida en la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Documentar el proceso necesario en la adquisición de conocimiento para el manejo de la tecnología del controlador lógico programable ControlLogix 5571 de Allen Bradley.
- Diseñar una interfaz humano máquina (HMI) que permita visualizar las variables del proceso donde se muestre el funcionamiento de la planta y permita operar manualmente la misma.
- Diseñar un controlador PID clásico para la variable temperatura que permita hacer pruebas de operación en el boiler principal al sistema de calentamiento, siguiendo protocolos de seguridad e implementándolo desde la HMI.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El presente trabajo plantea el desarrollo de una herramienta para ser usada por los estudiantes y docentes del área de control e instrumentación, permitiendo ofrecer a quienes deseen trabajar en este tema una documentación de las estrategias y la metodología consignada en un documento final de tesis y su implementación pueda ser aprovechada por el laboratorio de Control de Procesos de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, mediante las prácticas de laboratorio que basadas en el desarrollo de esta tesis se lograsen implementar.

Siendo la propuesta final la automatización del prototipo de la planta de destilación construida en la Universidad Pontificia Bolivariana, por la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, mediante la tesis de Maestría en Ingeniería Electrónica que se encuentra en desarrollo por el estudiante Francisco Cala Calderón; fue necesario crear una metodología para llegar a la fase final, es aquí donde empieza este trabajo de pregrado a formar parte fundamental de la tesis del maestría ya que en una planta se requiere el pre-comisionamiento, comisionamiento y la puesta en marcha, donde los dos primeros fueron la meta a alcanzar en este trabajo de pregrado y fases del proyecto de investigación planteado por el estudiante de maestría que tiene su origen y soporte en el grupo de Investigación Control Industrial de la Facultad. En este proceso al cual se aportó desde la presente tesis, se necesitaba que cada componente de la planta estuviese funcionando correctamente y verificar la operatividad de toda la instrumentación que compone el prototipo; el comprobar conexiones eléctricas, neumáticas y de flujo. Además, era necesario hacer accionamientos de los instrumentos de manera manual y usando la tecnología con la cual se diseñó la planta para esto, se haría uso de software y hardware concebidos en el trabajo de investigación, por lo que era necesario adquirir conocimiento para dicho manejo. De la misma forma se requería hacer pruebas con algún componente tangible como flujo de aire a presión y agua que permitiese verificar que las juntas y todos los acoples se encuentren en correcto funcionamiento. Era fundamental probar el sistema de calentamiento e implementar alguna técnica básica de control que permitiera su correcto funcionamiento. Partiendo de lo anterior se tendría material para implementar alguna herramienta donde se pueda visualizar el proceso trabajado.

La propuesta final de este trabajo era completar dos de las fases más importantes a llevar a cabo en la planta de destilación: el pre-comisionamiento y comisionamiento para dejar preparado hacia la meta general que es la automatización y puesta en marcha del prototipo de la planta. Los recursos empleados en este trabajo de grado estaban dados por la inversión realizada por la institución basada en lo que físicamente comprende los elementos adquiridos en metalmecánica y tecnología.

1.2. SOLUCIÓN AL PROBLEMA

Se hicieron las pruebas respectivas de los instrumentos concebidos en la planta haciendo uso de la tecnología del diseño de ésta, siendo así se implementó mediante el software de Allen Bradley un programa que permitió verificar el funcionamiento de dichos instrumentos y lograr que las señales eléctricas llegasen correctamente y cumplan su cometido desde el PLC a los actuadores y desde los sensores al PLC. Entonces haciendo uso de dicha tecnología se enlazó el hardware y se implementó una interfaz que muestra el funcionamiento de la planta, donde se pueden accionar los componentes y monitorizar las variables del proceso para tener el control básico del proceso.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. ESTADO DEL ARTE

Haciendo una revisión de trabajos realizados a nivel nacional e internacional se han destacado varios proyectos que, por sus objetivos planteados y temáticas tratadas se relacionan en diferentes aspectos a la planta de destilación que está siendo desarrollada en la Universidad Pontificia Bolivariana, Seccional Bucaramanga por la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, donde se plantea la automatización de ésta para la extracción de productos mediante una columna de destilación fraccionada.

Siendo un propósito bastante común la repotenciación de plantas pilotos para la extracción de materiales y relacionándose con el presente trabajo de grado, así como menciona (PATIÑO, 2014) en su tesis, la cual propone una reestructuración de una vieja y abandonada planta en un centro de estudios de Barrancabermeja, por medio de la cual se investiga la situación de ésta para saber la instrumentación más apropiada para dicho proceso lo cual permita la adquisición de datos y supervisión de variables a tener en cuenta en una extracción de este tipo, usando tecnología PAC para la automatización, además, se implementó un sistema de control para un lazo de temperatura en la columna de destilación, lo cual da una vista más objetiva y orienta el trabajo propuesto en una de las metas de la presente tesis.

De igual forma, trabajos como el de (CASTRO, SUCUNUTA, & MANZUR, 2010), de (BLANCO) y de (MARENGO) en los que proponen una readecuación y automatización de plantas anteriormente construidas y operadas manualmente hasta el momento de inicio de sus trabajos, siendo aspecto resaltante que las diferencias como los materiales a destilar y debido a que esto cambia las condiciones de operación, se tiene que hacer un estudio diferente para cada materia, siendo esto un factor importante a resaltar debido a que las mismas técnicas de control no funcionan en todos los casos, por esta razón no existen teorías ni metodologías únicas para hacer este tipo de proyectos, además que las condiciones de la planta y materiales usados en ellas cambian la manera en la que se le puede implementar la automatización.

En el campo de la automatización se deben seguir determinados pasos para que ésta pueda culminarse en su totalidad teniendo bajo control ciertos aspectos que podrían generar inconvenientes a la hora de la implementación, por ende, se hace sumamente importante el uso de simuladores para observar un comportamiento previo esperado en la planta a automatizar. El proyecto de (UGALDE, 2003) plantea varias etapas para un mismo trabajo; la primera y más importante de estas es la etapa de simulación, basada en una columna de destilación de 19 platos en la cual se pretende obtener gases, sin embargo, se debe resaltar que este proyecto es solo un diseño y no se implementa nada de lo descrito en el trabajo, pero permite la apertura a nuevos proyectos en los que se introduzca esta

investigación. Así mismo, las divisiones hechas en este trabajo, además de la simulación del prototipo fueron el diseño de la instrumentación y control y finalmente el presupuesto total de lo que para el proyecto debería ser concebido. Usando el software Matlab implementaron la simulación haciendo cálculos previos y teniendo en cuenta constantes de los materiales usados como la de los platos, las cuales se relacionan con ecuaciones diferenciales y la de los materiales a extraer ya que cada material tiene comportamientos distintos y si se cambian éstos, las condiciones del trabajo cambian totalmente. Luego de esto y observado ciertas variables a través del tiempo en la simulación se obtuvieron conclusiones y se pasó a la segunda fase, la cual, basada en la anterior tuvieron de dónde sustentar las decisiones para saber qué instrumentación sería la más indicada, de la misma forma se estudiaron las diferentes técnicas de control con la idea de proponer la que más se ajustara al caso y así completar el diseño de la automatización para luego pasar a los costos de los materiales requeridos.

Continuando con esto, en la búsqueda de mejoras en los procesos de simuladores y recordando que son las bases para el progreso y creación de diseños más óptimos y como plantean (RORÍGUEZ & DÍAZ, 2010), en donde mediante un modelado matemático simulan un proceso en una planta de destilación aplicando técnicas de control feedforward que trabaja de forma predictiva tomando los comportamientos de las variables como indicadores para poder predecir futuros estados y aplicando lo que ellos llaman la manipulación del plato de alimento como estrategia de control ante perturbaciones en la composición de entradas, esto como acción para mantener el sistema estable y teniendo como objetivo principal mantener la composición del destilado controlado sin necesidad de cambiar el compuesto de entrada o materia prima principal, como otra técnica para optimizar basado igualmente en simulaciones son los métodos de modelamiento de las plantas en las que es fundamental un buen acercamiento matemático para así llegar a conclusiones acertadas sobre qué tipo de cambios pueden implementarse para reducir costos y aumentar ganancias. Los trabajos de (ACOSTA & URIBE, 2017) y de (ZAFRA, 2013) plantean metodologías en las cuales se pretende llegar a una mejora en procesos distintos pero que con objetivos similares como lo es proponer basado en teorías y estudios cuál es la mejor forma de hacer más útiles los procesos de destilado para sus productos.

De forma aplicada, la destilación tiene muchas ramas en las que cada campo se encarga de estudiar de acuerdo al producto final o destilado que sea de su interés, en el caso de la planta de destilación que se tiene en la UPB en su concepción de diseño está para destilar agua y alcohol. El objetivo principal del presente trabajo de grado no será el compuesto a destilar; será la implementación de las fases previas a la automatización y control que permitan llegar a un proceso funcional de destilación. Siendo materia de investigación procesos de destilación para obtener variados productos de destilado como aceites esenciales, con los que se cuenta con gran material bibliográfico, es importante tener esta alternativa para posibles productos a destilar en la planta de la UPB. En la ciudad de Bucaramanga existen diversos centros de estudio dedicados a la destilación de variados productos y uno

de ellos, siendo de los más influyentes, es el de la Doctora Elena Stashenko, quien cuenta con múltiples trabajos dedicados al estudio de los métodos de extracción de aceites esenciales, produciendo cantidad de trabajos significativos en lo que se encuentran (LLINAS, 2011), (RUEDA, 2012) y (CÁRDENAS & PÉREZ, 2011), donde ilustran distintas técnicas para la obtención de los aceites que podrían ser motivos de estudio con el objetivo de ser igualmente aplicadas en la planta de la UPB, teniendo en cuenta que deberían hacerse adecuaciones en la planta, debido a que sería necesario aplicar nuevos controles y manejar nuevas variables igualmente se deberán hacer estudios dinámicos de los componentes y posibles comportamientos que generen alteraciones en los nuevos sistemas.

2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1 Pre-comisionado, comisionado y puesta en marcha

Estos términos son usados en todo tipo de proyecto en los que se plantea el diseño y funcionamiento de una planta para cualquier proceso industrial, es necesario hacer uso de metodologías como éstas que no dejen lugar para que algún aspecto sea descuidado para llegar al correcto funcionamiento de una planta. De manera continua se establecerán las funciones en cada una de estas fases, las cuales parten de tener ya una planta mecánicamente hecha e instrumentación lista para pruebas de todo tipo. Las fases comprenden siempre unos protocolos de seguridad que deben garantizar la integridad de los operarios que participan en la ejecución de estos pasos, además de las garantías que una vez realizadas estas etapas garanticen que en funcionamiento la planta brinde la seguridad necesaria para la protección de los operarios de planta.

2.2.1.1 Pre-comisionado

Según (ISS, NF), cuando se habla de pre-comisionado se mencionan las actividades a seguir cuando una planta ya se encuentre mecánicamente hecha estando alineada y completa toda la instrumentación a usarse en ella, será separado el trabajo en paquetes fácilmente manejables y las actividades serán la verificación del diseño, probar las conexiones eléctricas, verificar acoples mecánicos y prueba de instrumentos, también limpieza y embellecimiento de la planta.

2.2.1.2 Comisionado

La misma (ISS, NF) plantea que las actividades de comisionado parten del final del pre-comisionado cuando ya se han verificado todos los acoples mecánicos y se verifica el funcionamiento manual de la planta, dichas actividades empiezan cuando se introducen fluidos reales a trabajar en dicha planta, de tal forma se prueban y se ajustan uno por uno los instrumentos basado en los comportamientos reales de las variables, también será fundamental acoplar las señales eléctricas de forma tal que los programas a usar entiendan dichas señales y así hacer un programa en el caso pertinente el cual dará paso al funcionamiento continuo de la planta y poderla dejar lista para el arranque.

2.2.1.3 Arranque

Finalmente, la (ISS, NF) expone que el arranque de la planta es el paso final para la entrega del proyecto, éste incluye actividades como fijar condiciones del proceso indispensables para la creación de productos, el arranque podría incluir el reprogramar la planta basado en dichas condiciones, así de esta forma podrán darse los retoques finales para el buen funcionamiento de la planta, se harán pruebas de funcionamiento a condiciones normales para después verificar condiciones exigidas por el cliente.

2.2.2 Destilación

La destilación es un proceso altamente eficaz para la separación de productos en diferentes industrias, el cual siempre se ha basado bajo los mismos principios. Debido a la necesidad de avanzar y de encontrar formas más eficientes de obtener derivados de alguna base prima se ha ido trabajando en diferentes tipos de destilación que, dependiendo del tipo de material y sus principios físico-químicos naturales, se deben tener en cuenta para poder extraerse y lograr la máxima eficiencia en la obtención de derivados, aprovechando las diferentes volatilidades para la separación.

Cuando se habla de distintos tipos de destilación se hace referencia a distintas técnicas para extracción de derivados, algunas de la cuales se mostrarán a continuación para tener idea del trabajo a realizarse en este proyecto de grado, se profundizará más en el tipo de destilación fraccionada que será la trabajada en este proyecto.

2.2.2.1 Destilación simple:

(ANGURELL, y otros, NF) se han encargado de brindar las definiciones pertinentes en lo referente a destilación, de esta forma se le llama destilación simple al proceso de extracción de un solo componente de un material líquido con volatilidad mucho menor que con las que se encuentre mezclado, mientras éste se encuentre en un punto de ebullición pequeño al menos de 80 ° C, el resultado es de un solo producto ya sea porque solo estaba éste en la mezcla inicial o como lo dicho anterior era el más volátil.

Todo tipo de destilación tiene algunas condiciones que pueden hacerla más eficiente, como en su mayoría de casos se puede trabajar a presión atmosférica o bien sea a presión reducida o modificada.

2.2.2.1.1 Destilación a presión atmosférica

Destilación a presión atmosférica es aquella que se realiza a la presión del ambiente, es un poco reducida la eficiencia a la hora de la obtención de ciertos materiales debido a que tienen puntos de ebullición muy altos, pero a la hora de obtención de elementos volátiles se ve muy eficientemente este método (ANGURELL, y otros, NF).

2.2.2.1.2 Destilación a presión modificada

Destilación a presión reducida o modificada, es un poco más compleja debido a que necesita de elementos más sofisticados como bombas de presión y recipientes resistentes a altas o bajas presiones, se utiliza para lograr una disminución del punto de ebullición del producto a extraer, generalmente cuando el punto de ebullición del componente es superior al punto de destrucción química de la mezcla, entonces se utiliza este método (ANGURELL, y otros, NF).

2.2.2.2 Destilación fraccionada:

Este tipo de destilación se trabaja cuando en la mezcla inicial se encuentran varios productos con diferentes volatilidades con una diferencia entre ellas de un punto de ebullición menor a 80 °C, al calentarse la mezcla el vapor va extrayendo el producto cuyo punto de ebullición sea menor y así sucesivamente mientras se va calentando se va llegando a diferentes temperaturas lo que permite obtener los distintos productos. Una característica de esta técnica de destilación es que necesita de una columna de fraccionamiento la cual permita obtener los diferentes productos en diferentes recipientes. Este tipo de destilación se puede trabajar a presión atmosférica o presión modificada (ANGURELL, y otros, NF).

2.2.3 Proceso de destilación de etanol

Según (ENWEREMAADU, 2012) el etanol, sustancia existente en diferentes mezclas o soluciones fácilmente asequibles es un líquido incoloro de olor y sabor que lo identifica y resalta de otras sustancias. Hoy día es una sustancia de bastante uso en el mercado y con gran demanda por sus cualidades, puede ser extraído de casi cualquier solución que contenga azúcares mediante el proceso de la fermentación y separado por métodos de destilación, éste como uno de los métodos más usados en la industria para su obtención y también el que más energía necesita, la destilación requiere de grandes cantidades de energía para generar calor y poder convertir el líquido en vapor y así poder condensar nuevamente el derivado que se requiere de la sustancia principal, se estiman usos excesivos de energía en estos procesos por lo que se estudian métodos para el ahorro de energía en dichos procesos, para hacer sistemas de destilación eficientes y reducir consumos de energía en toda la planta y costos de operación. También se obtiene por métodos de arrastre de vapor (método de destilación), haciendo reaccionar el etano con vapor (etano materia prima que se obtiene del maíz), ejecutando este proceso varias veces para obtener una conversión de eteno a etanol, luego los gases de etanol se enfrían y se obtiene etanol líquido. El alcohol etílico se considera alcohol puro, aunque se encuentre mezclado con agua, cuando se añaden otros componentes para fabricación de otros materiales este pierde su naturaleza y deja de ser puro. El etanol es un solvente universal y es usado para la fabricación de alimentos, bebidas, antiséptico y también como combustible.

Según de (LOURDEZ, 2016), para la destilación simple de alcohol etílico se debe llevar la mezcla inicial al punto de ebullición, siendo para el etanol 78.3 °C en este

punto empieza a evaporarse el líquido elevándose por la columna de destilación llegando al final de la torre donde se encuentra un condensador el cual, se encarga de pasarlo a fase líquida nuevamente por proceso de enfriamiento, debido a que este componente es volátil y bastante sensible a cambios bruscos, sus características deben ser tenidas en cuenta para este proceso, con punto de inflamación de 14 °C, auto ignición de 365 °C y presiones de vapor de 59,2mbar a 20 °C.

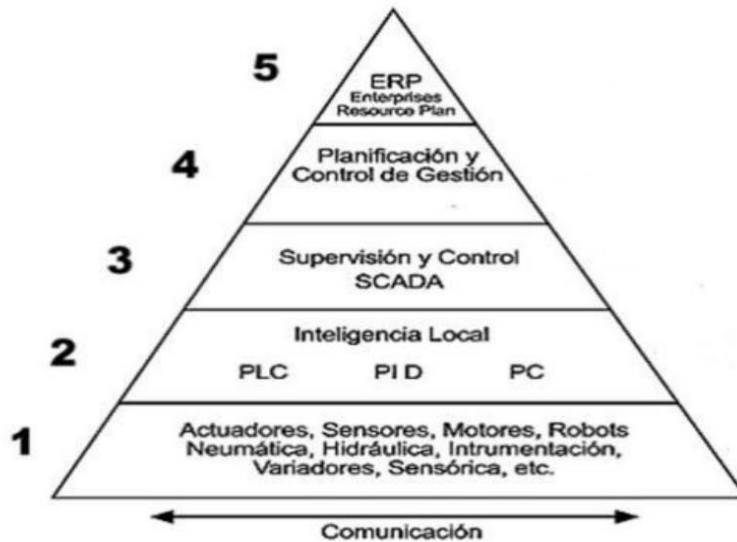
2.2.4 Automatización

Cuando se habla de automatización se debe entender primero que el término indicaba la autonomía de una máquina en la toma de alguna decisión cimentada en algunos parámetros preestablecidos por los ingenieros, basando ello en imitar algún tipo de acción de un animal o persona reflejado en un objeto (GARCIA, 1999)

Teniendo en un principio la automatización no como una necesidad sino como una forma de optimizar algún proceso y liberar de cargas la mano humana, dejando procesos peligrosos y rápidos a las máquinas, también evidenciando la necesidad de mejoría, estos procesos han venido cambiando de tal forma que se vean reflejados en la productividad de las empresas, de igual manera luego de ver la efectividad que tenían empresas ya automatizadas y la necesidad de competencia, surgió e hizo entrar estas tecnologías en furor y la investigación en nuevas técnicas para automatizar los procesos.

Debido a la amplitud del término automatización, se ha segmentado en diferentes fases donde se jerarquiza y divide por tareas cada una de estas fases, uno de los modelos creados para lo anterior es la pirámide de automatización (ver figura 1) que organiza y nombra cada uno de los peldaños de dicha pirámide según la ubicación del hardware y su función, algunos autores describen este modelo de tal forma que se muestre a qué nivel se quiere trabajar y ubica al investigador en un campo más específico, por otro lado el mismo principio sirve para describir y jerarquizar los sistemas que comunican cada uno de los peldaños mostrados en la figura, donde esta ilustración hace preguntar el método de interacción de estas escalas, a partir de ello se forma el modelo de fabricación integrada por computador o modelo CIM basado en esta pirámide, la cual es usada para mencionar métodos de comunicación industrial, de igual forma en ambos modelos es descrita la funcionalidad y el fin de cada nivel.

Figura 1. Pirámide de Automatización



Fuente: (MENDOZA, CORTES, & MURIEL, 2011)

Para el modelo CIM la función de los 5 niveles de la pirámide según (SALAZAR & CORREA, 2011) son:

- Nivel 1: En este nivel se encuentran todos los actuadores y sensores que transmiten la información para el control de la planta.
- Nivel 2: Llamado desde el modelo CIM como célula y desde la pirámide de automatización como CONTROL es donde se encuentra todo el hardware usado para generar acciones de control y alterar las variables de una planta para generar un sistema estable, puede contener PLC o Computadores de tipo industrial usados para obtener la información desde el nivel inferior.
- Nivel 3: Este nivel hace referencia a todo hardware que permita la supervisión y monitorización del proceso, pueden ser computadores o pantallas, las cuales están configuradas para recibir señales del nivel inferior y procesarlas para convertirlas en herramientas de supervisión además de generar alarmas y precauciones, también tiene la capacidad de apagar un proceso en riesgo, es llamada desde el modelo CIM como nivel de Planta, en el modelo de automatización este es el nivel de supervisión.
- Nivel 4: Se encuentran allí operarios y funcionarios de la empresa que dirigen el proceso de fabricación y supervisión, en este nivel la producción es un nivel inferior, aquí se generan todas las órdenes y se optimizan los productos mediante un buen manejo de la tecnología y saberes adquiridos, en automatización es llamado planificación mientras que el modelo CIM lo llama control de factoría.
- Nivel 5: Este Nivel llamado ERP o empresa no siempre considerado por los autores para la pirámide de automatización es un conjunto de módulos

software que reúnen datos que vienen de los varios departamentos de una empresa, esto dando soporte a niveles de gerencia de la empresa

2.2.4.1 Partes de la automatización

Según (GARCIA, 1999) se plantea que la base de toda automatización se ve reflejada en dos partes fundamentales que la constituyen las cuales son OPERATIVA y CONTROL, el funcionamiento armónico de estas dos partes, teniendo estas una adecuada comunicación, hacen que una buena automatización pueda ser aplicada a un proceso.

El funcionamiento correcto de la parte operativa y de control empiezan desde la comunicación entre los dispositivos operativos que recogen la información de forma análoga o digital y la envían al control para así tener respuesta de los procesos que se están haciendo y poder tener capacidad de reacción ante algunos inconvenientes que se puedan presentar en el proceso y si llegado el caso de errores poder corregirlos sin ningún tipo de inconvenientes y de esta forma la parte de control devuelve las acciones procesadas haciendo estable la planta controlada.

- Parte Operativa: El mismo (GARCIA, 1999) expone que para hacer una descripción de la parte operativa se debe tener en cuenta que en esta relaciona todos los elementos mecánicos de la planta o proceso, instrumentos de acción y sensores, en este ítem se muestran los tipos de fabricación dependiendo del proceso, en los que se aborda la forma más correcta y los pasos de producción, aquí las decisiones tomadas por las directivas se ejecutan directamente haciendo minimizar los gastos por desperdicios y aprovechamiento máximo de herramientas, que se verán reflejados en la calidad de la producción mostradas en las salidas de los productos y en los costos a la entrada del proceso.
- Parte de Control: El control siendo el más importante en la automatización debido que aquí se integra todo desde las órdenes de alta gerencia, los requerimientos básicos del control y entradas de información digital o análoga, aquí es donde se debe procesar e integrar toda la información para transformarla eficientemente y así tener las mejores garantías y los mejores resultados, dependiendo de esto se puede mantener un proceso continuo o cumplir con requerimientos de alta calidad puesto como condiciones en el programa de control. Este término se asocia no solo con el software y hardware que hacen acciones en el proceso, también forman parte los elementos mecánicos y electrónicos que permiten el control, así como lo son contactores, temporizadores, relés, bobinas y demás que conectados de ciertas formas también ofrecen acciones automatizadas (GARCIA, 1999).

2.2.4.2 Nivel de Automatización

Cada proceso tiene diferente nivel de complejidad, que dependiendo del grado de dicha complejidad, se requiere de algún tipo especial de tecnología que garantice los alcances del proyecto y que no limite el funcionamiento, entre más complejo

sea éste muy seguramente será más costoso realizar, por ende, para reconocer esto fácilmente se ha estructurado el nivel de automatización (GARCIA, 1999).

2.2.4.2.1 Nivel 1

En este nivel se hacen acciones básicas de control donde se pueden fijar parámetros a una máquina para supervisar, alertar y tomar decisiones basadas en indicaciones prefijadas por algún operario teniendo en cuenta requerimientos de la planta, podría también sugerir acciones al operador y servir como base a toma de decisiones.

2.2.4.2.2 Nivel 2

Se le exigen a las máquinas las máximas condiciones de uso partiendo de especificaciones prefijadas, se requiere el máximo potencial de los aparatos.

2.2.4.2.3 Nivel 3

En este nivel, (GARCIA, 1999) plantea que estos procesos en los que además de exigirse producción se les requiere de precisión, por lo que es esencial una monitorización total de cada movimiento y gracias a sus respectivas realimentaciones lograr la corrección de errores, llegando a las mejores condiciones de uso y haciendo más eficaces las tareas. El tipo de control aplicado no es la técnica usada para controlar, en este caso se habla de cómo se implementa la tecnología para conveniencia, existen cuatro forma de implementación de tecnología de control, cada una de estas tiene ventajas y desventajas, ellas son:

- Control centralizado: Este tipo de implementación es económica ya que un solo computador hace el control a todos los proceso sin embargo, como una gran desventaja se tiene que éste no podría fallar debido a que si esto pasa, todo el proceso se vería afectado (GARCIA, 1999).
- Control jerárquico: En este tipo de control se tiene un computador principal que es el que procesa la información total, éste delega acciones a diferentes controladores por debajo de él, liberando carga de trabajo. Como ventaja se tiene que si se daña algún equipo el proceso no se detiene totalmente, solo se vería afectada la parte la cual tenía asignada ese módulo y tiene como desventaja los retardos que pueden verse reflejados en la planta (GARCIA, 1999).
- Control multicapa: Es un tipo de control jerárquico en el cual se delegan acciones distintas a cada uno de los controladores y ellos van escalando la información entre capa y capa.
- Control Distribuido: En este se tiene un más amplio lote de controladores, el cual se encarga de una parte distinta del proceso, cada uno de estos tendrían la capacidad de suplir las tareas de los otros dispositivos en caso

de daños, tiene como desventaja el aumento en costos de adquisición de equipos y mantenimiento (GARCIA, 1999).

2.2.4.2.3 Nivel 4

Corresponde a la integración de temas de gestión empresarial, planificación, programación e instrumentación, llamados fabricación integrada por computador o modelo CIM.

2.2.5 Interacción Humano Máquina (HMI)

Los sistemas de comunicación hombre máquina que permitan la interacción entre el usuario y la planta se conocen como HMI, la sigla HMI se conoce con diferentes términos, todos asociados al mismo tema, interfaz humano máquina es una de ella, este término reduce el campo de acción que realmente tiene la sigla sin embargo, la mejor forma para la interpretación de ésta es interacción humano máquina, lo cual expande el campo de acción de éste, no solo diciendo que es lo que se pueda ver en una pantalla y tener la opción de generar cambios a través de ella, sino todo lo que conecte al humano con la máquina, cualquier tipo de reconocimiento facial, cualquier tipo de herramienta análoga o digital que recoja señales y las transforme para que un programa las interprete, un buen ejemplo de ello es el mouse y el teclado de un computador, que son herramientas que permiten tener interacción continua con el dispositivo en el caso del computador.

Debido a la gran variedad de HMI existentes es importante especificar en cuál campo se trabajará y qué tipo de HMI, para el caso del proyecto de grado, se trabajará con una interfaz gráfica que permita la interacción del usuario con la planta y así lograr supervisar el proceso y poder tener en cuenta variables dadas por los transmisores, también lograr hacer cambios en algunas constantes y set point, se debe tener en cuenta que ésta será una herramienta de supervisión y que se debe hacer una programación previa con algún tipo de controlador para así pretender implementar esta interfaz. Para (OROZCO, 2013), todos los sistemas de interacción deben cumplir con ciertas características para que se consideren como HMI las cuales son:

- Sentido: Los sistemas deben tener la capacidad de percibir o recibir señales externas, que pueden ser provenientes del usuario o del proceso, las señales recibidas generalmente producen un cambio en la máquina que es tomada como una realimentación para el usuario.
- Almacenamiento de datos: Los sistemas de interacción, además de recibir datos deben guardarlos para luego procesarlos de ser el caso o hacer de una vez el procesamiento, para el almacenamiento debe existir algún tipo de memoria.
- Procesamiento de datos: El sistema debe ser capaz de tomar los datos guardados y procesarlos para luego convertirlos en acciones mostradas y representadas en la máquina e interfaz, de esta forma el usuario puede generar cambios al proceso que se esté ejecutando.

- Ejecución: Los sistemas deben tener la capacidad de enviar los datos procesados anteriormente a la máquina en donde se verán reflejados, esta ya es la salida que tendrá que verse externamente en elementos físicos, este paso es el último en donde termina la interacción del humano con la máquina, por supuesto el usuario debe recibir una retroalimentación de lo que se está ejecutando, esta se verá reflejada en la acción que se está ejecutando físicamente.

2.2.6 PLC (Controlador lógico programable)

Este dispositivo es el más utilizado en la industria para llevar a cabo acciones de control de todo tipo, es un dispositivo con capacidad de procesamiento más baja que la de un computador pero que la robustez en la que esta construido lo hacen el más óptimo para ser el líder en los ambientes industriales, también conocido como API (Autómata Programable Industrial) cuenta con especificaciones requeridas para cumplir tareas de automatización, supervisión, toma de datos y procesamiento de los mismos, su arquitectura depende de la magnitud del proceso al que será sometido, ya que los hay de bajas, medias y altas gamas para procesos complejos y básicos, por supuesto uno de alta gama podría hacer lo que el de baja gama hace, básicamente estos dispositivos cuentan con tarjeta de red, entradas y salidas analógicas y digitales, puertos de comunicación Ethernet, bus, profibus, de igual manera dependiendo de la robustez del dispositivo se suelen dividir en dos tipos de PLC, como lo son modulares y compactos, como sus palabras lo indican el modular divide las funciones en varios módulos que procesan la información y dan recuento de ello a la CPU o módulo principal del PLC, estos para cuando son procesos complejos y con necesidad de muchas entradas y salidas, los otros son compactos igualmente como lo indica la palabra tienen todo integrado, tarjeta de red, CPU y entradas y salidas en un mismo módulo.

2.2.7 Servidor OPC

Un servidor OPC es un conjunto de estándares de Microsoft (COM, DCOM, OLE Automation y Active X), (RAIGOSA FIGUEROA & ANAYA RUIDIAZ, 2014) que satisfacen ciertas necesidades de la industria en comunicación de dispositivos naturalmente no entendidos entre sí, es decir estandariza un lenguaje de comunicación para poder hacer conexión a dispositivos, dicha comunicación especialmente trata en tiempo real, es decir permite el intercambio de datos constantemente.

El funcionamiento básico de un servidor OPC se trata del intercambio de datos usuario-fuente sin necesidad que el lenguaje de programación sea entendido en ninguno de los dos sentidos, viéndolo a ancho modo es un servidor que permite recibir datos traducidos desde la fuente.

Debido a que este tipo de servidores es muy usado en la industria de la automatización y control cierto tipo de datos son transferidos con frecuencia entre los dispositivos y controladores, básicamente se encuentran tres categorías como son: Datos en tiempo real, Datos históricos, alarmas y eventos.

3. METODOLOGÍA

El estado inicial de la planta de destilación y la ubicación de los elementos de la misma es mostrado en la Figura 2, la imagen presenta cómo se encontraba la planta cuando el presente proyecto inició, aquí cabe resaltar que no se puede evidenciar fallas tales como fugas, fisuras, desajuste de sensores ni ningún tipo de funcionamiento de los elementos, dicho proceso de verificación, prueba, reparación y caracterización es mostrado en el desarrollo de la metodología. El tanque número 4 (tk4) es usado con varios propósitos uno de ellos es servir de almacenamiento de materia prima para poder cargar luego al boiler, entonces el proceso de destilación inicia cuando se aplica energía sobre el boiler, allí al calentarse el líquido sube vapor por la torre de destilación pasando el vapor por el condensador (en la cabeza de la torre), a través del proceso de circulación de líquido frío se condensa el vapor el cual pasará al tanque número uno (tk1) el cual es el primer tanque de almacenamiento, de allí se tiene la posibilidad de escogerse a donde seguir; llegando así al tanque dos o al tanque tres (tk2 o tk3) y por último volver a mezclar todo nuevamente en el tk4. En la misma figura se muestran también las válvulas desde EV1 hasta EV9 además de la bomba peristáltica, el enfriador y parte del gabinete de control donde se encuentra cableada la instrumentación y el Controlador Lógico programable.

Figura 2. Planta inicial



Fuente: autor

3.1. PRECOMISIONAMIENTO DE SISTEMA DE MECÁNICO

Una de las principales fases del proyecto fue la inspección de las partes mecánicas en la planta de destilación, ¿porque es de las principales? Esta pregunta se responde debido a que es necesario tener todos los elementos mecánicos como tanques, juntas, soldaduras, tuberías y empalmes en excelente estado y en su debido lugar, ya que si no lo están pueden ocasionar accidentes como derrames de líquidos trabajados en los tanques, además que de alguna forma llegarían a poder afectar los instrumentos electrónicos. Habiendo mencionado lo anterior se iniciaron las pruebas inicialmente con los tanques y luego se pasó a los tramos de tubería de una manera metodológica que a continuación se describe.

El primer paso fue el desacoplamiento de los tanques de almacenamiento y el boiler principal para lograr hacer pruebas hidrostáticas y comprobar el estado de los tanques, verificando si la ventana de observación de nivel del tanque era hermética y no tenía problema alguno, para ello se tuvo en cuenta las normativas diseñadas por la API de sus siglas en inglés “American Petroleum Institute” la cual cuenta con una serie de instructivos en la construcción e inspección de calidad en tanques. La norma (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2013) la cual habla sobre procedimientos de construcción, inspección, verificación y algunas sugerencias de diseño y materiales, además tipos de pruebas todo para tanques de acero.

La norma (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2013) en su capítulo 6 numeral 2 habla de las garantías que el fabricante debe dar al comprador, menciona como sugerencia que todo tipo de pruebas en los tanques deberán ser efectuadas en el lugar de fabricación antes del envío y que debe garantizar la calidad del producto pero que esto no libera al fabricante de tener que reemplazar elementos con problemas de fabricación o defectos descubiertos en campo.

Los tanques desmontados antes de empezar el proceso de pruebas se muestra en las siguientes imágenes, ver Figura 3 a Figura 6.

Figura 3. Tanque tres antes de inspección.



Fuente: Autor

Figura 4. Tanque dos antes de inspección.



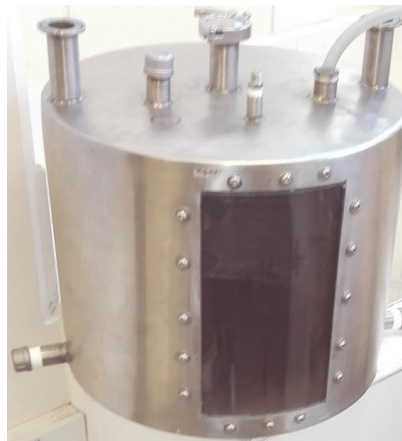
Fuente: Autor

Figura 5. Tanque uno antes de inspección.



Fuente: Autor

Figura 6. Tanque cuatro antes de la inspección.



Fuente: Autor

Teniendo los tanques desmontados, siguiendo el capítulo 7 de la norma (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2013) donde en su numeral 2 habla de los detalles de una buena soldadura y algunos consejos para aplicar e inspeccionar soldaduras en el tanque, comenta los tipos de soldaduras para los tanques de acero como lo son arco metálico, arco metálico de gas, gas de arco de tungsteno, oxicorte y otros. En la verificación de las soldaduras en el numeral 3.2.1 del capítulo 7 de la norma (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2013) se habla de los métodos de verificación e inspección de las soldaduras en la base del tanque, donde se recomienda hacer pruebas ultrasónicas o radiográficas por el fabricante, de igual manera, se deben hacer exámenes visuales en los cuales se pretende detectar grietas, golpes de arco, socavaduras excesivas y porosidad superficial, entre otras. Una vez revisada la base del tanque es necesario examinar las placas del interior que lo rodean y sellan, donde se debe verificar visualmente que no tenga problema alguno, en especial grietas y abolladuras que puedan resultar en fugas; además, todas las soldaduras deben ser probadas. Ahora el capítulo 7.3.4 de la norma (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2013) dice que antes que el tanque se llene de agua, para evitar derrames, primero deberá probarse con aire a una presión de 15psi, luego, mientras que se aplica el aire comprimido debe esparcirse una capa de jabón o algún líquido para detección de fugas en las soldaduras y examinar el tanque durante todo este proceso.

Cuando ya se haya completado lo anterior, todo el tanque deberá probarse con agua, ya que los tanques usados son sellados, como lo dice la norma (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2013) en su capítulo 7.3.5 debe llenarse unos 50mm por encima de la capacidad del tanque y estar examinando el comportamiento del tanque durante el llenado, las soldaduras y todas las juntas del tanque para encontrar posibles fallas.

El proceso de pruebas de los tanques primeramente se efectuó hidrostáticamente, para lo que se pretendió encontrar algunos desperfectos que pudiese tener el sistema mecánico; hecha la prueba, se encontraron grandes fallas en dichos tanques, lo que los hacia inoperables, debido a la gran cantidad de fugas fueron devueltos a la empresa fabricante para efectuar las garantías que todo fabricante debe asumir con un producto ya terminado y con desperfectos, las primeras pruebas hechas fueron fotografiadas y mostradas a continuación desde la

Figura 7 a la Figura 15.

Figura 7. Porosidad uno del tanque cuatro.



Fuente: Autor

Figura 8. Fuga hermética uno del tanque cuatro



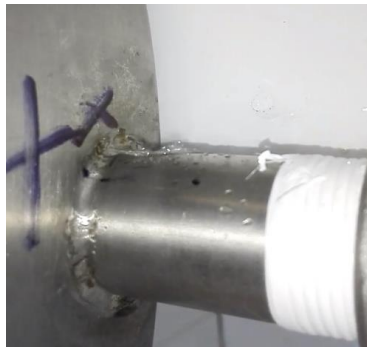
Fuente: Autor

Figura 9. Fuga hermética dos del tanque cuatro



Fuente: Autor

Figura 10. Porosidad dos del tanque cuatro



Fuente: Autor

Las anteriores imágenes fueron tomadas evidenciando el mal estado en el que se encontraron los tanques, siendo éste el primero de una lista de 5 tanques con diferentes funciones. Este primer tanque es llamado de almacenamiento de materia prima y es el más grande de los 4 ejemplares, para esta ocasión será llamado tanque 4 de almacenamiento, debido a la gran cantidad de fugas que tenía este artilugio el área de prueba fue derramada con agua durante toda la

prueba, seguido de esto, el que continuó en estas evaluaciones hidrostáticas fue el tanque de almacenamiento derecho el cual será llamado tanque 3, los resultados son mostrados a continuación (ver Figura 11 a la Figura 13).

Figura 11. Fuga hermética uno del tanque tres.



Fuente: Autor

Figura 12. Fuga hermética dos del tanque tres.



Fuente: Autor

Figura 13. Fuga hermética tanque tres



Fuente: Autor

El proceso continuó en la prueba del tanque izquierdo de almacenamiento que es donde se deposita el producto final del destilado, ya que la hermeticidad de éste es de suma importancia para el proceso; este tanque es llamado tanque 2 (Figura 14) donde, haciendo las pruebas iniciales con agua, se comprobó el mal estado del mismo y como se evidencia en la Figura 15.

Figura 14. Tanque dos



Fuente: Autor

Figura 15. Fuga hermética tanque dos



Fuente: Autor

El proceso de prueba de los tanques en primera instancia fue el que dio las bases de las evidencias para hacer la devolución y solicitar las garantías que como comprador tiene la Universidad Pontificia Bolivariana, este proceso de reparación fue largo, en el que el fabricante se llevó los tanques para lograr corregir las imperfecciones detectadas en el campo de trabajo y tratar de corregir las porosidades y fugas que tenía por falta de hermeticidad y malas soldaduras.

Luego de varias semanas de espera, el fabricante devuelve los tanques y se procedió a hacer pruebas para verificarse que la corrección de fallas en los tanques estuviese bien hecha, esta vez, para evitar derramamiento de agua en el

área de trabajo se hizo con aire comprimido, tal y como lo indica la norma API que fue usada como base de cada prueba de este trabajo.

Después de esto, se adquirieron los accesorios necesarios para sellar todos los orificios de los tanques y lograr verificar que sí habían hecho buenas correcciones de los tanques y que estos ya se encontrasen operables para pasar a la siguiente fase; como se muestra a continuación, los tanques fueron acondicionados para las pruebas neumáticas en las que se usó una solución de jabón altamente espumosa que permitiera verificar si existían fugas después del reingreso y con las nuevas reparaciones, para ello se aplicó aire a presión entre 10 a 15 PSI y se buscaron errores (ver Figura 16).

Figura 16. Tanque cuatro puesto a la prueba neumática



Fuente: Autor

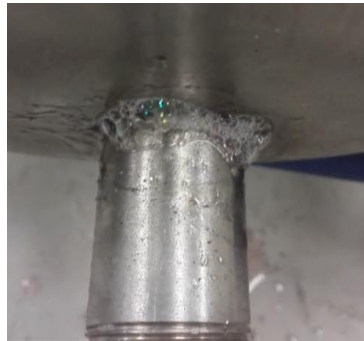
Las siguientes tres imágenes son los resultados obtenidos en las pruebas neumáticas con el tanque 4, en ellas se continuaron evidenciando fallas en las soldaduras (Figura 17 y Figura 18) mostrando porosidades que generaban la salida del aire y espuma debido a la misma, estas porosidades se encontraron en lugares donde anteriormente se habían detectado y en donde, según el fabricante ya se habían reparado. Sabiendo que las pruebas neumáticas se realizaron luego de haber traído los contenedores de la reparación efectuada por el fabricante y debido a las pruebas y resultados obtenidos por la prueba hidrostática, se siguieron observando escapes de aire por las ventanillas de observación así como se muestra en la Figura 19.

Figura 17. Porosidad tanque cuatro, prueba neumática



Fuente: Autor

Figura 18. Porosidad dos del tanque cuatro, prueba neumática.



Fuente: Autor

Figura 19. Fuga hermética tanque cuatro, prueba neumática



Fuente: Autor

Continuando las pruebas neumáticas en los tanques se procedió al sellado de los orificios de entrada y salida del tanque 3 para verificar el estado de éste, de esta manera se conectó la entrada de aire presurizado y se roció líquido con jabón altamente espumoso en soldaduras y ventanilla de observación de nivel, arrojando buenos resultados para las uniones soldadas pero mostrando aun desperfectos en las ventanillas de observación así como lo muestra la Figura 20 y Figura 21 en la cuales se puede observar espuma a un costado de la ventana, lo que indica una pequeña fuga que permitía el paso de aire.

Figura 20. Tanque tres, prueba neumática.



Fuente: Autor

Figura 21. Fuga hermética, prueba neumática



Fuente: Autor

Para el tanque 2 se realizó el mismo procedimiento en el cual se analizaron fallas mediante presión neumática, arrojando datos contundentes que ratifican lo que desde un inicio de las pruebas; se observó y fue que aún todos los tanques seguían con falta de hermeticidad y fugas, algo que sin duda pone en vilo la

calidad del fabricante para este tipo de trabajos, y, como se observa en la Figura 22 se presentaron fugas desde los tornillos hasta gran parte de la ventanilla de observación donde por estas fugas se permitía el paso de aire, ver Figura 22 y Figura 23.

Figura 22. Tanque dos, prueba neumática



Fuente: Autor

Figura 23. Fuga hermética, prueba neumática



Fuente: Autor

El tanque número uno tiene una característica especial, y es que a este llega el producto directamente desde el condensador, algo que podría suponer la llegada de líquidos con altas temperaturas por lo que es muy importante su operatividad, además, cuenta con un sistema de refrigeración, lo que lo hace más complejo, también es fundamental que sea hermético y que cuente con buenas soldaduras. La prueba neumática sirvió para arrojar los fallos que este tenía, empezando con una gran espacio entre la ventanilla de observación y el tanque, algo que permitía el paso desmesurado de aire al momento de la prueba como se observa en la Figura

24, además de esto tenía porosidades en una de las soldaduras que conecta mediante un tubo el condensador de la destiladora al tanque así como se muestra en la Figura 25.

Figura 24. Tanque uno, prueba neumática



Fuente: Autor

Figura 25. Fuga hermeticidad, prueba neumática



Fuente: Autor

En la prueba de la tubería se hizo uso de los tanques para lograr imprimirles aire a los tubos debido a que no se contaba con la pieza necesaria en el momento. Para adelantar estas pruebas se conectaron tubos y tanques y posteriormente se sellaron escapes de los tubos. Después de esto, se procedió a las pruebas, empezando con la tubería de conexión de los tanques 2 y 3 ver Figura 26 y Figura 27, de esta forma y como se mencionaba anteriormente, se conectaron las tuberías y se inyectó aire dando como resultados el hallazgo de nuevas fallas que perjudicarían la planta; se encontraron dos nuevos poros que ocasionaban la salida de aire y creaban espuma debido al líquido que fue usado para el descubrimiento de fallas.

Figura 26. Tubería uno



Fuente: Autor

Figura 27. Tubería dos



Fuente: Autor

Después de esto, se continuó trabajando con la tubería y probando la sección que conecta el tanque; con la bomba peristáltica se hizo el mismo proceso de prueba arrojando como resultado el descubrimiento de fugas que ocasionaban el paso de aire y creaban burbujas ver Figura 28.

Figura 28. Tubería tres



Fuente: Autor

A continuación se muestra la imagen de la segunda sección que conecta la bomba peristáltica con la columna de destilación la cual fue probada conectándose a la salida de un tanque e inyectándole aire para descubrir fallas, y como se había mencionado anteriormente, el sistema contaba con graves grietas y fugas tal y como se muestra en la Figura 29 donde se puede apreciar una fuga de tal magnitud que salpica todo el jabón puesto en la zona de la falla, expulsándolo con gran fuerza debido al aire comprimido, este parece ser un tramo donde no se soldó el tubo en la unión y evidencia descuidos por parte del fabricante, además de esta grieta se detectaron dos fallas más, una de ellas muy cercana a la primera y como se muestra en la Figura 30, un poro que permitía el paso de aire y creaba burbujas con el paso del aire; en la Figura 31 se evidencia la última falla de esta sección donde también se presentó una porosidad de gran magnitud y en donde, debido a esto se generó el paso de aire y presentó una nueva irregularidad.

Figura 29. Tubería cuatro



Fuente: Autor

Figura 30. Tubería cinco



Fuente: Autor

Figura 31. Tubería seis



Fuente: Autor

En la siguiente imagen se muestra la forma en que se realizaron las pruebas de los tubos, como se mencionaba anteriormente, se conectaron los tubos a las boquillas de los tanques y se inyectó aire al tanque, cerrándose los orificios por donde se pudiese escapar, la Figura 32 muestra la sección 1 del tubo que conecta la bomba con la columna de destilación, sin embargo, se hicieron las pruebas de este tubo y no se encontraron fugas de aire.

Figura 32. Tubería siete



Fuente: Autor

Haciendo pruebas a los tubos de la planta, por aparente subida de presión de parte de la válvula de aire que alimentaba al sistema de pruebas se presentó una falla que ocasionó una explosión en un tanque produciendo un sonido fuerte y la fractura del acrílico del tanque, además, una fisura en la carcasa del tanque, las siguientes imágenes (Figura 33 y Figura 34) muestran los daños causados.

Figura 33. Tanque dos explotado.



Fuente: Autor

Figura 34. Tanque dos explotado desmontado



Fuente: Autor

Luego del proceso de reparación, ver Figura 35, se puede decir que el sistema de tanques se encuentra por completo reparado y sin fugas, además, el sistema de tubos se halla en pleno funcionamiento, probados y verificados, de tal forma que la planta no tiene fugas.

Figura 35. Tanque dos reparado



Fuente: Autor

3.2. PROCESO DE CONEXIONES DE COMUNICACIÓN PROGRAMADOR-CONTROLADOR

Iniciando el proceso de configuración de comunicaciones con el PLC es necesario tener conectado el PLC punto a punto con el computador que funcionará como servidor, ver Figura 36.

Figura 36. Conexión punto a punto PLC a computador

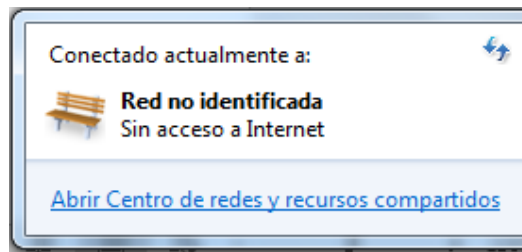


Fuente: Autor

Debido a que el proceso de comunicaciones ya se había hecho con anterioridad es necesario primero borrar la IP configurada antes para instalar una nueva.

Para el proceso de configuración de la comunicación del PLC con la red se debe tener un computador con los programas RSLinx y Booth-DHCP, los cuales son fundamentales en este proceso, además de esto, es necesario que el computador con el que se hará la configuración tenga acceso como administrador ya que serán cambiadas algunas condiciones de red del computador para que éste funcione como servidor ante el PLC. Para empezar se debe ir al centro de redes como se muestra en la Figura 37.

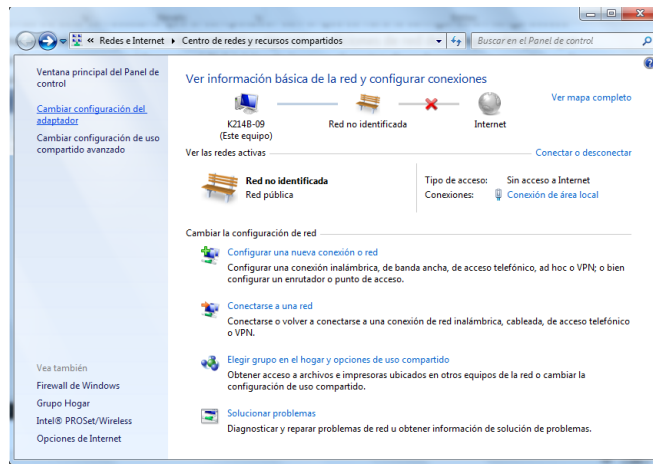
Figura 37. Centro de redes



Fuente: Autor

Después de haber ingresado al centro de redes, hay que dirigirse a la parte superior izquierda donde dice “cambiar configuración del adaptador” y se ingresa allí, la ilustración se muestra en la Figura 38.

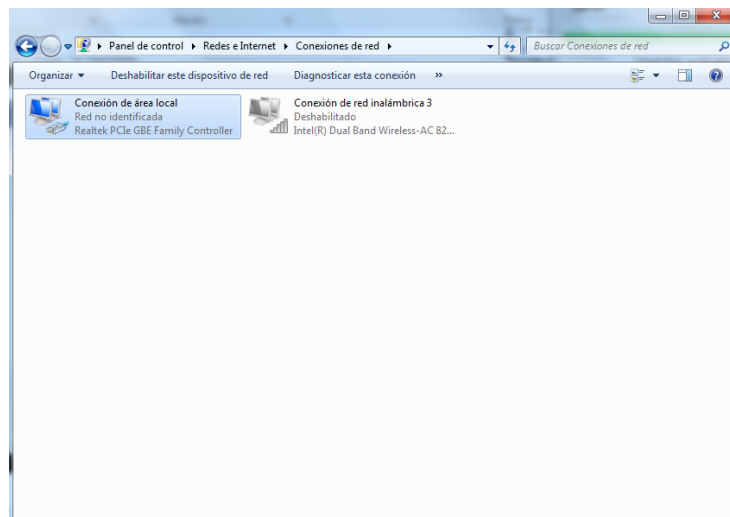
Figura 38. Configuración de conexiones



Fuente: Autor

El anterior paso lleva a la ventana mostrada en la Figura 39, donde es necesario ingresar al acceso que dice “Conexión de área local”

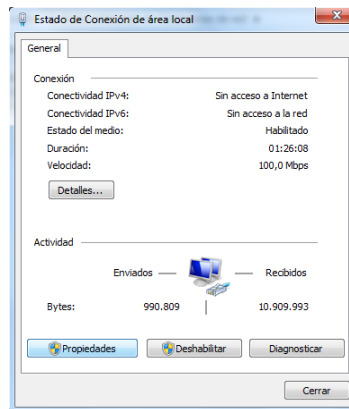
Figura 39. Conexión de área local



Fuente: Autor

Al ingresar en la conexión de área local se muestra el estado de dicha conexión como se ve en la Figura 40, hecho esto se ingresa a propiedades donde se encontrará una lista de opciones de configuración.

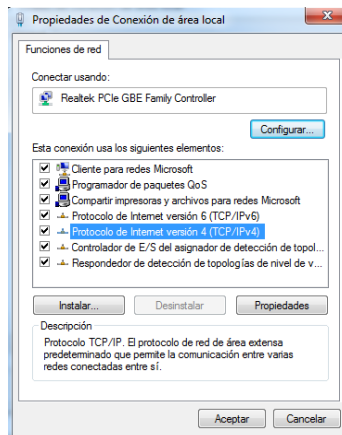
Figura 40. Estado de conexión de área local



Fuente: Autor

En esta lista de opciones de configuración de red se verá la forma de cambiar las opciones de red del protocolo de internet versión 4 (TCP/IPv4) ver Figura 41, dando clic en esta opción para lograr configurar una dirección estática en el computador, este proceso es momentáneo pero necesario en esta primera parte, el computador usado para programar será el servidor de red para el PLC.

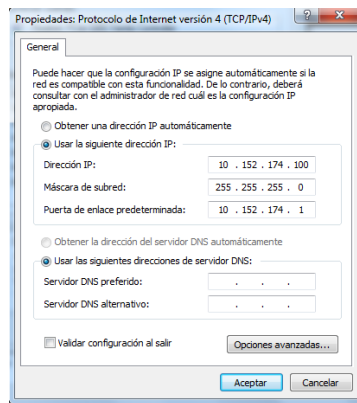
Figura 41. Propiedades de área local



Fuente: Autor

Después de esto, es necesario seleccionar la opción “Usar la siguiente dirección IP:” para que se habilite la edición de IP, máscara y puerta de enlace, para este proceso es necesario saber la VLAN en la que se encuentra conectado el dispositivo Servidor, en el caso de la Universidad para el laboratorio de control ubicado en el k306 es 174, por ende la dirección IP debe ser 10.152.174.XXX donde el 152 pertenece a la red universitaria y las XXX significan que puede colocarse cualquier número desde el 2 a 254, estos números definirán la dirección final, en este caso se decidió el valor 100, ver Figura 42, el número para este caso no importa cuál sea, es momentáneo y es solo para configuración del PLC, luego se debe ingresar la dirección de máscara tal como se muestra en la imagen; de igual forma, la dirección de puerta de enlace y, finalmente, se da clic en aceptar.

Figura 42. Protocolo IPV4

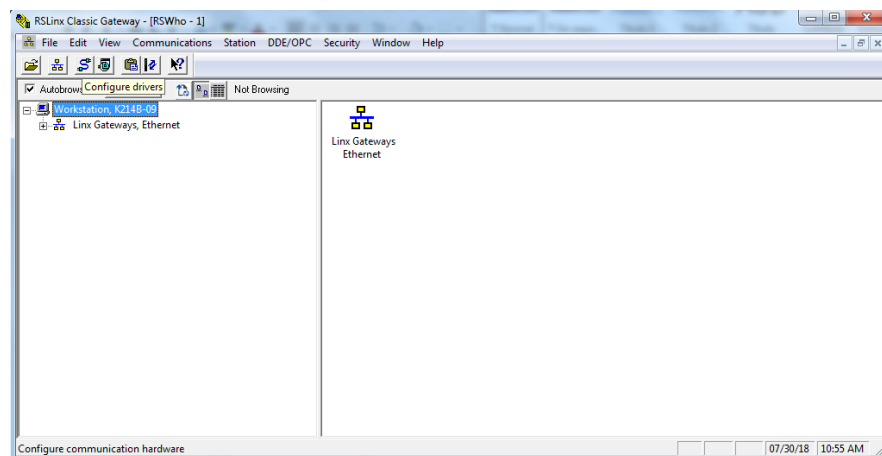


Fuente: Autor

Hecho el proceso anterior, la configuración del computador como servidor estará lista, ahora es necesario ingresar al programa RSlinx Classic.

Entrando a RSlinx se observará la ventana inicial tal y como se muestra en la Figura 43, después, se debe ir al icono en la barra de tareas que asemeja un cable en forma de S llamado “configure drivers”, y se ingresa allí para configurar la conexión del PLC.

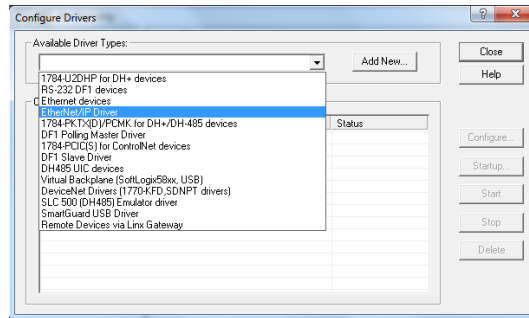
Figura 43. Inicio RSlinx



Fuente: Autor

En configuración de Controladores en la parte superior, se encuentra una opción para seleccionar los tipos de drivers disponibles, para el caso se selecciona Ethernet/IP Driver y se da clic en Add New tal como se observa en la Figura 44.

Figura 44. Configuración de controladores

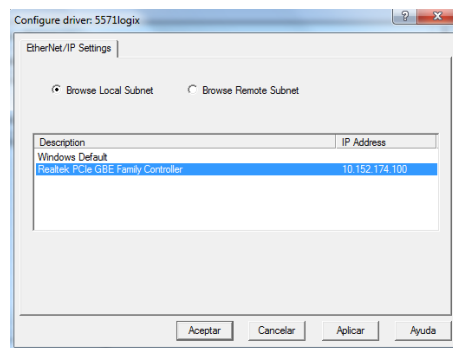


Fuente: Autor

Al hacer clic en Add New aparece una ventana donde se añadirá el nombre que se quiera a la conexión, hecho eso se hace clic en OK.

Después, se debe seleccionar “Browse Local Subnet” y hacer clic en la parte que dice: Realtek PCIe GBE family controller, tal y como se muestra en la Figura 45; se debe verificar que la dirección IP que aparezca allí sea la misma que se fijó en el computador usado como servidor, entonces se debe seleccionar, aplicar y posteriormente en “Aceptar”.

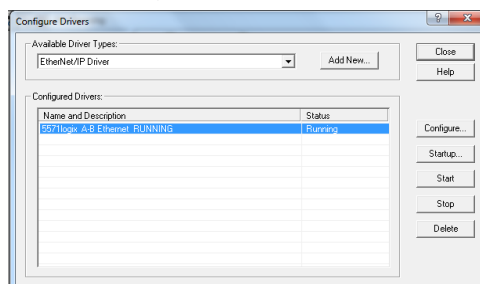
Figura 45. Conexión controlador red



Fuente: Autor

Hecha la conexión es necesario hacer clic en start para correr lo programado, ver Figura 46.

Figura 46. Configuración de controladores dos

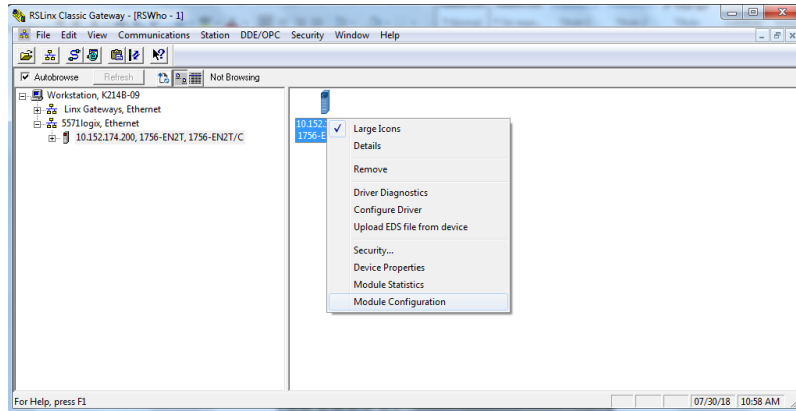


Fuente: Autor

Hecho el proceso anterior se mostrará ya en línea el PLC con la dirección IP que inicialmente tenía.

Haciendo clic derecho en el símbolo del módulo de Ethernet del PLC aparecerá una ventana de opciones en la que se buscará “Module configuration”. Figura 47.

Figura 47. Página inicio RSlinx, módulo Ethernet



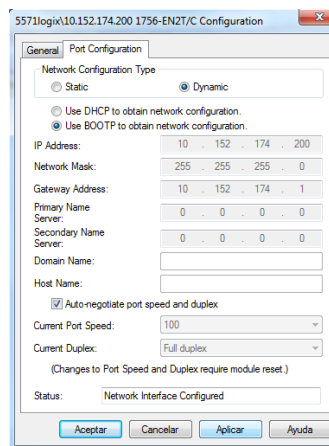
Fuente: Autor

En “Module configuration” se debe abrir la pestaña “Port configuration” y seleccionar el modo “Dynamic” como se muestra en la Figura 48. Luego, hacer clic en aplicar y aceptar. Posteriormente se reinicia el PLC para comprobar que la configuración haya sido modificada.

El proceso hecho sirve para eliminar la dirección IP que pueda tener configurada anteriormente el dispositivo para luego colocar una nueva.

Comprobado que se hayan guardado los cambios abrir el programa “Booth-DHCP”.

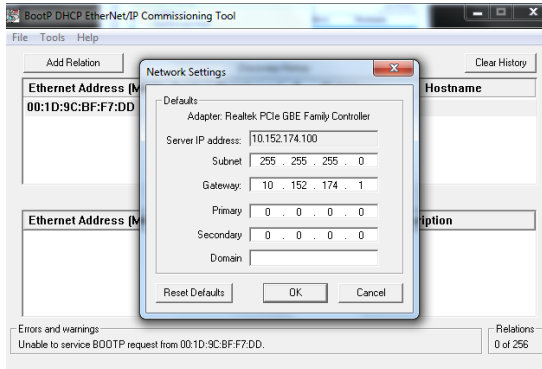
Figura 48. Configuración de puerto



Fuente: Autor

En el programa Booth DHCP se deben verificar las direcciones del servidor entrando a “Tools”, luego a “Networks Settings”, allí deben verificarse dirección IP de servidor, máscara de subred y llave de red, Figura 49.

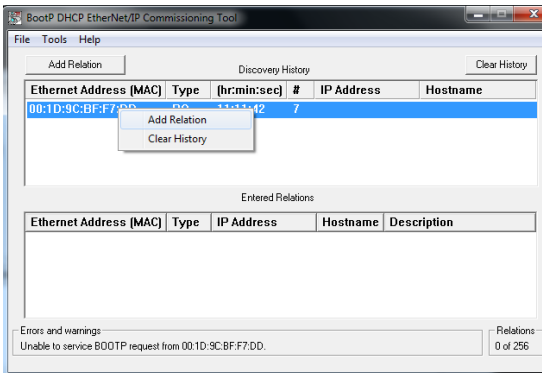
Figura 49. Direcciones de servidor.



Fuente: Autor

Verificadas las direcciones, se debe hacer clic derecho en la que debería ser la dirección MAC del PLC a conectar, es necesario verificar que sea la dirección correcta, y se elige “Add Relation”, Ver Figura 50.

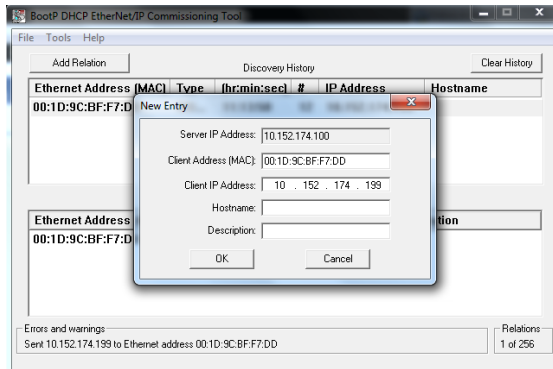
Figura 50. Añadir relación



Fuente: Autor

A continuación se verá la dirección IP del servidor, además, la dirección MAC que es única del dispositivo Control Logix manejado en la UPB en el k306, la dirección IP de cliente se debe configurar similar a lo explicado anteriormente, esta vez será 10.152.174.199, ver Figura 51. Esa dirección es recomendable dejarse estática y pedir al encargado del servidor de la universidad o empresa que sea usada únicamente para el Logix, debido a que los servidores de red asignan direcciones automáticas y en algún momento podría presentarse conflicto de conexión.

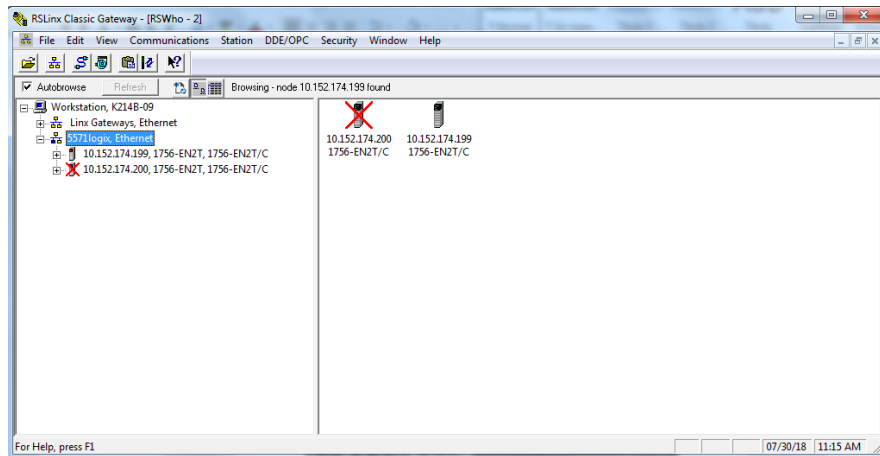
Figura 51. Configuración de red DHCP



Fuente: Autor

El proceso anterior es el método de asignación de IP al controlador, luego de haber asignado dicha dirección se vuelve a entrar a RSLinx y debe aparecer el anterior módulo con una x de conexión, éste podrá removerse, también aparecerá uno nuevo el cual será la nueva conexión con las configuraciones hechas ver Figura 52.

Figura 52. RSLinx nuevas configuraciones de red.

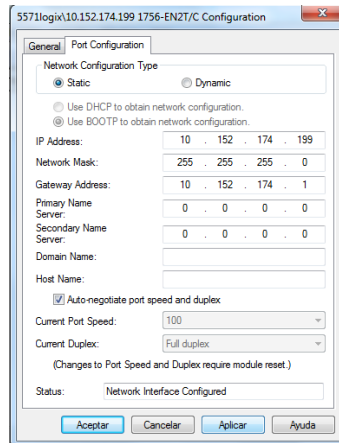


Fuente: Autor

A continuación, se debe hacer el proceso para dejar la dirección IP estática en el PLC, dando clic derecho y entrando a la opción “Module configuration”.

Después de esto, se debe seleccionar en la parte Superior donde dice “Networks Cofiguration Type” la opción “Static” oprimir, aplicar y aceptar, ver Figura 53.

Figura 53. Configuración de puerto, modo estático



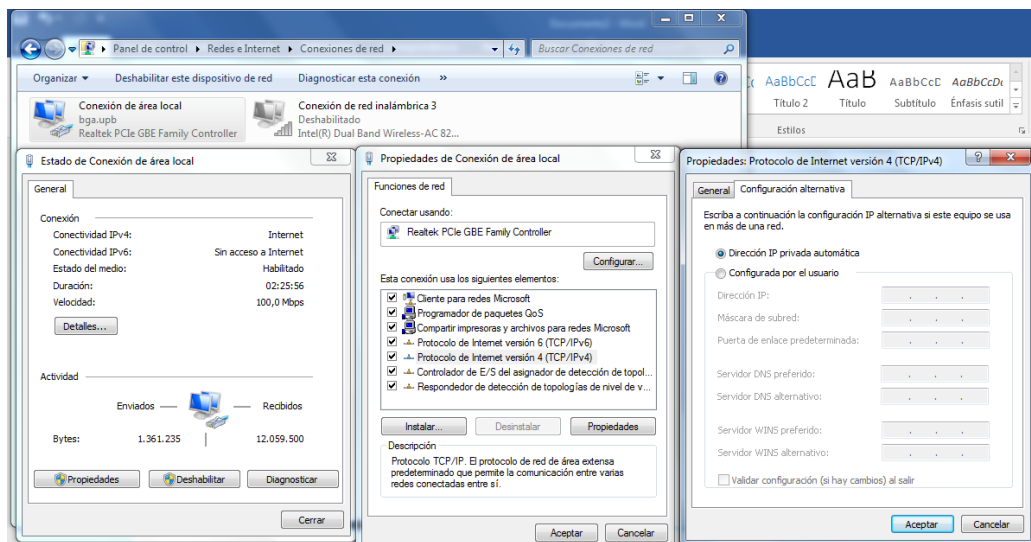
Fuente: Autor

Se debe reiniciar el PLC nuevamente para verificar que fueron hechas las modificaciones.

Se desconecta el cable Ethernet punto a punto con el PLC y se conecta tanto el computador como el PLC a la red para verificar cambios.

Es necesario volver a colocar la dirección del computador Automática así como se muestra a continuación en la Figura 54.

Figura 54. Configuración de red dirección automática



Fuente: Autor

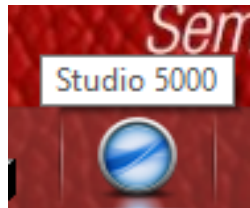
El último paso es volver a entrar al programa RSlinx para verificar que sí conecte teniendo conexión a internet.

3.3. PROGRAMA INICIAL BASE DE CONFIGURACION DEL CONTROL LOGIX 5571

Luego del proceso de comunicación del PLC explicado anteriormente se procede a la creación del programa inicial, este programa no tiene ningún tipo de programación de control para el PLC, en cambio, sirve para empezar cualquier proceso usando el Logix, debido a que estos dispositivos son multi-modulares y dependiendo del propósito de la empresa se compran los módulos necesarios, por ello es necesario configurar el tipo de módulo usado para el programa y en el caso del presente trabajo de grado servirá para todos los programas realizados que a su vez funcionará como una plantilla para cualquier tipo de propósito.

El Control Logix 5571 de Allen Bradley se programa mediante un programa llamado Studio5000 de Rockwell Automation; en el buscador se entra a dicho programa. El logo es mostrado a continuación en la Figura 55.

Figura 55. Studio 5000



Fuente: Autor

En la parte de abajo aparecen los proyectos trabajados, y en la columna llamada “Create” se elige “New Project”, ver Figura 56.

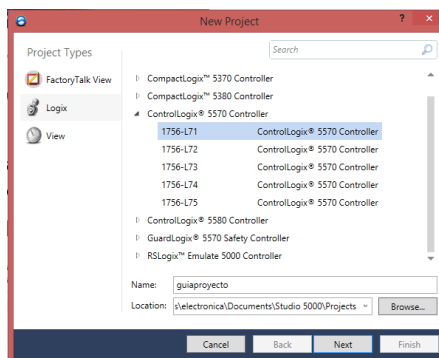
Figura 56. Inicio studio 5000



Fuente: Autor

El siguiente paso es seleccionar la referencia de CPU, en el caso de la planta de Destilación es el 1756-L71, se pone un nombre al proyecto ver Figura 57, por defecto el proyecto quedará guardado en la carpeta de proyecto del programa Studio5000, luego clic en “Next”.

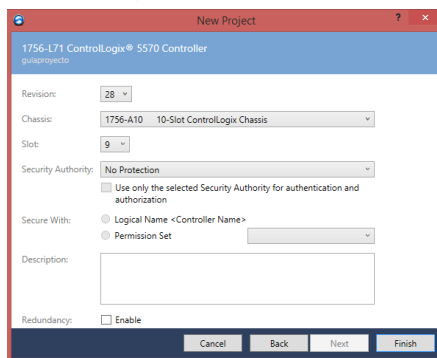
Figura 57. Referencia de CPU



Fuente: Autor

Para colocar la versión de la CPU se sigue la Figura 58, la cual es 28, también en la barra “Chassis” se selecciona el número de slot, el “slot” equivale al número de módulos que se tienen en total, y en esta ocasión es 1756-A10, en “Slot” se ubica el valor 9 contándose de 0 al 10, seleccionar “finish”.

Figura 58. Configuración inicial de controlador

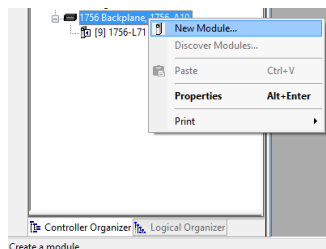


Fuente: Autor

Iniciado el programa en el costado inferior izquierdo se encuentra el listado de módulos configurados, entradas, salidas analógicas y digitales, además, módulos de RTD's, en la Figura 59 se resalta el nombre del proyecto con la referencia de CPU que se tiene en el PLC.

En “1756 Backplane, 1756-A10” clic derecho y en “New Module” como se muestra en la Figura 59.

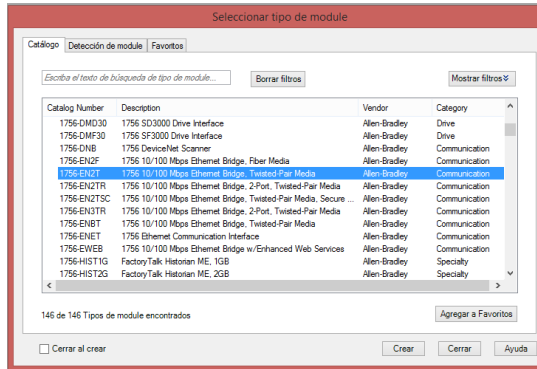
Figura 59. Backplane



Fuente: Autor

El primer módulo que se debe crear es el de Comunicación, en este caso Ethernet, se busca y se escoge el módulo 1756-EN2T haciendo doble clic en el nombre, Figura 60.

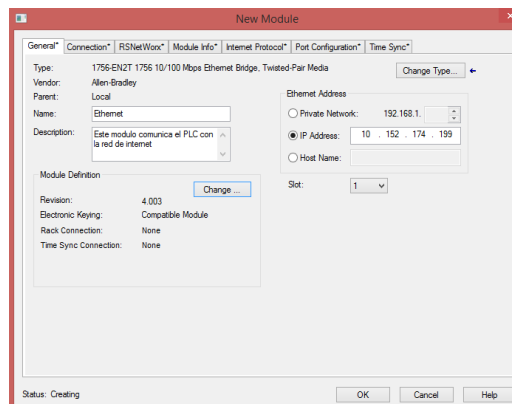
Figura 60. Selección módulo Ethernet



Fuente: Autor

Luego de elegir el módulo es necesario configurarlo, en el costado superior izquierdo se encuentra un espacio para editar el nombre y descripción del módulo, debajo de la descripción se encuentra “Module Definition” allí se fija la versión, la versión hace que el programa sea únicamente compatible con la elegida en adelante, algo a tener en cuenta. En el costado superior derecho se coloca la dirección IP fijada anteriormente en la etapa de Comunicación, este paso es el más importante para que el programa pueda comunicarse con el PLC, ver Figura 61.

Figura 61. Configuración módulo Ethernet

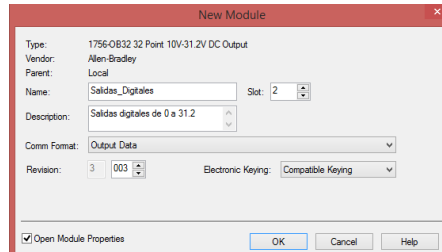


Fuente: Autor

El nuevo módulo a configurar será el de salidas y entradas Digitales, en orden respectivo, nuevamente se selecciona “1756 Backplane, 1756-A10” y se crea el módulo en “New Module”, buscar y seleccionar el módulo 1756-OB32 siendo de salidas Digitales. Creado el módulo pedirá seleccionar la versión a lo cual se ubicará un valor 3. Luego de seleccionar la versión sale el recuadro de opciones

principales del módulo, en este únicamente se pone el nombre y la descripción, luego dar Ok, Figura 62.

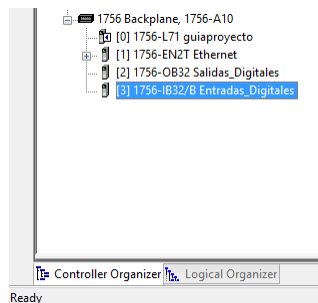
Figura 62. Creación módulo salidas digitales



Fuente: Autor

De forma similar se crea el módulo de entradas digitales llamado “1756-IB32”, tal y como se muestra en la Figura 63.

Figura 63. Backplane, entradas y salidas digitales



Fuente: Autor

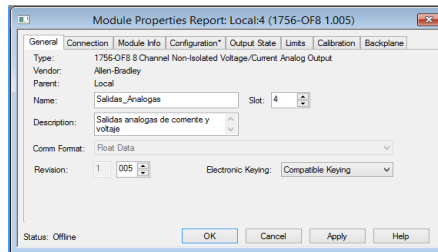
Para los módulos análogos se debe saber qué estará conectado a ellos, para la configuración del tipo de entrada y salida, los módulos análogos pueden manejar salidas y entradas de voltaje y corriente lo cual se debe tener en cuenta.

Apoyándose en los planos de conexiones se inicia por el módulo de salida analógica, hay dos instrumentos conectados al módulo, estos son la válvula proporcional neumática en el pin 0 con una señal de entrada 4 a 20mA y el variador de velocidad que controla la Bomba Peristáltica en la entrada 2 controlado con una señal de entrada de 0 a 20mA.

Se busca la referencia del módulo 1756-OF8 y se crea con esta referencia.

La Figura 64 muestra la ventana de propiedades del módulo, allí se ponen el nombre y descripción, además se modifica la versión, para efectuar cambios se cliquesa en aplicar.

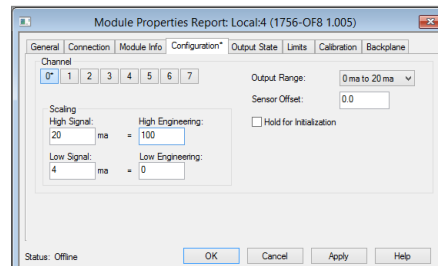
Figura 64. Propiedades módulo análogo



Fuente: Autor

En la pestaña llamada “Configuration” (Nota: este proceso se puede editar haciendo clic derecho en el módulo creado y yendo a las propiedades), existe la opción de configurar el tipo de salidas que se quieren o necesitan para los dispositivos, para el canal 0 usado por la válvula con una señal de 4 a 20mA por lo que debe ser configurada de tal forma así como se ve en la Figura 65.

Figura 65. Configuración de entrada analógica uno

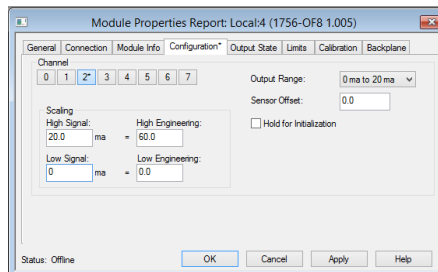


Fuente: Autor

Para el canal 2, ver Figura 66, destinado al variador de velocidad, controlado con una señal de 0 a 20mA, la medida de ingeniería depende del instrumento, en este caso 0mA sería 0hz y 20mA sería 60hz.

Al terminar se debe hacer clic en aplicar y luego en Ok.

Figura 66. Configuración de entrada analógica uno

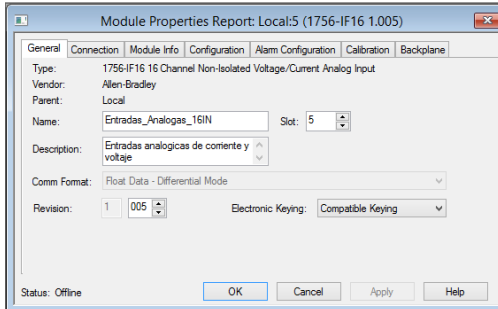


Fuente: Autor

Como se había mencionado anteriormente, es fundamental conocer el tipo de instrumentos que tendrán los módulos debido a que se pueden configurar de una vez en la creación. Ahora, el módulo analógico de 16 entradas, como se ha hecho anteriormente se busca el dispositivo, 1756-if16 y se da clic en “create”. Habiendo

creado el módulo se le asigna nombre y descripción, además, se elige la versión y se selecciona ok, ver Figura 67.

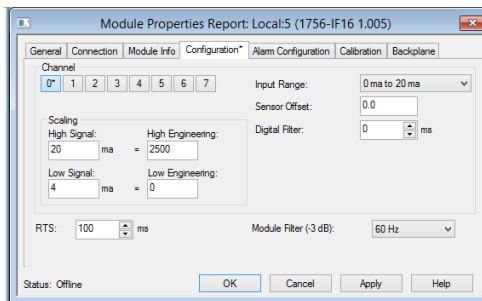
Figura 67. Configuración general del módulo de entradas analógicas



Fuente: Autor

Ahora, conociendo el tipo de salidas que arrojan los sensores, se configura el módulo como se muestra en la Figura 68, el sensor puesto en la primer entrada fue el sensor de presión el cual arroja una señal de 4 a 20mA indicando 0 con 4mA y 2500mBar cuando marque 20mA.

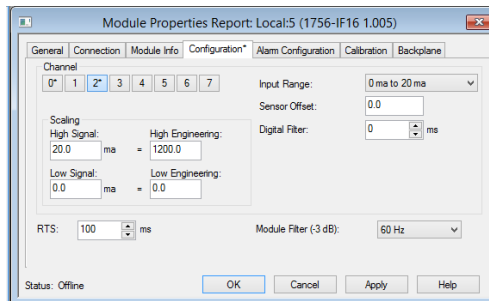
Figura 68. Configuración de puertos de entrada cero



Fuente: Autor

La Figura 69 muestra la configuración en el módulo del sensor de temperatura termocupla tipo k, la cual es conectada a un pequeño conversor de señal puesto en campo en el rack de control el cual es MinIPAQ-L que permite convertir la señal de voltaje arrojada por el sensor en una señal de corriente de 4 a 20mA, dependiendo el tipo de sensor se configura el escalamiento de ingeniería.

Figura 69. Configuración de puertos de entrada dos

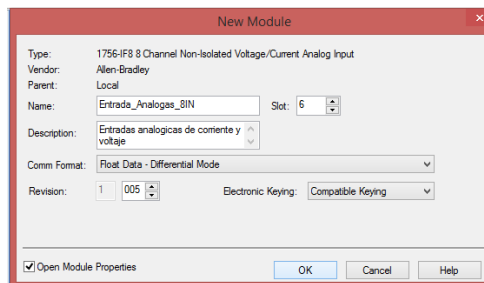


Fuente: Autor

Continuando el proceso de programación se configura el segundo módulo de entradas análogas de 8 puertos, el 1756-IF8, es el modulo usado para obtener las señales de los tres sensores de nivel de la planta y el sensor de presión diferencial, sabiendo ello se debe conocer cuál tipo de salida arroja cada sensor y configurarlos más adelante.

Luego de haber seleccionado el módulo correcto se añade el nombre y la descripción básica simbolizando la función del dispositivo y adecuando la versión de compatibilidad como se muestra en la Figura 70.

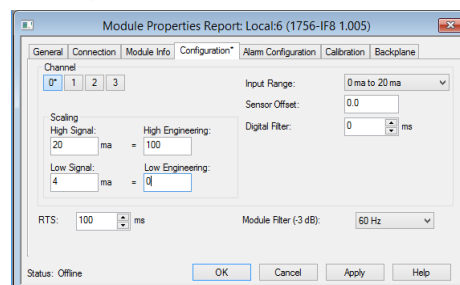
Figura 70. Creación módulo de entradas análogas dos



Fuente: Autor

Después de haber puesto nombre y descripción es necesario configurar los puertos de tal forma que concuerden con lo que se conecta físicamente, ver Figura 71, verificando el plano de conexiones se cerciorará que los tres sensores de nivel se conectan en los puertos 0,1 y 2 mientras que el sensor de presión diferencial es conectado en el puerto 3, sabiendo que el sensor de nivel arroja una señal 4 a 20mA para un nivel de 0 a 100%.

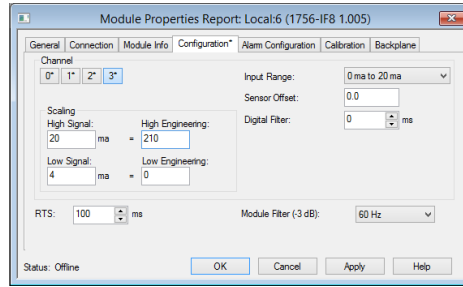
Figura 71. Configuración entrada de sensores de nivel



Fuente: Autor

El último sensor, ver Figura 72, también arroja una señal 4-20mA para una presión de 0 a 210 bares, para ello se decidió dejar esta medida ya que el otro sensor también arroja medidas en bares.

Figura 72. Configuración entrada sensor de presión diferencial

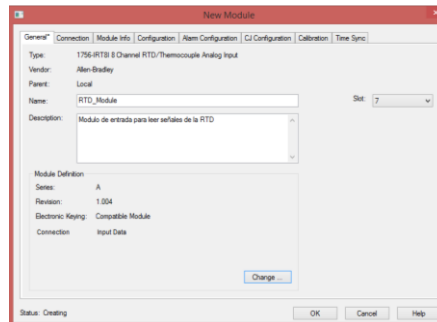


Fuente: Autor

Finalizando la configuración de módulos en el programa inicial es necesario añadir el dispositivo de entrada para las RTD en el PLC, el cual se encarga de convertir las señales directas de las RTD y pasarlas a una señal entendible para el dispositivo, para ello, y como se hizo anteriormente se busca el módulo llamado 1756-IRT8I, se selecciona y luego se da clic en crear para añadir el nuevo dispositivo.

Para éste módulo únicamente es necesario escribir el nombre y descripción, ver Figura 73, debido a que las entradas están configuradas por defecto para el tipo de RTD usadas en la planta de Destilación, hecho lo anterior solo se hace clic en OK, repetir el proceso para crear dos módulos de RTD.

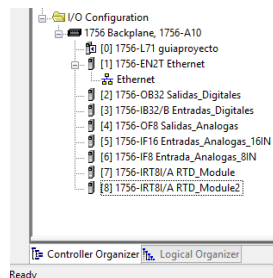
Figura 73. Creación módulo RTD



Fuente: Autor

Finalizada la creación de módulos el Backplane se verá como se muestra a continuación, ver Figura 74.

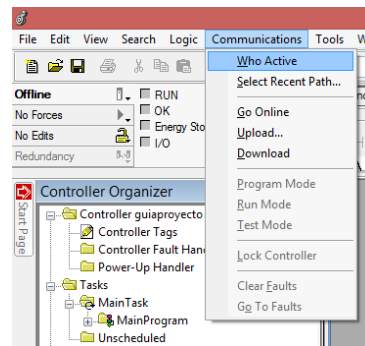
Figura 74. Backplane configurado



Fuente: Autor

Terminada la configuración de módulos se debe hacer la primer comunicación con el PLC y subir el programa inicial, a partir de allí se pueden hacer todas las programaciones y modificaciones teniendo en cuenta que la plantilla será la creada, entonces para comunicar es necesario desplegar el menú de la opción “Communications” y seleccionar “Who Active” como se muestra en la Figura 75.

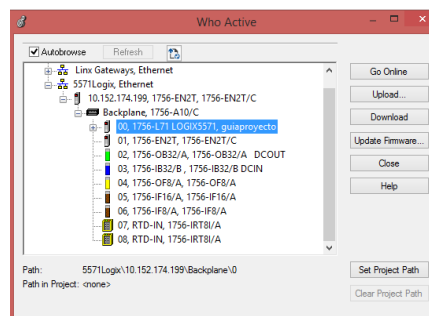
Figura 75. Quién activo para el PLC



Fuente: Autor

Luego de haber esperado que se cargaran los módulos, se despliega la lista desde la dirección IP del controlador y luego el Backplane, entonces se selecciona 1756-L71 logix5571, en la parte derecha se encuentran algunos botones donde “Download” debe ser pinchado, ver Figura 76, es necesario esperar unos segundos mientras el programa sube.

Figura 76. Descarga de primer programa



Fuente: Autor

Finalizado el proceso aparecerá en la parte superior izquierda de la pantalla de inicio de Studio5000 indicadores en color verde lo que indica que el proceso ha sido exitoso y que se encuentra en línea con el PLC.

La configuración de las comunicaciones en el PLC debido a que se debe tener en cuenta pasos anteriores resulta un poco compleja, el manejo de direcciones IP es fundamental, además se debe conocer muy bien el dispositivo a conectar para hacer el proceso, cada módulo cuenta con su referencia impresa físicamente.

La dirección IP del PLC debe ser fijada y única, debido a que puede hacer interferencia con algún otro dispositivo en la red.

3.4. IDENTIFICACIÓN I/O

La planta de destilación con su debido sistema de tanques cuenta con numerosos dispositivos controlados o leídos por el dispositivo maestro o PLC, dicho maestro es el encargado de enviar y recibir todo tipo de señal eléctrica estandarizada para la interpretación de la herramienta final que se encuentra puesta directamente en la planta, dichas herramientas se encargan de medir variables como de generar alguna acción que cause una reacción en los sistemas, por ejemplo, las válvulas son accionadas digitalmente a través de interfaces, también digitales, las cuales generan una señal eléctrica que provienen de los módulos de cada función del PLC y dicha salida llega a un elemento que se encarga de activar la válvula, para el presente caso se usaron relés, entonces teniendo una vista amplia de lo que se tiene se puede llegar a programar y darles función a cada uno de los dispositivos de la planta. Es necesario conocer dónde fueron conectados físicamente cada uno de los dispositivos para lograr asociar digitalmente en el programa del maestro la señal correcta a la salida correcta para poder interactuar con el aparato correcto, siendo así fue necesario hacer dicha identificación mostrada en las Tabla 1 a la Tabla 8 ordenadas por función.

Tabla 1. Sensores de temperatura

Nombre	Tipo	I/O	Módulo	Descripción
RTD 1	PT100	1756-IRT8I IN:7	1	Sensor 1 Torre destiladora
RTD 2	PT100	1756-IRT8I IN:0	2	Sensor 2 Torre destiladora
RTD 3	PT100	1756-IRT8I IN:2	2	Sensor 3 Torre destiladora
RTD4	PT100	1756-IRT8I IN:1	2	Sensor 4 Torre destiladora
RTD 5	PT100	1756-IRT8I IN:3	2	Sensor 5 Torre destiladora
RTD 6	PT100	1756-IRT8I IN:4	2	Sensor 6 Torre destiladora
RTD 7	PT100	1756-IRT8I IN:0	1	Sensor 7 Torre destiladora

RTD 8	PT100	1756-IRT8I IN:1	1	Sensor 8 Torre destiladora
RTD 9	PT100	1756-IRT8I IN:2	1	Sensor tanque 1
RTD 10	PT100	1756-IRT8I IN:4	1	Sensor tanque 3
RTD 11	PT100	1756-IRT8I IN:3	1	Sensor tanque 2
RTD 12	PT100	1756-IRT8I IN:5	1	Sensor tanque 4
RTD 13	PT100	1756-IRT8I IN:6	1	Sensor del Boiler
Termocupla 1	K	1756-IF16 IN:2	1	Sensor Chaqueta de calentamiento

Fuente: Autor

Tabla 2. Sensores de nivel

Nombre	Tipo	I/O	Modulo	Descripción
SN 1	Ultrasónico	1756-IF8 IN:0	1	SN tanque 1
SN 2	Ultrasónico	1756-IF8 IN:1	1	SN tanque 2
SN 3	Ultrasónico	1756-IF8 IN:2	1	SN tanque 3

Fuente: Autor

Tabla 3. Sensores de presión

Nombre	Tipo	I/O	Módulo	Descripción
SPA	Presión Absoluta	1756-IF16 IN:0	1	SPA Condensador
SPD	Presión Diferencial	1756-IF8 IN:4	1	SPD entre Boiler y condensador

Fuente: Autor

Tabla 4. Sensor inductivo de presencia

Nombre	Tipo	I/O	Módulo	Descripción
Sensor de Presencia	Capacitivo	1756-IB32 IN:0	1	Censa primera gota salida del condensador.

Fuente: Autor

Tabla 5. Válvulas

Nombre	Tipo	Estado	I/O	Módulo	Descripción
Válvula 1	ON/OFF	Encendido	1756-OB32 O:3	1	Válvula de salida 1 Tanque 4.
Válvula 1	ON/OFF	Apagado	1756-OB32 O:4	1	Válvula de salida 1 Tanque 4.
Válvula 2	ON/OFF	Encendido	1756-OB32 O:5	1	Válvula de entrada Boiler.
Válvula 2	ON/OFF	Apagado	1756-OB32 O:6	1	Válvula de entrada Boiler.
Válvula 3	ON/OFF	Encendido	1756-OB32 O:8	1	Válvula de distorsión 1 a torre.
Válvula 3	ON/OFF	Apagado	1756-OB32 O:9	1	Válvula de distorsión 1 a torre.
Válvula 4	ON/OFF	Encendido	1756-OB32 O:10	1	Válvula de distorsión 2 a torre desde tanque 1.
Válvula 4	ON/OFF	Apagado	1756-OB32 O:11	1	Válvula de distorsión 2 a torre desde tanque 1.
Válvula 5	ON/OFF	Encendido	1756-OB32 O:12	1	VS del condensador a Tanque 1.
Válvula 5	ON/OFF	Apagado	1756-OB32 O:13	1	VS del condensador a Tanque 1.

Fuente: Autor

Tabla 5. Válvulas

Nombre	Tipo	Estado	I/O	Módulo	Descripción
Válvula 6	solenoide	Izquierda	1756-OB32 O:15	1	Válvula de tres vías

Válvula 6	Solenoide	Derecha	1756-OB32 O:31	1	Válvula de tres vías
Válvula 6	solenoide	Habilitador	1756-OB32 O:14	1	Válvula de tres vías
Válvula 6	solenoide	Confirmación Izquierda	1756-IB32 I:2	1	Válvula de tres vías
Válvula 6	solenoide	Confirmación derecha	1756-IB32 I:1	1	Válvula de tres vías
Válvula XX	Proporcional Neumática	Proporcional 4-20mA	1756-OF8 O:0	1	Válvula de salida 2 tanque 4.

Fuente: Autor

Tabla 5. Válvulas

Nombre	Tipo	Estado	I/O	Módulo	Descripción
Válvula 7	Electroválvula neumática	Activada	1756-OB32 O:0	1	Válvula de Salida tanque 3 a 4.
Válvula 8	Electroválvula neumática	Activada	1756-OB32 O:1	1	Válvula de Salida tanque 3 a 4.
Válvula 9	Electroválvula neumática	Activada	1756-OB32 O:2	1	Válvula de Refrigeración Boiler.

Fuente: Autor

Tabla 6. Bomba Peristáltica

Nombre	Tipo	Estado	I/O	Módulo	Descripción
Bomba Peristáltica	Peristáltica	Encender	1756-OB32 O:23	1	Bomba
Variador Bomba Peristáltica	ACS150	Encender	1756-OB32 O:29	1	Variador
Variador NI	ACS150	Adelante/Atrás	1756-OB32 O:30	1	Variador

Fuente: Autor

Tabla 7. Refrigerador

Nombre	Tipo	Estado	I/O	Módulo	Descripción
Chiller	PolyStat 1C6	Encender	1756-OB32 O:24	1	Refrigerante del condensador.

Fuente: Autor

Tabla 8. Resistencias

Nombre	Tipo	Estado	I/O	Módulo	Descripción
Resistencia 1	20W	Encender	1756-OB32 O:16	1	Resistencia de Calentamiento.
Resistencia 2	20W	Encender	1756-OB32 O:17	1	Resistencia de Calentamiento.
Resistencia 3	20W	Encender	1756-OB32 O:18	1	Resistencia de Calentamiento.
Resistencia 4	20W	Encender	1756-OB32 O:19	1	Resistencia de Calentamiento.
Resistencia 5	20W	Encender	1756-OB32 O:20	1	Resistencia de Calentamiento.
Resistencia 6	40W	Encender	1756-OB32 O:21	1	Resistencia de Calentamiento.
Habilitador Resistencias	Enable	Encender	1756-OB32 O:22	1	Habilita el encendido de la Resistencias.

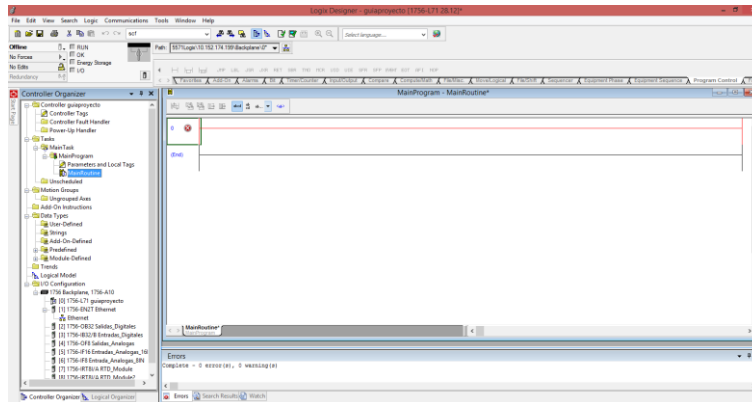
Fuente: Autor

3.5. PROGRAMA INICIAL PARA ARRANQUE MANUAL DE LA PLANTA

Después de haberse creado el programa inicial, se pasa a programar los elementos externos al PLC, en esta parte del documento será detallado el paso a paso del programa básico en el cual se podrá interactuar con los elementos finales de control y los sensores de la planta de destilación.

Continuando con la fase de programa inicial, se abre el archivo donde está la plantilla y están creados los módulos con los que se trabajarán, en este caso es el programa llamado "guiaproyecto", aquí haciendo doble clic en "MainRoutine" donde se muestra algo similar a lo mostrado en la Figura 77, se debe ubicar el cursor del mouse sobre la línea roja que aparece en la pantalla e ir a la barra de tareas ubicada en la parte posterior donde se buscará la pestaña "Program control" allí se debe usar la opción "JSR"

Figura 77. Rutina principal

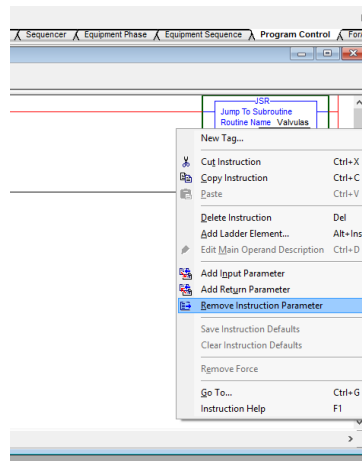


Fuente: Autor

Se procede a escribir el nombre de la subrutina.

Habiendo usado la instrucción, aparecerá un campo para añadir parámetros los cuales sirven para ingresar o salir de la subrutina en determinados casos usando una etiqueta, ahora el JSR se coloca para poder organizar el programa por lo que quedará directo y no son necesarios los parámetros, debido a esto se eliminan los campos destinados para esto como se muestra en la Figura 78.

Figura 78. JSR eliminar parámetros

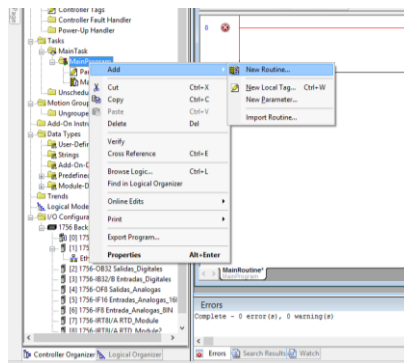


Fuente: Autor

Como se muestra a continuación en la Figura 79, se crea la subrutina llamada "Válvulas" donde se hará el programa inicial para controlar dichos elementos.

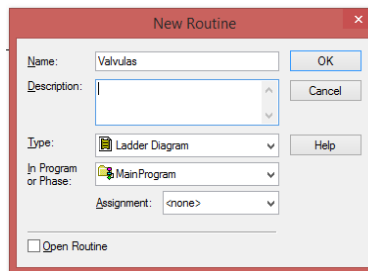
Se nombra de la forma que se quiera, pero debido a que anteriormente se creó la instrucción con el nombre "Válvulas" así quedará la subrutina creada, clic en OK.

Figura 79. Crear nueva subrutina



Fuente: Autor

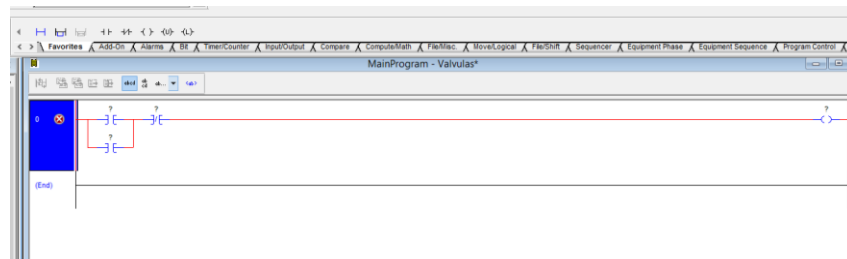
Figura 80. Configuración subrutina nueva



Fuente: Autor

Dentro de la nueva subrutina sobre la línea 0 que por defecto es creada se añaden los siguientes elementos encontrados en la barra de tareas de la parte superior en la pestaña llamada “favorites”, ver Figura 81.

Figura 81. Programación ladder para válvulas

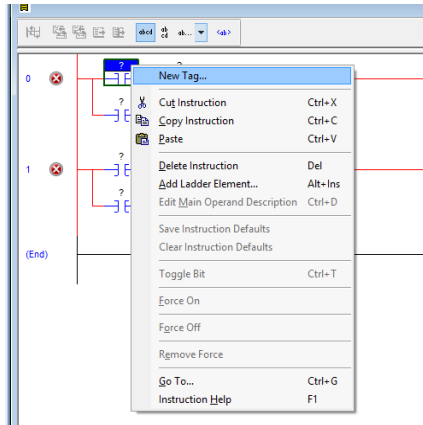


Fuente: Autor

Debido a que cada válvula se abre y se cierra haciendo uso de dos salidas físicas activando dos relés es necesario hacer dos líneas iguales para encender y apagar una válvula, entonces, haciendo clic derecho se busca y selecciona “Add rung”, en la nueva línea es necesario colocar los mismos elementos que en la línea 0.

Para crear TAGS existen dos formas efectivas para hacerlo, una de ellas es la mostrada en la Figura 82, haciendo clic derecho y seleccionando “New tag”, para este caso serán usadas dos tipos de etiquetas mostradas posteriormente.

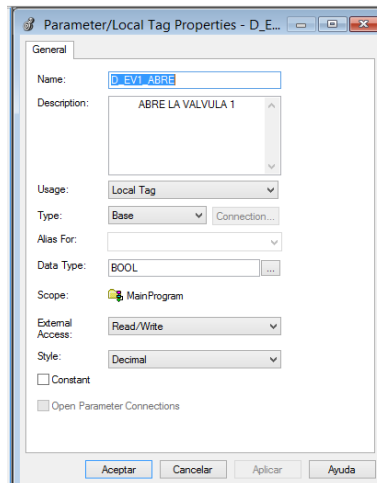
Figura 82. Nueva etiqueta



Fuente: Autor

Se añade el nombre que se quiere y una descripción la cual es opcional para colocar la función de la etiqueta, algo muy importante es el tipo de etiqueta que se usará, para ello en “Type” se selecciona “Base” así como se muestra a continuación en la Figura 83, luego clic en aceptar.

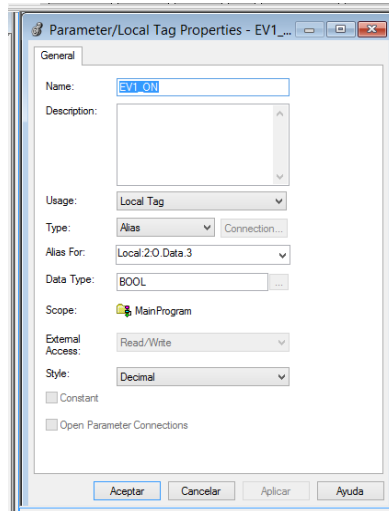
Figura 83. Etiqueta tipo base



Fuente: Autor

Para crear el tag de salida en forma similar a la anterior se hace seleccionando “Alias” en el tipo, en este caso se debe poner la dirección de la etiqueta que será usada en “Alias For” y se busca la dirección asignada de forma física, para ello es necesario hacer uso de la fase de identificación de entradas y salidas, ver Figura 84.

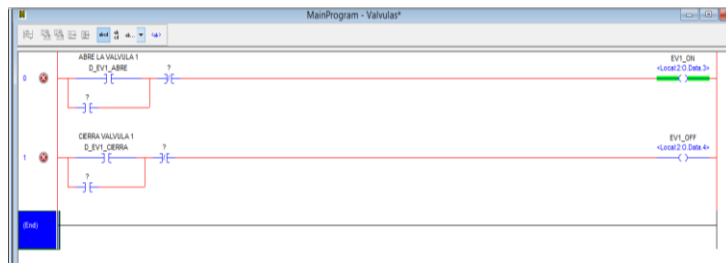
Figura 84. Etiqueta tipo alias



Fuente: Autor

De forma similar se crea la otra línea de programa, solo que las etiquetas en este caso serán dirigidas al cierre de la Válvula 1, Ver Figura 85.

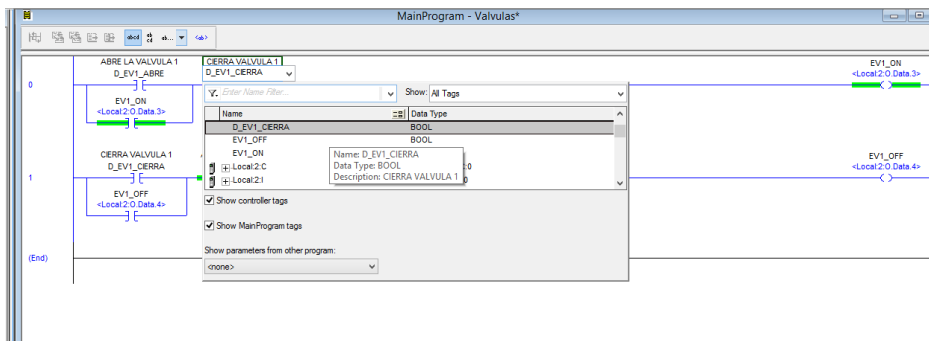
Figura 85. Ladder línea dos válvulas



Fuente: Autor

Cuando se quiere asociar un contacto con alguna etiqueta anteriormente creada se clikea dos veces sobre el interrogante y se despliega la pestaña como se muestra en la Figura 86, allí se hará la búsqueda de la etiqueta o relación de interés, ahora clic y está listo.

Figura 86. Asociar contactos con etiquetas creadas

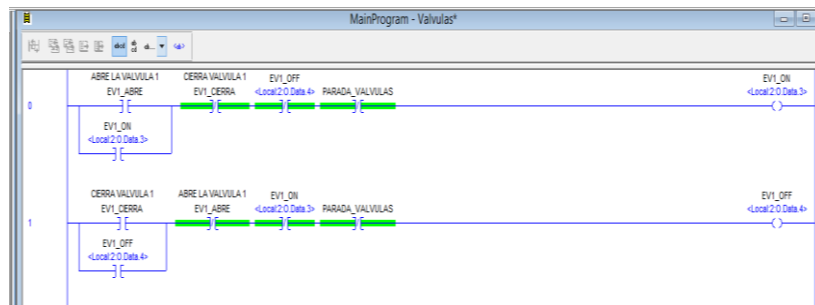


Fuente: Autor

Se relaciona todo como se muestra a continuación (Figura 87), esta forma de configurar los contactos permite asegurar que nunca ambas bobinas estarán activadas al tiempo, debido a que podría generar cortos en las válvulas. Entonces de la misma forma que para la válvula 1 se crean hasta la válvula 5 las cuales son de iguales características.

Por opciones de seguridad se añadió un contacto cerrado extra a cada línea que se relaciona con la bobina contraria la cual no puede estar encendida mientras haya paso de energía por la otra línea activa, así como se muestra a continuación (ver imagen), además, la parada de emergencia virtual que se añadió al programa de las válvulas en cada línea, que en caso de emergencia desactiva la energía a cada línea y todas las salidas quedarían inactivas y físicamente se apagarían las fuentes de energización de las válvulas, ver Figura 87.

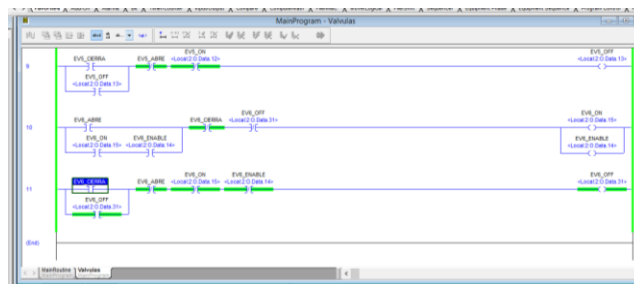
Figura 87. Líneas finales de programación de válvulas on/off



Fuente: Autor

Para la válvula 6, dado que es un caso especial, se deben accionar 3 relés de forma cuidadosa para evitar cortos, hacia la izquierda se usan dos salidas físicas una la cual cambia la polaridad en uno de los pines del motor conectando a 0 o 24v, el otro alimenta el motor con la alimentación dependiendo el sentido. Hacia la derecha se debe colocar únicamente la alimentación del motor, por ello solo se activa un relé, la programación para el accionamiento se muestra a continuación, ver Figura 88.

Figura 88. Líneas finales de programación de válvula solenoide

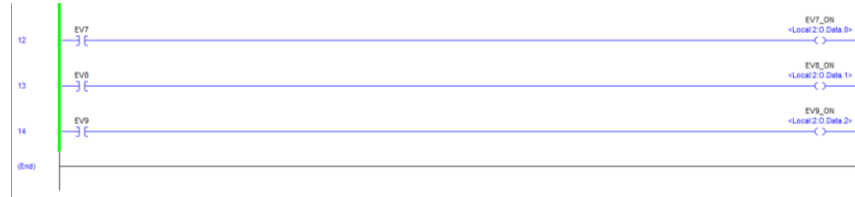


Fuente: Autor

El método para activación de las electroválvulas neumáticas se hace accionando un único relé, ya que cuando se energiza el relé se activa la válvula y se abre permitiendo el paso de aire, mientras que cuando se quita la energía se cierra la

válvula impidiendo el paso de aire, por lo que en la programación se relacionó un contacto con una bobina para accionar las válvulas, este método se muestra a continuación, ver Figura 89.

Figura 89. Programa ladder válvulas neumáticas

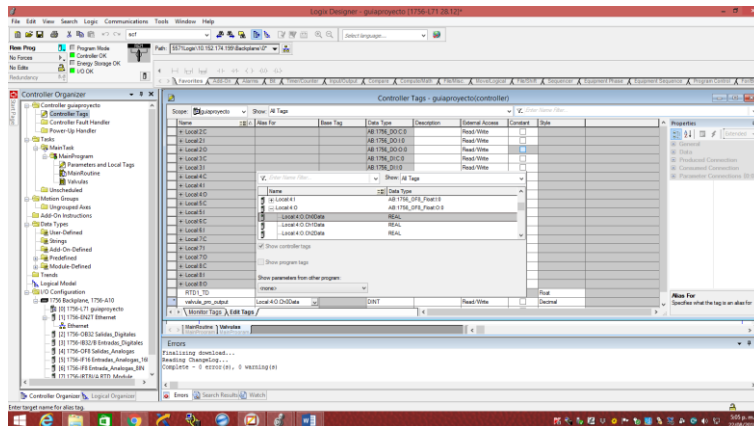


Fuente: Autor

Para la válvula proporcional se debe crear un TAG global el cual será usado para descargar valores a la válvula y poderla manejar, se accede a la parte superior izquierda donde se encuentra “controllerTAGS” allí se crea el nuevo TAG global, luego de seleccionar se muestra la siguiente ventana como se muestra en la Figura 90, en la parte “edit TAG” se creará esta etiqueta.

En la nueva línea en la parte inferior de la tabla se escribe el nombre de elección y se busca la dirección de la salida como se muestra a continuación en la Figura 91, debido a que la válvula arroja una señal de salida que llega al PLC para monitorización de la posición de apertura también será añadida al PLC como un TAG global nuevo, así como se creó el anterior.

Figura 90. Crear etiqueta global



Fuente: Autor

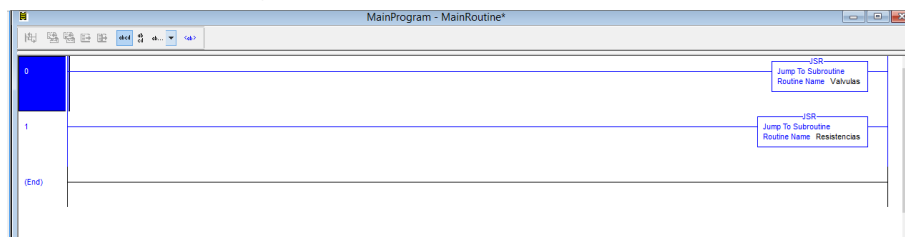
Figura 91. Crear etiquetas globales para válvula proporcional

Name	Alias For	Base Tag	Data Type	Description	External Access	Constant	Style
Local:2:O			AB:1756_DO:O:0		Read/Write	<input type="checkbox"/>	
Local:3:C			AB:1756_DI:C:0		Read/Write	<input type="checkbox"/>	
Local:3:I			AB:1756_DI:I:0		Read/Write	<input type="checkbox"/>	
Local:4:C			AB:1756_OF8_Flo		Read/Write	<input type="checkbox"/>	
Local:4:I			AB:1756_OF8_Flo		Read/Write	<input type="checkbox"/>	
Local:4:O			AB:1756_OF8_Flo		Read/Write	<input type="checkbox"/>	
Local:5:C			AB:1756_IF8_Flo		Read/Write	<input type="checkbox"/>	
Local:5:I			AB:1756_IF8_Flo		Read/Write	<input type="checkbox"/>	
Local:6:C			AB:1756_IF4_Flo		Read/Write	<input type="checkbox"/>	
Local:6:I			AB:1756_IF4_Flo		Read/Write	<input type="checkbox"/>	
Local:7:C			AB:1756_JRT8I:C:0		Read/Write	<input type="checkbox"/>	
Local:7:I			AB:1756_JRT8I:I:0		Read/Write	<input type="checkbox"/>	
Local:7:O			AB:1756_JRT8I:O:0		Read/Write	<input type="checkbox"/>	
Local:8:C			AB:1756_JRT8I:C:0		Read/Write	<input type="checkbox"/>	
Local:8:I			AB:1756_JRT8I:I:0		Read/Write	<input type="checkbox"/>	
Local:8:O			AB:1756_JRT8I:O:0		Read/Write	<input type="checkbox"/>	
RTD1_TD	Local:8:I.Ch[0] Data	Local:8:I.Ch[0] Data	REAL		Read/Write	<input checked="" type="checkbox"/>	Float
valvula_pro_output	Local:4:O.Ch0Data	Local:4:O.Ch0Data	REAL		Read/Write	<input checked="" type="checkbox"/>	Float
valvula_pro_input	Local:5:I.Ch1Data	Local:5:I.Ch1Data	REAL		Read/Write	<input checked="" type="checkbox"/>	Float

Fuente: Autor

Habiendo culminado la parte de programación de las válvulas es necesario continuar con los demás dispositivos de la planta, el siguiente paso a seguir es configurar contactos a las salidas que activan los relés de las resistencias de potencia, siguiendo este orden, ver Figura 92, se procede a crear una nueva subrutina donde se relacione.

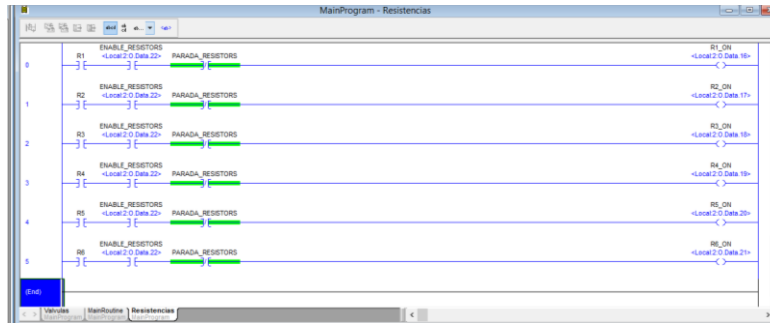
Figura 92. Subrutina resistencias



Fuente: Autor

Para la activación de la resistencias se deben tener en cuenta dos factores de seguridad, uno de ellos físico y el otro virtual, el primero llamado “enable_resistors” es un relé que activa físicamente la fuente de energía de las resistencias donde si este no se encontrase activo ninguna resistencia podría encenderse, el segundo factor de seguridad es una parada de emergencia virtual en cual apagará manual o automáticamente todas las resistencias llamado “parada_resistors”, ver la Figura 93. Los otros dos elementos son de activación de la resistencia como se aprecia en la siguiente imagen, ya que son seis resistencias, se debe hacer el mismo proceso con todas.

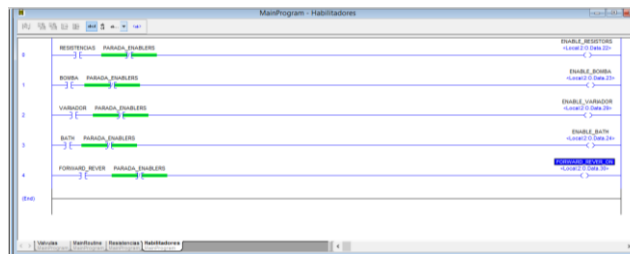
Figura 93. Programa de las resistencias



Fuente: Autor

Continuando el proceso de programación y de forma similar a la de las resistencias, se configuran los habilitadores de las resistencias, bomba y enfriador, esta únicamente cuenta con un sistema de encendido, además, se incluye un contacto que permite programar el sentido de giro de la bomba, ver Figura 94, mostrada a continuación.

Figura 94. Programa habilitadores

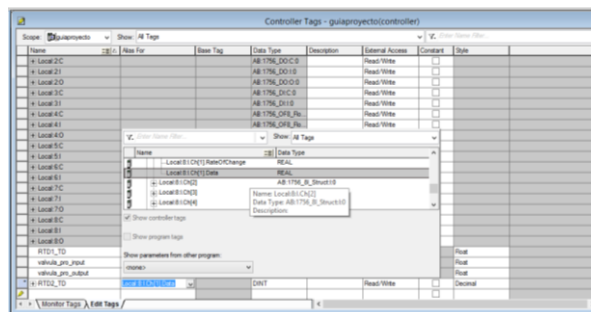


Fuente: Autor

Por último, se deben configurar cada uno de los sensores, estos sensores deben ser creados con etiquetas globales de forma similar como se configuró la válvula proporcional tal y como se mostró en la Figura 90.

Se accede a la pestaña “edit TAGS”, se abre el editor, se ubica en la línea nueva las cuales se irán creando automáticamente, se inserta el nombre relacionado con la entrada de señal, en este caso se ubicará primero las RTD’s, entonces se busca la entrada relacionada y así sucesivamente hasta crearlas todas, ver Figura 95.

Figura 95. Creación de etiquetas para las RTD



Fuente: Autor

De la siguiente forma, tal y como se muestra en la Figura 96, deben quedar todos los sensores de temperatura de la planta de destilación.

Figura 96. Etiquetas RTD

Name	Alias For	Base Tag	Data Type	Description	External Access	Constant	Style
Local 7.1			AB:1756_IRTB1:0		Read/Write	<input type="checkbox"/>	
Local 7.0			AB:1756_IRTB1:0:0		Read/Write	<input type="checkbox"/>	
Local 8.C			AB:1756_IRTB1:C:0		Read/Write	<input type="checkbox"/>	
Local 8.I			AB:1756_IRTB1:I:0		Read/Write	<input type="checkbox"/>	
Local 8.O			AB:1756_IRTB1:O:0		Read/Write	<input type="checkbox"/>	
RTD1_TD	Local 7.1 Ch[0] Data	Local 7.1 Ch[0] Data	REAL		Read/Write	<input type="checkbox"/>	Float
valvula_pro_input	Local 5.1 Ch1Data	Local 5.1 Ch1Data	REAL		Read/Write	<input type="checkbox"/>	Float
valvula_pro_output	Local 4.0 Ch0Data	Local 4.0 Ch0Data	REAL		Read/Write	<input type="checkbox"/>	Float
RTD2_TD	Local 7.1 Ch[1] Data	Local 7.1 Ch[1] Data	REAL		Read/Write	<input type="checkbox"/>	Float
RTD3_TD	Local 7.1 Ch[2] Data	Local 7.1 Ch[2] Data	REAL		Read/Write	<input type="checkbox"/>	Float
RTD4_TD	Local 7.1 Ch[3] Data	Local 7.1 Ch[3] Data	REAL		Read/Write	<input type="checkbox"/>	Float
RTD5_TD	Local 7.1 Ch[4] Data	Local 7.1 Ch[4] Data	REAL		Read/Write	<input type="checkbox"/>	Float
RTD6_TD	Local 7.1 Ch[5] Data	Local 7.1 Ch[5] Data	REAL		Read/Write	<input type="checkbox"/>	Float
RTD7_TD	Local 7.1 Ch[6] Data	Local 7.1 Ch[6] Data	REAL		Read/Write	<input type="checkbox"/>	Float
RTD8_TD	Local 7.1 Ch[7] Data	Local 7.1 Ch[7] Data	REAL		Read/Write	<input type="checkbox"/>	Float
RTD9_TK1	Local 8.1 Ch[0] Data	Local 8.1 Ch[0] Data	REAL		Read/Write	<input type="checkbox"/>	Float
RTD10_TK2	Local 8.1 Ch[1] Data	Local 8.1 Ch[1] Data	REAL		Read/Write	<input type="checkbox"/>	Float
RTD11_TK3	Local 8.1 Ch[2] Data	Local 8.1 Ch[2] Data	REAL		Read/Write	<input type="checkbox"/>	Float
RTD12_TK4	Local 8.1 Ch[3] Data	Local 8.1 Ch[3] Data	REAL		Read/Write	<input type="checkbox"/>	Float
RTD13_BOILER	Local 8.1 Ch[4] Data	Local 8.1 Ch[4] Data	REAL		Read/Write	<input type="checkbox"/>	Float
TERMOCUPLA	Local 5.1 Ch2Data	Local 5.1 Ch2Data	REAL		Read/Write	<input type="checkbox"/>	Float

Fuente: Autor

El proceso anterior debe repetirse para los otros sensores los cuales son de nivel, presencia y presión, haciendo esto último se puede decir que ya se tiene un programa de adquisición de señales y control básico de elementos finales de control, se debe ver de la siguiente forma como se muestra en la Figura 97.

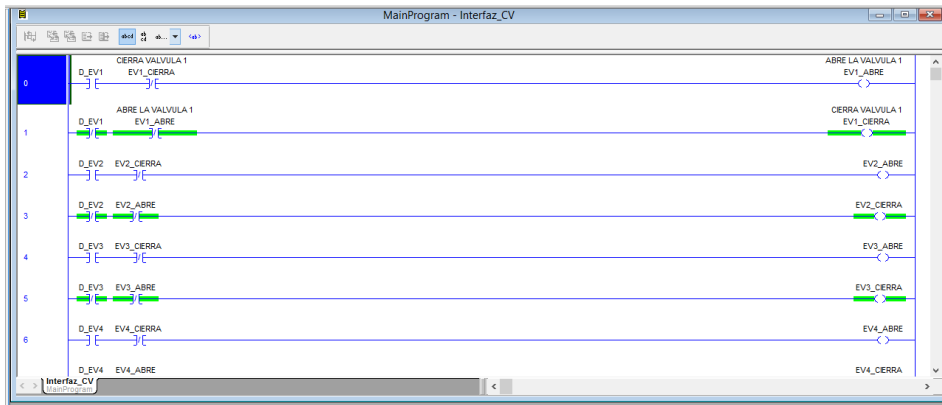
Figura 97. Total etiquetas de sensores

Name	Alias For	Base Tag	Data Type	Description	External Access	Constant	Style
RTD1_TD	Local 7.1 Ch[0] Data	Local 7.1 Ch[0] Data	REAL		Read/Write	<input type="checkbox"/>	Float
valvula_pro_input	Local 5.1 Ch1Data	Local 5.1 Ch1Data	REAL		Read/Write	<input type="checkbox"/>	Float
valvula_pro_output	Local 4.0 Ch0Data	Local 4.0 Ch0Data	REAL		Read/Write	<input type="checkbox"/>	Float
RTD2_TD	Local 7.1 Ch[1] Data	Local 7.1 Ch[1] Data	REAL		Read/Write	<input type="checkbox"/>	Float
RTD3_TD	Local 7.1 Ch[2] Data	Local 7.1 Ch[2] Data	REAL		Read/Write	<input type="checkbox"/>	Float
RTD4_TD	Local 7.1 Ch[3] Data	Local 7.1 Ch[3] Data	REAL		Read/Write	<input type="checkbox"/>	Float
RTD5_TD	Local 7.1 Ch[4] Data	Local 7.1 Ch[4] Data	REAL		Read/Write	<input type="checkbox"/>	Float
RTD6_TD	Local 7.1 Ch[5] Data	Local 7.1 Ch[5] Data	REAL		Read/Write	<input type="checkbox"/>	Float
RTD7_TD	Local 7.1 Ch[6] Data	Local 7.1 Ch[6] Data	REAL		Read/Write	<input type="checkbox"/>	Float
RTD8_TD	Local 7.1 Ch[7] Data	Local 7.1 Ch[7] Data	REAL		Read/Write	<input type="checkbox"/>	Float
RTD9_TK1	Local 8.1 Ch[0] Data	Local 8.1 Ch[0] Data	REAL		Read/Write	<input type="checkbox"/>	Float
RTD10_TK2	Local 8.1 Ch[1] Data	Local 8.1 Ch[1] Data	REAL		Read/Write	<input type="checkbox"/>	Float
RTD11_TK3	Local 8.1 Ch[2] Data	Local 8.1 Ch[2] Data	REAL		Read/Write	<input type="checkbox"/>	Float
RTD12_TK4	Local 8.1 Ch[3] Data	Local 8.1 Ch[3] Data	REAL		Read/Write	<input type="checkbox"/>	Float
RTD13_BOILER	Local 8.1 Ch[4] Data	Local 8.1 Ch[4] Data	REAL		Read/Write	<input type="checkbox"/>	Float
TERMOCUPLA	Local 5.1 Ch2Data	Local 5.1 Ch2Data	REAL		Read/Write	<input type="checkbox"/>	Float
SN1_TK1	Local 6.1 Ch0Data	Local 6.1 Ch0Data	REAL		Read/Write	<input type="checkbox"/>	Float
SN2_TK2	Local 6.1 Ch1Data	Local 6.1 Ch1Data	REAL		Read/Write	<input type="checkbox"/>	Float
SN3_TK3	Local 6.1 Ch2Data	Local 6.1 Ch2Data	REAL		Read/Write	<input type="checkbox"/>	Float
SP_ABSOLUTA	Local 5.1 Ch0Data	Local 5.1 Ch0Data	REAL		Read/Write	<input type="checkbox"/>	Float
SP_DIFERENCIAL	Local 6.1 Ch3Data	Local 6.1 Ch3Data	REAL		Read/Write	<input type="checkbox"/>	Float
SENSOR_PRESENCIA	Local 3.1 Data 0	Local 3.1 Data 0	BOOL		Read/Write	<input type="checkbox"/>	Decimal

Fuente: Autor

Debido a que las válvulas de tipo ON/OFF que se tienen en la planta de destilación se controlan mediante dos relés los cuales dan el sentido de giro de las mismas, fue necesario idear una técnica que permitiera manejarlas con un solo botón por comodidad a la hora de accionarlas, por ende, se creó una nueva subrutina en la que se tuvo en cuenta esto y que permita hacer la transición de posición usando un solo contacto, en la Figura 98 se ve la subrutina creada en el programa principal.

Figura 98. Subrutina HMI



Fuente: Autor

3.5.1 Arranque de bomba peristáltica

El arranque de la bomba es un proceso que requirió de fases anteriores para lograr el objetivo, en primera instancia fue necesario tener un correcto funcionamiento de todas las partes mecánicas que la conectan, de tal forma que de activarse y probarse no hubiesen derrames de líquidos ni ningún otro percance, entonces, se procedió a la prueba y corrección de juntas y acoples, luego fue necesario el arranque del variador de velocidad que proporcionaría una señal al motor de 0 a 60hz, sin embargo, el proceso de conexión no fue efectuado en el presente trabajo de grado. Los ingenieros de la empresa en la que se adquirió la bomba peristáltica y el variador se encargaron de dejar configurados los parámetros del motor con el variador; sabiendo la configuración de cada parámetro y los límites de manejo del variador, se inició con las pruebas a la máquina con agua, lo que permitió verificar el funcionamiento para el cual se pensó y por el cual fue adquirida la bomba.

3.5.2 Arranque de re-circulador de líquido frío y caliente

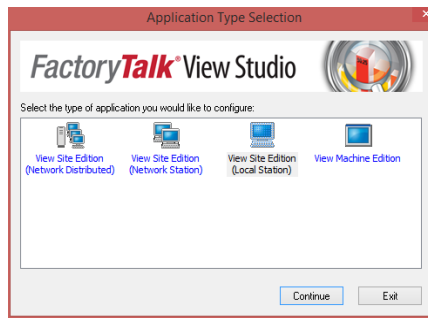
Para proceder a la puesta en marcha del dispositivo enfriador y calentador de líquido se tuvo en cuenta el manual (Cole Parmer-polystat, 2017) suministrado por la empresa, el cual, dando indicaciones concretas, permitía hacer el correcto arranque y puesta en funcionamiento del aparato, conociendo esto se procedió a llenar el tanque del coleparmer y se encendió el dispositivo, luego de configurar los setpoints de prueba, el tipo de líquido a usarse y la presión de bombeo interno del enfriador se encendió y arrancó el proceso de recirculación de la máquina en cuestión, verificando que dicho dispositivo estaba en correcto estado y que lograba llevar el líquido a la temperatura deseada.

3.6. HMI

En esta parte del documento se encuentra la descripción y detalles para manejar el software Factorytalkview Studio, que cuenta con algunas de las formas con las que se pueden trabajar display, botones y cómo se relacionan éstos con las etiquetas desde el programa en Studio 5000, es importante saber que para empezar esto es fundamental completar las anteriores fases, además, se mostrará cómo trabajar las comunicaciones entre los programas Studio 5000 y Factorytalkview Studio, se resalta que no es una manera única de hacerlo y dependiendo las circunstancias del trabajo debe hacerse de diferentes formas, sabiendo lo anterior se creará una HMI nueva, sencilla, en la cual se implementan las características usadas en la HMI GuiaProyecto desarrollada por el Autor para el control de la planta de destilación, debido a que una interfaz es un proceso también creativo será complicado enseñar el paso a paso para llegar a Guiaproyecto, pero se mostrarán las herramientas de cómo hacerlo.

Empezando, se debe buscar el programa FactoryTalkView Studio e ingresar en él, luego de haber cargado aparecerá la siguiente (ver Figura 99) ventana donde aparecen cuatro iconos donde “View Site Edition (local station)” es seleccionado, debido a que este programa puede establecer comunicación con otros pueden hacerse redes en las cuales se permita interactuar de forma continua a través de las aplicaciones.

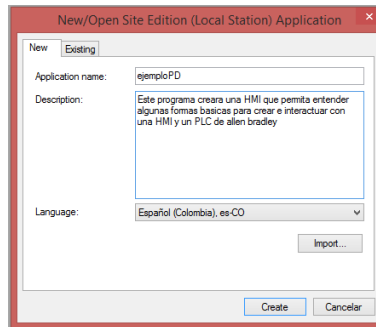
Figura 99. Factorytalkview



Fuente: Autor

Luego de haber seleccionado el tipo de aplicación aparecerá un nuevo cuadro donde se tiene la opción de seguir trabajando en alguna aplicación antigua o crear una nueva, para este caso se creará una nueva, entonces en la pestaña “New” se coloca el nombre de la aplicación y una descripción si se quiere, ver Figura 100.

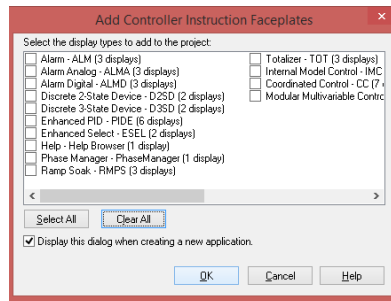
Figura 100. Creación de nuevo proyecto Factorytalkview



Fuente: Autor

El siguiente paso será seleccionar qué tipos de display se quieren tener en la aplicación, ahora se dejan como se ve en la Figura 101.

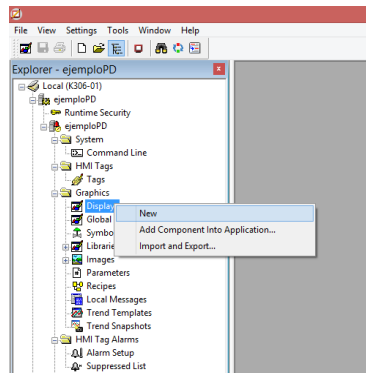
Figura 101. Selección display iniciales



Fuente: Autor

Para iniciar la creación de pantallas (ver Figura 102), en la barra exploradora de archivos ubicada en la parte izquierda en la carpeta llamada “Graphics” se encuentra una herramienta llamada “Displays” en ella se hará clic derecho y se seleccionará “New”.

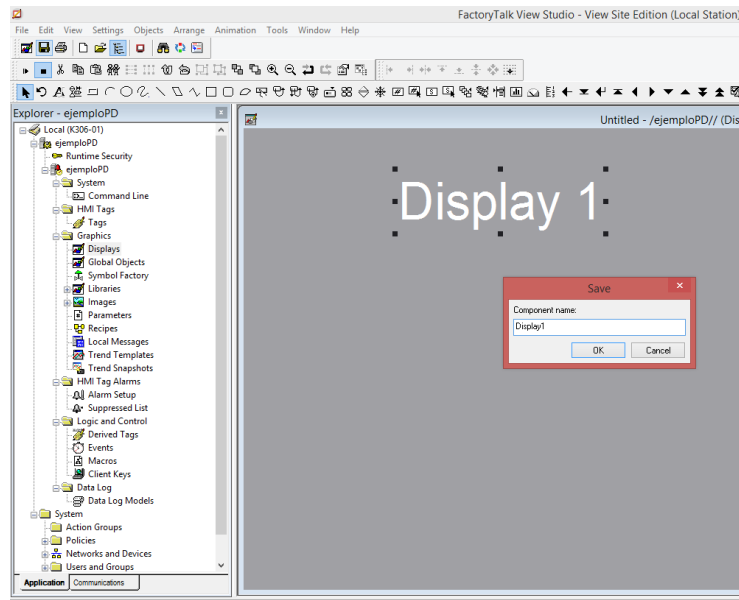
Figura 102. Nueva pantalla



Fuente: Autor

Al crear el display abre una pestaña vacía y gris en la cual se debe empezar a trabajar, lo primero que se hará será darle un nombre al display, para esto se debe colocar algún tipo de elemento dentro del display, en este caso únicamente se pondrá un texto, ver Figura 103, los cuales se pueden insertar accediendo a la barra de herramientas ubicada en la parte superior, allí, en la parte izquierda en el tercer símbolo de la segunda fila de herramientas de arriba hacia abajo con forma de “A”, se selecciona ese botón y se dirige el cursor dentro del display, luego, haciendo clic sostenido y desplazándolo se genera la ventana de escritura, donde se pondrá cualquier cosa, puede ser algo que simbolice la utilidad del display, luego de haber insertado el texto se accede a la opción de guardar y automáticamente se genera una ventana donde se puede añadir el nombre para aquel display trabajado.

Figura 103. Nombrar un nuevo display



Fuente: Autor

Para la configuración del Display, haciendo clic derecho se puede llegar a la ventana de configuración mostrada en la imagen, la cual es muy importante entender para lograr llegar al punto donde se desea en la interfaz, algo importante de resaltar es que se pueden crear los display que se quieran y configurar de forma distinta cada uno, como se mencionaba anteriormente, lo más importante es la creatividad, debido a que parte esencial de una HMI es la estética y la interactividad.

Siguiendo este orden de ideas, se tiene la ventana de configuración la cual, para explicar se dividirá verticalmente en dos secciones, la primer sección, Figura 104, se encuentra en la parte superior en donde aparece algo llamado “Display type”, es una opción fundamental a la hora de trabajar varios displays con navegación entre ellos, allí existen tres opciones, la primera es “Replace” al seleccionar esta opción se le dice al display que cuando se navegue se cierre el display de partida

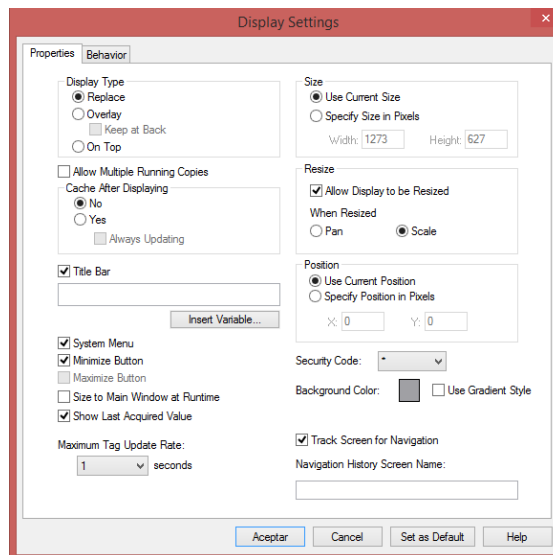
y solo quede abierto el display de llegada, “Overlay” es la segunda opción que indica a la aplicación que cuando se navegue entre displays se abra el de llegada sin cerrar el de partida y colocándose sobre el de partida, Overlay tiene una particularidad, y es que cuando se tengan dos display abiertos siendo uno más pequeño que el otro, si es de preferencia interactuar con el de mayor tamaño el pequeño pasa a un segundo plano hasta que nuevamente sea llamado. Finalmente, el tercero es llamado “On top” de forma similar al anterior se coloca uno sobre el otro, pero con la única diferencia que usando esta opción si se llaman N veces los displays N veces se abrirán estos, esta opción funcionará igual que Overlay al no ser seleccionada la opción “Allow Multiple Running Copies”. La siguiente opción “cache after displaying” permite memorizar los estados en los cuales se dejó algún display cerrado anteriormente.

En este orden se encuentran las opciones de visualización de la ventana, como quitar o poner la barra de título o quitar las opciones de minimizar, entre otras, no son relevantes pero podrían afectar visualmente y dañar el objetivo esperado para la HMI.

La sección dos es la encargada de seleccionar las ubicaciones donde se espera se abran los display, tamaño y otras opciones que no son usadas, aquí las usadas son de ubicación como “Size and Resize” y de posición como “Position”.

Para esta ocasión se seleccionará un tamaño de 700 por 700 pixeles.

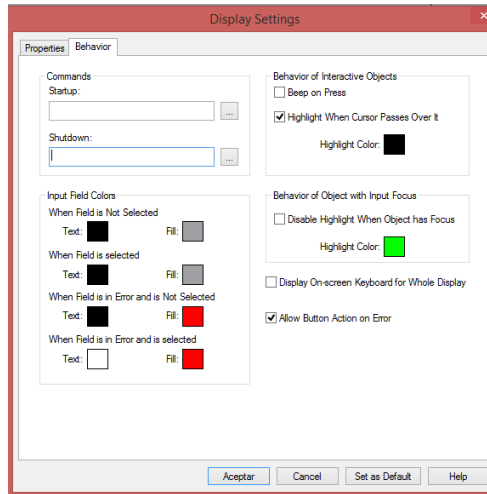
Figura 104. Configuración de pantalla, propiedades.



Fuente: Autor

La pestaña llamada “Behavior” no será usada en este caso, pero hay que tener en cuenta que aunque no haya ningún comando de inicio o de salida del display, deber verse como se muestra en la Figura 105.

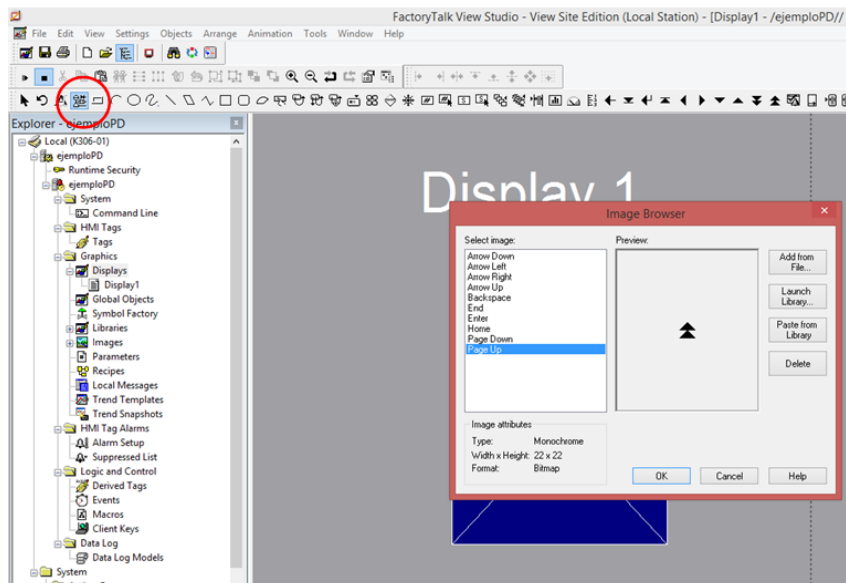
Figura 105. Configuración de pantalla, comportamiento.



Fuente: Autor

A continuación, se muestra cómo insertar una imagen en el Display como portada, se debe mencionar que la seleccionada es una imagen prediseñada por el programa Factory y que son de uso mediante licencia. Como se ilustra en la Figura 106 se encerró en un círculo la ubicación de la herramienta de insertar imágenes, se debe seleccionar y llevar el cursor al display donde se quiere la imagen, luego se debe hacer clic mantenido y crear un recuadro donde, culminado esto, aparecerá automáticamente una ventana como la ilustrada, allí hay dos opciones diferentes de importar, una es desde cualquier dirección del computador por la opción “Add from file” y la otra es “launch library”, la cual permite seleccionar una imagen prediseñada del programa, se selecciona “launch library”.

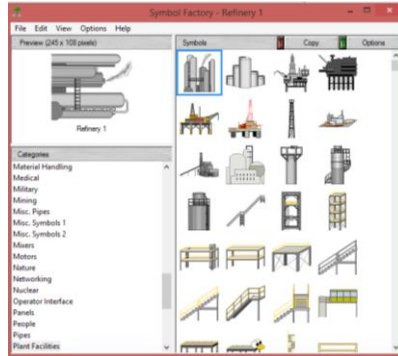
Figura 106. Añadir imágenes a la pantalla, paso uno.



Fuente: Autor

En seguida, se abrió una pestaña nueva en la que se pueden observar todas las imágenes disponibles, la imagen de preferencia es la mostrada en la Figura 107 sin embargo, cualquiera puede usarse, se hace doble clic en el gráfico predilecto.

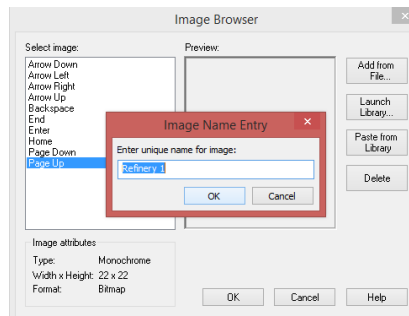
Figura 107. Imágenes prediseñadas



Fuente: Autor

Luego de haber ubicado la imagen, se debe seleccionar la opción "Paste From Library" donde aparecerá una ventana nueva la cual pide ingresar un nombre a la imagen pegada desde la librería, aunque por defecto ya tiene uno, se da clic en OK y aparecerá la imagen dentro del Display, ver Figura 108.

Figura 108. Añadir imágenes a la pantalla, paso dos.



Fuente: Autor

A continuación se muestra el progreso, Figura 109.

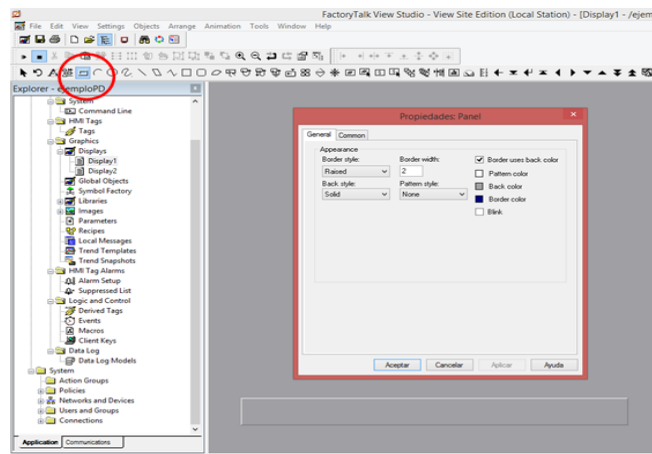
Figura 109. Avance de display



Fuente: Autor

El siguiente paso será cómo navegar entre displays, para ello primero es necesario crear un segundo display con iguales condiciones que el primero, luego de esto, para una mejor sensación visual, se creará un panel que contenga los botones de navegación, la posibilidad del panel es opcional y se muestra en la Figura 110 encerrada en un círculo rojo, luego de crear el panel aparece la opción de propiedades y se configuraron como se muestra.

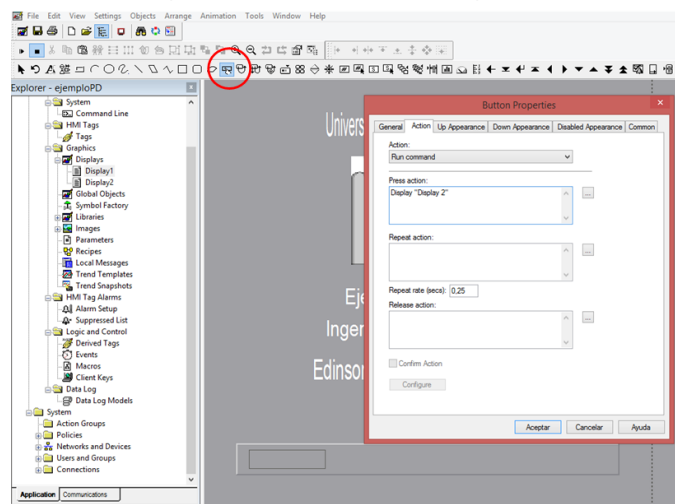
Figura 110. Creación de panel



Fuente: Autor

Para crear el botón de navegación, ver Figura 111, se debe seleccionar el encerrado en el círculo, apenas se cree el tamaño del botón aparece la ventana de propiedades del botón creado, en la parte llamada "Action" en el recuadro llamado "Press Action" escribir el comando "Display" y entre comillas se coloca hacia donde se quiere dirigir, esto es lo más relevante de esta nueva adquisición, lo demás es opcional y por estética se puede modificar.

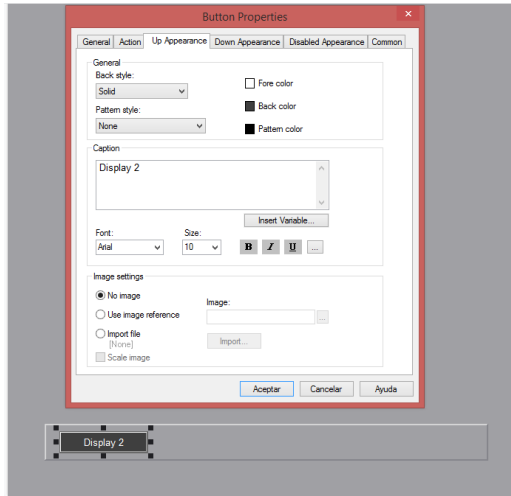
Figura 111. Botón navegación



Fuente: Autor

Para una visualización intuitiva, se configuró la apariencia del botón cuando se encuentre en estado inactivo, ver Figura 112, de forma similar se debe crear un segundo botón que dirija de vuelta al display, por lo que se hace con las mismas características pero dirigiéndolo al Display 1.

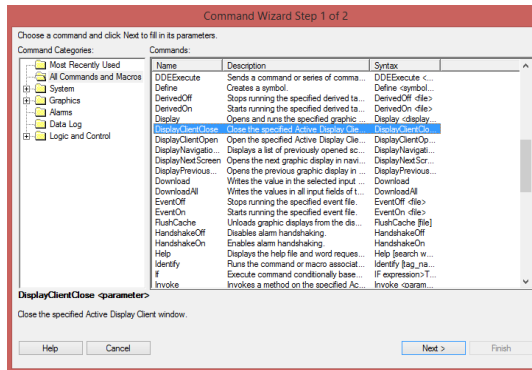
Figura 112. Propiedades de botón



Fuente: Autor

Como se observa a continuación se crearon otros dos botones, uno de ellos dirige hacia el display 1, el otro se creó para salir de la aplicación. Estos tres botones deben estar presentes en ambos displays donde se vaya a trabajar para lograr navegar, lo único diferente del botón “salir” es el comando el cual se muestra a continuación en la Figura 113, entonces, en las propiedades del botón en la pestaña “Action” en el recuadro “Press action” se encuentra un botón con puntos ubicado en la parte izquierda, seleccionando dicho botón se mostrará una ventana como la de la imagen, donde será necesario buscar la opción subrayada para que el botón “salir” ejecute la opción deseada.

Figura 113. Botón de salida



Fuente: Autor

Hasta el momento, el progreso de la HMI se ve en la Figura 114, aquí se han añadido algunos títulos de portada, además la barra de navegación se añadió en ambos display, esto para poder salir y entrar sin restricción.

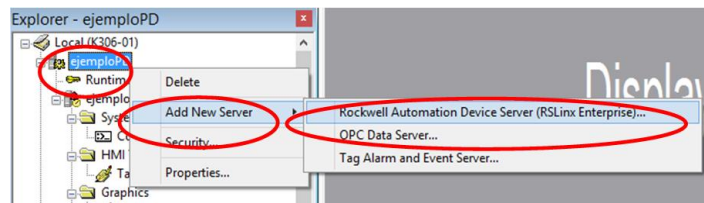
Figura 114. Avance dos



Fuente: Autor

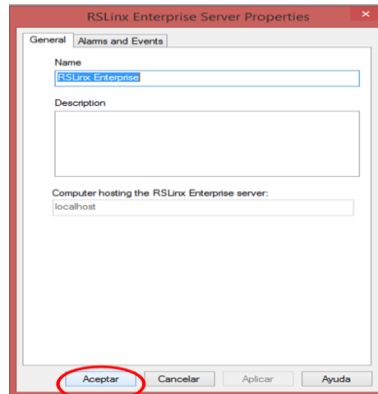
Para continuar al siguiente paso es necesario dejar configurada la comunicación con el PLC, por lo cual se deben seguir los siguientes pasos siguiendo el orden de los círculos desde la Figura 115 a Figura 119.

Figura 115. Comunicación con el PLC, paso 1



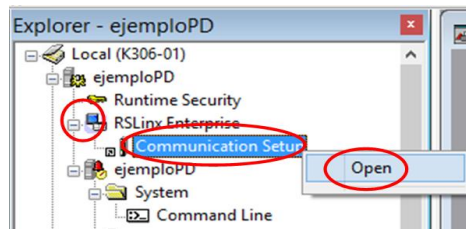
Fuente: Autor

Figura 116. Comunicación con el PLC, paso 2



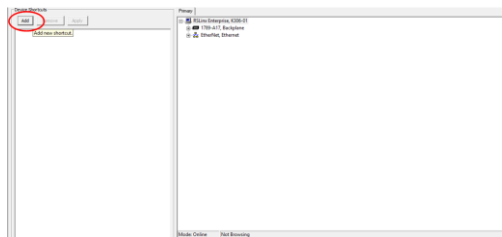
Fuente: Autor

Figura 117. Comunicación con el PLC, paso 3



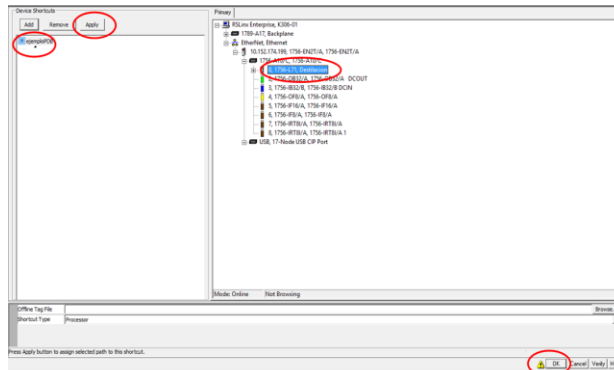
Fuente: Autor

Figura 118. Comunicación con el PLC, paso 4



Fuente: Autor

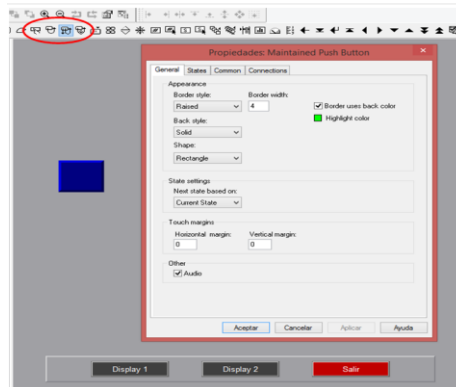
Figura 119. Comunicación con el PLC, paso 5



Fuente: Autor

El proceso de conexión es fundamental para empezar a usar botones que generen alguna acción directa al PLC, luego de haber hecho dicho proceso se puede empezar a crear y relacionar los diferentes botones, líneas de tendencia, barras, entre otras. Como se muestra en la imagen, existen diversos tipos de botones, desde pulsadores hasta interruptores multiestados, cada uno de ellos se puede usar según la necesidad del programa, en el caso del ejemplo se trabajará con un botón “maintained push button” como es llamado en el programa y como se puede ver en la Figura 120, dicho botón tiene dos estados booleanos 1 y 0, para crearlo es necesario seleccionar la opción e ir al display donde se quiere y con clic izquierdo mantenido generar un tamaño de recuadro, entonces aparecerá automáticamente la ventana de propiedades donde se configura todo, en la pestaña general se encuentran las opciones de apariencia, aquí se puede seleccionar el estilo del botón, la forma, y el estilo de relleno, además, cuenta con una opción que permite que cuando sea seleccionado el botón se resalte el contorno, por efectos del ejemplo no se cambiará nada en la parte estética.

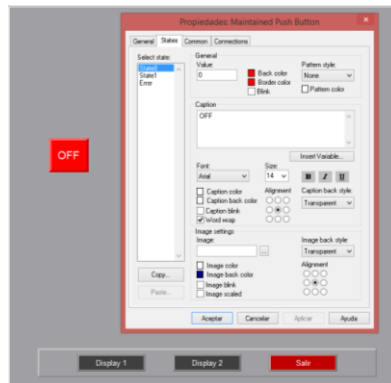
Figura 120. Botón mantenido



Fuente: Autor

La pestaña de estados configura el aspecto cuando el botón se encuentre en cada uno de los estados, esto se configurará a decisión propia y a conveniencia, para el ejemplo ver Figura 121.

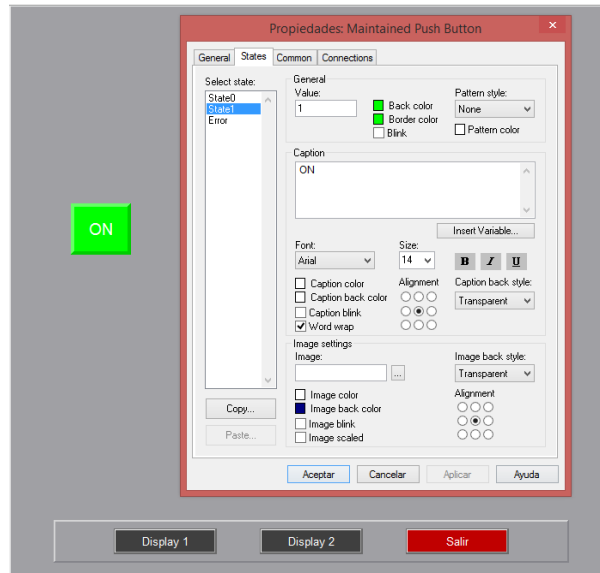
Figura 121. Botón mantenido, estado uno



Fuente: Autor

El estado 1 fue configurado como se muestra en la Figura 122.

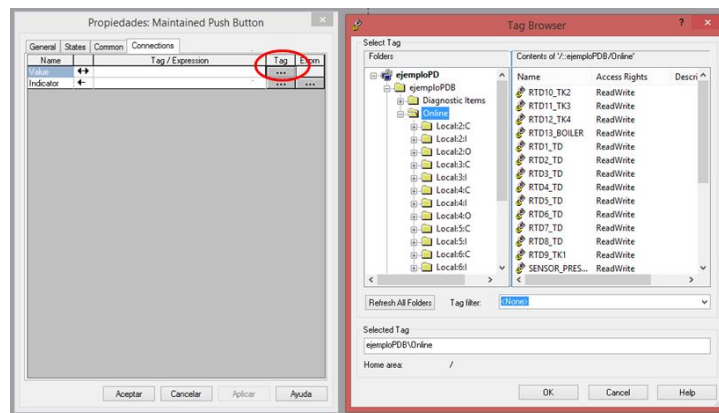
Figura 122. Botón mantenido, estado dos



Fuente: Autor

La parte fundamental en la creación de botones es relacionar la etiqueta del botón con alguna creada en el PLC, para ello en la pestaña conexiones se debe seleccionar la columna "tag" en la fila de valor, con clic izquierdo se abre una ventana como la que se muestra en la Figura 123 en la parte derecha, allí se debe buscar el tag el cual se desea relacionar el botón.

Figura 123. Relación de tag

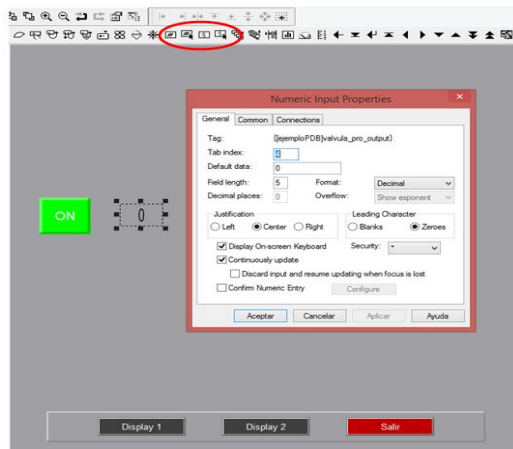


Fuente: Autor

Los displays son herramientas que se usan para visualizar señales de sensores o puntos de posición de válvulas, entre otros. Se pueden usar de tipo numérico o letras según la necesidad requerida, los hay de visualización y escritura o solo visualización, para el caso del ejemplo, ver Figura 124, se usará de tipo

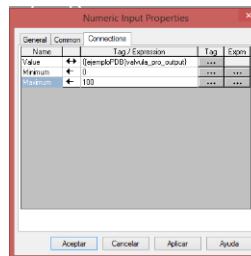
visualización y escritura numérica, para ello es necesario disponer en primera medida el TAG tal cual como se hizo en el botón, en este caso se debió seleccionar una etiqueta que permitiera este tipo de entradas como lo es la válvula proporcional la cual acepta señales de entrada, emitidas, en este caso por la HMI. Las opciones en la pestaña “general” de las propiedades del display únicamente sirven para opciones de aspecto. En la pestaña de conexiones es importante fijar los límites de entrada, y para el caso de la válvula de 0 a 100, esto puede observarse en la Figura 125.

Figura 124. Propiedades de entrada numérica



Fuente: Autor

Figura 125. Etiqueta de string

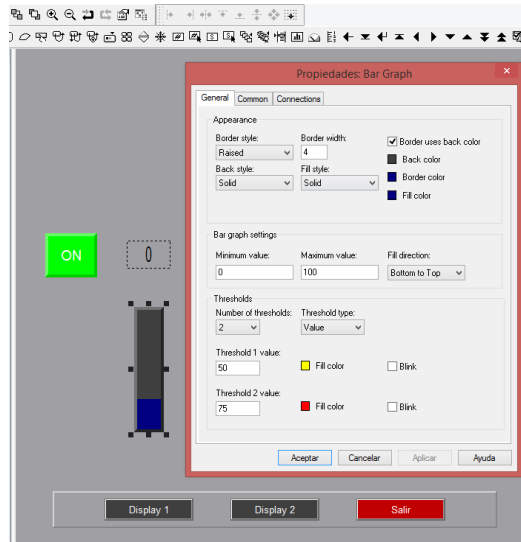


Fuente: Autor

Otra herramienta que puede ser usada en una HMI y que sirve para mostrar en el tiempo el cambio de una variable como nivel, dicha herramienta es llamada “Bar Graph” la cual tiene opciones en la pestaña “general”, allí se pueden cambiar los colores y la forma de llenado, además se puede seleccionar en modo de alarma visual un cambio de color en el llenado de la barra a partir de ciertos valores determinados por el usuario, para el ejemplo seguir la Figura 126.

Como se mencionó la barra gráfica puede usarse para tener una forma de visualización a través del tiempo con la variable nivel, por ende, en “conections” se usó la etiqueta de un sensor de nivel.

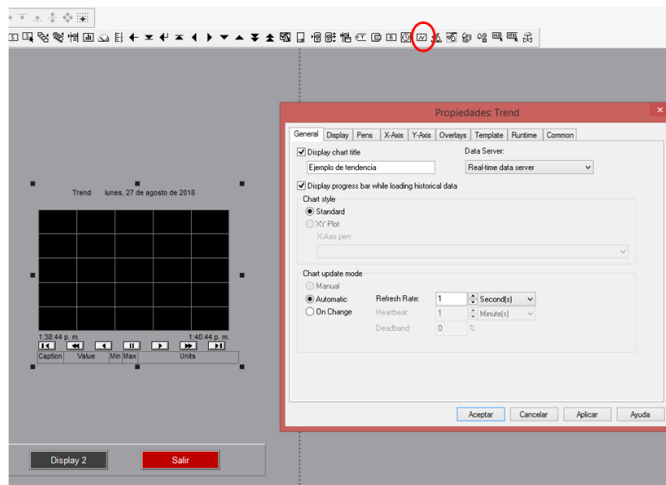
Figura 126. Gráfica de barra



Fuente: Autor

A continuación se muestra cómo hacer un gráfico de tendencia ver desde la Figura 127 hasta la Figura 130, para alguna variable que cambie a través del tiempo, lo primero por hacer, así como se muestra en la imagen es seleccionar la herramienta y generar un tamaño en el display, luego de ellos saldrá la ventana de propiedades automáticamente, entonces allí únicamente se cambia el nombre del gráfico dependiendo el uso.

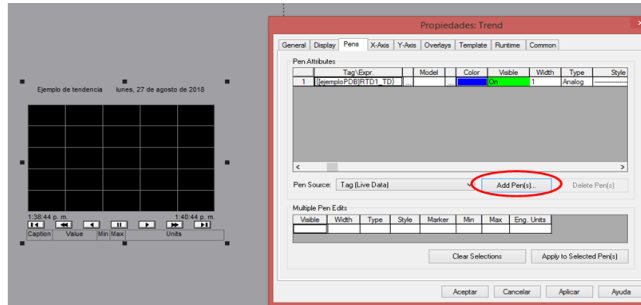
Figura 127. Gráfico de tendencia, paso uno



Fuente: Autor

La pestaña “Pens” es donde se pondrá la etiqueta acerca de que variable se quiere graficar, para el caso del ejemplo que mejor que la variable temperatura, seleccionamos “add pen(s)” donde se logra buscar la etiqueta que se quiere graficar, ver Figura 128.

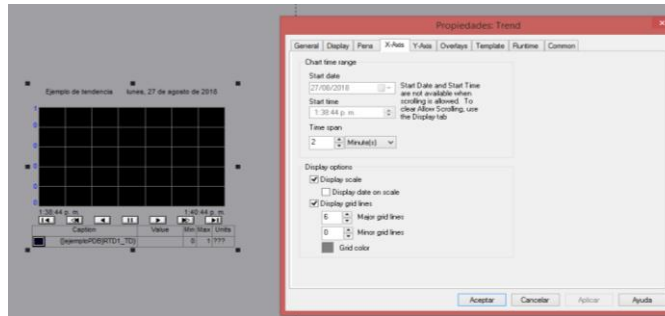
Figura 128. Gráfico de tendencia, paso dos



Fuente: Autor

Luego de haber colocado la etiqueta es necesario configurar los ejes, el eje X por efectos de ejemplo únicamente se cambiará el número de líneas de la gráfica a 6, aquí también se puede modificar el tiempo de graficado como efecto de elección.

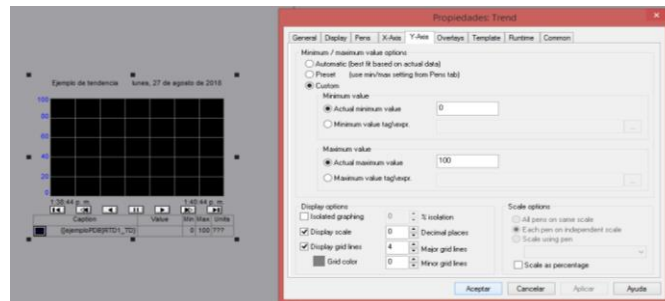
Figura 129. Gráfico de tendencia, paso tres



Fuente: Autor

El eje Y se modifica según la necesidad, es decir, la variable que se tenga graficando, en el caso del ejemplo se coloca que la temperatura únicamente iba de 0 a 100 solo por efectos de ejemplo, pues se sabe que las RTD pt-100 tienen un rango más alto de medida.

Figura 130. Gráfico de tendencia, paso cuatro



Fuente: Autor

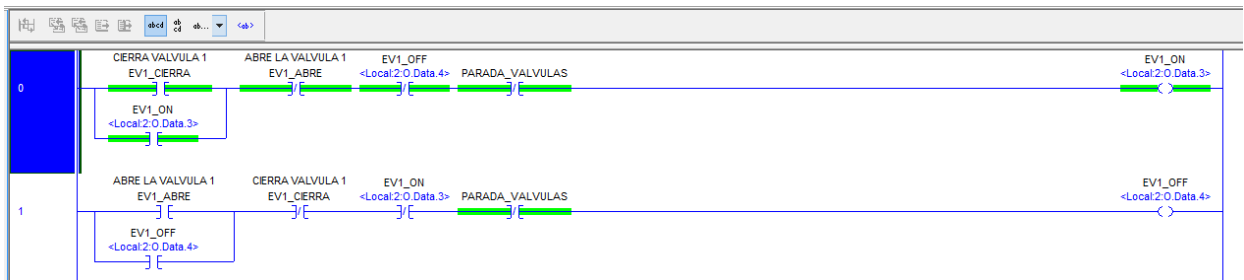
3.7. CARACTERIZACIÓN DE VÁLVULAS, VERIFICACIÓN DE APERTURA Y SELLADO SIN FUGAS.

La fase de prueba y caracterización de válvulas se realizó de forma experimental donde visualmente se observaron los comportamientos de las mismas, además, se verificó el sellado hermético y se constató que la señal de apertura estuviese haciendo correctamente la función en la válvula, debido a que no se data de alguna norma o protocolo de pruebas se garantizó que todo se encontrase funcionando correctamente y sin ningún percance, se describirá a continuación que tipo de prueba y para qué tipo de válvula se realizó el procedimiento.

Válvula On/Off PA6 UL94V0: Esta válvula tipo bola, adecuada con actuador eléctrico de dos posiciones se accionó por medio de dos tipos de pruebas, la primera de ellas fue verificar que el cuerpo de la válvula con los acoples a la tubería no tuviese alguna fuga, inicialmente esta prueba no se lograba hacer debido a las fugas que los tanques y las tuberías presentaban, una vez superadas estas situaciones se logró cerciorar que el empaquetado con el que fue ajustado la válvula estaba mal puesto y con fugas, después de encontradas las fugas se ajustó el sistema dejándolo libre de goteos, esta prueba fue posible gracias a que la válvula puede accionarse de forma manual, lo que permitía posicionarla abierta y lograr circular agua para esta prueba.

La segunda prueba consistió en verificar que la señal de apertura dada desde el PLC realmente estuviese haciendo su función, pues se encontró que en algunas válvulas estaba contraria la reacción de la válvula ante la señal de apertura, inicialmente se verificó la posición del indicador propio de la válvula y verificar que lo que mostraba concordaba con la posición de apertura o sellado, allí se comprobó que en algunas válvulas se encontraba al contrario de la ubicación del posicionador y por ende se concluyó que el vástago de la válvula se encontraba mal ubicado, algo que no se podía corregir de forma sencilla mecánicamente ya que eso significaba abrir el cuerpo de la válvula y adecuar la posición de la bola y el vástago, debido a lo anterior se decidió únicamente invertir la señal de apertura y sellado directamente desde el programa del PLC, la Figura 131 muestra cómo quedó el programa con el cambio para las válvulas con la inversión.

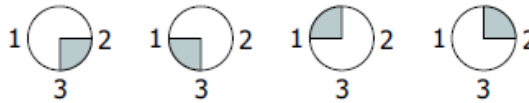
Figura 131. Caracterización de válvula eléctrica



Fuente: Autor

Válvula de tres vías PAE0352: La válvula PAE cuenta con un motor de 24v que permite cambiar la posición del vástago y consigo una válvula de bola la cual está creada para abrir paso desde una entrada común a dos no comunes como se muestra en la siguiente Figura 132.

Figura 132. Sentidos posibles para válvula de tres vías.



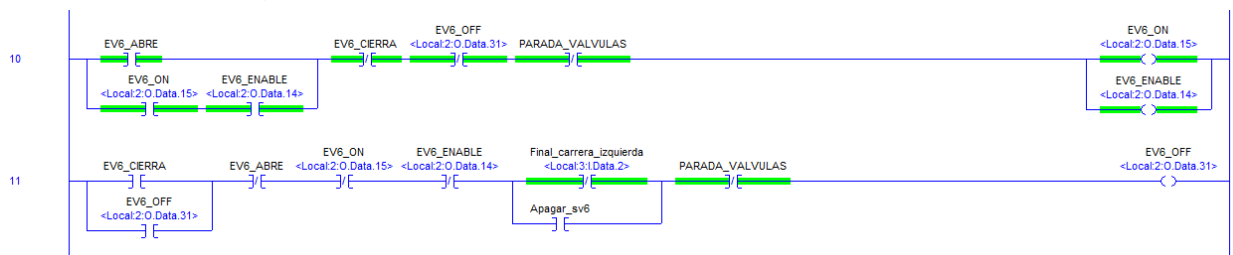
Fuente: (AIRMATIC S.A.S., 2017)

El dispositivo mecánico que permite posicionar casi exactamente la bola de la válvula son 4 finales de carrera, dos de ellos usados para abrir mecánicamente el circuito de alimentación del motor de 24v en el actuador, como lo enseña el manual (AIRMATIC S.A.S., 2017) así entonces permitir o cortar el paso de fluido hacia algún sentido, sabiendo lo anterior, de llegar a estar mal la posición de la bola, se puede corregir modificando la posición de los finales de carrera.

Se hicieron varios tipos de pruebas para verificar el funcionamiento correcto de la válvula y el actuador PAE, la primera fue teniendo en buen estado las tuberías de la planta y bien acopladas, de esta manera se hizo pasar agua y se verificó que los acoples no tuviesen fugas, luego, desde el tanque 1 se probó el primer sentido de la bola, la misma prueba se repitió para el segundo sentido llegando a resultados tales como que la válvula permitía fluido a todos los caminos posibles en un solo sentido y que nunca cerraba totalmente el paso de líquido.

El paso a seguir fue corregir las posiciones de apertura de la válvula modificando la posición de los dos finales de carrera que controlaban la parada en la posición debida, logrando así que la válvula funcionase como se espera, además de ello, debido a que no se contaba con la función de cerrado total se usó uno de los finales de carrera extras para lograr la parada en la posición del vástago donde se encontrase totalmente cerrada la bola y no se permitiera el paso de fluidos a ningún lugar, este tercer final de carrera se añadió al programa quedando así las líneas de accionamiento Figura 133, de tal forma que al accionar el contacto llamado Apagar_sv6 se omita el final de carrera en sentido izquierdo que coloca la válvula en posición de apertura al tanque 2 y se cierre totalmente el paso de agua.

Figura 133. Caracterización de Válvula de tres vías



Fuente: Autor

Válvulas neumáticas: Las válvulas neumáticas 8692 tipo Y de compuerta ON/OFF controladas a través de válvulas eléctricas de 24v 3/2 que hacen una conversión de señal eléctrica a neumática, se probaron de forma simple con dos pruebas básicas, la primera se basó en verificar que el sistema de conexión de las válvulas estuviese sin fugas, luego de ello se hizo la prueba de verificación de apertura en sentido correcto, se accionaban dándoles señales de 24v directamente desde el PLC a un relé que abre el paso de corriente desde la fuente 24V con la corriente suficiente para accionar las válvulas 3/2.

Válvula proporcional neumática tipo 2000: El protocolo de pruebas para válvulas proporcionales es basado en el estándar de 4 a 20mA, para lo cual se hizo el envío directo desde el PLC según el porcentaje de apertura de la válvula. Al estar completamente cerrada se verificó el absoluto sello de la misma al no dejar pasar el agua, para ello se accedió a la configuración mediante el display local se accede a dicha configuración y ajuste mediante un teclado de membrana que la válvula posee.

3.8. CARACTERIZACIÓN DE SENSORES DE LA PLANTA, VERIFICACIÓN CON HERRAMIENTAS DE MEDICIÓN EXTERNAS.

El tema de los sensores ha sido abordado anteriormente en este mismo documento en donde por medio del programa inicial se relacionaron las entradas asociadas a los sensores de la planta y a través del programa Studio 5000 se lograron leer los datos que enviaban los sensores en sus respectivos estándares de 4 a 20mA, señales de 24v DC y señales de resistencia por medio de las RTD, esto permitió verificar que se estuviesen tomando correctamente las señales de los sensores. Luego de verificar conexiones eléctricas con la llegada de datos al PLC fue necesario corroborar y probar que las señales dadas fuesen correctas y que concordaran con los valores reales de las variables leídas. A continuación se describirá el tipo de prueba y con qué instrumento externo se verificó y probó la señal de los sensores.

Sensores de temperatura: Los sensores de temperatura que se tienen en la planta son de dos tipos, en su mayoría tipo RTD pt-100 las cuales varían su resistencia interna dependiendo el valor de temperatura y Termocupla tipo k, estas arrojan un valor en corriente a medida que cambia la temperatura en la vaina del sensor. Los sensores de temperatura fueron probados con un elemento externo llamado baño seco el cual tiene la capacidad de calentar y enfriar de forma rápida con el propósito de prueba de los sensores de temperatura, la Figura 134 muestra el baño seco usado en las pruebas.

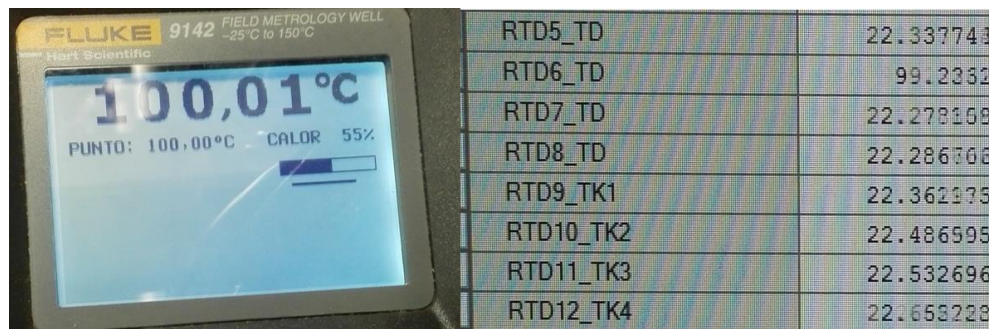
Figura 134. Baño seco



Fuente: Autor

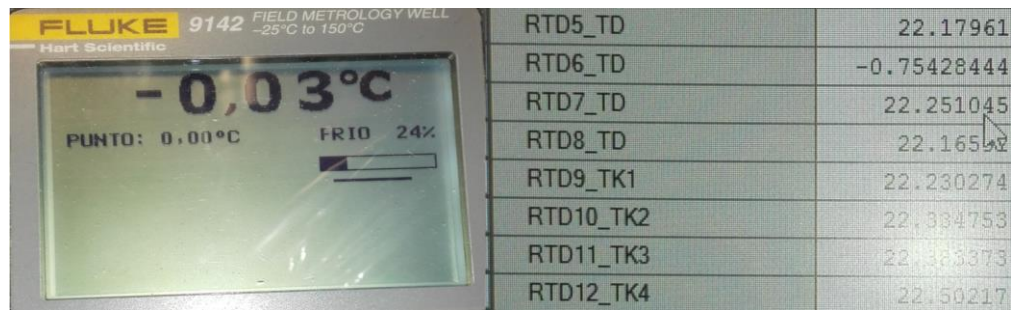
Las pruebas realizadas se basaron en calentar y enfriar la RTD de tal forma que se pudiese comparar los valores que arrojaba el baño seco y las señales que llegaban al computador a través del PLC, así se logró determinar de la fiabilidad de los sensores, se pusieron en dos puntos bastante distanciados, uno a 0 y el otro a 100 grados Celsius así como se muestra en la Figura 135 y en la Figura 136.

Figura 135. Caracterización de RTD alta temperatura.



Fuente: Autor

Figura 136. Caracterización de RTD Baja Temperatura

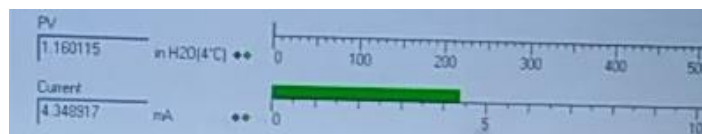


Fuente: Autor

Debido a que todos los elementos de lectura de temperatura son de similares características y se encuentran referenciados a la temperatura ambiente no fue necesario probarlos, esto permitió verificar que las señales mostradas en el programa del PLC de temperatura fueran certeras.

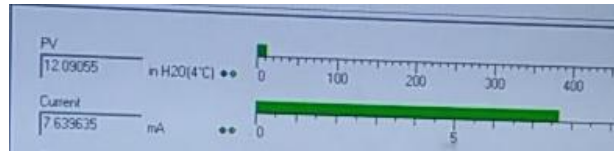
Sensores de presión: El proceso de prueba de los sensores de presión fue un poco más complejo que el de las demás variables de la planta, debido a que con dichas variables se contaba con menor experiencia y fue necesario acudir a los manuales (ASEA BROWN BOVERI, 2017) y (ASEA BROWN BOVERI, 2017) donde se encuentran tablas de especificaciones para saber los rangos de trabajo de los mismos, en un inicio se trabajó con el sensor de presión diferencial con referencia 266DSH el cual cuenta con un rango de trabajo de 0 a 5.7 psi o 160 inH₂O de presión diferencial, además, en cada una de sus entradas diferenciales soporta una presión máxima de 3045 psi o 210 bares lo que permite tener una línea de alta conectada al sensor, dicho sensor fue probado mediante protocolo HARD con el software PACtware así como se muestra en la Figura 137, repitiendo así mismo la prueba variando la presión y obteniendo los datos resultantes como se muestra en la Figura 137, Figura 138 y Figura 139, para el caso de la prueba estaba en unidades de inH₂O, por medio de una línea de aire por la cual se podía controlar la cantidad de aire (Figura 141) que pasara por la línea, debido a que el sensor trabaja a presiones diferenciales bajas se usó la línea de prueba en un valor de casi 0 ya que de pasarse los 6 psi se saturaría el sensor.

Figura 137. Prueba y Caracterización de sensor diferencial de presión.



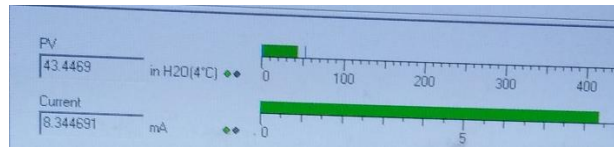
Fuente: Autor

Figura 138. Prueba dos Caracterización de sensor diferencial de presión.



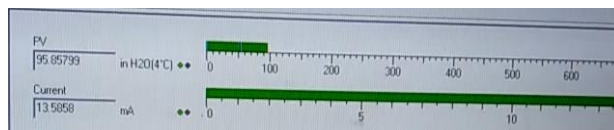
Fuente: Autor

Figura 139. Prueba tres Caracterización de sensor diferencial de presión.



Fuente: Autor

Figura 140. Prueba cuatro Caracterización de sensor diferencial de presión.



Fuente: Autor

Figura 141. Unidad de mantenimiento

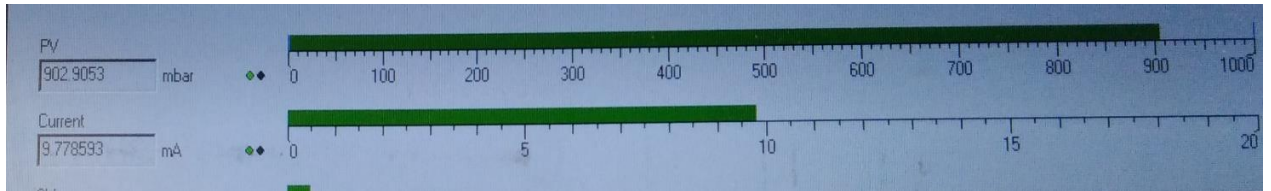


Fuente: Autor

En el proceso de prueba del sensor de presión absoluta 261AS fue un poco más sencillo que el anterior debido al rango de medida más amplio que el de presión

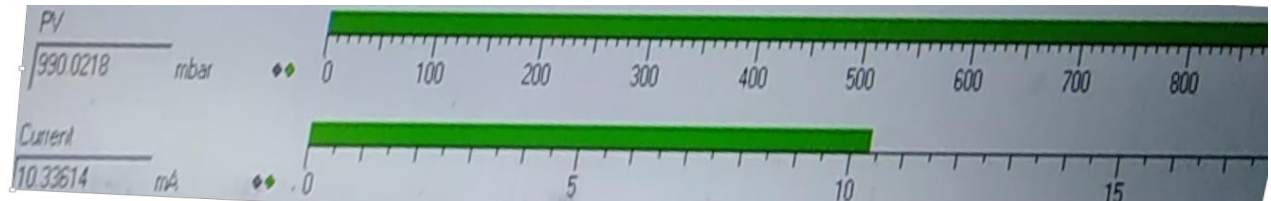
diferencial, con un rango de 0 a 37psi, esto permitió hacer pruebas con la unidad de aire del laboratorio y verificar que las señales eléctricas que enviaba al PLC fuesen certeras, sin embargo sabiendo la presión absoluta de la ciudad donde se encuentre el PLC sería suficiente como punto de referencia así comparar la señal en milibares aproximada que genera el sensor. En la Figura 142, Figura 143, Figura 144 y Figura 145 se muestra como varía la señal mediante el cambio de la presión colocada por medio de la unidad de aire.

Figura 142. Prueba uno Caracterización de sensor de presión absoluta.



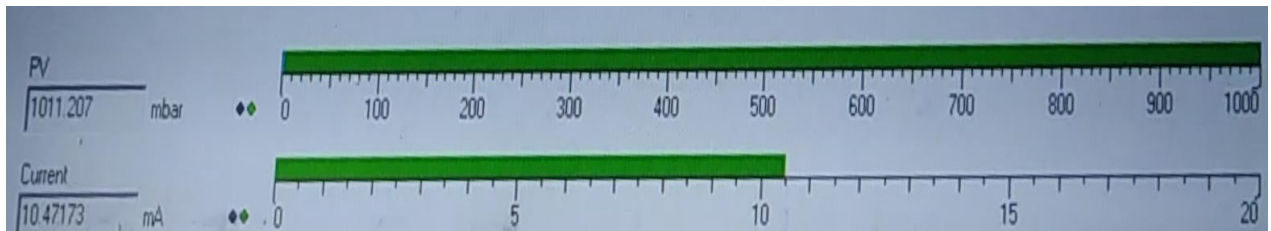
Fuente: Autor

Figura 143. Prueba dos Caracterización de sensor de presión absoluta.



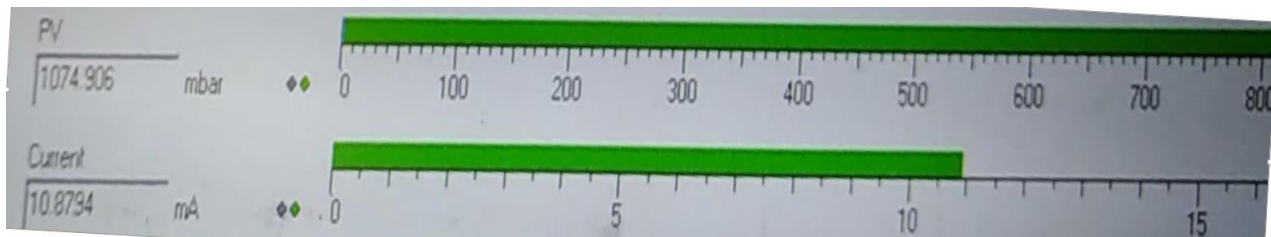
Fuente: Autor

Figura 144. Prueba tres Caracterización de sensor de presión absoluta.



Fuente: Autor

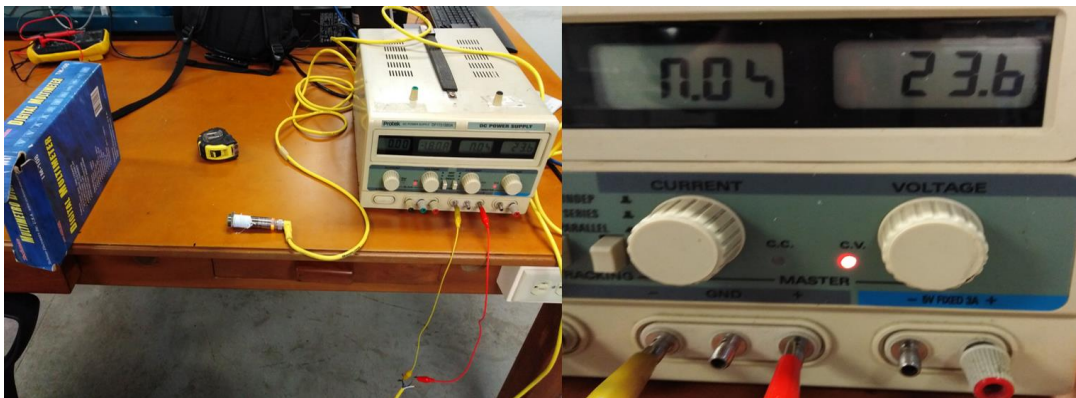
Figura 145. Prueba cuatro Caracterización de sensor de presión absoluta.



Fuente: Autor

Caracterización sensores de nivel: Refiriéndose a los sensores tipo ultrasónicos capacitivos de referencia UB500-18GM75-I-V15 (Pepperl-fuchs) teniéndose como base de documentación los manuales técnicos (PEPPERL FUCHS, 2010) de uso donde muestra características únicas de éste tipo de instrumento, así entonces se siguiendo las instrucciones de configuración de nivel se hizo el proceso como se muestra en la Figura 146, donde fue necesario fijar los niveles máximo y mínimo, además, configurar las rampas de nivel las cuales se encontraban desajustadas, se necesitaron tomar medidas a los tanques y ajustar los limites mediante un obstáculo puesto a la misma distancia que tendría en los tanques.

Figura 146. Caracterización de sensores de nivel.



Fuente: Autor

3.9. COMISIONAMIENTO DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO.

El sistema de calentamiento en el boiler de la torre de destilacion se compone de un conjunto de resistencias acopladas en una chaqueta de calentamiento dispuesto para el proceso de destilación, cinco de las resistencias de calentamiento cuentan con una potencia de 1100W las cuales se encuentran ubicadas a los costados de la chaqueta, además, hay una resistencia de 2200W la cual se encuentra ubicada en la base de la chaqueta la cual a la hora de calentar estaría en contacto directo con el tanque o boiler, el sistema de calentamiento cuenta además con dos sensores de temperatura una RTD pt-100 y una termocupla tipo k ubicadas dentro del tanque y directamente en las resistencias calefactoras respectivamente. Para implementar el sistema de control se tiene el PLC con alta capacidad de control la cual arroja una señal PWM a un grupo de relés que a su vez activan y desactivan las resistencias en un rango de tiempo según lo indique el controlador diseñado. Antes de las pruebas de calentamiento se debe adicionar al programa de control de las resistencias un contacto que permita hacer el encendido de forma independiente de manera directa, por ello se adiciona el relé en paralelo a la línea inicialmente creada en pasos anteriores, además, no se debe permitir que mientras esté funcionando el sistema de control

se encienda de forma directa las resistencias, por ello, así como se muestra en la Figura 147 se adecuó el programa para evitar ese tipo de errores.

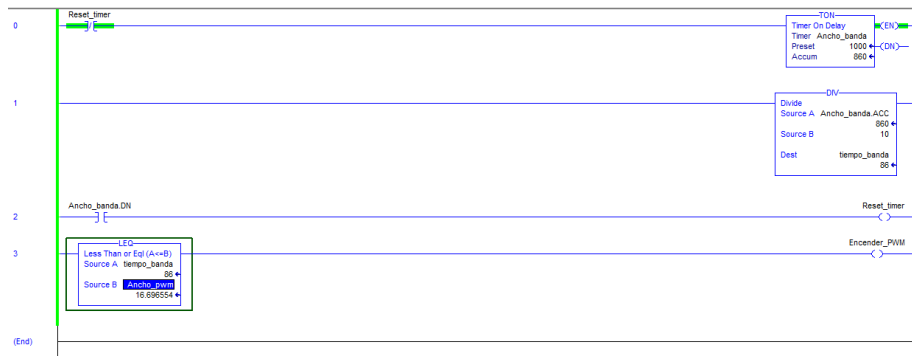
Figura 147. Acción de encendido del PWM en las resistencias



Fuente: Autor

Además del programa acondicionado anteriormente fue necesario crear una señal especial de entrada a las resistencias que permitiera el control de temperatura de las resistencias y a su vez del liquido dentro del boiler, para ello se creó un modulador PWM que modifica el tiempo de encendido y apagado de las resistencias en un rango de tiempo, en el caso de la planta fue de un segundo, así entonces encendiendo y apagando las resistencias con la señal PWM permitían entregar potencia en un rango de tiempo, dicho encendido y apagado generado por el PLC generando la señal de control llegando a los relés de estado sólido y estos abriendo o cerrando el paso de energía. El sistema PWM se genera a partir de comparadores y temporizadores como se muestra en la Figura 148 donde en la línea 0 se crea lo que es el tiempo de suicheo del PWM haciendo que el temporizador resetee la acción cada determinado tiempo, luego de ello en la línea 1 se encuentra un divisor que permite escalar el tiempo en una rango de 0 a 100 con el fin de usarlo en el comparador, en la línea tres se encuentra la línea, se resetea el tiempo y hace que se cree una señal periódica, dicho reset se hace asociando la etiqueta del temporizador con el prefijo “.DN” que indica cuando se ha terminado el tiempo de conteo del temporizador y vuelve a empezarlo, por último se encuentra la línea que se encarga de comparar y arrojar una señal de alto cuando el tiempo recorrido en el temporizador sea menor o igual al porcentaje de ancho de banda que sería de 0 a 100.

Figura 148. Programa generador de señal PWM



Fuente: Autor

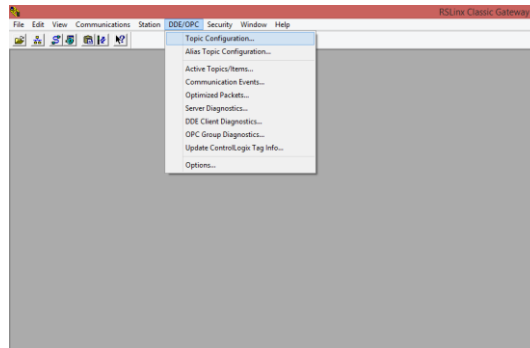
Teniendo un programa para accionar las resistencias de forma periódicas se puede pasar a probar las resistencias ejecutado en intervalos variando la potencia de entrada.

3.10. CONFIGURACIÓN DE COMUNICACIÓN OPC MATLAB-PLC

En el campo de aprendizaje cualquier herramienta en la que se permita interactuar estudiante-teoría-experimento es siempre bienvenido, la herramienta de Matlab hoy día se ha vuelto muy conocida y netamente práctica, uno de los tantos toolbox de Matlab es simulink, un entorno de simulación que permite obtener un acercamiento a los comportamientos reales que podría tener una planta de cualquier tipo bajo algunas características de diseño propias de los elementos a estudiar, para el caso del trabajo de grado se usó la librería OPC. Simulink de Matlab cuenta con dicha herramienta que conecta en tiempo real programas que interactúan entre sí pudiendo trabajar de la mano en aplicaciones las cuales necesitan de ambos programas para interactuar con plantas, para el caso se muestra cómo hacer la conexión de comunicación entre Matlab y Rslinx el cual trabaja de la mano con Studio 5000 programas de Rockwell Automation, tecnología dispuesta para el desarrollo en controladores Allen Bradley. A continuación se muestra en la Figura 149 el inicio para entablar conexión a través de los programas mencionados.

En la Figura 149 se muestra en donde acceder a través de Rslinx para crear el servidor OPC con el cual se quiere trabajar.

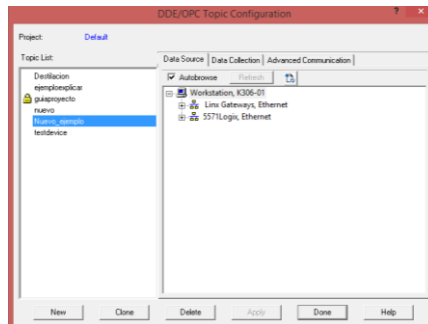
Figura 149. RSlinx topic configuration



Fuente: Autor

Para crear el servidor OPC en la parte donde dice “new” se da clic derecho y allí genera una nueva línea con un nombre por defecto el cual se puede cambiar, por efecto de ejemplo se creó uno con nombre “Nuevo_ejemplo”, ahora, luego de crear el servidor se enlaza con la CPU que se tiene cargado el proyecto el cual se muestra en el paso siguiente.

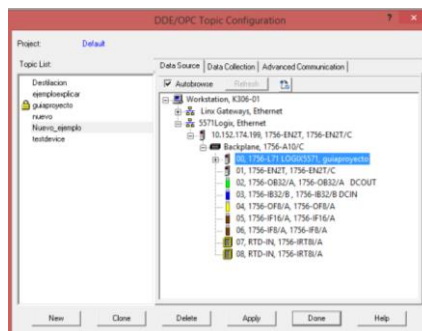
Figura 150. Creación de servidor y enlace con proyecto en línea.



Fuente: Autor

Para relacionar la CPU que posee el proyecto cargado con el cual se quiere trabajar se debe oprimir en el nombre de la CPU como se encuentra subrayado en la Figura 151 y luego seleccionar el servidor con el cual se desea trabajar, después dar clic en aplicar y por ultimo seleccionar “hecho”.

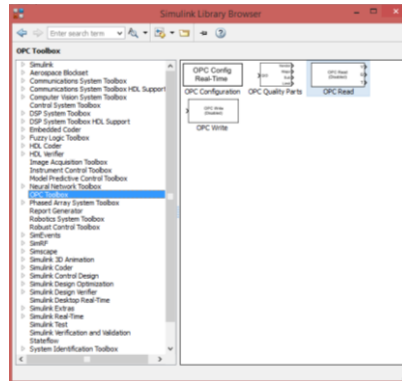
Figura 151. Conexión con el servidor OPC



Fuente: Autor

Luego de hacer el proceso de creación del servidor en Rslinx y relacionar con la CPU y proyecto trabajado, ya que es un objetivo poder comunicar Matlab con Studio 5000 y así con el PLC, ahora es necesario hacerse el proceso de conexión desde Matlab, la herramienta simulink en una de las librerías que maneja se encuentra la del servidor OPC el cual cuenta con cuatro módulos de los cuales se usarán tres de ellos, uno esencial que hace la comunicación y otros dos de lectura y escritura, dichos módulos se pueden observar en la Figura 152.

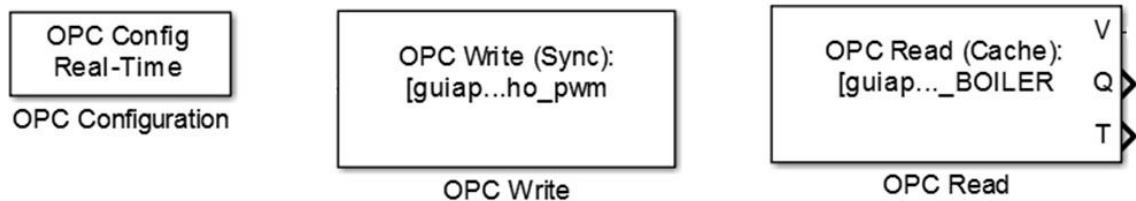
Figura 152. Librería de simulink para servidor OPC



Fuente: Autor

La Figura 153 muestra cómo se encuentran los módulos de conexión OPC en simulink de Matlab.

Figura 153. Herramientas OPC Matlab

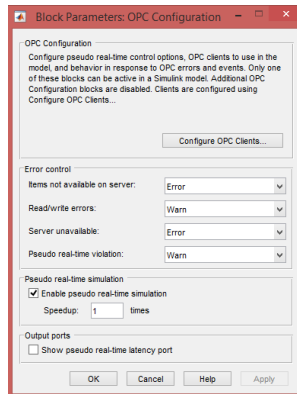


Fuente: Autor

Luego de haber identificado cuáles son los módulos a usar hay que hacerse un proceso de configuración de los mencionados para poderse conectar en línea con el programa del PLC, para ello, comenzando con el módulo “OPC configuration” se deben seguir los pasos mostrados del 1 al 4 en las imágenes desde Figura 154 hasta Figura 157.

Al hacerse doble clic en el módulo de configuración aparece la ventana mostrada en la Figura 154 donde se hará clic en la parte que dice “configure OPC clients” luego de ello hacer el paso 2.

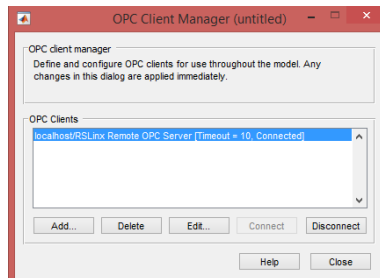
Figura 154. Configuración de módulo de comunicación OPC paso 1



Fuente: Autor

La Figura 155 siendo el paso dos, muestra la ventana con los servidores activos, en caso de no estarlo se debe hacer clic en el botón “ADD”

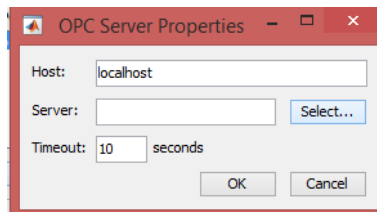
Figura 155. Configuración de módulo de comunicación OPC paso 2



Fuente: Autor

Para añadir el servidor en Matlab es necesario ir a la barra de servidor y hacer clic en “select”, en la Figura 156 se muestra la ventana que se observara en las propiedades del servidor.

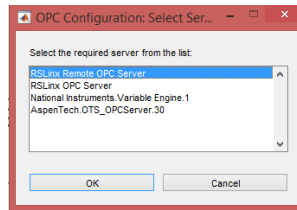
Figura 156. Configuración de módulo de comunicación OPC paso 3



Fuente: Autor

Luego de hacer los pasos anteriores se debe seleccionar el tipo de servidor con el cual se desea trabajar, en la Figura 157 se muestra la ventana donde se seleccionara el servidor, allí aparecen los nombres de servidores disponibles, en el caso del ejemplo se creó un servidor en Rslinx de tipo remoto, entonces es allí donde debe seleccionarse y dar clic en “ok”.

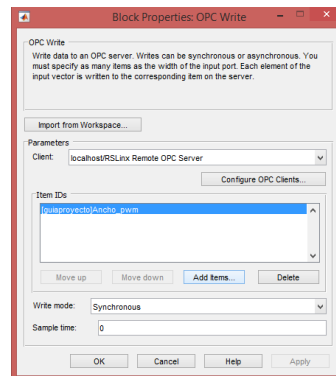
Figura 157. Configuración de módulo de comunicación OPC paso 4



Fuente: Autor

Luego de haber configurado la conexión OPC en simulink ahora es necesario agregar las variables de escritura y lectura, éstas se configuran de forma similar, teniendo en cuenta que cada etiqueta relacionada debe existir en Studio 5000 y debe ser llamada exactamente igual a como se desea llamar. Haciendo doble clic en el módulo deseado se hace clic en “ADD items”, la pestaña de propiedades del módulo de escritura se muestra en la Figura 158.

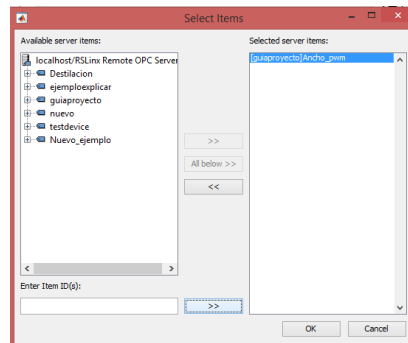
Figura 158. Configuración de módulo de entradas o salidas de lectura y escritura paso 1



Fuente: Autor

Para añadir una etiqueta estando en la pestaña ítems como se muestra en la Figura 159, se encuentran dos columnas, una a la izquierda la cual muestra los diferentes servidores posibles, aquí hay que tener en cuenta en cuál servidor está corriendo el proyecto actual, para el caso es en “guiaproyecto” donde se encuentra relacionado el proyecto actual, sabiendo ello debajo de la mencionada columna se encuentra una barra titulada “Enter ítem” allí se añadirá el tag anteponiendo entre corchetes el nombre del servidor y luego el nombre de la etiqueta por ejemplo: [guiaproyecto]Ancho_pwm, entonces habiendo escrito la etiqueta se oprime la tecla ubicada al centro de las columnas con una flecha apuntando a la columna derecha, la segunda columna anteriormente mencionada será donde se localicen las etiquetas añadidas, es importante mencionar que se pueden añadir varios tag los cuales saldrán multiplexados en la salida V del módulo de lectura, el cual debe desmultiplexarse y tomar cada señal en orden de añadidura, finalmente se debe seleccionar “ok”.

Figura 159. Configuración de módulo de entradas o salidas de lectura y escritura paso 2



Fuente: Autor

Es importante mencionar que para que la conexión OPC funcione y se comuniquen los programas ambos deben estar sin errores y corriendo en línea, es decir para Studio 5000 debe estar en “Remote Run” y la simulación de simulink debe estar corriendo.

4. CÁLCULOS Y RESULTADOS

Basado en la imagen real de la planta de destilación se enumeraron cada una de las partes mecánicas del sistema que componen toda la planta, de tal forma y tomando como guía la Figura 160 se da idea de lo expresado en las tablas donde se hace referencia a elementos numerados.

4.1. RESULTADOS SOBRE ESTADO DE ELEMENTOS MECÁNICOS Y ELÉCTRICOS

En la Tabla 9 y la Tabla 10 se muestran los resultados de los elementos tanto mecánicos como eléctricos y cada uno de los dispositivos y el estado actual, debido a que uno de los propósitos generales del proyecto es el precomisionamiento, se menciona el estado de cada artículo de la planta y en forma general a qué tipo de prueba se sometió y que reparación se hizo, dicho objetivo se da por cumplido y los resultados se muestran de la Tabla 9 y Tabla 10, allí también se detalla el número de elementos por artículo y se hacen observaciones acerca del estado actual del elemento.

Figura 160. Numeración de elementos de la Planta Destiladora



Fuente: Autor

Tabla 9. Elementos Mecánicos de la planta destiladora y sistema de tanques.

Elemento	Prueba	Reparación	Estado actual	Observación
Tanque 1	Visual, hidrostática y neumática.	Soldado sellado. y	Funcional	Ninguna
Tanque 2	Visual, hidrostática y neumática.	Soldado sellado. y	Funcional	Ninguna
Tanque 3	Visual, hidrostática y neumática.	Soldado sellado. y	Funcional	Ninguna
Tanque 4	Visual, hidrostática y neumática.	Soldado sellado. y	Funcional	Ninguna
Boiler	Visual, hidrostática y neumática.	Ninguna	Funcional	Internamente el sistema de enfriamiento por aire tiene fuga.
Torre de destilación	Visual	Ninguna	Funcional	Ninguna
Tubo con mirilla	Visual, hidrostática y neumática.	Cambio de vidrio a manguera plástica transparente	Funcional	Ninguna
Tubo 1	Visual, hidrostática y neumática.	Soldado pulido. y	Funcional	Ninguna
Tubo 2	Visual, hidrostática y neumática.	Soldado pulido. y	Funcional	Ninguna
Tubo 3	Visual, hidrostática y neumática.	Soldado pulido. y	Funcional	Ninguna
Tubo 4	Visual, hidrostática y neumática.	Soldado pulido. y	Funcional	Ninguna

Tubo 5	Visual, hidrostática y neumática.	Soldado pulido.	y	Funcional	Ninguna
Tubo 6	Visual, hidrostática y neumática.	Soldado pulido.	y	Funcional	Ninguna
Tubo 7	Visual, hidrostática y neumática.	Soldado pulido.	y	Funcional	Ninguna
Tubo 8	Visual, hidrostática y neumática.	Soldado pulido.	y	Funcional	Ninguna
Tubo 9	Visual, hidrostática y neumática.	Soldado pulido.	y	Funcional	Ninguna
Tubo 10	Visual, hidrostática y neumática.	Soldado pulido.	y	Funcional	Ninguna
Tubo 11	Visual, hidrostática y neumática.	Soldado pulido.	y	Funcional	Ninguna
Tubo 12	Visual, hidrostática y neumática.	Soldado pulido.	y	Funcional	Ninguna
Tubo 13	Visual, hidrostática y neumática.	Soldado pulido.	y	Funcional	Ninguna
Tubo 14	Visual, hidrostática y neumática.	Soldado pulido.	y	Funcional	Ninguna
Conexión válvula 1	Visual, hidrostática y neumática.	Pulido.		Funcional	Ninguna
Conexión válvula 2	Visual, hidrostática y neumática.	Pulido.		Funcional	Ninguna
Conexión válvula 3	Visual, hidrostática y neumática.	Pulido.		Funcional	Ninguna
Conexión	Visual,	Pulido.		Funcional	Ninguna

válvula 4	hidrostática y neumática.			
Conexión válvula 5	Visual, hidrostática y neumática.	Pulido.	Funcional	Ninguna
Conexión válvula 6	Visual, hidrostática y neumática.	Pulido.	Funcional	Ninguna
Conexión válvula 7	Visual, hidrostática y neumática.	Pulido.	Funcional	Ninguna
Conexión válvula 8	Visual, hidrostática y neumática.	Pulido.	Funcional	Ninguna
Conexión válvula 9	Visual, hidrostática y neumática.	Pulido.	Funcional	Ninguna

Fuente: Autor

Tabla 10. Elementos eléctricos de la planta destiladora.

Nombre	Referencia	Cantidad	Prueba	Estado actual
Detector resistivo de temperatura RTD	Pt-100	13	Baño seco y verificación de señal	Caracterizado y funcional
Termocupla	Tipo k	1	Baño seco y verificación de señal	Caracterizado y funcional
Sensor ultrasónico de nivel	UB500-18GM75-I-V15(Pepperl-fuchs)	3	Visual y verificación de señal	Caracterizado y funcional
Sensor de presión absoluta	261AS(A.B.B)	1	Punto de referencia de ambiente y verificación de señal mediante protocolo hard	Caracterizado y funcional
Sensor de presión diferencial	266DSH(A.B.B)	1	Variar presión en una entrada usando la unidad	Caracterizado y funcional

			de mantenimiento y verificación mediante hard	
Bomba peristáltica	MS 712-4(TECHTOP)	1	Arranque y verificación visual de potencia y eficiencia	Verificado
Circulador enfriador-calentado	POLYSTAT 1C6 (Cole-Parmer)	1	Verificación de enfriamiento, Puesto en marcha y reubicado para alcance de bomba	Funcional
Sensor capacitivo de presencia	CJ30-50K10-E0123-Y46139(Pepperl-fuchs)	1	Verificación de detección de objetos	Funcional
Válvula eléctrica ON/OFF	PA6 UL94V0(VALPES)	6	Verificación de sentido de apertura y correcta señal de sentido	Funcional
Válvula eléctricas de tres vías	PAE0352 (A.R.T)	1	Verificación de sentido de apertura y correcta señal de sentido	Funcional
Válvula neumática proporcional	8692(burkert)	1	Verificación de sentido de apertura y correcta señal de sentido	Funcional
Válvula neumática proporcional	Type 2000 (burkert)	2	Verificación de porcentaje de apertura y caracterizado automático de la válvula	Funcional
Variador de	ACS150(ABB)	1	Verificación de	Funcional

velocidad			entrada de señal	
Controlador lógico programable PLC	Control logix 5571 (Allen Bradley)	1	Programa básico de prueba de elementos	Funcional
Unidad de procesamiento central CPU	1756 L-71	1	Programa básico de prueba de elementos	Funcional
Módulo Ethernet	1756-EN2T	1	Correcta conexión de comunicación, controlador a PLC	Funcional
Salidas Digitales	1756-OB32	1	Entrada y salida de señal según conexión	Funcional
Entradas Digitales	1756-IB32	1	Entrada y salida de señal según conexión	Funcional
Salidas Análogas	1756-OF8	1	Entrada y salida de señal según conexión	Funcional
Entradas Análogas	1756-IF8	1	Entrada y salida de señal según conexión	Funcional
Entradas Análogas	1756-IF16	1	Entrada y salida de señal según conexión	Funcional
Módulo RTD	1756-IRT8I	2	Entrada y salida de señal según conexión	Funcional
Modulo conector de salidas análogas	1492-AIFM8	1	Entrada y salida de señal según conexión	Funcional
Módulo conector de 8 canales de entradas análogas	1492-AIFM8	1	Entrada y salida de señal según conexión	Funcional
Módulo conector de entradas	1492-IFM40F	1	Entrada y salida de señal según	Funcional

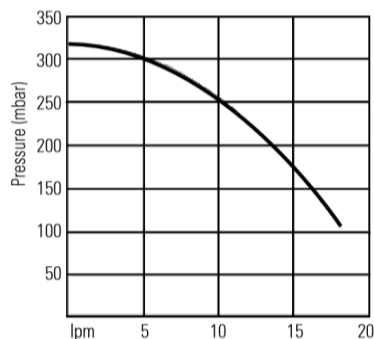
digitales			conexión	
Módulo conector de 4 entradas análogas	1492-AIFM8	1	Entrada y salida de señal según conexión	Funcional
Módulo conector de salidas digitales	1492-IFM40F	1	Entrada y salida de señal según conexión	Funcional
Módulo conector de RTD	1492-AIFM8S_3	2	Entrada y salida de señal según conexión	Funcional
Relé de estado solido	TD24A25(OPTEC POWER SOLUCIONS)	4	Entrada y salida de señal según conexión	Funcional
Relé de estado solido	HFS15 D-240A15Z-L(555) (CRUUS)	8	Entrada y salida de señal según conexión	Funcional
Relé mecánico	0809(257) (CRUUS)	12	Entrada y salida de señal según conexión	Funcional
Contactores	NC1-3210 (CHNT)	3	Entrada y salida de señal según conexión	Funcional
Fuente de voltaje de 22.5-28.5v	QUINT POWER (PHOENIX CONTACT)	1	Entrada y salida de señal según conexión	Funcional

Fuente: Autor

4.2. CÁLCULOS DE LA BOMBA DEL RECIRCULADOR

En la Figura 161 se muestra la característica de la bomba del circulador enfriador.

Figura 161. Gráfico presión vs flujo (litros por minuto de circulador enfriador).



Fuente: (Cole Parmer-polystat, 2017)

Haciendo toma de datos experimentales se obtuvo la medida aproximada de caudal

$$Q = 12.8 \frac{\text{litros}}{\text{minutos}}$$

El dato anterior por medio de la hoja técnica de (Cole Parmer-polystat, 2017) mediante la referencia 1C6 se accedió a la hoja de datos que se observa en la Figura 161 con lo que se halla la potencia mediante el caudal, resultando un aproximado de 225mbar o 22500pa.

Teniendo la potencia de la bomba en pascales mediante la fórmula siguiente (HERNANDEZ, 2012).

$$Pot_h = \mu * H_n$$

Sabiendo que

$$H_n = \text{Altura Neta}$$

$$Pot_h = \text{potencia hidráulica}$$

$$\mu = \text{peso específico}$$

$$\mu = \delta * g$$

Se obtiene el despeje de la altura neta que tiene la bomba, quedando así

$$H_n = \frac{Pot_h}{\mu}$$

$$H_n = \frac{22500pa}{9800 \frac{kg}{m^2 s^2}} = 2.2959m$$

Este valor corresponde a la altura máxima ideal que tendría la bomba para elevar el fluido sin considerar las pérdidas que todo sistema hidráulico posee.

Donde al saber la equivalencia de pascales en kg, metro y segundos se cancelan las unidades generando un resultado en metros, entonces 1 pascal es igual a

$$pa = \frac{kg}{m * s^2}$$

No obstante, es necesario saber las pérdidas que genera el sistema de tuberías a la bomba debido a que dicho sistema podría detener el flujo de líquido, se pueden calcular las pérdidas de la siguiente manera (HERNANDEZ, 2012)

$$H_f = \frac{f * L}{d} * \frac{V^2}{2g}$$

Donde cada término significa

$$H_f = \text{pérdida de carga}$$

$$f = \text{coeficiente de fricción}$$

$$L = \text{longitud tubería}$$

$$d = \text{diámetro interno tubería}$$

$V = \text{velocidad fluido}$

Y siendo f un coeficiente natural para cada tipo de líquido donde se expresa como (HERNANDEZ, 2012)

$$f = \frac{64}{Re}$$

Donde el número de Reynolds es expresado como

$$Re = \frac{d * v * \delta}{\mu}$$

Cuyos nuevos términos significan

$v = \text{velocidad del fluido}$

$\mu = \text{viscosidad dinámica del fluido}$

En el caso del presente proyecto fue usado agua fría para condensar el agua que circula por la torre de destilación en forma de vapor, entonces se tienen los valores de densidad y viscosidad del fluido

$$\delta = 997 \frac{kg}{m^3}$$
$$\mu = 0.001139 \frac{pa}{s}$$

El caudal del fluido como se mencionó anteriormente fue un dato hallado de forma empírica

$$Q = 12.8 \frac{\text{litros}}{\text{minutos}}$$
$$Q = 0,000213 \frac{m^3}{s}$$

Dicho dato también se usará para calcular la velocidad del fluido, sabiendo el área de la tubería con los datos mostrados a continuación

$$A = \pi * r^2$$
$$d = 0.01075m$$
$$r = 0.005375m$$
$$A = 9.07625 * 10^{-5}$$

Entonces así fue posible calcular este dato dando el resultado mostrado

$$v = \frac{0,000213 \frac{m^3}{s}}{9,07626 * 10^{-5} m^2} = 2,346782 \frac{m}{s}$$

Así teniendo ya todos los datos se puede saber el número de Reynolds que se calcula a continuación

$$Re = \frac{0.01075m * 2,34678 \frac{m}{s} * 997 \frac{kg}{m^3}}{0.001139 \frac{kg}{m * s}} = 22082$$

Debido a que el número de Reynolds resultó ser mayor de 4000 se deduce que el fluido es turbulento y para calcular f se debe hacer teniendo en cuenta en coeficiente de rugosidad del material asociado en una formula hecha por Altshul (ANAYA DURAND, CAUICH SEGOVIA, FUNABAZAMA BÁRCENAS, & GRACIA MEDRANO BRAVO, 2014)

$$f = 0,11 \left(\frac{k}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}$$

$$k = 0,006cm = \text{coeficiente de rugosidad del acero inoxidable}$$

Lo anterior permite hallar el valor final de fricción para el sistema de tuberías de acero inoxidable que conectan la bomba circulatoria con el condensador de la torre de destilación, lo que genera un resultado aproximado de

$$f = 0,11 \left(\frac{0,006}{1,075} + \frac{68}{22082} \right)^{0,25} = 0,033557$$

Sabiendo ello ya se podría calcular las pérdidas en la tubería

$$H_f = \frac{f * L}{d} * \frac{V^2}{2g}$$

$$H_f = \frac{0,033557 * 5m}{0,01072m} * \frac{\left(1,15 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * 9,8 \frac{m}{s^2}} = 1,056m$$

Dichas pérdida se restan a la altura neta de la bomba y el resultado generado sería la altura real máxima que la bomba podría llegar a elevar el fluido del caso (agua).

4.3. RESULTADO FINAL INTERFAZ HUMANO MÁQUINA

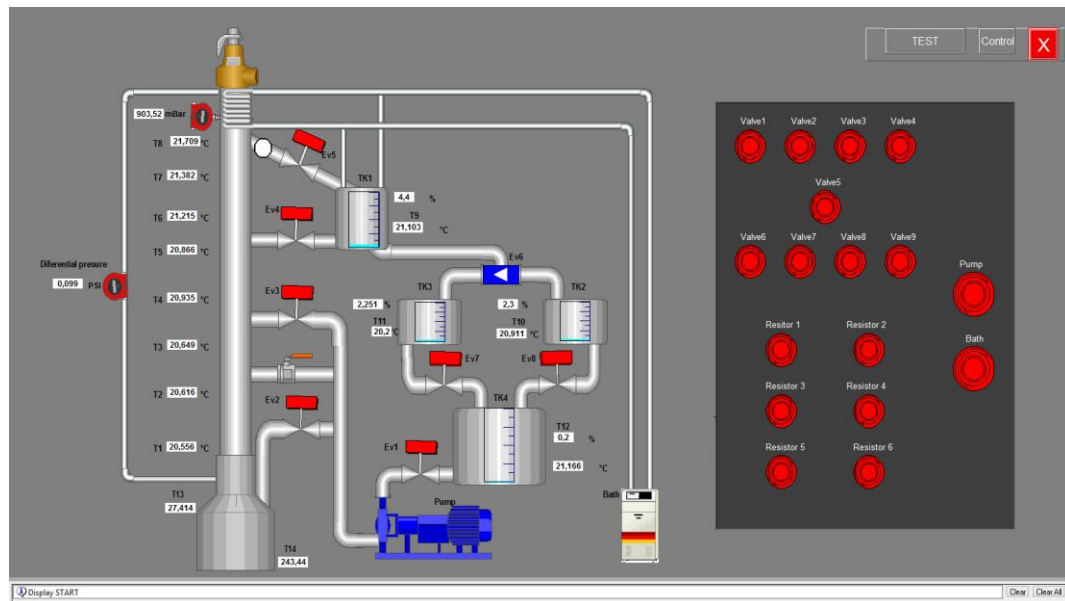
El resultado final de la interfaz humano máquina fue una implementación gráfica de todo el modelo de la planta de destilación, además, el sistema de tanques de recolección y nivel como se muestra en la Figura 162, respetando la normatividad para interfaces se planeó el uso de colores neutros en todo lo que sería la herramienta de interacción, además se añadió señalización de encendido y apagado para complementar el uso de la herramienta.

La HMI se desarrolló en diferentes partes tratando de hacerse lo más explícita posible de tal forma que para el usuario sea útil y fácil de manejar, en primera parte al abrir la interfaz se encuentra con la Figura 162, allí se muestra en plano general de lo que se encuentra constituida la planta real, está primera ventana únicamente es de visualización, allí se pueden observar las diferentes variables en tiempo real, además, se puede ver el estado de cada dispositivo como válvulas y

bombas, en la parte izquierda como herramienta complementaria ya mencionada elemento que permite visualizar el estado de cada dispositivo, estando en rojo cuando esté cerrado o apagado y verde cuando este encendido o abierto.

Para adentrarse más a los dispositivos se programaron ventanas auxiliares a la pantalla principal las cuales se abren dependiendo la herramienta con la cual se quiera interactuar, por ejemplo de querer abrir una válvula, se hace clic sobre la válvula y se abrirá una ventana donde permitirá accionar cada una de ellas, así con cada una de los otros elementos.

Figura 162. Pantalla de inicio HMI

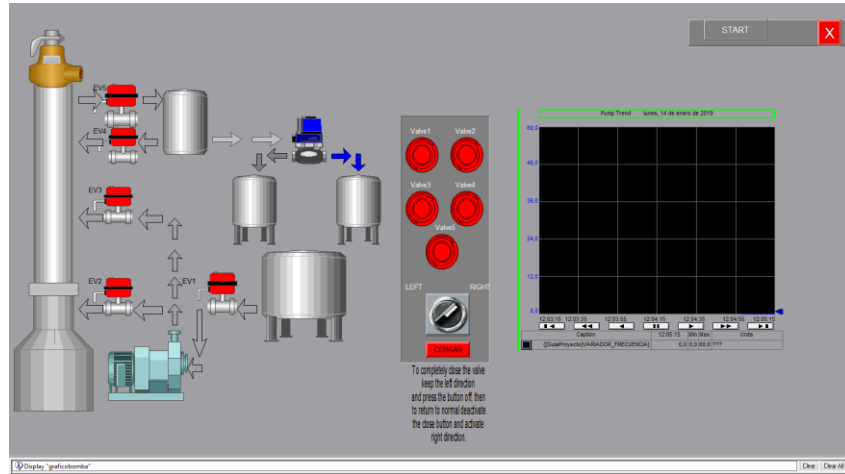


Fuente: autor

Al hacerse clic sobre alguna válvula desde la uno a la cinco se ingresa directamente a la ventana de acción como se muestra en la Figura 163, allí se pueden observar igualmente el estado de las válvulas, pero además, se puede accionar cada una de ellas permitiendo abrir o cerrar como se requiera, las valvulas rojas son de encendido on/off, la válvula azul tiene una característica extra que es tener tres vías, el comportamiento natural de la válvula no permite cerrarse totalmente pero debido a modificaciones internas ahora se puede cerrar, siendo así, en la parte central de la pantalla se encuentra una llave selectora la cual indica la posición en la que se encuentra la válvula, de quererse izquierda o derecha, además, se puede cerrar totalmente, colocando la válvula en sentido izquierdo y oprimiendo el botón cerrar, así después de unos segundos de acción quedará totalmente cerrada y no permitirá paso de líquido en ningún sentido, ahora para volver a abrir la válvula se desativa el boton cerrar y se activa el sentido derecho de la válvula, luego de haberse situado en posición ya se podrá

enviar fluido a cualquier dirección. Haciendo clic en la imagen de la bomba se abre un histórico de datos que permite visualizar los últimos movimientos en frecuencia de la bomba peristáltica.

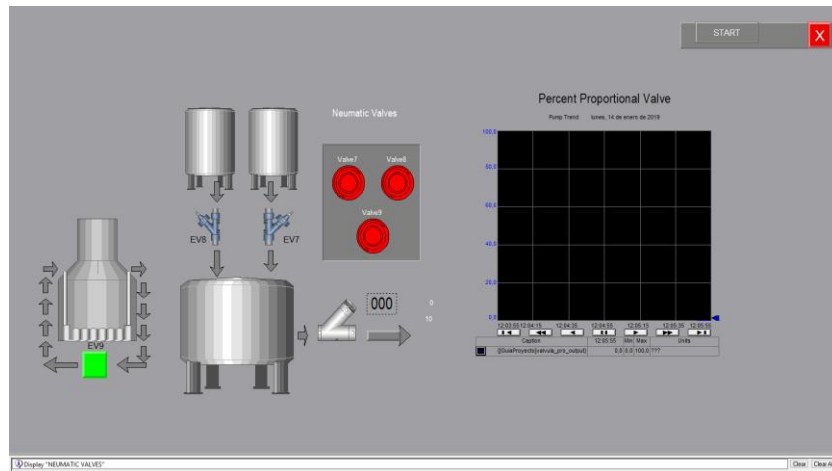
Figura 163. Ventana actuadores eléctricos ON/OFF



Fuente: autor

Se ubicaron las válvulas neumáticas aparte de las eléctricas, siendo así al hacer clic en las válvulas siete y ocho se ingresa a la ventana de accionamiento de las mismas como se muestra en la Figura 164, donde se muestra en detalle los sentidos de cada una, además se permite accionar enviando señales de encendido o apagado y como se cuenta con una válvula proporcional se puede dar un porcentaje de apertura, únicamente haciendo clic sobre la numeración que aparece al lado del actuador en la imagen, permitiendo así interactuar con cada dispositivo. Aquí se permite además de visualizar y actuar las válvulas, se puede tener un histórico de datos de lo que ha sido la apertura de la válvula proporcional en los últimos minutos.

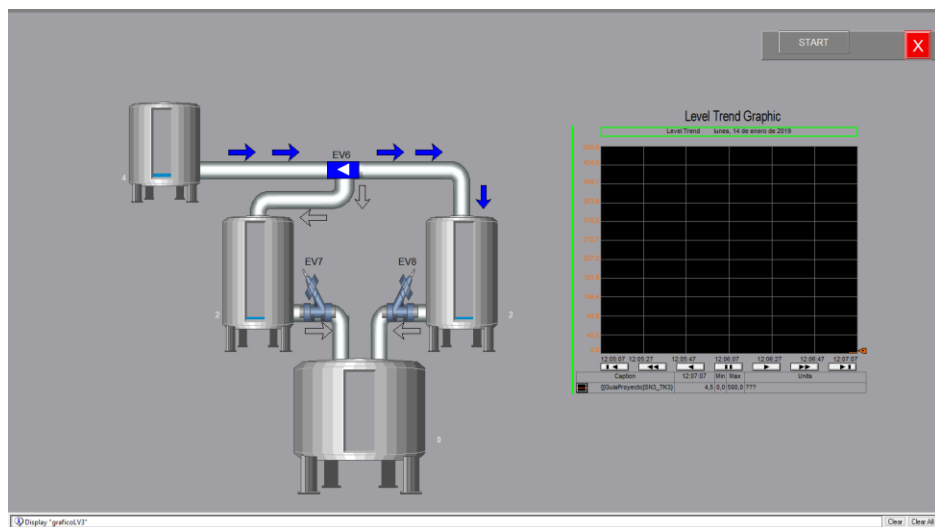
Figura 164. Ventana actuadores neumáticos



Fuente: autor

Una de las tres variables medidas en la planta es Nivel, aquí se tiene en cuenta el sistema de tanques con el cual se pretende almacenar y controlar líquidos bien sea desde la destilación o externos que permitan llevar un proceso continuo, cada tanque cuenta en su salida con una válvula que permitirá variar el nivel en un punto deseado. Como ha sido mencionado para llegar a una forma explícita de cada elemento, se creó una ventana para cada variable y actuador, entonces al hacer clic en los tanques se abre la ventana de la variable nivel como se observa en la Figura 165, donde muestra la cantidad de tanques medidos y además si se hace clic en cada uno de esos tanques se mostrará un gráfico del histórico del nivel en los últimos minutos

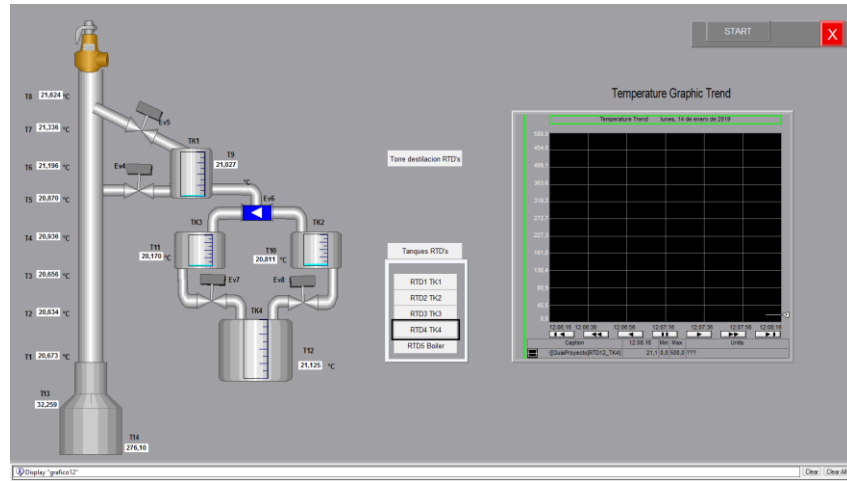
Figura 165. Ventana variable nivel



Fuente: autor

La variable temperatura es la más importante para la presente tesis debido a la implementación del control de temperatura para el boiler, sin embargo se le dio la misma importancia en el detalle a cada variable, no obstante debido a la cantidad numérica de elementos transmisores de temperatura se programó una ventana que permitiese tener al detalle cada uno de los transmisores, como se observa en la Figura 166 en la parte izquierda de la ventana se muestran todos los transmisores y las señales recibidas en tiempo real desde el PLC, además en el centro de la ventana se encuentran dos pestañas desplegables donde se encuentran al detalle cada herramienta de medida donde al hacer clic se despliega un gráfico detallado del histórico de los datos en los últimos minutos .

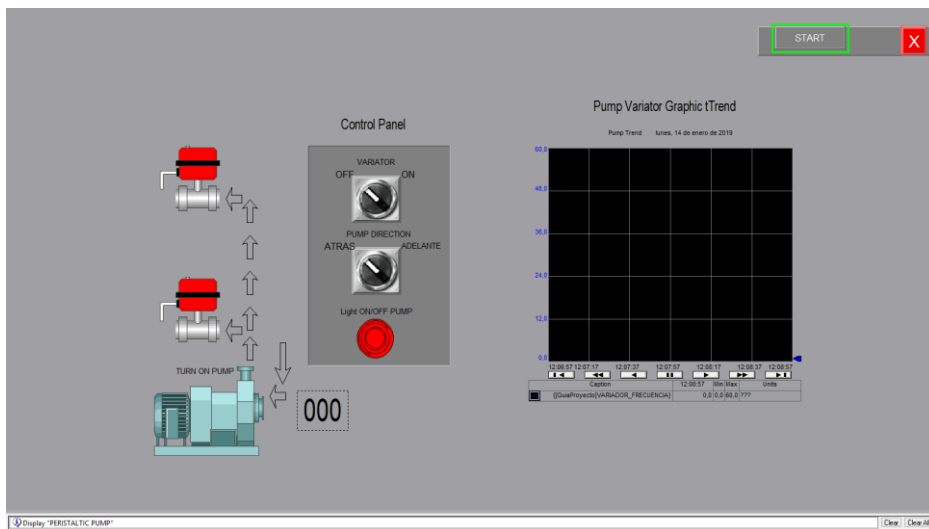
Figura 166. Ventana variable temperatura



Fuente: autor

De forma sencilla pero eficaz se programa una ventana que acciona la bomba peristáltica, debido a que esto conlleva un proceso anterior de encendido se debe tener en cuenta lo siguiente para poder encender, primero es necesario saber y tener en cuenta el sentido en que se quiere bombear ya que ambos sentidos son posible los cuales uno lleva al boiler y el otro al tanque 4, entonces, sabiendo lo anterior se hace clic en el dibujo de la bomba lo cual accionará el contactor físico que permite el paso de energía hacia el motor, segundo se debe encender el variador el cual guía a la bomba y controla la velocidad, tercero colocar el sentido de giro de la bomba y cuarto hacer clic en los números al lado de la bomba los cuales permitirán variar la velocidad de 0 a 60hz como máximo, se ilustra en Figura 167. Además del proceso de encendido se puede visualizar al detalle el histórico de datos del variador, el cual controla la velocidad de la bomba.

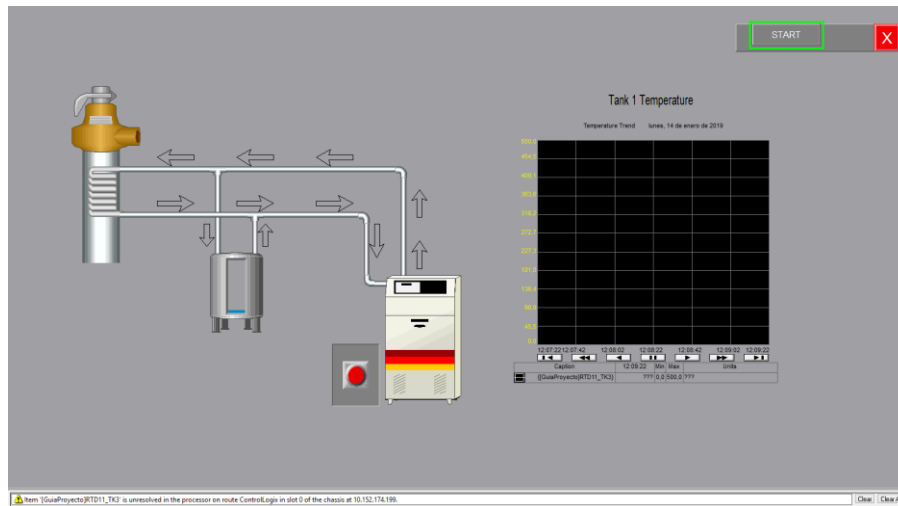
Figura 167. Ventana actuador bomba



Fuente: autor

El sistema de refrigeración, debido a su naturaleza, por el modelo del dispositivo no cuenta con características programables de forma remota es decir, solo se puede programar manualmente por lo que lo único que se puede automatizar es el encendido, no obstante de forma interactiva se hizo una ventana de acción para éste, de forma tal que se muestra el sentido de flujo del líquido y además se puede visualizar la temperatura del tanque uno, el cual es alimentado con dicho líquido frio, entonces se podrá ver qué tan eficiente esta siendo con respecto la capacidad de enfriamiento.

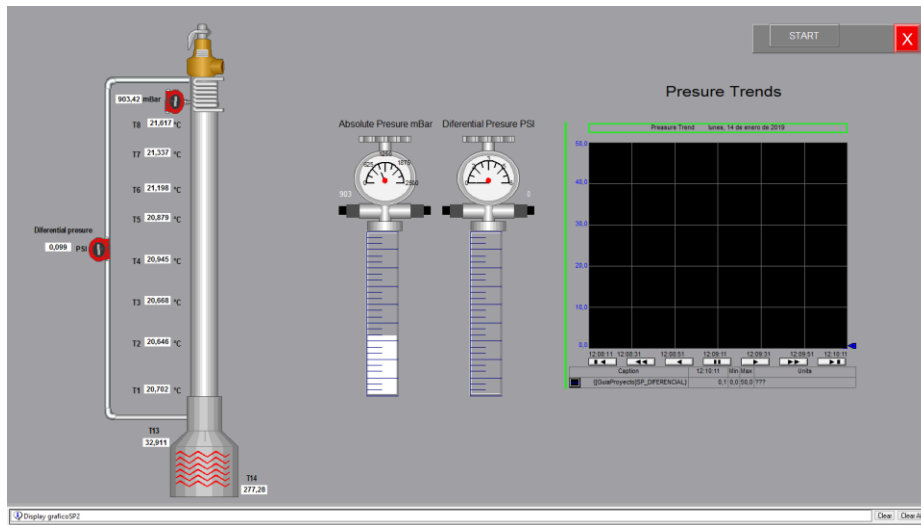
Figura 168. Ventana actuador circulador



Fuente: autor

La variable presión es indispensable para el proceso de destilación debido a que una subida inóspita de presión puede causar accidentes de cualquier tipo, entonces es importante tener supervisados los cambios de presión, por ende la ventana mostrada en la Figura 169 presenta en detalle y de forma dinámica la presión en tiempo real, entonces como se observa aparecen dos manómetros que hacen alusión a los instrumentos puestos en campo, cada uno de ellos mide una presión diferente, esto se indica como título, además de tener una idea de la ubicación exacta mostrada en el gráfico de la izquierda de la ventana. Como complemento cada sensor cuenta con un gráfico del historial de los datos en los últimos minutos.

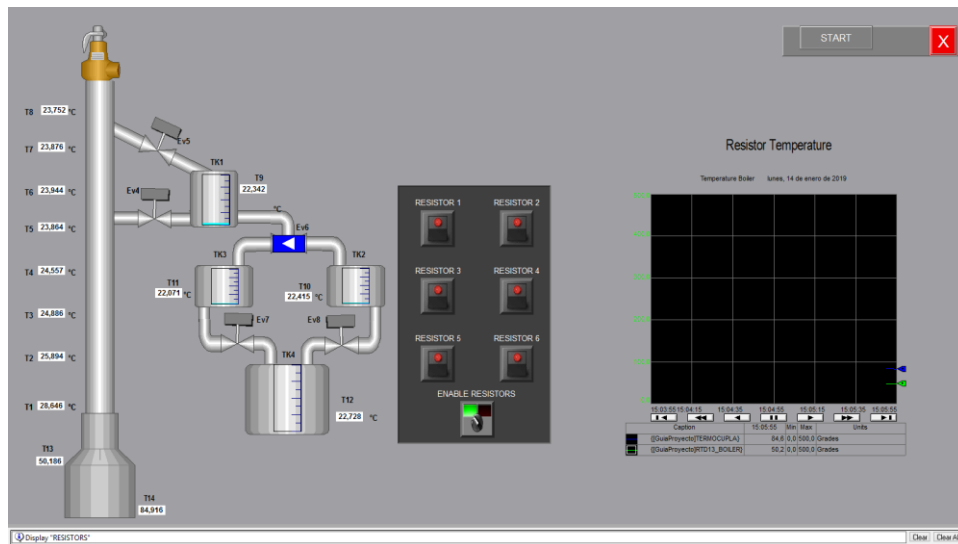
Figura 169. Ventana variable presión



Fuente :autor

El sistema de temperatura es manipulado directamente desde la ventana mostrada en la Figura 170, es decir que desde allí se puede accionar los actuadores de calor, tenéndose en cuenta que al accionar de esta forma quedarían de forma directa algo nosivo para los elementos, de igual forma se encuentra el dispositivo habilitador, que permite el acceso a corriente de las resistencias, sin que éste se encuentre accionado las resistencias no tendrán acceso a energía.

Figura 170. Accionamiento de actuadores resistivos de calor



Fuente:autor

Las características con las que cuenta la interfaz HMI desarrollada son:

- Supervisión del sistema de nivel
- Supervisión del sistema de temperatura en toda la planta
- Supervisión del sistema de presión de la torre de destilación
- Accionamiento de todas las válvulas de la planta
- Accionamiento y control de velocidad de bomba peristáltica
- Accionamiento del enfriador circulador
- Control del sistema de temperatura en el boiler.
- Navegación a través de la interfaz
- Almacenamiento de histórico de datos

Entre la normatividad que se tiene en cuenta al momento de desarrollar una interface gráfica se tiene:

- ISO 11064-5 Ergonomic design of control centres – Part 5 Displays and controls First Edition 2008-07-01)
- DEP 30.00.60.16-Gen. Human factors engineering – Attention Hierarchy coding for graphical displays April 2006)
- DEP 30.00.60.15-Gen. Human/machine interface and control room design Human factors engineering May 2004
- API 557 Process Control Systems Functions and Functional Specification Development2004 Part 1
- EEMUA PUB 201 Process plant control desks utilising human-computer interfaces A guide to design, operational and human interface issuesJan 1, 2002.
- ISA–S5.5–1985 Graphic Symbols for Process Displays Approved 3 February 1986
- DEP 32.00.00.11-Gen. Human-machine interface in a control room July 1997
- HMI HANDBOOK (Bill Hollifield, Dana Oliver Lan Nimmo & Eddie Habibi2008

4.3.1 RECOMENDACIONES ACERCA LA HMI Y APLICACIONES

Se recomienda tener conocimientos básicos en los Software de Rockwell Automation para manipular la HMI.

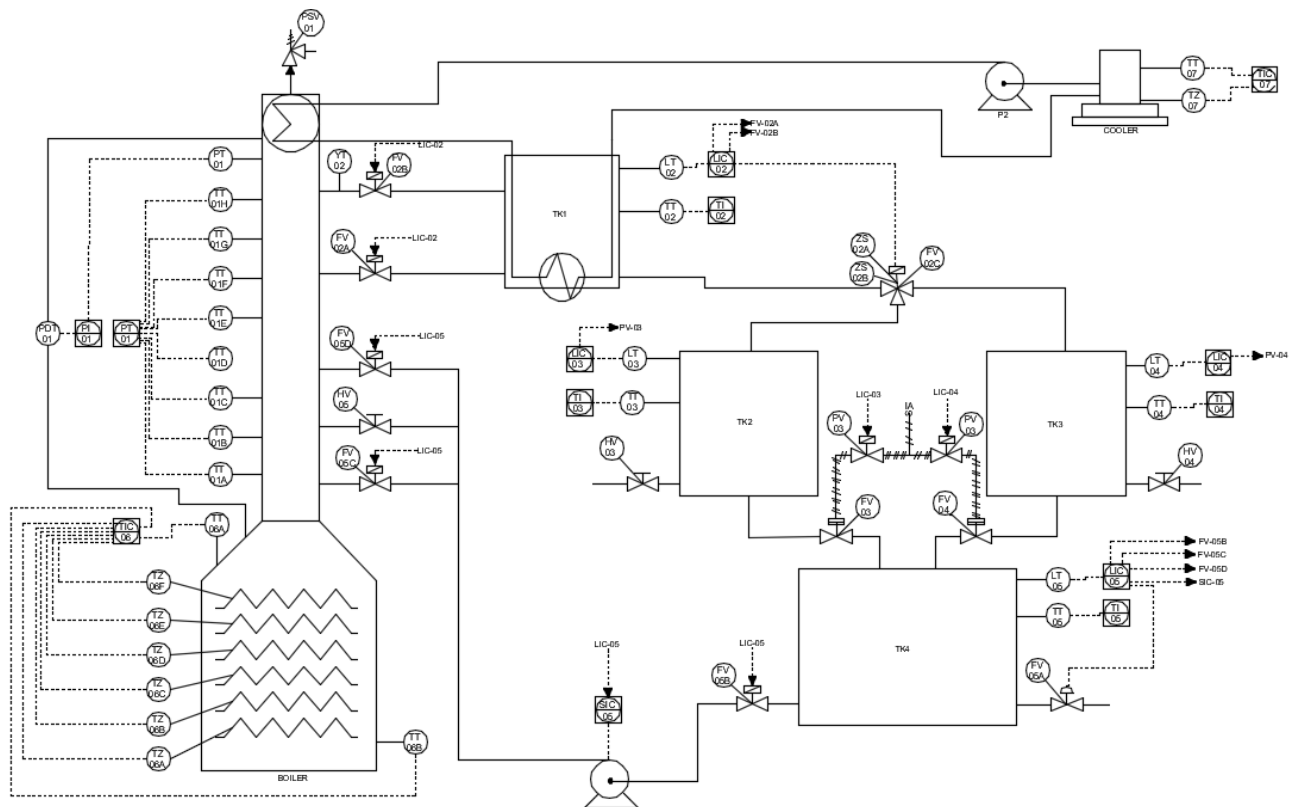
Se recomienda no poner las resistencias de calentamiento en modo directo desde la HMI, únicamente accionar desde el programa de Studio 5000 con el variador de PWM que varía la potencia de las mismas.

La aplicación de la HMI se encuentra compacta y solo se necesita abrirla desde la aplicación, no se recomienda abrir desde el programa maestro.

4.4. DEFINICIÓN DE LAZOS DE CONTROL P&ID

Los lazos de control son definidos por la cantidad de elementos que contenga la planta y que hayan sido propuesto por los diseñadores, hay que tener en cuenta que un lazo de control se compone básicamente de tres partes, la primer parte es de actuadores, situado en el escalafón bajo de la pirámide de automatización mencionada en el planteamiento teórico del libro, la segunda parte siendo el penúltimo escalón de la pirámide se encuentra los transmisores y enseguida se encuentran los controladores, mencionadas partes componen un lazo de control, de no tenerse en totalidad se puede hablar de lazos de visualización y monitorización. Para la planta de destilación conociendo los elementos que la componen se llegó al P&ID de la Figura 171, allí se encuentra actualizado hasta la fecha de entrega del presente documento todos y cada uno de los lazos posibles de control y monitorización en detalle.

Figura 171. P&ID Planta de destilación.



Fuente: Autor

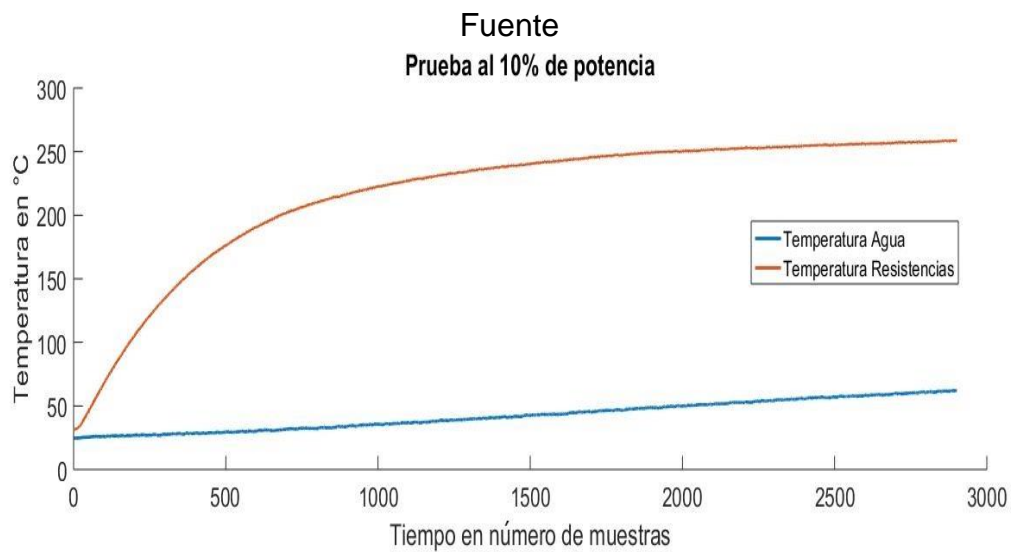
4.5. COMISIONAMIENTO DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO DE LA PLANTA DE DESTILACIÓN

El sistema de calentamiento se operó usando PWM a una potencia baja para realizar los calentamientos iniciales de las resistencias, estos calentamientos se realizaron siempre garantizando una transferencia de calor con el boiler lleno de agua. Una vez se realizaron estos precalentamientos y se verificaron las corrientes manejadas por cada una de las resistencias, además de las señales del ancho de pulso presentes en los relés de estado sólido, se pasó a efectuar calentamientos como se describen a continuación y seguidamente se realizó el modelamiento matemático del sistema basado en dichas pruebas.

4.5.1 Pruebas de comisionamiento

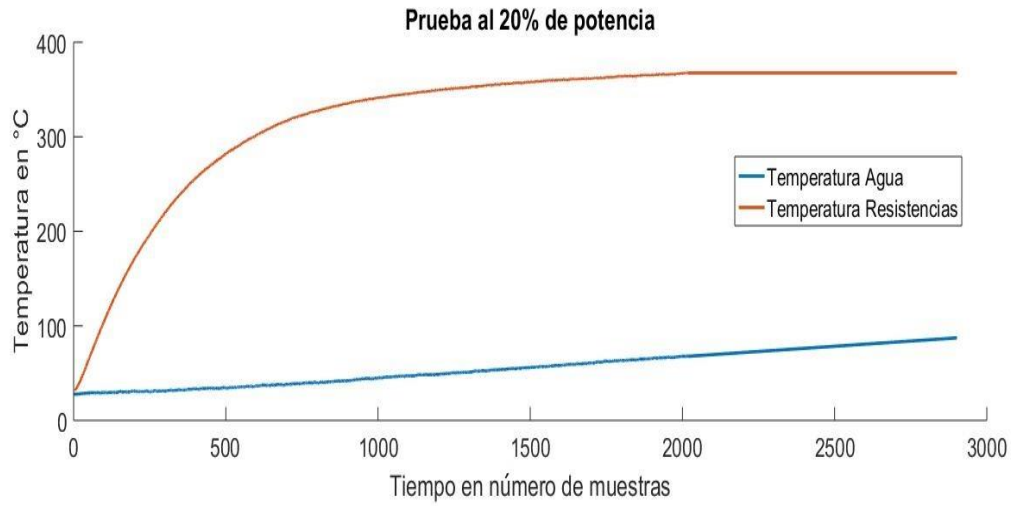
En el proceso de pruebas de las resistencias se tomó el programa del PWM para hacer la variación de potencia del sistema de calentamiento donde se programó diferentes potencias y se examinó el comportamiento de la planta durante 3000 muestras, es decir, 9000 segundos desde las resistencias de calentamiento y la temperatura del agua siendo el objetivo final, los resultados obtenidos son los mostrados a continuación, para una potencia según un PWM del 10%, 20%, 30% y 40% se obtuvieron las gráficas de la Figura 172, Figura 173, Figura 174 y Figura 175 respectivamente. En estas figuras se muestra la temperatura obtenida gracias a TT06A y TT06B de la Figura 171, que corresponden a la temperatura del agua dentro del boiler y a la temperatura de la resistencia del fondo del boiler.

Figura 172. Comportamiento del sistema calefactor al 10% de potencia recibida.



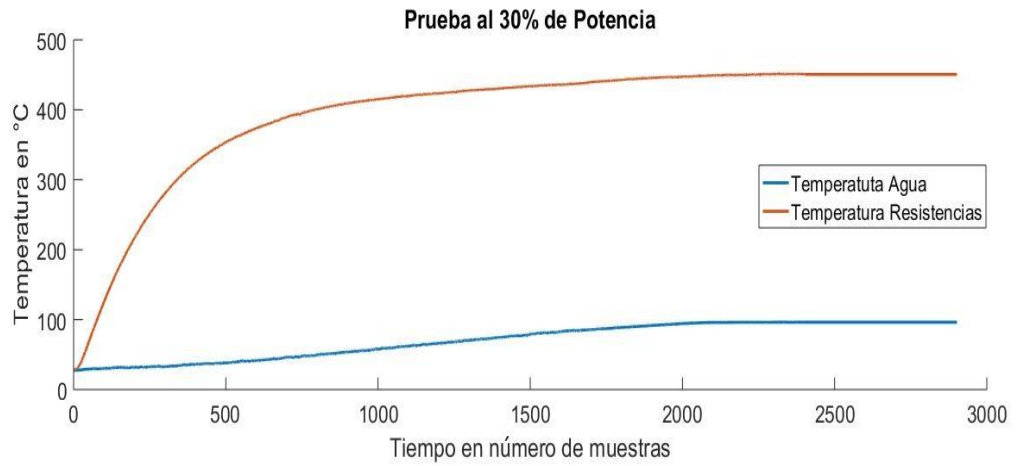
Fuente: Autor

Figura 173. Comportamiento del sistema calefactor al 20% de potencia recibida.



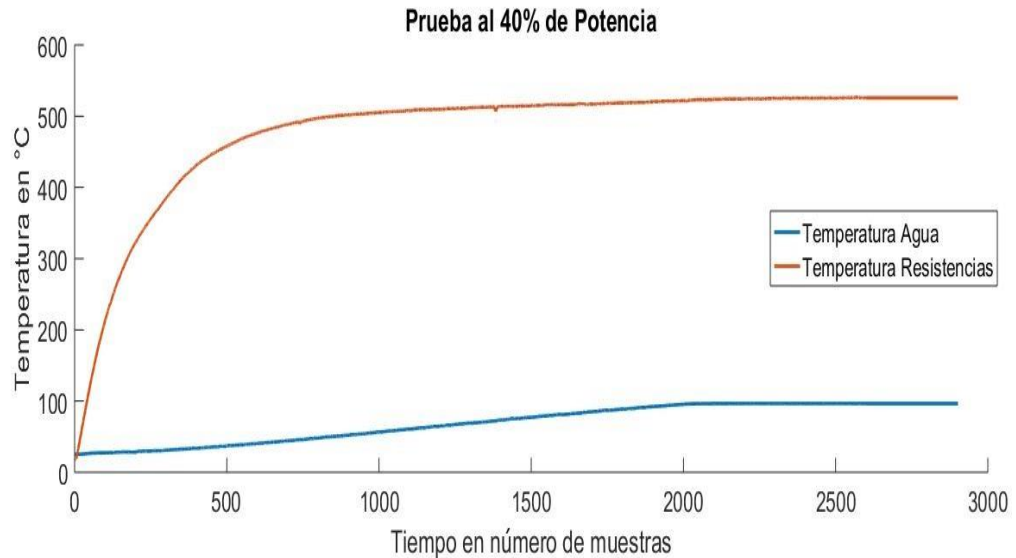
Fuente: Autor

Figura 174. Comportamiento del sistema calefactor al 30% de potencia recibida.



Fuente: Autor

Figura 175. Comportamiento del sistema calefactor al 40% de potencia recibida.

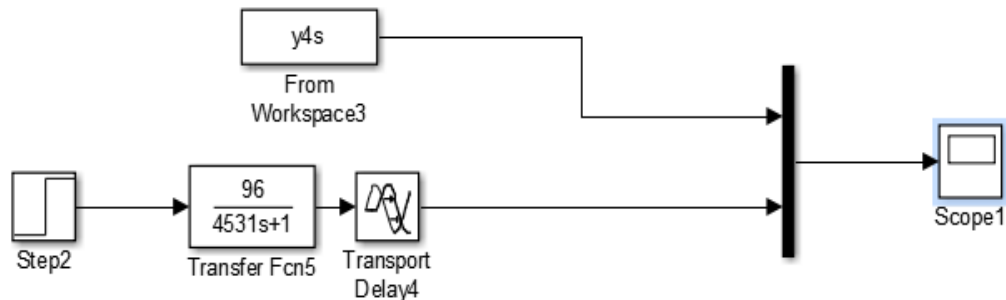


Fuente: Autor

4.5.2. Simulación del modelo de la planta en lazo abierto

Con el método de modelamiento propuesto por el libro de (OGATA, 2010) se logró obtener un modelo cercano al real hallado mediante la respuesta de la planta a un paso de 40% de potencia. La forma de prueba de la aproximación del modelo hallado, es la simulación mediante simulink aproximando las características reales con la que se obtuvo el modelo, de tal forma que se graficó la reacción de la planta y se logró comparar con el modelo real obtenido, usando la herramienta "from workspace" se trae la gráfica real pasando de datos a gráfico en simulink.

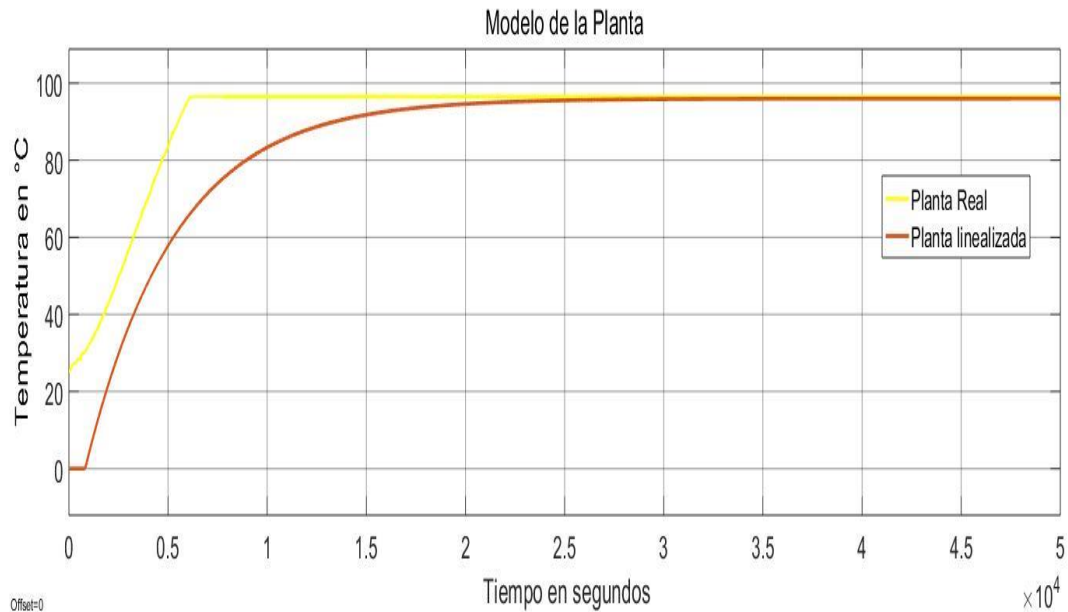
Figura 176. Modelo de la planta



Fuente: Autor

La respuesta del modelo obtenido es de tonalidad naranja, teniendo como referencia la gráfica de color amarillo que corresponde a los datos reales de la planta, allí se puede observar la cercanía de las dos respuestas, con un error pequeño a pesar que no se usó ningún método numérico de aproximación y teniendo en cuenta que en la simulación no se tiene en cuenta la temperatura inicial con la que arranca el líquido.

Figura 177. Datos reales de la planta y resultados del modelo simulado

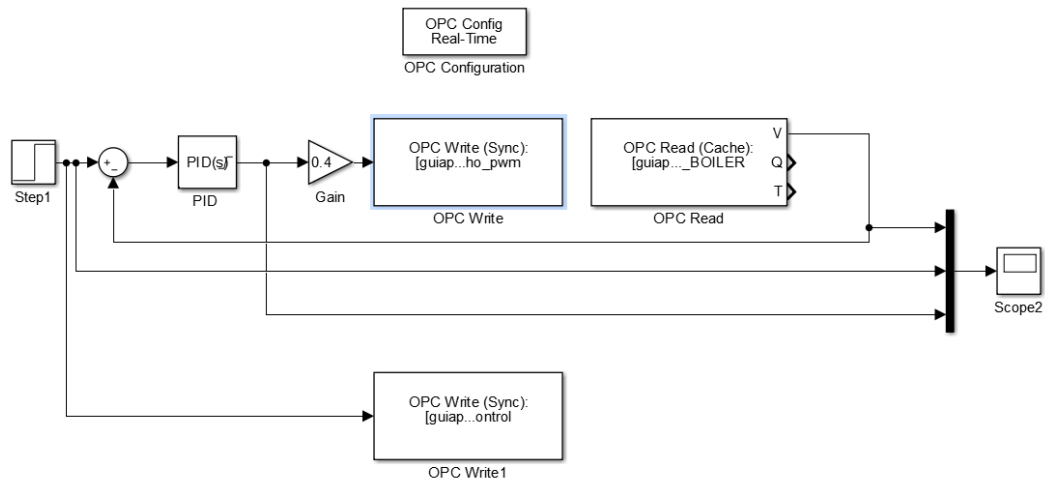


Fuente: Autor

4.6. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN OPC

Como fue explicado en el capítulo 3, el sistema OPC de Matlab posee tres módulos los cuales fueron explicados con detenimiento, aquí se muestra cómo se conforma toda la implementación del controlador mediante OPC, teniendo dos módulos de escritura y uno de lectura funcionando, siendo los dos primeros usados para hacer llegar la información del setpoint y la señal del controlador para ser graficado en el programa Studio 5000, además, el de lectura funcionando para traer la información de la salida de la planta a Matlab para lograr de igual forma graficar y completar el lazo cerrado de control.

Figura 178. Sistema OPC implementado



Fuente: Autor

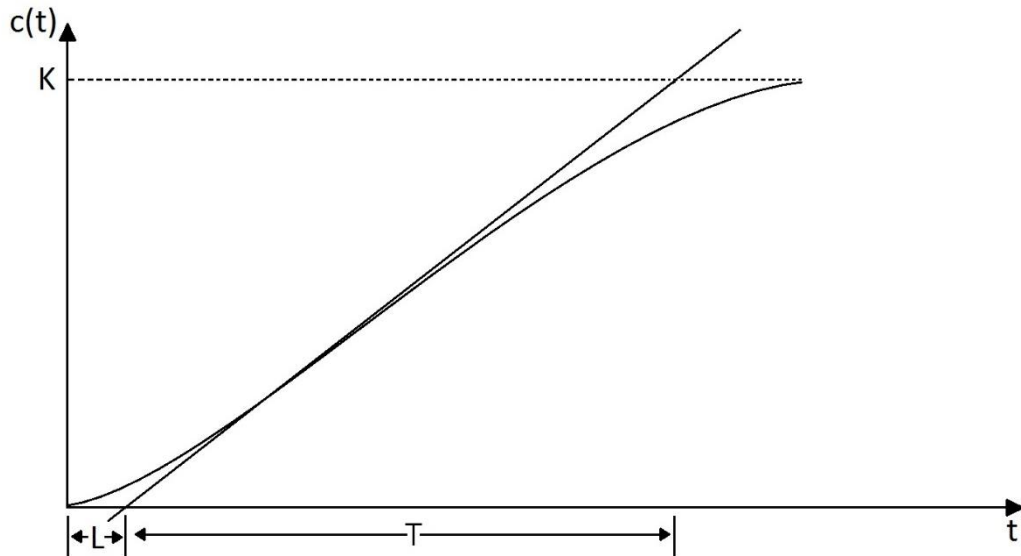
4.7. DISEÑO DEL CONTROLADOR PID PARA EL LAZO DE TEMPERATURA

Hechas las pruebas de temperatura y la recolección de datos del comportamiento del sistema de temperatura mediante el Controlador control logix, se estudiaron las formas de diseño de controladores PID y hallando la planta mediante el proceso de Sintonización de PID de Ziegler and Nichols (OGATA, 2010), el cual dice que mediante la entrada de un escalón unitario a la planta y obteniéndose los datos experimentales se puede llegar a una aproximación del modelo de la planta teniendo en cuenta el tiempo de retardo y el tiempo establecimiento de la planta como se muestra en la Figura 179.

4.7.1 Base teórica del diseño del controlador PID.

En base al texto (OGATA, 2010) se obtuvo la información para aproximar el modelo de la planta de temperatura, entonces según el texto si el modelo obtenido mediante una entrada a escalón unitario resulta similar a como se muestra en la Figura 179 se puede aproximar a un sistema de grado 1 multiplicado por un exponente denotando el retardo, donde los términos L y T serán usados más adelante para formar la función de transferencia que componga el modelo.

Figura 179. Respuesta del sistema de temperatura.



Fuente : (OGATA, 2010)

Del mismo autor (OGATA, 2010) fue tomada la Tabla 11 donde se muestran las formas para calcular controladores de diferente índole desde proporcional hasta proporcional-derivativo-integral. Dicha tabla se usó en el presente trabajo para hallar los parámetros del controlador PID y lograr diseñar el controlador.

Tabla 11. Diseño de controlador PID por método Ziegler and Nichols

	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

Fuente: (OGATA, 2010)

Las fórmulas a continuación del autor (OGATA, 2010) representan el modelo aproximado de una planta de orden 1 con retardo y la forma del controlador para el cual se le diseñaran los parámetros.

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{ke^{-Ls}}{Ts + 1}$$

$$G_c(s) = Kp\left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right)$$

4.7.2 Controladores diseñados por el metodo Ziegler and Nichols

Teniendo en cuenta los anteriores parámetros de diseño se obtuvieron los datos de la Tabla 12 los cuales, están basados en Ziegler and Nichols, siendo el primer controlador un PID diseñado con dichos criterios e igualmente el segundo controlador un PI, de allí en adelante por métodos experimentales y pruebas anteriormente hechas se obtuvo que ciertas características de los controladores mejoraban o empeoraban la señal de control y con ello la salida de la planta, por ello el controlador dos, tres y cuatro fueron PI similares por sintonización fina, siendo la constante proporcional de cada controlador una fracción del anterior y así sucesivamente. Para el caso de los controladores cinco, seis, siete y ocho se tuvo en cuenta el controlador uno tomando sus valores de constantes y disminuyéndolo de tal forma que se lograse una sintonización fina.

Tabla 12. Controladores experimentados.

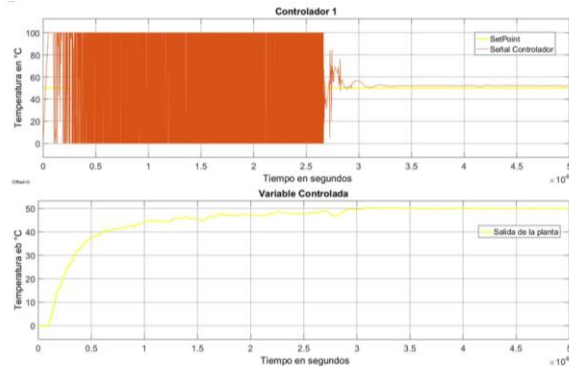
Controlador	Kp	Ti	Td
1	6,62	1642	410,5
2	4,96	2739	0
3	2,48	2739	0
4	1,24	2739	0
5	3,31	1642	102,5
6	3,31	1642	51,25
7	3,31	1642	12,81
8	3,31	3284	12,81

Fuente: Autor

4.7.3 Simulación de controladores diseñados implementándolos con modelo de la planta

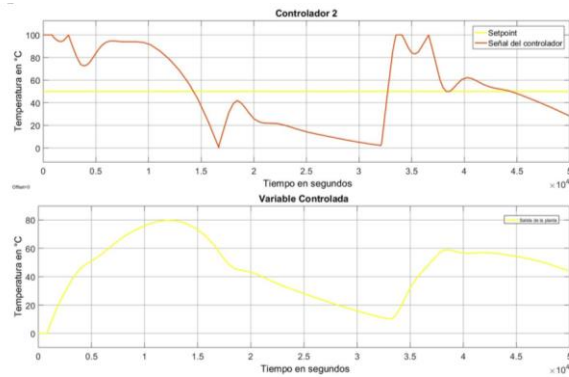
Para tener una idea aproximada de cómo podría ser el comportamiento de los controladores diseñados y únicamente para efectos visuales, se usó la herramienta simulink para simular el comportamiento de cada diseño, usando el módulo PID y modificando los parámetros según Tabla 12 se simuló y llegó a las gráficas mostradas desde la Figura 180 a la Figura 187 en orden conforme se presentaron los diseños en la Tabla 12.

Figura 180. Simulación controlador 1



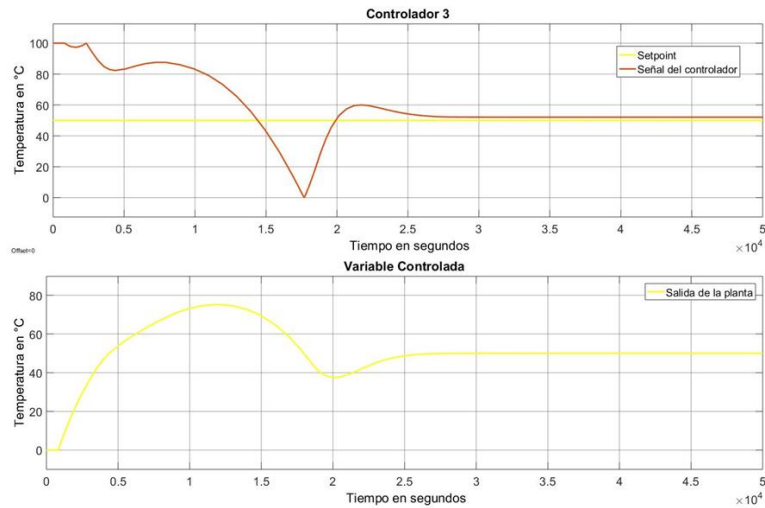
Fuente: Autor

Figura 181. Simulación controlador 2



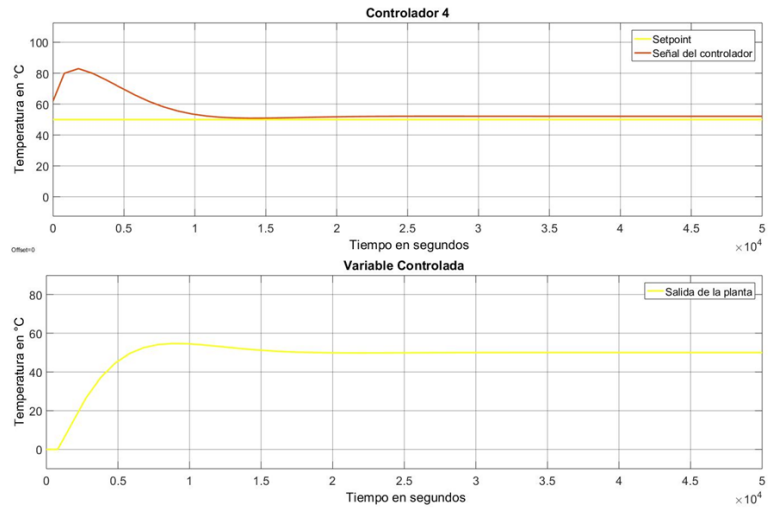
Fuente: Autor

Figura 182. Simulación controlador 3



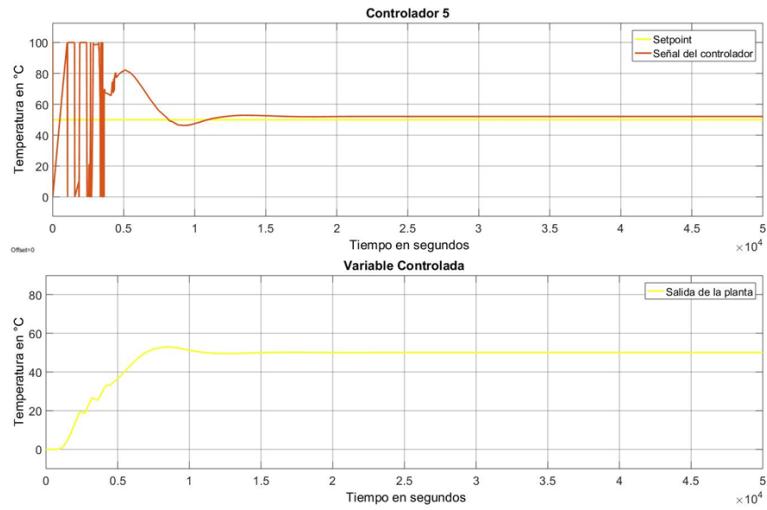
Fuente: Autor

Figura 183. Simulación controlador 4



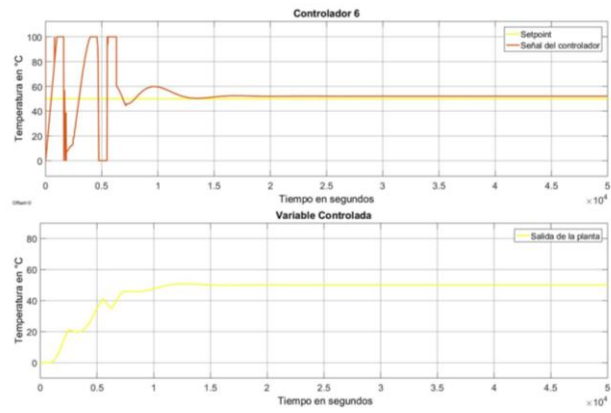
Fuente: Autor

Figura 184. Simulación controlador 5



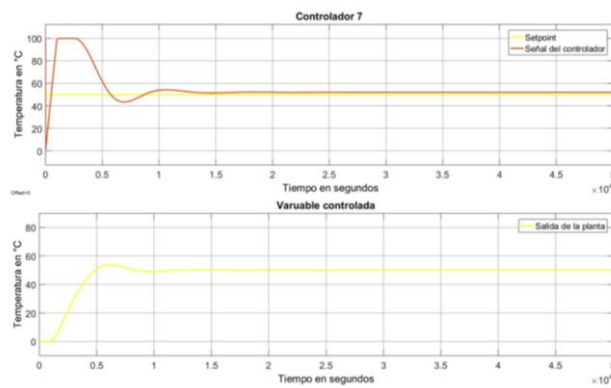
Fuente: Autor

Figura 185. Simulación controlador 6



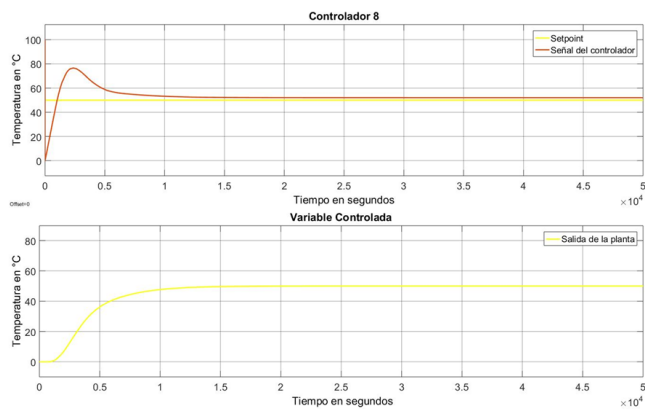
Fuente: Autor

Figura 186. Simulación controlador 7



Fuente: Autor

Figura 187. Simulación controlador 8



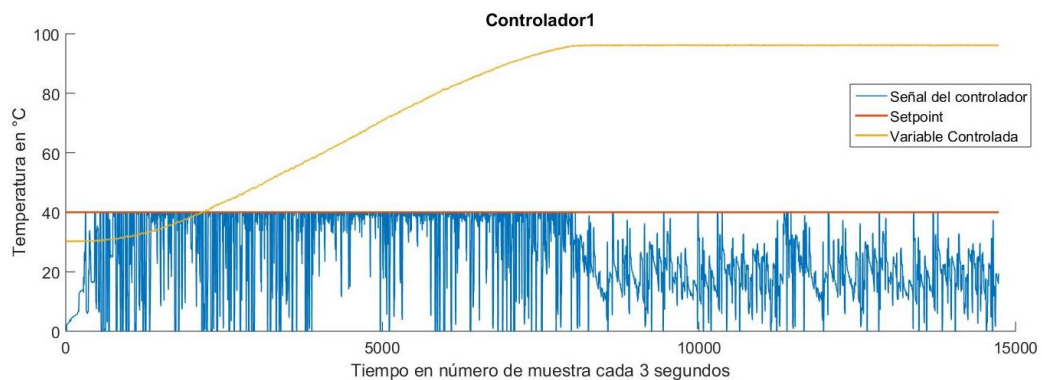
Fuente: Autor

4.7.4. Resultados experimentales de controladores diseñados e implementados en planta real mediante conexión OPC Matlab-Studio 5000.

Luego de implementar el método de comunicación OPC que permitió conectar Matlab con el software Studio 5000 se logró implementar diferentes controladores y obtener resultados mediante ambos programas, se implementaron los ocho controladores de la Tabla 12 en el mismo orden en que se encuentran y los resultados se muestran a continuación.

Iniciando la implementación de los controladores diseñados mediante Ziegler and Nichols se planteó mostrar el funcionamiento de un controlador PID, los resultados muestran una señal de control con mucho ruido el cual, podría ser efecto de ruido de medida como se aprecia en la Figura 188, además la variable controlada queda estable lejana al punto deseado, en su punto de ebullición, efecto que pudo ser causado por la entrega en exceso de potencia por el controlador, debido a experimentos anteriores se pudo prever dicho comportamiento debido a la acción derivativa la cual causa dicho efecto y como se demuestra con el controlador 2 al suprimirse dicho factor y hacerse un controlador proporcional-integral.

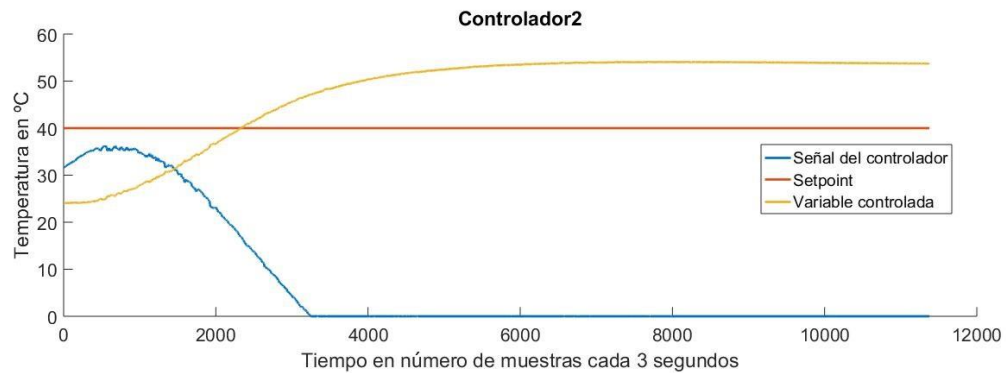
Figura 188. Resultado controlador 1



Fuente: Autor

El segundo controlador de la Figura 189 como era de esperarse por experimentos no documentados y por la simulación, por ser un controlador de tipo PI no mostró ruido de medida y se reguló la señal de control lo que permitió que la variable controlada llegara a un valor cercano a 60°C un valor casi 20°C más arriba del valor deseado efecto producido por la termodinámica de la planta que al no tener un sistema de intercambio de calor, la energía es almacenada y es liberada lentamente lo que causa que el sistema sea en extremo lento y que para llegar a verse una respuesta subamortiguada se debería haber efectuado una prueba de un mayor tiempo con mayor número de muestras.

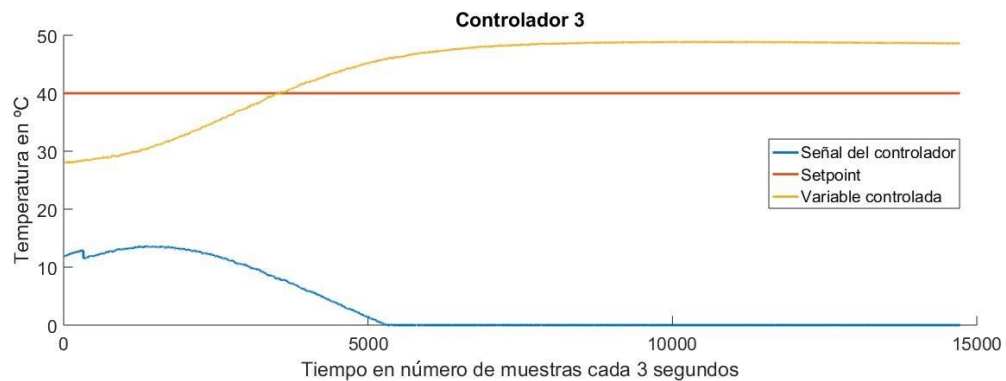
Figura 189. Resultado controlador 2



Fuente: Autor

Disminuyendo la constante proporcional a la mitad que tenía el controlador 2, se encuentran diferencias notables, hallando un controlador con una respuesta más suave y lenta a la hora de buscar el punto deseado, algo bueno ya que por tratarse de un sistema de térmico es un proceso bastante lento. Observar la Figura 190

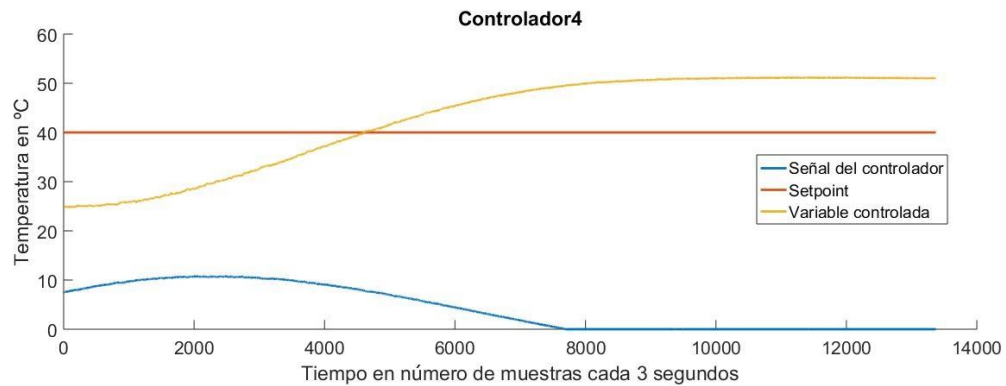
Figura 190. Resultado controlador 3



Fuente: Autor

El controlador número cuatro de la Figura 191 es un PI con una constante proporcional de $k_p/4$ respecto al segundo controlador, como se observa se sigue recatando la señal de control, siendo un poco más lenta la acción y acercándose más al punto deseado, el sobrepaso que posee la señal es aproximadamente de 10°C , ello debe a que el sistema no posee la capacidad de enfriar lo suficientemente rápido como para que el controlador encuentre el punto deseado con efectividad.

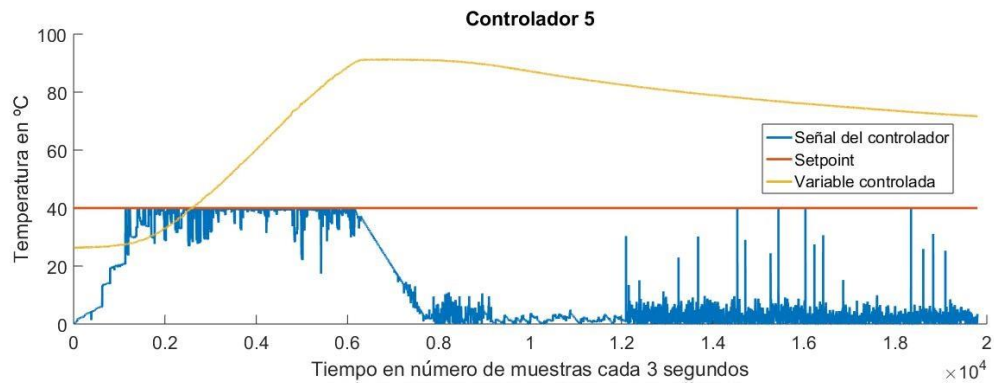
Figura 191. Resultado controlador 4



Fuente: Autor

El cambio del controlador cuatro al cinco es inmenso, se pasa de una señal de control estable a una con oscilación ruidosa ver Figura 192, esto debido a la constante derivativa que a pesar que se disminuyó siendo $td/4$ respecto al primer controlador hallado aún se encuentra inestabilidad, además hay que tener en cuenta la baja capacidad de enfriamiento del sistema de calentamiento.

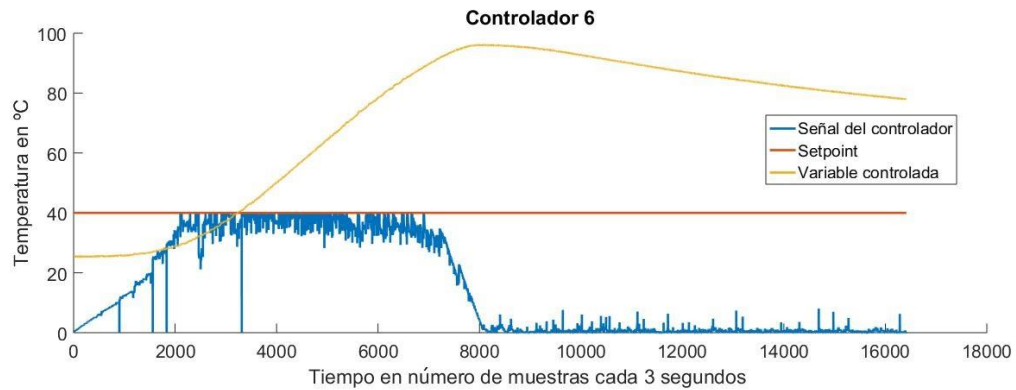
Figura 192. Resultado controlador 5



Fuente: Autor

Pasando de $td/4$ a $td/8$ respecto al primer controlador se obtuvo una diferencia satisfactoria pero no suficiente, obteniendo un punto de temperatura muy lejano al deseado Figura 193.

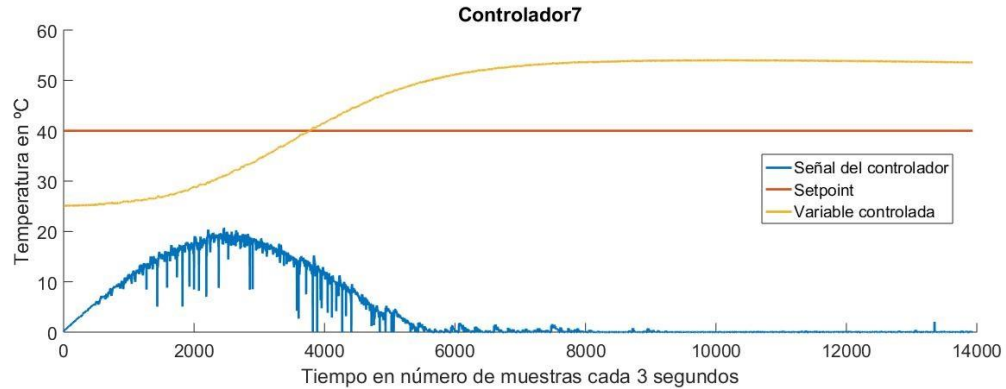
Figura 193. Resultado controlador 6



Fuente: Autor

Queriéndose sintonizar un PID se siguió experimentando sabiendo que la acción derivativa alta influye en alto ruido, entonces se propuso tomar el valor de t_d del primer controlador e implementarlo en el controlador siete pero reducido 32 veces, de forma así los resultados que se muestran en la Figura 194 es una mejora de la señal de control, una acción más rápida y con menos ruido, se logra un acercamiento al punto de temperatura deseado.

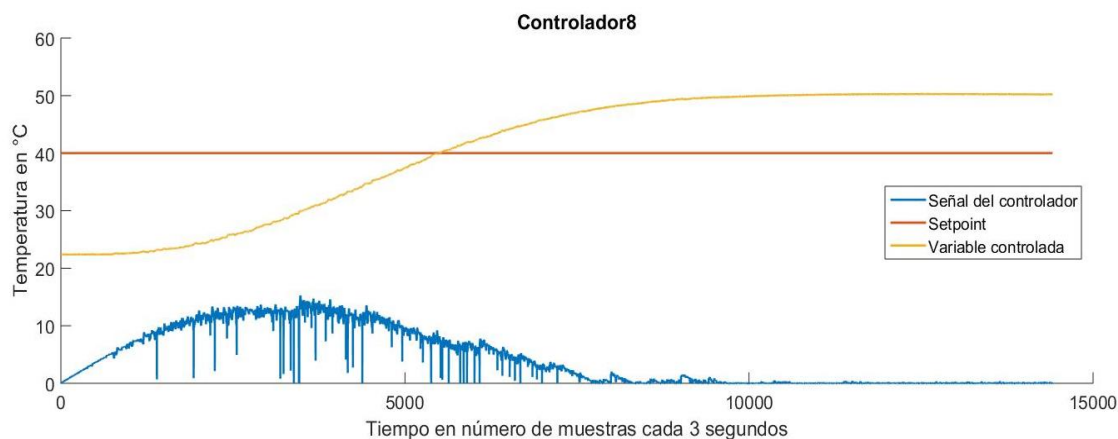
Figura 194. Resultado controlador 7



Fuente: Autor

Por último basados en los resultados del controlador siete se experimenta dejando los mismo valores que se manejaron de k_p y t_d , ahora aumentando el valor de constante integral, es decir t_i . Dicho valor se aumentó el doble siendo ésta una acción que disminuiría la acción integral debido a que en el controlador dicho t_i es el divisor de uno. Como resultado se observa una señal más suave y lento a la hora de hacer un control, algo bueno para el sistema de temperatura, además se observa una aproximación al punto deseado de calentamiento sin embargo, se muestra que aún sigue el ruido de representativos para estos casos de los controladores PID, ver Figura 195.

Figura 195. Resultado de controlador 8



Fuente: Autor

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

Se logró el pre-Comisionamiento de la planta de destilación haciéndose la respectiva reparación de todo el sistema mecánico, dejándose en óptimas condiciones elementos como tubos, mangueras y ventanas de observación de los tanques, quedando listo todo el proyecto para futuros trabajos.

El Comisionamiento de la planta fue efectuado con éxito siguiéndose a cabalidad la metodología propuesta del proyecto, cumpliéndose con la prueba y caracterización de válvulas y sensores usándose como elemento tangible el agua.

Mediante el proceso de prueba y arranque de artefactos se logró la identificación de elementos que no cumplían con los requerimientos de funcionamiento para la planta, los cuales fueron modificados teniendo en cuenta cálculos que soportaran las decisiones tomadas, siendo el cambio más significativo la reubicación del sistema refrigerante circulador, logrando así resultados exitosos para la planta, dejando en excelente condiciones dicho sistema.

Se logró la implementación de un sistema OPC que conecta a Matlab con Studio 5000 y así de tal forma fue posible la implementación de controladores en el sistema de temperatura, logrando así llegar a sintonizar un controlador mediante la técnica Ziegler and Nichols con algunos ajustes finos.

El proceso de aprendizaje llevado a cabo en el transcurso del proyecto permitió conocer la forma de programación del PLC Allen Bradley Controllogix 5571 con cpu L-71 permitiendo así lograr un documento de tesis completo lleno de información instructiva del paso a paso del manejo de la tecnología.

Se logró el diseño e implementación de un interfaz humano máquina eficaz y sencilla para el usuario, con enfoques centrados en las variables medidas de la planta de destilación, además, la supervisión y accionamiento manual de todos los elementos de la planta, por último se implementó el sistema de control el cual conecta los programas Factorytalk Studio con Studio 5000 y Matlab.

5.2. RECOMENDACIONES

A la hora de hacer pruebas de hermeticidad en los tanques se recomienda hacerse de tipo hidrostática y no neumática, ya que la segunda conlleva a riesgos físicos para los tanques y para el operario mismo. De hacerse pruebas neumáticas es aconsejable usarse menos de 10psi de presión debido a que al llenarse y no haber fugas significativas podría causar daños, además es aconsejable colocar un instrumento de presión para mantener monitorizado las peligrosas subidas de presión en los tanques.

Se recomienda ampliar la cantidad de cables conectados de las RTD en el módulo 1756-IRT8I ya que tiene la ventaja de permitir conexión de 4 hilos con dichos instrumentos, además es aconsejable usar los mismos módulos para anexar futuros sensores de temperatura termocupla.

Se aconseja implementar el sistema de enfriamiento por aire al boiler y así se mejorarán los resultados al implementar controladores.

Para efectos de verificación de la respuesta de los controladores se recomienda efectuar pruebas de duración superiores a 24 horas. De esta manera se lograrán tener índices de desempeño en los controladores para concluir resultados cuantitativos de control.

Se recomienda implementar sistemas de control avanzado aprovechando el método de implementación hallado en el presente trabajo para lazos de temperatura y nivel.

6. BIBLIOGRAFÍA

- ACOSTA, M., & URIBE, M. (2017). *Modelo de optimización para torres de destilación basado en assays de crudo (Tesis para optar al título de Ingenieras Químicas)*. Universidad Industrial de Santander (Facultad de Ingeniería Físico-Químicas): Colombia.
- AIRMATIC S.A.S. (2017). *Actuadores Rotativos, Neumáticos y Electricos*. Bogota , Colombia: A.r.t.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. (2013). *Welded Tanks for Oil Storage API650*. Washington D.C.
- ANAYA DURAND, A. I., CAUICH SEGOVIA, G. I., FUNABAZAMA BÁRCENAS, O., & GRACIA MEDRANO BRAVO, V. A. (14 de Marzo de 2014). Evaluación de ecuaciones de factor de fricción explícito para tuberías. *Educacion Química*, 25(2), 128-134. doi:1870-8404
- ANGURELL, I., CASAMITJANA, n., CAUBET, A., DINARÉS, I., LLOR, N., MUÑOZ, D., . . . VELASCO, D. (SF). www.ub.edu.co. (Facultad de INGENIERIA Inorganica, Organica, Farmaceutica y Terapeutica.) Recuperado el 15 de 04 de 2018, de <http://www.ub.edu/oblq/oblq%20castellano/index.html#>
- ASEA BROWN BOVERI. (2017). *2600T Series Pressure Transmitters Engineered solution for all applications*. Zurich: ABB.
- ASEA BROWN BOVERI. (2017). *Especificación técnica SS/261GS/AS*. Zurich: ABB.
- BLANCO, J. (s.f.). *Automatizacion y Control Regulatorio de una Columna de Destilación Extractiva a Nivel Planta Piloto para la Producción de Etanol Anhidro. (Tesis Maestría)*.
- CÁRDENAS, C., & PÉREZ, V. (2011). *Instalación y puesta en marcha de la planta de destilación de aceites esenciales en el municipio de Sucre (Santander): estudio del efecto de diferentes variables sobre el rendimiento y composición del aceite esencial de Thymus vulgaris L. por arrastre de vapor (tesis pregrado)* Universidad Industrial de Santander (Facultad de Ingeniería Físico-Químicas): Colombia.
- CASTRO, O., SUCUNUTA, N., & MANZUR, A. (2010). , Alberto. Automatización y control de un proceso de destilación de alcohol crudo y etílico por medio de un PAC ControlLogix, con redundancia en control y comunicación, usando RSLogix 5000 V16 e INTOUCH 10.0. *Centro de Investigación Científica y Tecnológica*, 1,2.
- Cole Parmer-polystat. (2017). *Cooling/heating Circulating Baths* (03/13/2017 ed.). Illinois, Estados Unidos: CULUS. doi:U01206

- ENWEREMAADU, C. (2012). Energy Conservation in Ethanol-Water Distillation column with Vapour Recompression heat PUMP. En *Advances from modeling to applications* (págs. 35-60). South Africa: ZERESHKI.
- GARCIA, E. (1999). *Automatización de Procesos Industriales*. Valencia : Universitat Politecnica de Valencia .
- HERNANDEZ, E. A. (2012). *Bombas Centrifugas*. Bucaramanga, Colombia: Universidad Pontificia Bolivariana. doi:978-958-8506-26-5
- ISS, I. S. (NF). *Comissioning and start-up directory*. Roma: INTEGRATED SERVICE SOLUTIONS.
- LLINAS, M. (2011). *Estudio de la composición química de los extractos y aceites esenciales de Hyptis sp. y Lippia alba obtenidos por diferentes técnicas de extracción. (Tesis Para optar a Ingeniero Químico)*. Universidad Industrial de Santander (Facultad de Ingenierías Físico-Químicas): Colombia.
- LOURDEZ, P. (2016). Aplicaciones del Alcohol Etilico. *Con-ciencia*, 3(5), 1-4.
- MARENGO, S. (s.f.). *Sistema de control automático para torre de destilación fraccionada*. Universidad Tecnológica Nacional: Argentina.
- MENDOZA, J., CORTES, J., & MURIEL, J. (AGOSTO de 2011). CONTROL SECUENCIAL DE UN CIRCUITO ELECTRONEUMÁTICO A TRAVÉS DE UN PLC. (U. T. PEREIRA, Ed.) *SCIENTIA ET TECHNICA*, 16(48), 191-195. doi:0122-1701
- OGATA, k. (2010). *Ingenieria de control moderna* (5 ed.). Madrid: Pearson Educación S.A. doi:978-84-8322-660-5
- OROZCO, G. (2013). *Desarrollo de una interfaz Hombre-Maquina aplicado a un sistemas de deteccion de fallos en una planta intercambiadora de Calor.(Tesis de grado ingeniero electronico)*. Universidad Catolica del Perú (Facultad de ciencias e ingenieria): Perú.
- PATIÑO, C. (2014). *Automatización de una planta piloto de Destilación Fraccionada de Alcohol*. UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA: COLOMBIA.
- PEPPERL FUCHS. (2010). *Manual Tecnico UB500-18GM75-I-V15*. Mannheim: PEPPERL FUCHS. doi:104467
- RAIGOSA FIGUEROA, A. P., & ANAYA RUIDIAZ, A. I. (2014). *SIMULACIÓN DE UN PROCESO INDUSTRIAL EN MATLAB Y CONTROL POR MEDIO DE UN PLC Y COMUNICACIÓN POR OPC (TESIS PARA OPTAR A INGENIEROS ELECTRONICOS)*. Bucaramanga Universidad Pontificia Bolivariana: Facultad de Ingenieria Eletronica.
- RORÍGUEZ, J., & DÍAZ, I. (2010). *Estudio en Aspen Hysys de la controlabilidad de un sistema de destilación metanol-agua mediante redistribución de la corriente de entrada en múltiples platos de alimento.(Trabajo de grado ingeniero químico)*. Universidad Industrial de Santander (Facultad de Ingenierías Físico-Químicas): Colombia.

- RUEDA, C. (2012). *Estudio de la Restificación por destilación fraccionada a presión reducida y de la hidrólisis básica del aceite esencial de Cymbopogon martinii (Palmarrosa). (Tesis Para optar a Ingeniero Químico)*. Universidad Industrial de Santander (Facultad de Ingenierías Físico-Químicas): Colombia.
- SALAZAR, C., & CORREA, L. (DICIEMBRE de 2011). BUSES DE CAMPO Y PROTOCOLOS EN REDES INDUSTRIALES. (U. D. MANIZALES, Ed.) *VENTANA INFORMATICA*, 1(25), 83-109. doi:0123-9678
- ZAFRA, J. (2013). *Metodología para el modelado y optimización de la síntesis de secuencias de destilación.*(tesis de grado para optar al título de Ingeniero Químico). Universidad Industrial de Santander (Facultad de Ingenierías Físico-Químicas): Colombia.