

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

### **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO PARA LA COLUMNA DE DESTILACIÓN ATMOSFÉRICA DEL LABORATORIO DE PROCESOS UNITARIOS DE LA FACULTAD DE QUÍMICA DE LA ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN  
ELECTRÓNICA Y CONTROL**

**JOHN EFRAÍN SAMANIEGO MÉNDEZ**

[je\\_sm\\_11@hotmail.com](mailto:je_sm_11@hotmail.com)

**NELSON DANIEL VIZCAÍNO PAZMIÑO**

[ndv\\_dan696.ziv@hotmail.com](mailto:ndv_dan696.ziv@hotmail.com)

**DIRECTOR: DR. OSCAR CAMACHO**

[camacho1959gmail.com](mailto:camacho1959gmail.com)

**CODIRECTOR: ING. ANA RODAS**

[ana.rodas@epn.edu.ec](mailto:ana.rodas@epn.edu.ec)

**Quito, Marzo 2016**

## DECLARACIÓN

Nosotros, John Efraín Samaniego Méndez y Nelson Daniel Vizcaíno Pazmiño, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

John Efraín Samaniego Méndez

---

Nelson Daniel Vizcaíno Pazmiño

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por John Efraín Samaniego Méndez y Nelson Daniel Vizcaíno Pazmiño bajo nuestra supervisión.

---

**Dr. Oscar Camacho**

**DIRECTOR DEL PROYECTO**

---

**Ing. Ana Rodas**

**CO-DIRECTOR DEL PROYECTO**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios que me permitió estar aquí cumpliendo otro paso más en mi carrera, y compartiendo con todas las personas que quiero mucho.

A mi mamá Susana por soportarme en cada momento, por guiarme cada vez que hacia algo mal, por estar ahí cuando más la necesitaba, por ser como ella es, y por quererme como solo una madre puede hacer.

A mi papá Marco por no dejar de apoyarme en todo este largo camino y aconsejarme cada vez que algo se interponía en mi vida.

A mi hermano Dario por ser un gran hermano, por haber compartido tantos momentos alegres, por haberme aguantado cada momento hasta ahora y a pesar de cada adversidad que se ha presentado, por ser un gran ejemplo a seguir.

A mi hermano David y a mi cuñada Verónica por apoyarme en todo momento y ser una inspiración a seguir, pero les agradezco en especial por el mejor regalo que ha llegado a mi vida hasta ahora, mi sobrina Camila.

A mi sobrina Camila con la que he podido compartir cada momento desde que nació, y que con su cariño me da fuerzas para seguir avanzando sin desfallecer.

Al Doctor Oscar Camacho y a la Ingeniera Ana Rodas por habernos guiado todo el momento en el planteamiento y desarrollo de la tesis.

Al Ing. Marcelo Salvador, al Sr. Camilo Peñaloza y a las personas del departamento de Química por brindarnos las facilidades y el apoyo para trabajar en el Laboratorio de Procesos Unitarios.

A mi compañero de tesis y amigo, John, con el que pudimos compartir todo este proceso, y por su entrega al proyecto.

A toda mi familia, tíos, tías, primos, primas, y demás generaciones con los que formamos una gran unión, que espero que no se acabe. Un saludo especial a mis Abuelitos Luis e Inés, a mis tíos Graciela, Lili y Luis con los que compartí muchos momentos y puedo seguir contando.

A Cristian, Lenin, Gabriel, Andrés, Rubén, William, Javier, Adriana, Andrea, Luis, Sebastián, Belinda, Andrea, Cristina que me han brindado su sincera amistad desde hace muchos años.

A todos mis amigos, compañeros y conocidos que pasaron por mi vida, y aunque no los haya nombrado, dejaron una huella que no se podrá borrar.

**Daniel**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por haberme dado la sabiduría necesaria para poder superar todas las etapas de la vida, guiado y llenar mi mente de ciencia día a día en mi educación.

A la Institución Escuela Politécnica Nacional, que por intermedio de sus Maestros me transmitieron y brindaron sus conocimientos para alcanzar el objetivo fijado.

A mis padres Gustavo y Celia por su guía y apoyo incondicional, a mis hermanos y familiares por todos los consejos de superación.

A mi esposa Jessica quien me ha ayudado durante todo este tiempo y me ha dado la fortaleza necesaria para poder culminar este proceso; a mis hijos Matías y Emily por brindarme su inocencia, cariño y alegría quienes son mi soporte de esfuerzo y superación.

A mi compañero de tesis y amigo Daniel por ayudarme a sobre poner todos los obstáculos que se presentaron en el desarrollo de este proyecto.

A mi Director de tesis Doctor Óscar Camacho, por transmitirme sus conocimientos y orientarme hacia la realización de este proyecto. A don Camilo Peñaloza, encargado de la Columna de Destilación, que con su experiencia y sabiduría me guó en la ejecución del mismo.

A mis amigos y compañeros de estudios que me han soportado y gracias por haberme permitido obtener tantas experiencias junto a Ustedes. A todos los conocidos por sus buenos consejos que me han sido útiles en el día a día.

**John**

## **DEDICATORIA**

A Susana, Marco, Dario, Camila, David y Verónica que han sido mi soporte, mi inspiración y mi guía en cada momento. Los amo con todo mi corazón.

**Daniel**

## **DEDICATORIA**

A mis padres, Gustavo y Celia pilares fundamentales en mi vida que con su amor y cariño me dieron toda la fortaleza para terminar el presente proyecto.

Dedico a mi esposa e hijos, que soportaron muchas angustias y noches de desvelo, pero han sido la motivación para la culminación de este largo proceso y hoy pueden ver el fruto de todo este esfuerzo.

Con mucho amor para ustedes, mi querida FAMILIA.

**John**

## CONTENIDO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	1
<b>MARCO TEÓRICO Y GENERALIDADES DEL FUNCIONAMIENTO DEL PROCESO</b> .....	1
1.1 INTRODUCCIÓN .....	1
1.2 GENERALIDADES DE LA DESTILACIÓN [1].....	2
1.3 EQUILIBRIO DE FASES [1].....	2
1.3.1 LEYES QUE DICTAN EL COMPORTAMIENTO DE SISTEMAS IDEALES.....	3
1.3.2 RELACIÓN DE EQUILIBRIO .....	4
1.3.3 CURVAS DE EQUILIBRIO .....	5
1.3.3.1 Diagrama Punto de Ebullición vs Composición (Presión constante) ..	5
1.3.3.2 Diagrama de Presión vs Composición (Temperatura constante) .....	6
1.3.4 VOLATILIDAD RELATIVA .....	7
1.4 TIPOS DE DESTILACIÓN [1].....	8
1.4.1 DESTILACIÓN CON REFLUJO.....	9
1.5 FACTORES INFLUYENTES EN LA DESTILACIÓN DE LA MEZCLA EN LA COLUMNA.....	10
1.6 COLUMNA DE DESTILACIÓN ATMOSFÉRICA.....	12
1.6.1 ELEMENTOS PREVIOS A LA AUTOMATIZACIÓN .....	14
1.6.1.1 Sensores e Indicadores .....	14
1.6.1.2 Actuadores .....	14
1.6.1.3 Elementos Físicos .....	14
1.6.1.4 Alimentación .....	14
1.6.1.5 Panel de Manejo.....	15
1.6.2 DESCRIPCIÓN DE ELEMENTOS DE CONTROL PREVIOS A LA AUTOMATIZACIÓN.....	15
1.6.2.1 Microcontrolador .....	15
1.6.2.2 Teclado 4x4 .....	15
1.6.2.3 Display .....	16
1.6.3 DESCRIPCIÓN DEL PANEL DE MANEJO ANTIGUO .....	16
1.6.4 P&ID DE LA PLANTA.....	17
1.6.4.1 Nomenclatura .....	18

1.6.5	DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO PREVIO A LA AUTOMATIZACIÓN.....	18
1.7	DESVENTAJAS PRESENTES EN LA COLUMNA DE DESTILACIÓN...	23
1.8	PROYECTO A DESARROLLAR .....	24
1.9	ARQUITECTURA LÓGICA DEL SISTEMA DE CONTROL .....	26
<b>CAPÍTULO 2</b>	.....	<b>27</b>
<b>DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL HARDWARE DEL SISTEMA</b>	.....	<b>27</b>
2.1	ARQUITECTURA FÍSICA DEL SISTEMA.....	27
2.2	SUSTITUCIÓN Y/O ADECUACIÓN DE HARDWARE .....	27
2.2.1	SENSORES.....	28
2.2.2	ACTUADORES.....	29
2.2.3	CONTROL .....	30
2.3	DESCRIPCIÓN DE HARDWARE.....	30
2.4	EQUIPOS DE CONTROL .....	31
2.4.1	CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE .....	31
2.4.1.1	PLC XC3-24RT-E .....	32
2.4.2	MODULO ANALÓGICO.....	33
2.4.3	PANTALLA TOUCHWIN TH765-NT/NU .....	34
2.5	SENSORES .....	35
2.5.1	TEMPERATURA (RTD).....	35
2.5.2	NIVEL .....	36
2.5.2.1	Sensor Tipo Flotador .....	36
2.5.3	PRESIÓN (TRANSDUCTOR DE PRESIÓN CS-PT100) [7].....	37
2.6	ACTUADORES .....	38
2.6.1	BOMBA DE PISTÓN 1Ø DE 110 VAC .....	38
2.6.2	MOTOR DC (SOLENOIDE CILÍNDRICO) .....	38
2.6.3	BOMBA 3Ø DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO DE 220 VAC .....	39
2.6.4	ELECTROVÁLVULA A 110 VAC .....	40
2.7	DIAGRAMAS DE CONEXIÓN.....	41
2.7.1	ENTRADAS Y SALIDAS PLC.....	41
2.7.2	MÓDULO DE EXPANSIÓN .....	43
2.7.3	TOUCH PANEL .....	43

2.7.4	MOTOR DC .....	44
2.7.5	BOMBA DE PISTÓN 3Ø DE 220 VAC .....	44
2.7.6	BOMBA 1Ø DE 110 VAC.....	45
2.7.7	ELECTROVÁLVULAS 110 VAC .....	45
2.7.8	SENSOR DE TEMPERATURA.....	46
2.7.9	TRANSMISOR.....	46
2.7.10	TRANSDUCTOR .....	47
2.7.11	SENSORES DE NIVEL DEL POZO .....	47
2.7.12	SENSOR DE NIVEL DEL CALDERÍN .....	48
2.8	TABLEROS ELÉCTRICOS .....	48
2.8.1	TABLERO DE CONTROL .....	48
2.8.1.1	Interruptor con Llave.....	50
2.8.1.2	Pulsador de Inicio .....	50
2.8.1.3	Paro de Emergencia .....	50
2.8.1.4	Luz de Encendido .....	51
2.8.2	TABLERO DE POTENCIA.....	51
2.8.2.1	Relés Industriales de Potencia .....	53
2.8.2.2	Contactador Trifásico 220 [V] .....	53
2.8.2.3	Fusibles .....	54
2.8.2.4	Luces de Señalización.....	55
2.9	MONTAJE .....	55
2.9.1	TABLERO DE CONTROL .....	56
2.9.2	TABLERO DE POTENCIA.....	57
2.9.3	SEÑALIZACIÓN DEL CABLEADO .....	58
2.9.4	INSTALACIÓN DE SENSORES .....	58
2.9.4.1	Sensores de Temperatura .....	59
2.9.4.2	Sensores de Nivel.....	59
2.9.4.3	Sensores de Presión .....	60
2.9.5	INSTALACIÓN DE ELECTROVALVULAS .....	60
2.9.6	REHABILITACIÓN DE LA ETAPA DE REALIMENTACIÓN .....	61
2.9.6.1	Habilitación de la Etapa de Calentamiento .....	62
2.10	P&ID ACTUAL.....	63
2.10.1	NOMENCLATURA UTILIZADA .....	64

<b>CAPÍTULO 3</b> .....	66
<b>DISEÑO DE SOFTWARE</b> .....	66
3.1  INTRODUCCIÓN .....	66
3.2  PROGRAMAS USADOS PARA PROGRAMACIÓN DEL PLC Y HMI.....	66
3.2.1  XC SERIES PROGRAM TOOL .....	66
3.2.2  TOUCHWIN EDIT TOOL .....	67
3.3  REQUISITOS DE INSTALACIÓN Y ENTORNO DE TRABAJO:.....	67
3.3.1  XC SERIES PROGRAM TOOL .....	67
3.3.2  TOUCHWIN EDIT TOOL .....	68
3.3.2.1  Barra de Proyecto.....	69
3.3.2.2  Área de Edición .....	70
3.3.2.3  Menú.....	70
3.3.2.4  Barra de Herramientas .....	70
3.3.2.5  Barra de Estado.....	71
3.4  DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA IMPLEMENTADO .....	71
3.4.1  LÓGICA GENERAL .....	71
3.4.2  CONTROL MANUAL .....	72
3.4.3  CONTROL SEMIAUTOMÁTICO.....	76
3.5  ESTIMACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN .....	80
3.5.1  CÁLCULO DE LA ECUACIÓN.....	82
3.6  DISEÑO DEL PROGRAMA IMPLEMENTADO EN EL PLC .....	84
3.6.1  ENTRADAS Y SALIDAS UTILIZADAS .....	84
3.6.2  OBTENCION DE DATOS .....	86
3.6.2.1  De temperatura.....	86
3.6.2.2  De nivel.....	91
3.6.2.3  De presión .....	91
3.6.3  PROGRAMA DE CONTROL .....	93
3.7  DISEÑO DEL HMI IMPLEMENTADO EN EL PANEL TÁCTIL .....	94
 <b>CAPÍTULO 4</b> .....	 101
<b>PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO</b> .....	101
4.1  PARÁMETROS EXTERNOS .....	101
4.1.1  MEZCLA.....	101

4.1.2	ALIMENTACIÓN DE VAPOR .....	101
4.2	ENCENDIDO GENERAL.....	101
4.2.1	CONTROL MANUAL .....	102
4.2.1.1	Resultados Obtenidos .....	105
4.2.2	CONTROL SEMIAUTOMÁTICO.....	110
4.2.2.1	Resultados Obtenidos .....	113
4.3	COSTO DEL PROYECTO .....	117
<b>CAPÍTULO 5</b> .....		121
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....		121
5.1	CONCLUSIONES.....	121
5.2	RECOMENDACIONES .....	122
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....		124

## **ANEXOS:**

**Anexo A.** TABLA DE VALORES QUE INTERVIENEN EN LA ECUACIÓN  
CONCENTRACIÓN VS TEMPERATURA

**Anexo B.** MANUAL DE USUARIO

**Anexo C.** HOJAS DE DATOS

**Anexo D.** CERTIFICADO DE FUNCIONAMIENTO

## RESUMEN

El proyecto tiene como propósito la automatización de la Columna de Destilación Atmosférica presente en el Laboratorio de Procesos Unitarios de la Facultad de Química de la Escuela Politécnica Nacional mediante el uso de un PLC y la implementación de un HMI (pantalla táctil).

La columna de destilación está activa alrededor de 60 años y tiene 10 metros de altura, su función es destilar alcohol etílico de una mezcla entre este alcohol y agua; el modo de trabajo era manual, activando o desactivando los diferentes actuadores, por lo que el proyecto se realizó con el fin de tener un manejo automático desde un panel local.

Un objetivo de la automatización es estimar el valor de la concentración de alcohol permitiendo que el resultante del destilado este dentro del porcentaje adecuado (entre 96 y 75 grados de alcohol) y que los estudiantes que realizan las prácticas de laboratorio puedan visualizar dicho valor y comprobarla manualmente.

Para el control de la columna se utilizó un PLC de la marca Xinje Electronics, modelo XC3-24RT, el cual tiene el número de entradas y salidas adecuadas para el manejo de la planta, además se añadió un módulo de expansión para la adquisición de datos de los RTDs y una pantalla táctil para la visualización de las variables (presión, temperatura, nivel) y la activación o desactivación de los actuadores (electroválvulas, bombas, motores).

Se cambiaron los sensores de temperatura ya que los que se usaban se dañaban continuamente y su rango de medición no era el adecuado, por lo que se optó por trabajar con RTDs (PT100) que permite un mejor manejo de la variable y en base al valor obtenido realizar una estimación de la concentración de alcohol y permitir o no la recolección del producto destilado.

Se añadieron electroválvulas para el ingreso de vapor, ingreso de mezcla, desalojo de desechos, purga y trampa de vapor, además se adecuaron los

elementos en la planta que estaban en funcionamiento (bomba de realimentación, motor de recolección y bomba de desechos).

Se mejoró el ingreso de la mezcla hacia el calderín mediante la instalación de un tanque fijo, se rehabilitó la etapa de realimentación de mezcla y la fase de recalentamiento de la misma brindando la opción de trabajar con más de una carga.

La programación del PLC se realizó en lenguaje ladder y para la pantalla táctil se usó el lenguaje screen (pantallas), la interacción entre ambos se la realiza mediante comunicación RS232 y la utilización de un cable con terminales DB9 (Pantalla táctil) y mini din 8 (PLC).

En el panel táctil se implementaron pantallas que permiten elegir el modo de control, el ingreso de datos, visualización de la temperatura en función del tiempo y la pantalla de trabajo la cual presenta un esquema de la planta y de sus actuadores.

Se realizó dos tipos de control: manual y semiautomático.

El modo manual permite activar los actuadores desde el panel táctil en cualquier momento (con las respectivas restricciones), en este control el manejo de la columna se hace de forma más didáctica para que los estudiantes puedan interactuar con la misma.

El modo semiautomático se implementó con la finalidad de minimizar la intervención del operario en el manejo de la planta, obteniendo así un proceso continuo y permitir la recolección del destilado de manera efectiva.

## PRESENTACIÓN

El presente proyecto tiene por objetivo el diseño e implementación de un sistema de control para la columna de destilación atmosférica mediante el desarrollo de un algoritmo de control en un PLC que trabajará con los datos que generen los sensores de temperatura, presión y nivel para activar los actuadores presentes en la columna de destilación para su correcto funcionamiento. Se tiene una pantalla táctil para el manejo del HMI visualizando las variables presentes.

Se implementó dos modos de control: manual el cual permite la interacción del usuario con todos los actuadores que se encuentran en la columna siguiendo parámetros establecidos y semiautomático que permitirá el manejo de la columna de forma automática, exceptuando las etapas externas como ingreso de mezcla y alimentación de vapor.

Para la obtención del objetivo planteado se desarrollaron los siguientes capítulos:

Capítulo 1. Detalla el marco teórico del proceso de destilación y se analiza el funcionamiento de la columna de destilación atmosférica antes de la implementación del sistema de control.

Capítulo 2. Describe el hardware utilizado: PLC, modulo analógico, pantalla táctil, sensores y actuadores, además de su conexión e instalación.

Capítulo 3. Describe el software utilizado para la programación del PLC y del panel táctil, además presenta el diagrama de flujo del programa que se implementó en el PLC y la programación de la pantalla táctil (HMI).

Capítulo 4. Muestra los resultados obtenidos en las pruebas de funcionamiento efectuadas en el modo manual y en el modo semiautomático.

Capítulo 5. Presenta las conclusiones y recomendaciones que se generaron en el desarrollo del proyecto.

## **CAPÍTULO 1**

### **MARCO TEÓRICO Y GENERALIDADES DEL FUNCIONAMIENTO DEL PROCESO**

#### **1.1 INTRODUCCIÓN**

La destilación como otras técnicas de uso en la química, debe su descubrimiento a los alquimistas. Hay pruebas documentales de que los trabajos de estos alquimistas llegaron a los árabes y los aparatos que utilizaban para la destilación son descritos por Marco Graco en el siglo VIII, en el que puede considerarse el primer documento histórico sobre la destilación de vinos, aunque no indica nada sobre las características del destilado obtenido.

Los alquimistas de los siglos XVI y XVII, escribieron en sus libros diversos métodos de destilación y los instrumentos que el proceso requería, utilizaban en la tarea vasos de diversas formas y condensaban los vapores por refrigeración con agua fría.

La destilación es un proceso de separación de dos líquidos solubles aprovechando la diferencia entre sus temperaturas de ebullición, donde el vapor del líquido más volátil es transferido a una superficie fría donde se condensa y es recogido. Este método permite la purificación e identificación de líquidos y se utiliza para separar líquidos volátiles de sustancias que no lo son, o bien para separar dos líquidos cuyos puntos de ebullición sean suficientemente distintos. La destilación es el método de separación de sustancias puras más antiguo e importante que se conoce.

El proceso de destilación es fundamental en la elaboración de numerosos productos industriales, aunque sin duda la industria petroquímica es el área industrial en la cual el proceso de destilación adquiere una mayor importancia.

La destilación utiliza fases de vapor y líquido, a la misma temperatura y presión, para las zonas coexistentes, en la cual se utilizan varios tipos de dispositivos para el proceso.

## 1.2 GENERALIDADES DE LA DESTILACIÓN [1]

Desde el punto de vista microscópico, todo aumento de temperatura de un líquido implica un aumento de la energía cinética de las moléculas que lo componen. La tendencia al escape (presión de vapor) de las moléculas de un líquido "A" depende de las fuerzas de interacción que existen entre ellas. Cuando esta presión de vapor es igual a la presión atmosférica el líquido hierve, la temperatura en este punto se denomina punto de ebullición.

En los sistemas vapor – líquido siguen la regla de las fases:

$$F = C - P + 2 \quad (1.1)$$

Donde P es el número de fases en equilibrio, C es el número de componentes totales en las 2 fases, y F es el número de variantes o grados de libertad del sistema. Como ejemplo el sistema amoníaco – agua, para dos componentes y dos fases, el valor de F es de 2 grados de libertad. La composición molar de ambas fases de cada elemento es 1, así tenemos:

$$x_A + x_B = 1 \quad (1.2)$$

$$y_A + y_B = 1 \quad (1.3)$$

Donde  $x_A$  y  $x_B$  representan las fracciones molares en la fase líquida y  $y_A$  y  $y_B$  representan las fracciones molares en la fase vapor de los componentes A y B.

## 1.3 EQUILIBRIO DE FASES [1]

A continuación detallamos conceptos básicos que rigen las relaciones entre las composiciones de una mezcla, y las ecuaciones necesarias para comprender el equilibrio de fases del sistema, indispensable para el cálculo de las concentraciones presentes dentro de la columna de destilación.

### 1.3.1 LEYES QUE DICTAN EL COMPORTAMIENTO DE SISTEMAS IDEALES

De acuerdo con la Ley de Dalton de las presiones parciales establece que la presión de vapor total del sistema P es igual a la suma de las dos presiones parciales de los componentes que la constituyen.

$$P = p_A + p_B \quad (1.4)$$

Donde P es la presión total y  $p_A$  y  $p_B$ , son las presiones parciales de los componentes A y B de la mezcla, si se tiene más componentes en la mezcla la presión total es la suma de las presiones parciales de todos los componentes.

Se define una mezcla ideal de dos líquidos como aquella en la que ambos constituyentes cumplen la Ley de Raoult en todo el intervalo de concentraciones y a todas las temperaturas. La Ley de Raoult se expresa como:

$$p_A = P_A * x_A \quad (1.5)$$

Donde  $p_A$  es la presión parcial del componente A en el vapor,  $P_A$  es la presión de vapor de A puro y  $x_A$  es la fracción mol de A en la fase líquida. Esta ley es solo es válida para soluciones ideales, que por lo general son sustancias muy similares entre sí.

Las presiones parciales de los vapores en equilibrio con una mezcla de líquidos vienen determinadas por la presión total y la composición del vapor. Si expresamos dicha composición como fracciones molares de cada componente (y) tenemos:

$$p_A = P * y_A \quad (1.6)$$

Donde  $p_A$  es la presión parcial del componente A en la mezcla de vapor, P es la presión total y  $y_A$  es la fracción molar del componente A en la fase vapor.

Reemplazando la ecuación 1.5 en la 1.6 y despejando la fracción molar en fase vapor ( $y_A$ ), se obtiene el valor en función de su presión parcial pura y la presión total, obteniendo:

$$y_A = \frac{x_A * P_A}{P} \quad (1.7)$$

Con el propósito de trabajar por medios computacionales se han desarrollado una serie de fórmulas (teóricas y empíricas) para determinar la concentración de los componentes en una mezcla tanto a temperatura como a presión constante. Una de las más usadas es la ecuación de Antoine, que es una derivación de la ecuación de Clausius – Clapeyron, que describe la relación entre la temperatura y la presión de saturación del vapor de sustancias puras y se expresa de la siguiente manera:

$$\log_{10}P = A - \frac{B}{C+T} \quad (1.8)$$

Donde P es la presión de vapor del componente puro, generalmente expresada en mmHg, A, B y C son constantes específicas para cada elemento y T es la temperatura del sistema, generalmente expresada en °K.

Despejando la presión de la ecuación 1.8 obtenemos:

$$P = e^{A - \frac{B}{C+T}} \quad (1.9)$$

Esta ecuación nos permite determinar el valor de la presión de vapor del elemento puro de cada componente de la mezcla, que se utiliza para determinar la presión parcial de cada elemento.

### 1.3.2 RELACIÓN DE EQUILIBRIO

La concentración de cualquier componente, en equilibrio, presente en la mezcla en fase líquida se relaciona con su concentración en la mezcla en fase vapor por la relación o constante de equilibrio K.

$$y_A = K_A * x_A \quad (1.10)$$

Donde  $y_A$  es la fracción molar del componente A en la fase vapor,  $K_A$  es la constante de equilibrio del componente A y  $x_A$  es fracción molar del componente A en la fase líquida

El componente que tenga mayor valor de K será el más volátil.

### 1.3.3 CURVAS DE EQUILIBRIO

En mezclas ideales, la presión de vapor es proporcional a la fracción molar de cada uno de los componentes acorde con Ley de Raoult. Así se pueden elaborar diagramas de presión de vapor en función de la composición de la fase líquida y la fase de vapor a temperatura constante; también es posible elaborar diagramas de punto de ebullición en función de la composición de la fase líquida y la fase de vapor a temperatura constante y también diagramas de punto de ebullición en función de la composición de la mezcla para presión constante.

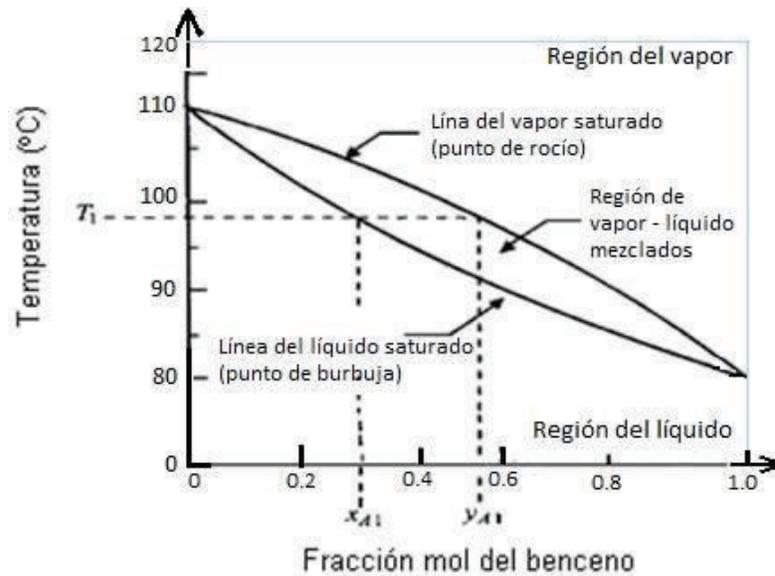
#### 1.3.3.1 Diagrama Punto de Ebullición vs Composición (Presión constante)

En una mezcla de dos componentes en dos fases en equilibrio (líquido – vapor), la coexistencia de esas fases en equilibrio solo es posible en el área comprendida entre las dos curvas del diagrama de equilibrio y la composición de la fase líquida ( $x_A$ ) determina la de la fase vapor ( $y_A$ ) y viceversa como se puede apreciar en la figura 1.1.

Se puede expresar la fracción molar de cada elemento en la fase líquida en función de la presión total y de las presiones puras de vapor de cada elemento, trabajando en las ecuaciones 1.4 y 1.5, obtenemos para el componente A:

$$x_1 = \frac{P - P_2}{P_1 - P_2} \quad (1.11)$$

De donde podemos generalizar para una mezcla binaria la fracción molar de un elemento ( $x_1$ ) es igual a la presión total ( $P$ ) menos la presión pura del otro elemento ( $P_2$ ), sobre la diferencia de las presiones puras del elemento que deseamos obtener la fracción molar y el otro elemento presente en la mezcla ( $P_1 - P_2$ ).

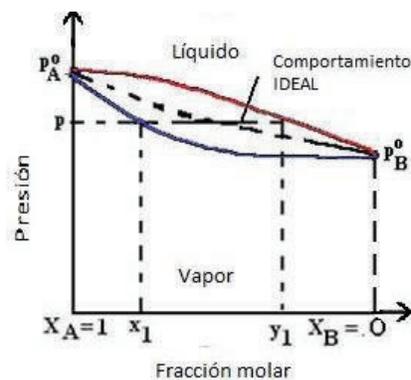


**Figura 1.1.** Diagrama de puntos de ebullición para el benceno – tolueno a 1 atm de presión total [1]

En la figura 1.1,  $x_A$  es la fracción molar del elemento en fase líquida y  $y_A$  es la fracción molar del elemento en fase vapor, la línea superior es del vapor saturado (línea de punto de rocío) y la línea inferior es del líquido saturado (línea de punto de burbuja). La región de dos fases está situada entre estas dos líneas.

### 1.3.3.2 Diagrama de Presión vs Composición (Temperatura constante)

Los diagramas de punto de ebullición son específicos para una presión total definida. A mayores presiones la región entre las curvas de las dos fases se estrecha, como se aprecia en la figura 1.2.



**Figura 1.2.** Diagramas del punto de ebullición a temperatura constante [1]

Los puntos por encima de la línea roja (cuando la presión es mayor que la presión de vapor) corresponden al líquido como fase estable y los puntos por debajo de la línea azul (cuando la presión es menor que la presión de vapor, de forma que la muestra se evapora) corresponden al vapor como fase estable. Cuando el vapor y el líquido están en equilibrio, sus composiciones no son las mismas.

### 1.3.4 VOLATILIDAD RELATIVA

Es la relación entre la concentración del componente A en el vapor y en el líquido ( $y_A/x_A$ ), dividida para la relación entre la concentración del componente B en el vapor y en el líquido ( $y_B/x_B$ ). La volatilidad relativa ( $\alpha_{AB}$ ) es proporcional a la facilidad para separar los componentes de una mezcla por destilación, es decir a mayor volatilidad relativa mayor facilidad y viceversa.

$$\alpha_{AB} = \frac{y_A/x_A}{y_B/x_B} = \frac{K_A}{K_B} \quad (1.12)$$

También se puede expresar la volatilidad relativa en función de un sólo componente, por ejemplo en función de A, sustituyendo las ecuaciones 1.2 y 1.3 en la ecuación 1.12, por lo que tenemos:

$$\alpha_{AB} = \frac{y_A/x_A}{y_B/x_B} = \frac{y_A/x_A}{(1-y_A)/(1-x_A)} \quad (1.13)$$

Igualando las ecuaciones de la Ley de Dalton (1.4) y Raoult (1.5) tenemos:

$$P_A = \frac{y_A}{x_A} * P \quad (1.14)$$

Para el componente A de la mezcla, lo mismo ocurre para el componente B. Reemplazando ambas en la ecuación de la volatilidad relativa (1.12) tenemos:

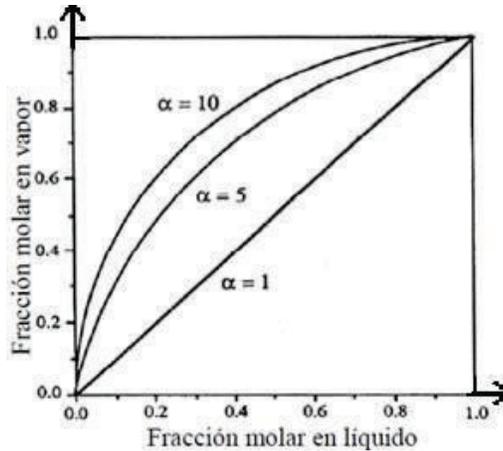
$$\alpha_{AB} = \frac{P_A}{P_B} \quad (1.15)$$

Donde podemos concluir que para un sistema ideal la volatilidad relativa es totalmente independiente de la presión total y de la composición.

La ecuación 1.13 se puede reordenarla para obtener la concentración de un componente en el vapor como una función de su concentración en el líquido y su volatilidad relativa:

$$y_A = \frac{\alpha \cdot x_A}{1 + (\alpha - 1) \cdot x_A} \quad (1.16)$$

En la figura 1.3 se muestra el efecto de la volatilidad relativa, se observa que conforme la volatilidad relativa se incrementa, la concentración del componente más volátil en el vapor se incrementa para una composición molar en el líquido fija.



**Figura 1.3.** Fracción molar de componente más volátil con volatilidad relativa variable [1]

## 1.4 TIPOS DE DESTILACIÓN [1]

En la práctica la destilación se lleva a cabo por medio de dos métodos principales:

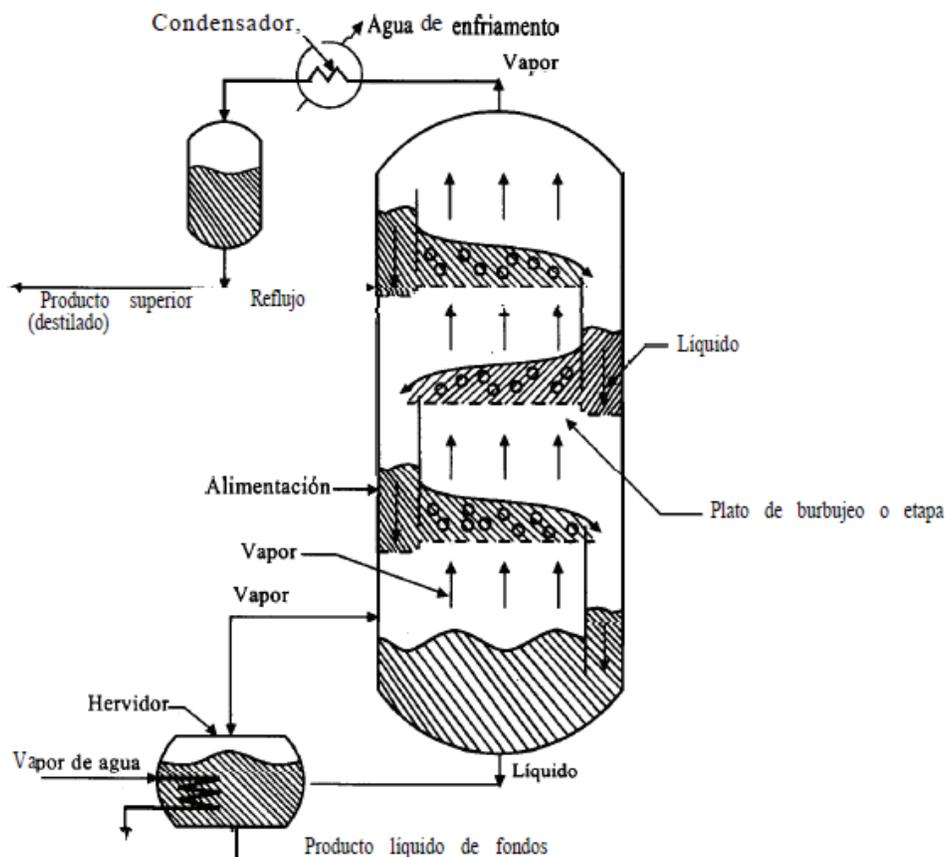
El primer método consiste en la producción de vapor por ebullición de la mezcla líquida que se va a separar en una sola etapa, para recuperar y condensar los vapores. En este método no se permite que el líquido regrese al destilador de una sola etapa y se ponga en contacto con los vapores que se desprende.

El segundo método consiste en el retorno de una porción del condensado al destilador. Los vapores se desprenden a través de una serie de platos y parte del líquido condensado fluye hacia abajo a través de dichos platos a contracorriente respecto a los vapores, a este método se lo conoce como destilación con reflujo, rectificación o destilación fraccionada, este es el método de trabajo de la columna de destilación atmosférica.

### 1.4.1 DESTILACIÓN CON REFLUJO

En este método tenemos el reflujo del condensado, que se conoce como rectificación (fraccionada) o destilación por etapas con reflujo se puede considerar desde un punto de vista simplificado como un proceso en el cual se lleva a cabo una serie de etapas de vaporización instantánea, de manera que los productos gaseosos y líquidos de cada etapa fluyen a contracorriente. Como se muestra en la figura 1.4, el líquido de una etapa se conduce o fluye a la etapa inferior y el vapor de una etapa fluye hacia arriba, a la etapa superior. Por consiguiente, en cada etapa entra una corriente de vapor y una corriente líquida, que se mezclan y alcanzan su equilibrio, y de dicha etapa sale una corriente de vapor y una corriente de líquido en equilibrio.

En una columna de destilación, las etapas (a las que se llama casquetes de burbujeo o platos) de una torre de destilación están distribuidas verticalmente.



**Figura 1.4.** Proceso para una torre fraccionada con casquete de burbujeo [1]

La alimentación entra a la columna aproximadamente en la zona media de la misma. Si la alimentación es líquida, fluirá hacia abajo, a un casquete de burbujeo o etapa. El vapor entra al plato y burbujea a través del líquido a medida que éste fluye hacia abajo, el vapor y el líquido que salen del plato están esencialmente en equilibrio. El vapor continúa hacia arriba pasando a la siguiente etapa o plato, donde nuevamente se pone en contacto con el líquido que fluye hacia abajo. En este caso, la concentración del componente más volátil (el componente A de punto de ebullición más bajo) va aumentando en el vapor de una etapa a la superior siguiente y disminuye el líquido de una etapa a la inferior siguiente. El vapor final que sale por la parte de arriba se envía a un condensador y se extrae una porción del producto líquido (destilado), que contiene una alta concentración de A. El líquido remanente en el condensador regresa (refluye) al plato superior.

El líquido que sale por el plato inferior entra a un hervidor, donde se vaporiza parcialmente, y el líquido remanente, que es pobre en A o rico en B, se extrae como producto líquido. El vapor del hervidor regresa a la etapa o plato inferior.

En muchos casos, el número de platos es mayor. En el plato de burbujeo, el vapor penetra a través de una abertura y burbujea en el líquido para producir un contacto íntimo entre el líquido y el vapor en el plato.

En el plato teórico, el vapor y el líquido que salen del mismo están en equilibrio. El hervidor se puede considerar como una etapa o plato teórico.

## **1.5 FACTORES INFLUYENTES EN LA DESTILACIÓN DE LA MEZCLA EN LA COLUMNA**

Los factores que influyen en el proceso de la destilación son:

- a. Temperatura: El efecto de un aumento de ésta, suele disminuir las diferencias relativas de las volatilidades entre los componentes de una mezcla dada; de igual modo, un descenso de la temperatura de vaporización aumenta corrientemente las diferencias de las volatilidades.
- b. Presión de vapor: La presión o tensión del vapor de un líquido, es la presión de su valor a una temperatura dada en la cual las fases de vapor y líquido de la

sustancia pueden existir en equilibrio. Si se mantiene constante la temperatura y se comprime el vapor sobre el líquido puro, tendrá lugar una condensación hasta que no se desprenda nada de vapor. Recíprocamente, si se ensancha el espacio ocupado por el vapor, se produce evaporación.

c. Volatilidad relativa: de un componente respecto a otro (en mezclas ideales es el cociente entre las presiones de vapor de los dos componentes).

d. Razón de reflujo: es la relación entre el caudal de líquido que se devuelve a la columna como reflujo (L) y el que se extrae como destilado (D).

$$\text{Razón de reflujo} = \frac{L}{D} \quad (1.17)$$

La razón de reflujo puede oscilar entre dos extremos: reflujo total y reflujo cero.

Cuando una columna opera a reflujo total, todo el vapor que llega a la cabeza de la columna es condensado y devuelto a la columna. En estas condiciones el caudal de líquido que desciende es el máximo posible y se aprovechan los platos superiores de la columna para el contacto líquido-vapor, lo que lleva a la mejor separación posible entre componentes, aunque no se extrae ninguna fracción de destilado. Es útil para determinar la capacidad de la columna.

Cuando una columna opera a reflujo cero, el vapor que alcanza la parte superior de la columna y se condensa en el refrigerante superior no es devuelto a la columna, sino que es recogido a través de la cabeza de columna. La capacidad de separación es mínima, puesto que no se aprovechan los platos superiores al no haber suficiente líquido de retorno, pero se extrae la máxima cantidad posible de destilado.

Las columnas de destilación operan generalmente con razón de reflujo en valores intermedios.

e. Método de contacto: en columnas de platos será mejor cuanto mayor sea la altura del líquido en cada plato, aunque aumentará la pérdida de carga a lo largo de la columna. En una columna de relleno sucede lo mismo. Un relleno más compacto permite un mejor contacto pero aumenta la pérdida de carga.

f. Altura de la columna: Evidentemente cuanto mayor sea el número de pisos mayor será la capacidad de separación de la columna. Un piso en el que se alcanza el equilibrio entre el líquido y el vapor se denomina piso teórico, el número de pisos reales para conseguir una separación es siempre mayor que el número de pisos teóricos. Se define una eficacia de piso que indica el grado de aproximación al equilibrio:

$$Eficacia\ del\ piso = \frac{\# de\ pisos\ teóricos}{\# de\ pisos\ reales} \quad (1.18)$$

En columnas de relleno se define la altura equivalente de un piso teórico (AEPT) que indica la altura de relleno necesaria para conseguir misma separación que un piso teórico:

$$AEPT = \frac{Altura\ de\ la\ columna}{\# de\ pisos\ teóricos} \quad (1.19)$$

g. Número de platos: Los platos son etapas de equilibrio donde se efectúa el intercambio de líquido con gas, hay varias maneras de obtener el número de platos teóricos entre ellos están los métodos de McCabe-Thiele y Ponchon-Savarit, que son métodos largos, pero también hay métodos más cortos como el de la ecuación de Fenske que relaciona la volatilidad relativa, con las fracciones en el fondo y en lo alto de la torre.

## 1.6 COLUMNA DE DESTILACIÓN ATMOSFÉRICA

La estructura física de la columna de destilación atmosférica llegó a la Escuela Politécnica Nacional en la década de los 60, proveniente de Alemania gracias a un convenio con la UNESCO.

La estructura de la columna de destilación consta de diferentes tuberías de cristal, que tienen sus propios acoples, y uniones para la integración de sensores y actuadores manuales, con los que se trabajaron en un comienzo. Así mismo, tienen soportes de metal para que las partes superiores se puedan sujetar, evitando desacoples o caídas.

La columna tiene una altura de 5 metros tomando en cuenta solo la columna de cristal como se muestra en la figura 1.5.

Por su ubicación, la columna está dividida en tres pisos:

El piso inferior que es en el cual se encuentran la tubería de ingreso de vapor para el calentamiento de la mezcla, y el ingreso de la misma, así como el desalojo de los desechos.

El piso del medio, que es donde se encuentra colocada toda la columna, además del panel de control, pero solo se puede tener acceso hasta la mitad de dicha columna, por la altura de esta. En este piso se encuentra el tanque por el cual ingresa la mezcla tanto al inicio del proceso como en la etapa de realimentación. Además se debe ubicar el contenedor en el cual se recogerá el producto final.

El piso superior por el cual se puede acceder a las partes más elevadas de la columna, en la fase de recolección y refrigeración en caso de cambio de algún elemento.



**Figura 1.5.** Columna de destilación atmosférica del laboratorio de procesos unitarios

## **1.6.1 ELEMENTOS PREVIOS A LA AUTOMATIZACIÓN**

### **1.6.1.1 Sensores e Indicadores**

- Indicador de presión (manómetro)
- Indicadores de temperatura (termómetros)
- Indicador de flujo (rotámetro)
- Sensores de nivel (flotadores)
- Sensores de temperatura (Lm35)

### **1.6.1.2 Actuadores**

- Válvulas manuales
- Válvula anti-retorno
- Bomba de pistón de 220 V<sub>AC</sub> (B1)
- Solenoide cilíndrico DC de 18 V<sub>DC</sub> (M1)
- Bomba de 110 V (B2)
- Electroválvula activada con 110 V<sub>AC</sub> (EV1)

### **1.6.1.3 Elementos Físicos**

- Calderín (Cal1)
- Depósito de alimentación de la mezcla (Dep1)
- Calentador para la realimentación (Cal2)
- Depósito de realimentación de la mezcla (Dep2)
- Columna de destilación de vidrio de 3 etapas
- Anillos Rasching
- Condensadores (C1, C2 y C3)

### **1.6.1.4 Alimentación**

- Vapor (temperatura)
- Agua (refrigerante)
- Mezcla (agua y etanol)
- Eléctrica (panel de control)

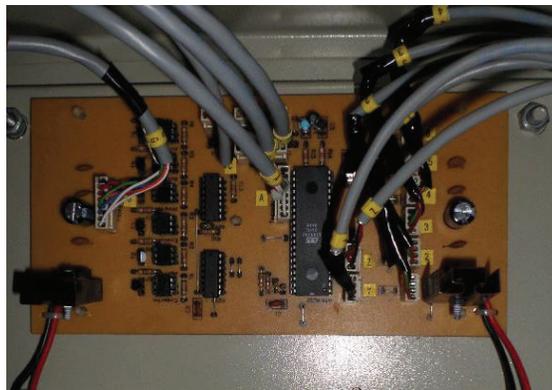
### 1.6.1.5 Panel de Manejo

- Microcontrolador
- Display de cristal líquido
- Fuente de poder
- Transformador

## 1.6.2 DESCRIPCIÓN DE ELEMENTOS DE CONTROL PREVIOS A LA AUTOMATIZACIÓN

### 1.6.2.1 Microcontrolador

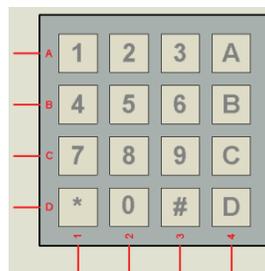
Es el encargado de recibir los datos ingresados, para procesarlos y ejecutar las acciones necesarias, está colocado en una placa como se muestra en la figura 1.6.



**Figura 1.6.** Placa de Control con microcontrolador

### 1.6.2.2 Teclado 4x4

Es el que nos ayuda a ingresar los datos para que el microcontrolador ejecute las acciones, como se muestra en la figura 1.7.



**Figura 1.7.** Teclado matricial 4x4 [2]

Donde las teclas tienen las siguientes funciones:

- 0 – 9: Ingresar los dígitos que deseamos
- \*: Desplaza el menú hacia abajo
- #: Desplaza el menú hacia arriba
- A: Acepta el valor ingresado
- B: Borra el valor ingresado
- C: Regresa al menú principal
- D: Sin función

### **1.6.2.3 Display**

Es una pantalla de cristal líquida (LCD) de 16x2 que permite la visualización de los datos ingresados y valores de los diferentes sensores de temperatura.

### **1.6.3 DESCRIPCIÓN DEL PANEL DE MANEJO ANTIGUO**

El panel de manejo tiene las siguientes funciones a elegir:

01 Temperatura de enfriamiento: se ingresa el valor de temperatura a la cual se activa la electroválvula (EV1) para el ingreso de refrigerante a los condensadores.

02 Tiempo de recolección: se debe ingresar el valor de tiempo que deseamos para la recolección del producto destilado (etanol) entre 1 y 100 segundos.

03 Tiempo de reflujo: se debe ingresar el valor de tiempo que deseamos para el retorno del producto destilado a la columna, entre 1 y 100 segundos.

04 Datos: permite la visualización de los tiempos ingresados.

05 Encender recolección: activa el solenoide DC (M1) que envía el producto a la salida del proceso durante el tiempo ingresado para la recolección.

06 Apagar recolección: desactiva el solenoide DC (M1), por ende no se tiene recolección del producto, lo que permite tener una relación de reflujo total.

07 Visualizar temperatura: se visualiza las temperaturas de los sensores.

08 Iluminación display: permite encender y apagar la iluminación del mismo.



#### 1.6.4.1 Nomenclatura

- TT = Transmisor de Temperatura
- LT = Transmisor de Nivel
- PI = Indicador de Presión
- TI = Indicador de Temperatura
- LI = Indicador de Nivel
- TIC = Controlador Indicador de Temperatura
- V = Válvula
- B = Bomba
- EV = Electroválvula
- M = Motor Solenoide
- C = Condensador

#### 1.6.5 DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO PREVIO A LA AUTOMATIZACIÓN

El proceso inicia encendiendo la alimentación del vapor (en el laboratorio encienden el generador de vapor, el caldero, una hora antes de empezar la práctica ya que dicha alimentación se usa para todas las plantas que requieran vapor de agua).



**Figura 1.9.** Válvula de ingreso (V1) y depósito de mezcla (Dep 1)

Se ingresa el líquido a destilar (mezcla de agua y etanol), abriendo la válvula de ingreso (V1) al depósito de la mezcla (Dep1) como se muestra en la figura 1.9, donde se encuentra el serpentín (Cal1) para el calentamiento de la mezcla (aproximadamente 60 litros), adicionalmente se dispone de un sensor de nivel (LT1) y una válvula (V15), el operario visualiza que se tiene el nivel necesario para empezar el proceso de calentamiento y cierra manualmente la válvula de ingreso de mezcla (V1).

Se debe comprobar que en la tubería de alimentación de vapor no exista presencia de vapor condensado (agua), por lo que se abre la válvula de purga (V2), para que los residuos caigan al pozo de desechos, el operario comprueba la salida de vapor y cierra dicha válvula (V2) como se muestra en la figura 1.10.



**Figura 1.10.** Válvulas de ingreso de vapor (V4) y purga (V2)

Para el ingreso del vapor se tiene una válvula de seguridad (V3), que generalmente pasa abierta. Luego se abre la válvula manual (V4) para que el vapor alimente el serpentín que calentara la mezcla. En la línea de transmisión, luego de la válvula V4 existe una válvula anti-retorno (V5), que impide el retorno del vapor hacia el generador. A continuación tenemos una tubería de desvío con una válvula (V6) que es por donde actualmente pasa el vapor, ya que por la línea de transmisión entre la válvula (V7), el indicador de presión (PI1), y la válvula (V8) no circula el vapor, ya que la válvula V7 está dañada.

A la salida del desvío tenemos un indicador de presión (PI2), que muestra el valor de presión de vapor que entra al serpentín (que debe estar entre un valor de 5 a 10 PSI), para lo cual actualmente se regula con la válvula V6. Previo a la llegada del vapor al depósito (Dep1) se tiene una válvula (V9) y un indicador de temperatura (TI1) que muestra el valor de temperatura con la que ingresa el vapor al calderín.

A la salida del calderín, se tiene una trampa de vapor y una válvula (V10) por la cual todo el vapor condensado sale hacia el pozo de residuos.

Luego se enciende el panel de manejo (figura 1.11) que nos permite la visualización de las variables e ingreso de datos.



**Figura 1.11.** Panel de manejo

Por el paso del vapor de agua en el serpentín se eleva la temperatura en el depósito por lo que la mezcla empieza a calentarse, una vez que se obtenga la temperatura de ebullición del elemento más volátil, el líquido empieza a evaporarse por toda la columna, por lo que dicho vapor empieza a subir, en la columna se encuentran presentes 4 sensores de temperatura cuyos valores se observan en el display.

Se setea la temperatura de enfriamiento (ejemplo 78 °C), que es el valor que se compara con la temperatura del sensor TT4 para así activar la electroválvula EV1, que previo a esta se dispone de una válvula de seguridad (V14) y permitir el paso del refrigerante a los condensadores.

En la columna están presentes 3 condensadores, dos en la parte superior de la columna (C1 y C2) que sirven para condensar el vapor del líquido más volátil (etanol), y uno en la etapa de recolección del elemento final (C3), para tratar de obtener el producto destilado a temperatura ambiente.

El vapor que sube por la columna pasa las etapas de los anillos Rasching, llega a los condensadores (C1 y C2) donde cambia a estado líquido y desciende por la misma columna, a este proceso se le llama reflujo, si no hay recolección del producto destilado se tiene reflujo total, que permite que la concentración del líquido más volátil se incremente.

La persona encargada del laboratorio determina cuando iniciar la recolección, en el cual se activa el solenoide M1 que permite la salida del líquido que pasa por el condensador C3 y finalmente cae a un recipiente donde se realiza la medición de la concentración de alcohol para comprobar que el destilado que se genera tiene una concentración acorde a la capacidad de la planta (95%), mediante un alcoholímetro, este procedimiento se lo realiza cada minuto, ya que al tener una relación de reflujo constante, sale la misma cantidad de alcohol que la que retorna a la columna, por lo que, transcurrido cierto tiempo, la concentración va a ir descendiendo.

Se debe setear el tiempo de recolección y el tiempo de retorno, según la relación de reflujo que se desee tener (por ejemplo, para tener una relación de reflujo de 1, los tiempos de recolección y retorno del líquido deben ser los mismos), donde el motor M1 se acciona acorde a los tiempos establecidos.

Cuando la concentración baja hasta un límite inferior (por ejemplo menos 85%), se selecciona la opción de apagar recolección, para que todo el líquido que se condense retorne a la columna, reflujo total, y se espera un cierto tiempo para volver a activar la recolección (por ejemplo 10 minutos) y así tener un destilado con mayor concentración.

Mientras se va recolectando el producto, la mezcla que se encuentra en el depósito va a ir descendiendo hasta llegar a un nivel inferior y activar el sensor de nivel bajo del depósito que a la vez activa la bomba de desplazamiento positivo que permitiría la realimentación de mezcla a la columna, esta etapa se encuentra

inhabilitada, por lo que se procede a cerrar la válvula de ingreso de vapor V4 terminando la práctica.

Adicionalmente en la primera etapa de la columna se dispone de un indicador de temperatura (TI2) y una válvula manual (V12), de igual manera para la segunda etapa TI3 y V13.

Si se desea finalizar el proceso, se apaga el panel de manejo y se cierra la válvula de alimentación (V4) de vapor del calderín. Al finalizar la práctica, por seguridad del operador, se espera cierto tiempo para que la temperatura de la mezcla en el depósito (Dep1) disminuya, entonces el encargado de la planta procede a abrir la válvula de desfogue de los residuos (V11) como se observa en la figura 1.12 para que los sobrantes caigan al pozo.



**Figura 1.12.** Válvula de desfogue de residuos (V11)

Para la eliminación de los desechos del pozo de residuos hacia el desagüe se activa la bomba (B1) para lo cual necesariamente debe estar encendido el panel de manejo y activarse el sensor de nivel (LT2) hasta que la persona encargada decida apagar el panel de manejo.

## **1.7 DESVENTAJAS PRESENTES EN LA COLUMNA DE DESTILACIÓN**

En la actualidad la columna de destilación atmosférica presente en el laboratorio de procesos unitarios de la facultad de química de la Escuela Politécnica Nacional, presenta las siguientes desventajas:

- El ingreso de la mezcla se lo realiza manualmente abriendo o cerrando la válvula V1.
- La alimentación del vapor hacia el calderín para elevar la temperatura de la mezcla se la realiza manualmente abriendo o cerrando la válvula (V4).
- La purga de condensado previo el ingreso del vapor al calderín se lo realiza manualmente con la válvula V2.
- En la tubería de desvío se encuentra dañada la válvula V8 por lo que el paso del vapor se lo realiza a través de la válvula V6, cuando su función correcta es permanecer cerrada y solo usarla cuando se desee dar mantenimiento a la válvula V8 o cuando está este dañada, hasta que sea reemplazada.
- La etapa de realimentación de la mezcla no está habilitada.
- La etapa de calentamiento de la mezcla para la realimentación no está habilitada por lo que en la práctica se realiza una sola carga.
- La medida de la temperatura en las diferentes etapas de la columna se lo realiza mediante LM35 y estos sensores son sensibles a la oxidación que se da por la humedad por lo que periódicamente son cambiados.
- La salida de los desechos del depósito de la mezcla se lo realiza mediante una válvula manual.
- La eliminación de los desechos del pozo de recolección de residuos se lo realiza mediante una bomba de pistón la cual es activada mediante el sensor de nivel LT2 pero para desactivar la bomba hay que apagar el panel de control, esta acción lo realiza el operario de manera aproximada cuando observa que se haya evacuado todo el desecho.

- El sensor de temperatura de la última etapa en la recolección del vapor condensado está inhabilitado.
- Cuando disminuye la concentración del destilado se apaga manualmente la recolección y se espera cierto tiempo, para volver a tomar la muestra y verificar si hay un aumento de la concentración.
- El ingreso de valores de los tiempos de recolección, de retorno del producto y temperatura para la activación del refrigerante no se puede realizar en la misma pantalla.
- En el display de cristal líquido solo se visualiza los valores de temperatura.
- La visualización de los valores de temperatura en la columna de destilación no se la puede mostrar en una sola pantalla, ya que solo se dispone de un display de 16x2.
- Para determinar el valor de la presión a la cual ingresa el vapor de agua al serpentín se debe visualizar el manómetro ubicado en la parte inferior.
- No se puede determinar cuando está activa la recolección del producto destilado, este decir hay que observar al motor M1 para ver si está activo o no.

## **1.8 PROYECTO A DESARROLLAR**

En base a todas las desventajas presentes en la columna de destilación el presente proyecto plantea las siguientes mejoras:

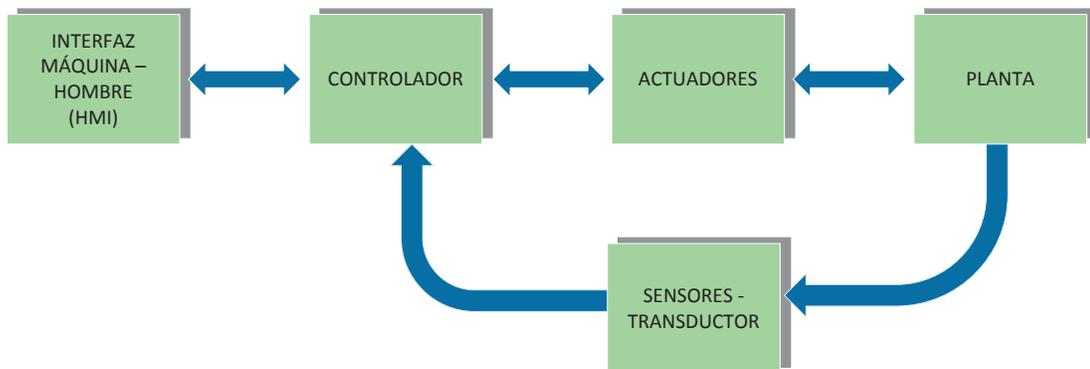
- Añadir electroválvulas en las siguientes partes del proceso actual: alimentación de vapor, purga, trampa de vapor, salida de residuos y en el ingreso de la mezcla al depósito para evitar la acción manual de apertura y cierre de las válvulas.
- Añadir un sensor de presión que permita visualizar el valor con el cual ingresa el vapor al serpentín.
- Realizar un algoritmo de control para mantener un rango de presión establecido.

- Habilitar la etapa de realimentación.
- Habilitar la etapa de calentamiento para la realimentación continua de la mezcla, para lo cual se añadirá una electroválvula a la salida de la trampa de vapor, permitiendo la opción de calentar o no, la mezcla presente en el depósito de realimentación.
- Cambio de sensores de temperatura (Lm35 a RTD) para una mejor precisión en la medición, con sus respectivas protecciones para evitar la oxidación y aumentar su tiempo de vida útil.
- Mejorar el proceso de eliminación de los desechos del pozo de residuos, implementando un nuevo lazo de control.
- Añadir y habilitar un nuevo sensor de temperatura en la fase previa a la recolección del destilado.
- Uso de un PLC para el control de la columna de destilación y de un panel táctil para la visualización de las variables, cambiando el microcontrolador y el display presentes.
- Crear la interfaz de usuario en el panel táctil, la cual permitirá visualizar todas las variables presentes en el proceso, además de seleccionar si el proceso es semiautomático o manual.
- Implementar lazos de control para la estimación de concentración de alcohol en base a la temperatura en la fase de recolección y permitir la salida del producto destilado.
- Se indicará el valor estimado de la concentración de alcohol en el panel táctil, que será comprobado por las personas que realicen la práctica.
- Se implementarán alarmas que indicarán al operador que existe una anomalía en el funcionamiento de la columna.
- Se instalará dos tableros eléctricos, uno con los elementos de potencia y otro con los de control.
- Mejorar el ingreso de mezcla en la etapa de inicio y realimentación.

## 1.9 ARQUITECTURA LÓGICA DEL SISTEMA DE CONTROL

Una vez realizado el planteamiento de mejoras para la automatización de la columna de destilación se establece la lógica del sistema de control (figura 1.13).

La interacción entre el usuario y la columna de destilación (planta) se establece mediante una pantalla táctil (HMI), que se encarga de enviar y recibir datos del controlador (PLC) y este a su vez activa o desactiva los actuadores para el manejo de la planta en la cual están instalados sensores que envían la señal al controlador para ejecutar las acciones programadas.



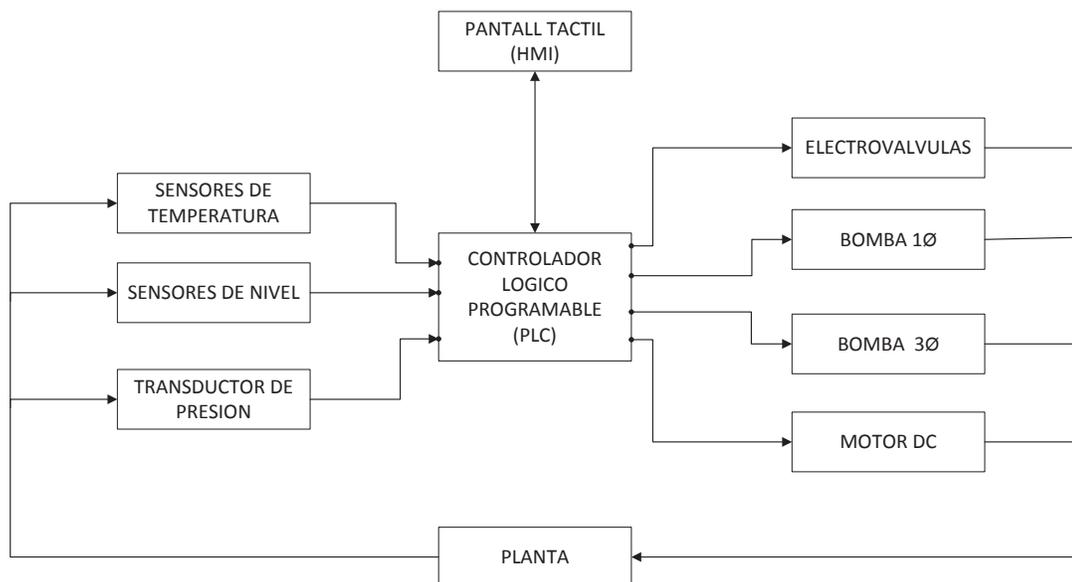
**Figura 1.13.** Arquitectura lógica del sistema de control

## CAPÍTULO 2

### DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL HARDWARE DEL SISTEMA

#### 2.1 ARQUITECTURA FÍSICA DEL SISTEMA

En la figura 2.1 se describen los elementos que formarán parte del sistema de control:



**Figura 2.1.** Arquitectura física del sistema

A continuación se detalla las características y especificaciones de los equipos de control, actuadores y sensores, además de las adecuaciones y/o sustituciones realizadas.

#### 2.2 SUSTITUCIÓN Y/O ADECUACIÓN DE HARDWARE

A los siguientes elementos de la columna de destilación se les realizaron sustitución y/o adecuación:

### 2.2.1 SENSORES

Los sensores señalados en la tabla 2.1 se encontraban instalados en la columna, pero no cumplían una función adecuada o eran propensos a daños continuos.

**Tabla 2.1.** Tabla de Sensores presentes en la columna

ELEMENTO	SEÑAL	DESCRIPCIÓN	SUSTITUIR/ADECUAR
Temperatura LM35 (Integrado)	Analógica	Propenso a oxidación Rango de medición extenso	Sustitución de todos los sensores
Nivel Calderín (Flotador de 3 posiciones)	Digital	Sensor no utilizado	Adecuación del sensor para el manejo de los actuadores
Nivel Alto del Pozo (Flotador)	Digital	Sensor no utilizado	Adecuación del sensor para activación de la bomba de desechos

Una vez realizado el análisis de las señales que se necesitan para el manejo del proceso se determinaron las siguientes sustituciones o adecuaciones descritas en la tabla 2.2:

**Tabla 2.2.** Tabla de Adecuación y/o Sustitución de los sensores

SENSOR	SEÑAL	DESCRIPCIÓN	NUEVO/ADECUADO
Temperatura RTD (PT100)	Analógica	Menor riesgo de oxidación Mayor exactitud de medida	Nuevos
Nivel Calderín (Flotador de 3 posiciones)	Digital	Por su ubicación no se sustituyo Se adecuaron las señales para ser enviadas al PLC y tener control sobre los actuadores	Adecuado
Nivel Alto del Pozo (Flotador)	Digital	Señal usada para la activación de la bomba de	Adecuado

		desechos	
Nivel Bajo del Pozo (Flotador)	Digital	Señal usada para la desactivación de la bomba de desechos	Nuevo
Transductor de Presión	Analógica	Sensor usado para regulación del ingreso de presión	Nuevo

### 2.2.2 ACTUADORES

Se decidió que los actuadores presentes en la columna de destilación se mantendrán ya que su funcionamiento es correcto (tabla 2.3) y se añadirán electroválvulas para mejorar el manejo del proceso

**Tabla 2.3.** Tabla de Adecuación de los Actuadores

ELEMENTOS	ALIMENTACIÓN	DESCRIPCIÓN
Electroválvula	110 V	Usada para el ingreso de refrigerante a los condensadores
Motor DC	12 V	Usado para la recolección/reflujo del destilado
Bomba 1 $\emptyset$	110 V	Usada para eliminación de residuos del pozo de desechos
Bomba 3 $\emptyset$	220 V	Usada para realimentación de mezcla (no está en uso)

Todas las electroválvulas añadidas para mejorar el manejo de la columna de destilación (descritas en la tabla 2.4) tienen alimentación de 110 V<sub>AC</sub> y son las siguientes:

**Tabla 2.4.** Tabla de Electroválvulas añadidas

ELECTROVÁLVULAS	DESCRIPCIÓN
V1	Utilizada para el ingreso de la Mezcla al Calderín
V2	Utilizada para realizar la purga de los condensados de la

	tubería y regulación de la presión de ingreso de vapor
V3	Usada para permitir el ingreso de vapor al serpentín
V4	Utilizada para aprovechar los condensados que salen de la trampa de vapor
V5	Usada para el desalojo de desechos del calderín

### 2.2.3 CONTROL

Los elementos de control (microcontrolador, teclado y display) serán cambiados por un controlador industrialmente más robusto (PLC) y para el ingreso de datos, visualización de las variables y activación o desactivación de los actuadores se implementara un HMI (panel táctil).

## 2.3 DESCRIPCIÓN DE HARDWARE

A continuación se detallará los elementos presentes en la planta y los elementos que se van a adicionar para la automatización de la misma.

Se describirá a breves rasgos su funcionamiento, materiales, tipo y por qué se escogieron los diferentes sensores, actuadores, PLC y HMI para controlar el funcionamiento de la planta.

Además se presentarán los diagramas de conexión de todos los elementos detallados y la instalación de los mismos, también se presentará el montaje de los tableros de control y de potencia.

Los elementos que se detallaran son los siguientes:

- Equipos de control:
  - PLC (controlador lógico programable)
  - Módulo analógico
  - Pantalla táctil
- Sensores:
  - Temperatura (RTD)
  - Nivel
  - Presión

- Actuadores:
  - Bomba de pistón 1Ø de 110 V<sub>AC</sub>
  - Motor DC (Solenoido Cilíndrico)
  - Bomba de pistón 3Ø de desplazamiento positivo de 220 V<sub>AC</sub>
  - Electroválvula a 110 V<sub>AC</sub>
  - Válvulas manuales
- Elementos de protección y visualización

## **2.4 EQUIPOS DE CONTROL**

### **2.4.1 CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE**

Un controlador lógico programable (PLC) es un dispositivo de operación digital, que usa una memoria para el almacenamiento interno de instrucciones para implementar funciones específicas, como lógica, secuenciación, registro y control de tiempos, conteo y operaciones aritméticas, para controlar a través de entradas y salidas digitales o analógicas, varios tipos de procesos.

Dada la oferta de modelos y variedad de fabricantes de PLC que existen actualmente en el mercado, se busca una elección correcta para alcanzar el objetivo de la aplicación, por lo tanto se utiliza criterios funcionales donde se define la capacidad y complejidad del controlador.

La capacidad determina el número y la naturaleza de las entradas y salidas, cual pueden ser analógicas o digitales de acuerdo a la necesidad de la aplicación.

La complejidad establece el tratamiento de realizar funciones para manipular variables, con el fin de controlar el proceso eficientemente.

Además de estos criterios, se toma en cuenta el costo del mismo, así como el de sus elementos afines como expansiones y panel táctil.

El PLC seleccionado fue el PLC XC3-24RT-E de la marca XINJE ya que tiene el número de entradas y salidas que se necesita, y en el cual se puede añadir un módulo de expansión para el manejo de los RTDs, además de la pantalla táctil, con la cual se puede comunicar (con un cable XVP).

La programación se realiza en lenguaje ladder, mediante software libre.

El precio fue otro factor influyente en la decisión de elegir este PLC, ya que no solo se debía tomar en cuenta el precio del mismo, sino el del módulo de expansión y el de la pantalla táctil, que en conjunto, fue el más conveniente para la automatización del proceso.

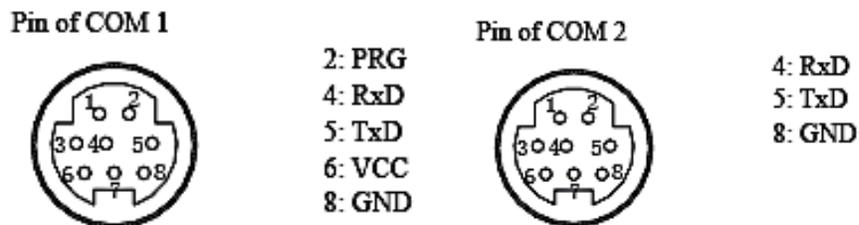
#### 2.4.1.1 PLC XC3-24RT-E

El PLC XC3-24RT-E (figura 2.2) tiene 14 entradas a 24 V<sub>DC</sub>, 10 salidas (2 de transistor y/o relé, y las demás tipo relé) y se alimenta con 90 a 260 V<sub>AC</sub>.



**Figura 2.2.** PLC XINJE XC-3 [3]

En la parte frontal el PLC tiene dos puertos de comunicación (Com1 y Com2) para la conexión con la pantalla táctil, y para la conexión con la computadora y realizar la programación del mismo. Los puertos de conexión son Mini Din 8 y tienen los siguientes pines como se ve en la figura 2.3.



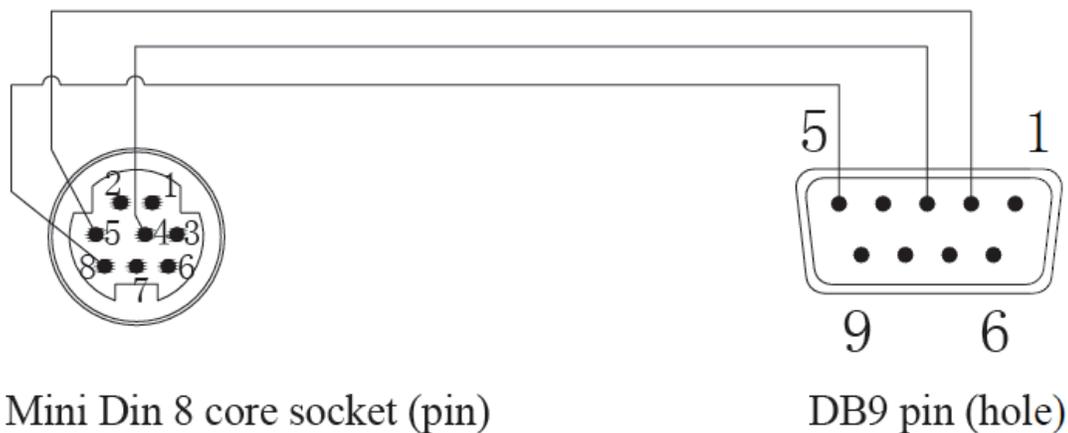
**Figura 2.3.** Pines de puertos de comunicación [4]

En la parte derecha tiene el puerto de conexión para el módulo de expansión.

Tiene indicadores que se encienden cuando el PLC está energizado (PWR), cuando está en modo de activación o de trabajo (RUN), activado desde el programa de manejo en la computadora, y cuando sucede algún error (ERR).

Los terminales de la parte superior son los pertenecientes a las entradas, y los de la parte inferior son las salidas. Cada una de estas tiene su respectivo nombre al finalizar o iniciar los mismos respectivamente. Estos tiene luces indicadoras que se encienden cuando una entrada o salida se activa.

El cable de conexión con la pantalla táctil o programación con la computadora tiene un puerto mini din 8 y un DB9 con los siguientes pines como se observa en la figura 2.4:



**Figura 2.4.** Conexión entre mini din 8 y DB9 [4]

#### 2.4.2 MODULO ANALÓGICO

Se añadió un módulo de expansión al PLC cuyo modelo es THINGET XC-E3AD4PT2DA (figura 2.5) con alimentación de 24 [V<sub>DC</sub>].

El módulo dispone de 4 entradas para sensores de temperatura (exclusivamente para RTD PT100) con conexión de tres hilos, 3 entradas analógicas (de 4 a 20 [mA]) y 2 salidas analógicas de 0 a 10 [V<sub>DC</sub>].



**Figura 2.5.** Módulo de analógico de expansión [5]

### 2.4.3 PANTALLA TOUCHWIN TH765-NT/NU

Este dispositivo permite visualizar la interacción de los elementos electrónicos utilizados en la planta, desde la pantalla se podrá seleccionar el modo de manejo de la planta (manual y semiautomático) y todos los comandos necesarios para el manejo adecuado y eficiente de la planta.

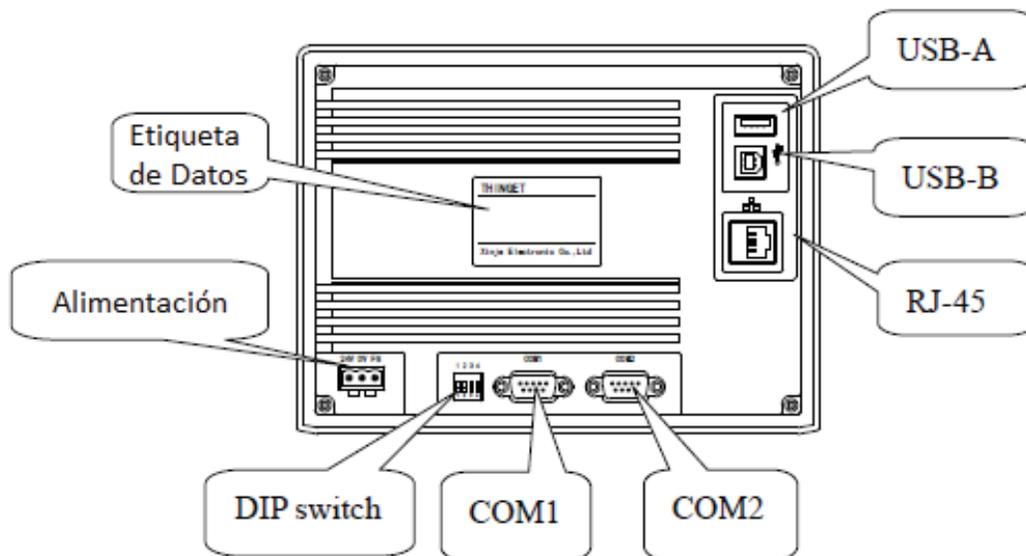
Para el diseño del HMI se usará la pantalla táctil TH765 de la marca XINJE de 7 pulgadas (figura 2.6) debido a la compatibilidad con el PLC que se va a usar.



**Figura 2.6.** Pantalla táctil TouchWin TH765 [3]

La pantalla TH765 es a color (800x480 pixeles), tiene una capacidad de 128 MB de memoria, tiene puertos de conexión para RS232, RS485 y puertos USB.

En la parte posterior de la pantalla táctil se conecta el cable XVP con el PLC, en el COM1, y el cable de programación se conecta en el puerto USB-B. El puerto USB-A se lo puede utilizar para conexiones directas con impresoras como se muestra en la figura 2.7.



**Figura 2.7.** Conectores de la parte posterior de la pantalla [6]

## 2.5 SENSORES

### 2.5.1 TEMPERATURA (RTD)

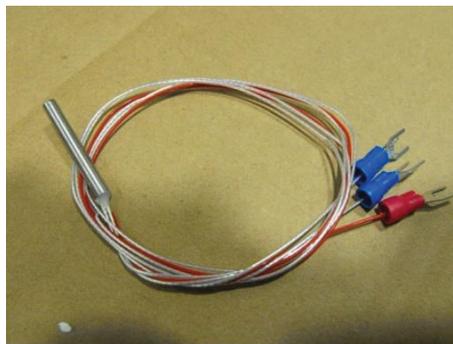
Se escogió el RTD constituido por platino que tiene las siguientes características:

- Margen de temperatura mayor.
- Alta linealidad.
- Puede ser colocada a cierta distancia sin mayor problema hasta unos 30 metros.
- Pero su desventaja con respecto a las demás (tipos de materiales) es su sensibilidad que es menor.

El RTD que vamos a emplear para la medición de la temperatura es el RTD Pt100, que consiste en un alambre de platino que a 0 °C tiene un valor de 100 ohmios y que al aumentar la temperatura aumenta su resistencia eléctrica.

Normalmente las Pt100 industriales se consiguen encapsuladas en la misma forma que las termocuplas, es decir dentro de un tubo de acero inoxidable u otro material (vainas), en un extremo está el elemento sensible (alambre de platino) protegido dentro de una caja redonda de aluminio (cabezal) y en el otro está el terminal eléctrico de los cables.

En la figura 2.8 se puede observar el RTD PT100 que se utilizará.



**Figura 2.8.** RTD PT100 de tres cables

## 2.5.2 NIVEL

Como se menciona en la tabla 2.1, se tiene un sensor de nivel tipo magnético de tres posiciones que se mantendrá en el calderín para la medición de nivel del mismo, y se añadirá un sensor de nivel tipo flotador en la parte baja del pozo.

### 2.5.2.1 Sensor Tipo Flotador

El flotador usado es el LA16M40 (figura 2.9) que tiene un contacto hermético en el cual el movimiento del flotador magnético abre o cierra un contacto eléctrico que funciona NA o NC (girando 180° el sensor en el montaje), es de tipo on-off. La presión máxima es de 2 bares, y la temperatura de trabajo es de -10 a 100°C.



**Figura 2.9.** Flotador lateral magnético

### 2.5.3 PRESIÓN (TRANSDUCTOR DE PRESIÓN CS-PT100) [7]

Este tipo de transductor es muy utilizado para detectar la presión de vapores y líquidos con altas temperaturas, está hecho de acero inoxidable, su estructura es compacta, es de fácil instalación, tiene un bajo costo, ofrece alta seguridad y además puede trabajar en entorno inflamable, puede trabajar en la industria de mecánica, farmacéutica y de alimentos.



**Figura 2.10.** Transductor de presión CS-PT100 [7]

En la figura 2.10 se observa el modelo de transductor seleccionado debido a su rango de medida que es de -1 BAR (-14.5038 PSI) a 5 BAR (72.519 PSI), que dentro de estos valores son los que se trabaja para el calentamiento del calderín, y ofrece una salida de 4 – 20 mA que es la señal enviada al módulo XC-3AD4PT2DA para ser procesada dentro del PLC y el valor obtenido de la presión se pueda visualizar en el panel táctil.

## 2.6 ACTUADORES

### 2.6.1 BOMBA DE PISTÓN 1Ø DE 110 VAC

Uno de los modelos de bombas hidráulicas más comunes, es el de pistones. Este tipo de bomba hidráulica es utilizada para facilitar el transporte de fluidos no compresibles y de gran potencia que bombea fluido a presiones más elevadas que la de las bombas de paletas tradicionales.



**Figura 2.11.** Bomba de pistón monofásica de la columna

La bomba Myers modelo D65-20 Triplex (figura 2.11) es una bomba de pistón de alta presión y alto volumen, cuenta con fácil mantención y limpieza, además tiene un diseño resistente para las más distintas aplicaciones industriales de alta presión las cuales requieren confiabilidad.

Las características técnicas de la bomba son las siguientes:

- Flujo: 65 GPM.
- Presión: hasta 2.000 PSI.
- Reducción automática de velocidad de los engranajes.
- Lubricación continua por todas las direcciones.

### 2.6.2 MOTOR DC (SOLENOIDE CILÍNDRICO)

El solenoide cilíndrico es de marca MAGNET-SCHULTZ, que tiene un diseño de larga carrera con varilla de empuje roscada, cuya nariz de montaje roscado tiene una función de anti-rotación y que es resistente a las sacudidas como se ve en la figura 2.12.



**Figura 2.12.** Solenoide cilíndrico

Este solenoide cilíndrico DC es adecuado para el funcionamiento en cualquier posición, trabaja hasta 24 [V] y con una corriente de 1 [A], puede realizar su trabajo de manera constante a temperaturas mayores de 25°C. El movimiento de salida del cilindro en el interior del solenoide puede llegar a ser de hasta 15 [Kgf].

Este solenoide se encuentra instalado a un lado de la columna, pero el cilindro que empuja al activarse se encuentra dentro de la columna, permitiendo la recolección del destilado moviendo en la parte interna de la columna una copa que redirige el líquido para ser recolectado y se retrae al ser desactivado.

### **2.6.3 BOMBA 3Ø DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO DE 220 VAC**

La bomba que se utiliza para la realimentación de mezcla es de pistón de desplazamiento positivo que crea la succión y la descarga, desplazando el líquido con un elemento móvil. El espacio que ocupa el líquido se llena y vacía forzando y extrayendo el líquido mediante movimiento mecánico.



**Figura 2.13.** Bomba trifásica de desplazamiento positivo presente en el laboratorio

En la figura 2.13 se muestra la bomba de marca Loher & Söhne Ruhstorf, y sus datos de placa son los siguientes:

- Voltaje = 230/500 [V]
- Corriente = 4,65 / 2,7 [A]
- Potencia = 1,5 [Kw]
- Velocidad = 1420 [rev / min]
- Frecuencia = 60 [Hz]

#### 2.6.4 ELECTROVÁLVULA A 110 VAC

Las electroválvulas o válvulas solenoides utilizadas son dispositivos diseñados para controlar el flujo (ON-OFF) y se las puede usar con agua, gas, aire, vapor entre otros. Están fabricadas en acero inoxidable y PVC que se usaron para vapor y líquido, respectivamente.



**Figura 2.14** Electrovalvula de 110 [V] [8]

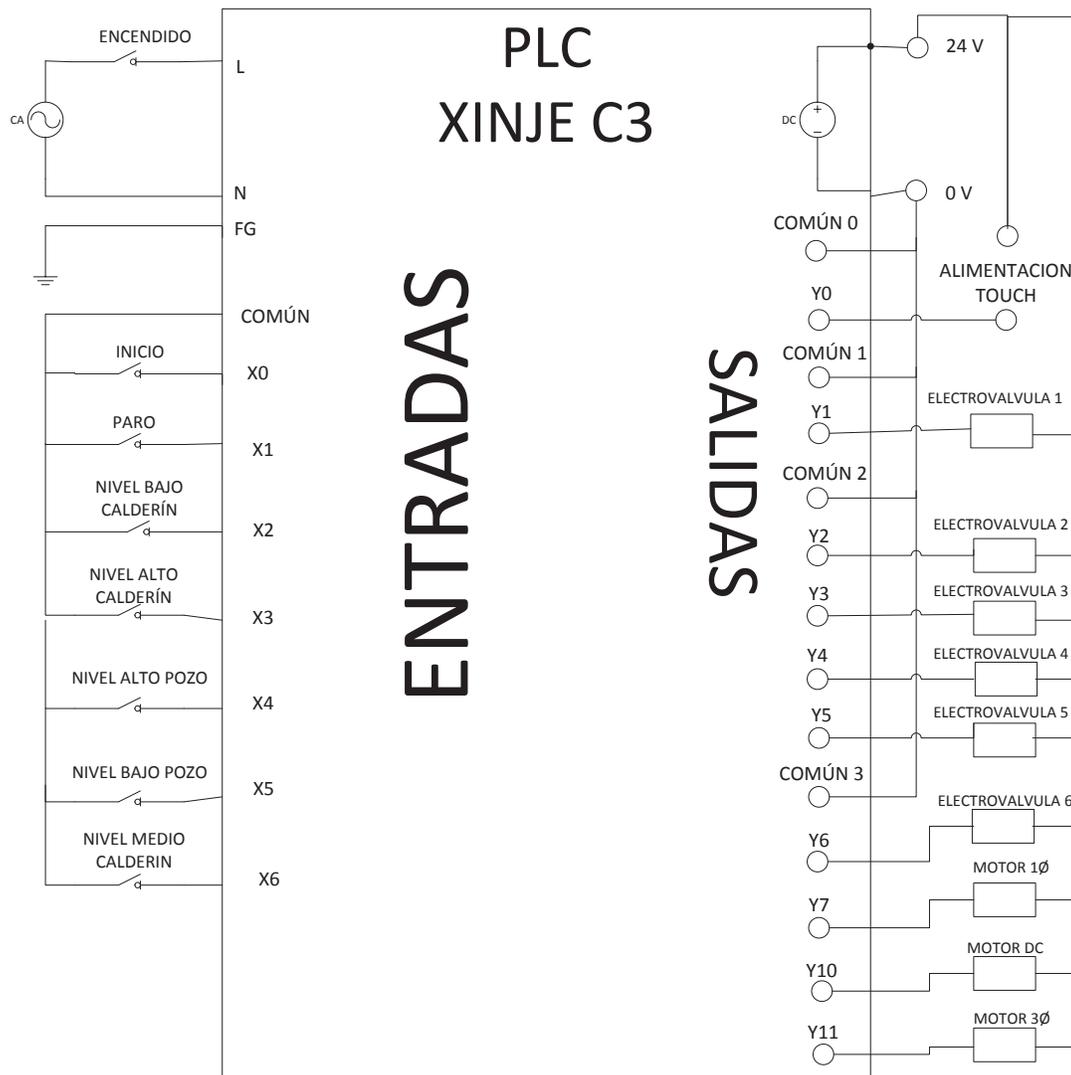
En la figura 2.14 se observa la electrovalvula empleada para el manejo de vapor de agua y presenta las siguientes características:

- Tamaño = 3/4"
- Patrón de movimiento = Acción directa
- Presión de trabajo = 0 a 100 PSI
- Temperatura de funcionamiento = -5°C – 90°C

## 2.7 DIAGRAMAS DE CONEXIÓN

### 2.7.1 ENTRADAS Y SALIDAS PLC

En la figura 2.15 se muestra a que entradas o salidas del PLC van conectados los elementos requeridos para el manejo de la planta como son sensores, electroválvulas y motores, además de las conexiones realizadas, tanto de alimentación, como de puntos físicos comunes que se conectaron.



**Figura 2.15.** Diagrama de conexión de entradas y salidas del PLC

En las siguientes tablas 2.5 y 2.6 se describen las entradas y salidas utilizadas descritas en el diagrama de conexión del PLC (figura 2.15).

**Tabla 2.5.** Entradas físicas usadas en el PLC

<b>ENTRADAS</b>			
Inicio	X0	Pulsador que energiza la pantalla táctil	
Paro	X1	Botón de paro de emergencia que al activarse detiene el proceso	
Nivel bajo calderín	X2	Sensor de nivel Tipo Flotador De 3 posiciones	Se activa al no haber mezcla en el calderín
Nivel alto calderín	X3		Se activa cuando el calderín está en su capacidad máxima
Nivel medio calderín	X6		Se activa cuando el nivel del calderín está en el punto medio
Nivel alto pozo	X4	Sensor de nivel que se activa cuando los desechos en el pozo está en su punto máximo	
Nivel bajo pozo	X5	Sensor de nivel que se activa cuando los desechos del pozo está en su punto inferior	

**Tabla 2.6.** Salidas físicas usadas en el PLC

<b>SALIDAS</b>		
Alimentación Touch	Y0	Encendido panel táctil y luz de encendido
Electroválvula 1	Y1	Electroválvula alimentación mezcla (V1)
Electroválvula 2	Y2	Electroválvula purga (V2)
Electroválvula 3	Y3	Electroválvula alimentación vapor (V3)
Electroválvula 4	Y4	Electroválvula trampa de vapor (V4)
Electroválvula 5	Y5	Electroválvula residuos (V5)
Electroválvula 6	Y6	Electroválvula refrigerante(V6)
Motor 1ø	Y7	Bomba de 110V pozo
Motor DC	Y10	Motor DC de recolección
Motor 3ø	Y11	Bomba de 220V realimentación

### 2.7.2 MÓDULO DE EXPANSIÓN

Al módulo de expansión están conectados todos los RTDs, el transductor de presión y el transmisor. Este módulo se alimenta con 24 [V] tomados del PLC como se muestra en la figura 2.16.

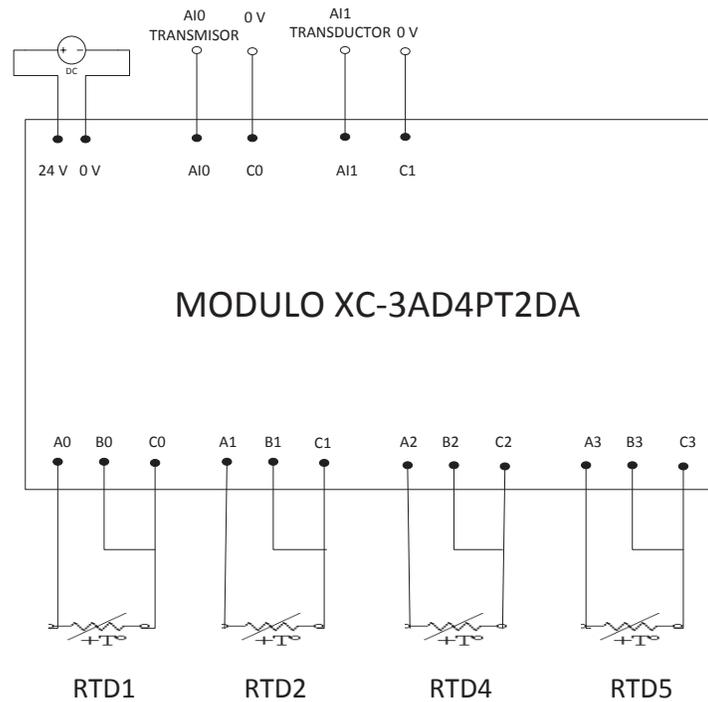


Figura 2.16. Diagrama de conexión del módulo de expansión

### 2.7.3 TOUCH PANEL

El panel táctil se alimenta con 24 [V] tomados del PLC y se comunican a su vez con un cable XVP con conexión a tierra como se ve en la figura 2.17.

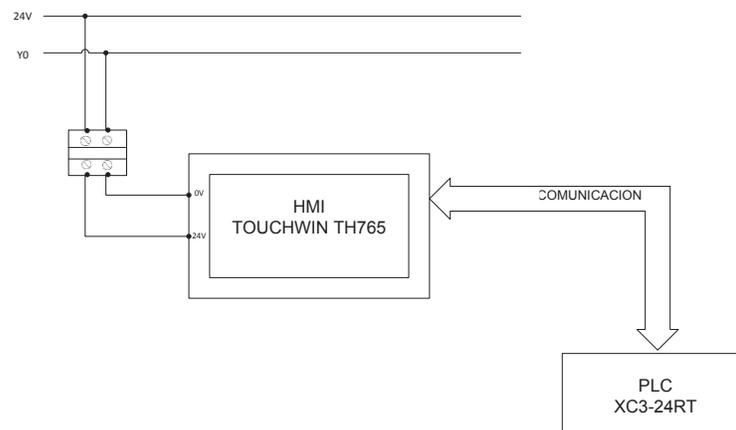
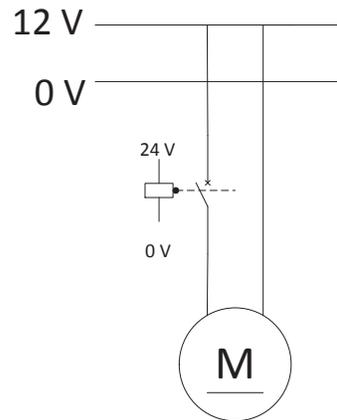


Figura 2.17. Diagrama de conexión de la pantalla táctil

### 2.7.4 MOTOR DC

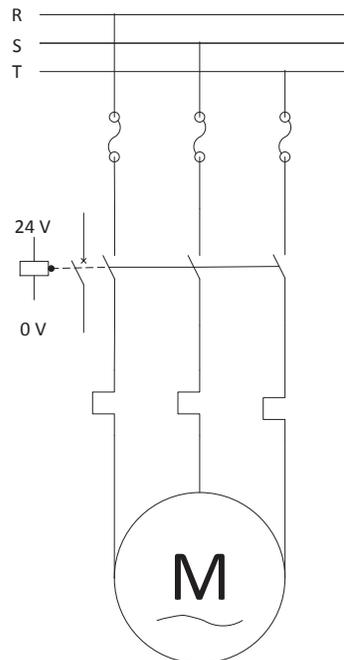
Este motor controla la recolección de alcohol, y va conectado a una fuente de 12 [V], su conexión se ve en la figura 2.18.



**Figura 2.18.** Diagrama de conexión del solenoide cilíndrico DC

### 2.7.5 BOMBA DE PISTÓN 3Ø DE 220 VAC

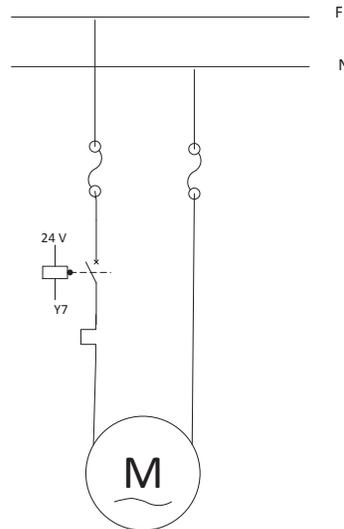
La bomba de desplazamiento positivo va conectada a un guarda motor, además tiene fusibles como protección como se ve en la figura 2.19.



**Figura 2.19.** Diagrama de conexión del motor trifásico de la bomba

### 2.7.6 BOMBA 1Ø DE 110 VAC

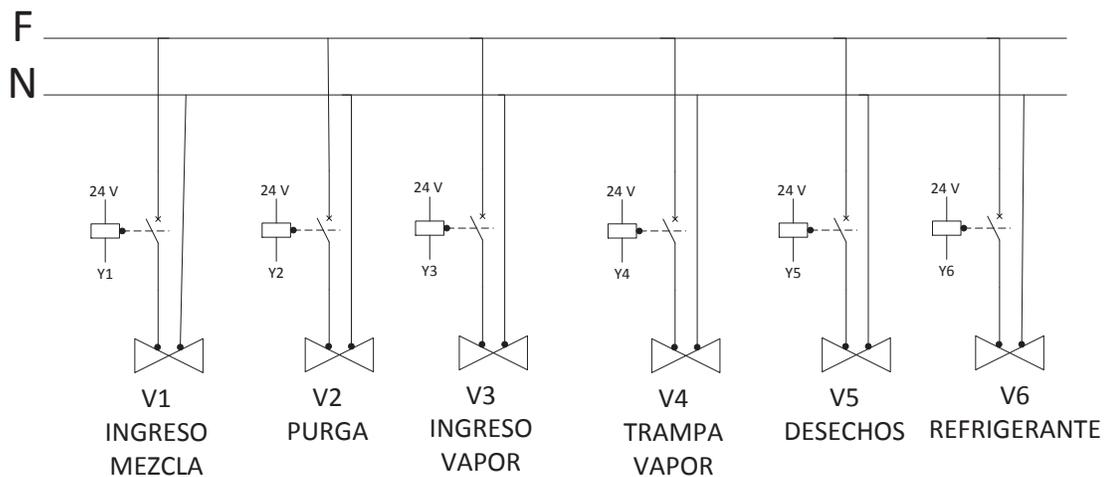
La bomba de desalajo de desechos presenta la siguiente conexión mostrada en la figura 2.20.



**Figura 2.20.** Diagrama de conexión del motor monofásico

### 2.7.7 ELECTROVÁLVULAS 110 VAC

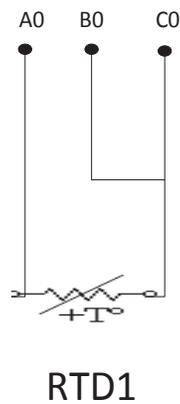
Todas las electroválvulas (PVC y cobre) trabajan a 110 [V] y su activación se realiza por intermedio de los relés de control, su conexión se indica en la figura 2.21.



**Figura 2.21.** Diagrama de conexión de las electroválvulas

### 2.7.8 SENSOR DE TEMPERATURA

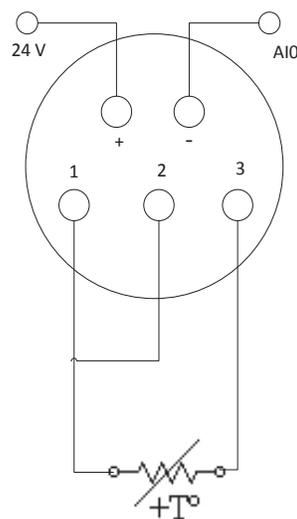
Los sensores de temperatura RTD tienen 3 cables (positivo y dos comunes), que van conectados al módulo de expansión y este se encarga del acondicionamiento de la señal recibida y su conexión se muestra en la figura 2.22.



**Figura 2.22.** Diagrama de conexión de los sensores de temperatura RTD

### 2.7.9 TRANSMISOR

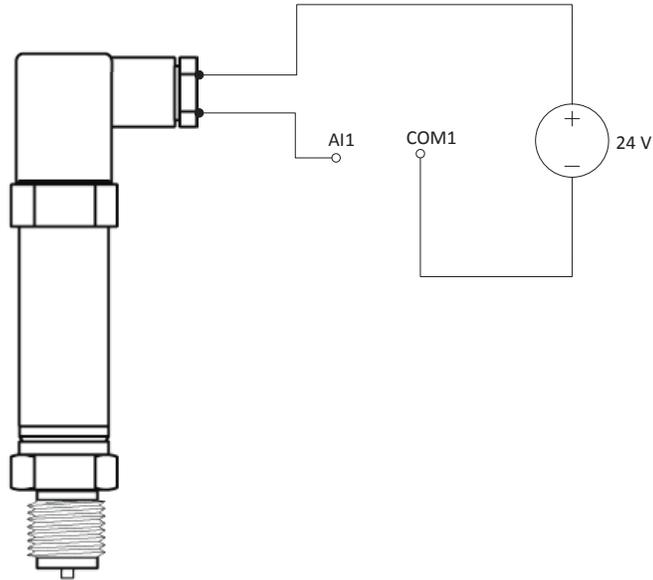
Tiene alimentación de 24 [V], al cual ingresan los tres cables del RTD y su conexión se muestra en la figura 2.23. Este transmisor se usó ya que el módulo de expansión solo tiene cuatro puertos para RTDs, y se requería un sensor de temperatura más.



**Figura 2.23.** Diagrama de conexión del transmisor

### 2.7.10 TRANSDUCTOR

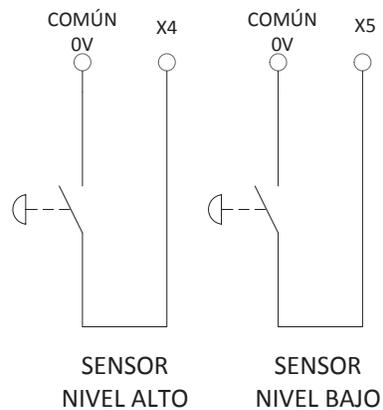
La conexión del transductor de presión se observa en la figura 2.24.



**Figura 2.24.** Diagrama de conexión del transmisor de presión

### 2.7.11 SENSORES DE NIVEL DEL POZO

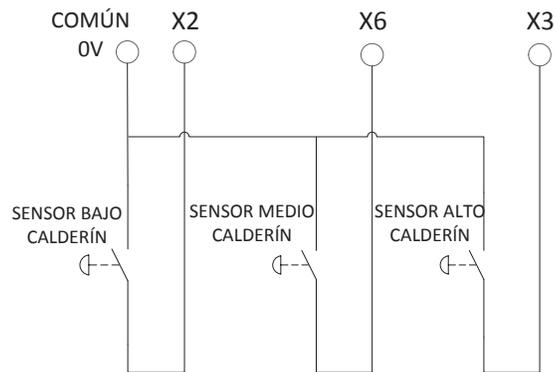
Son sensores de nivel tipo flotador que se encuentran ubicados en la pared lateral del pozo, que determinan si el nivel del pozo está al máximo de su capacidad o cuando se encuentra en su nivel bajo, su conexión se muestra en la figura 2.25.



**Figura 2.25.** Diagrama de conexión de los sensores de nivel del pozo

### 2.7.12 SENSOR DE NIVEL DEL CALDERÍN

Este es un sensor de nivel tipo flotador de tres posiciones que nos da señal de nivel alto, medio y bajo, su conexión se observa en la figura 2.26.



**Figura 2.26.** Diagrama de conexión del sensor de nivel del calderín

## 2.8 TABLEROS ELÉCTRICOS

A continuación se detalla e ilustra la estructura interna y externa de los tableros que se instalaron para el control de la columna de destilación.

### 2.8.1 TABLERO DE CONTROL

EL tablero de control se encuentra a la izquierda de la planta para una mejor visualización de las variables en el panel, la cercanía del tablero nos permite la facilidad de conexión de los sensores, actuadores y demás elementos.

En el tablero se encuentran los elementos de control, donde llegan los sensores y del cual salen las señales hacia el tablero de potencia, para la activación de los actuadores.

En la parte interior del tablero de control se encuentran los siguientes elementos:

PLC, el módulo de expansión, las borneras para el mejor manejo de los cables y el transmisor para el RTD como se ve en la figura 2.27.



**Figura 2.27.** Vista Interna del tablero de control

La figura 2.28 nos muestra la parte externa del tablero donde se puede observar la pantalla táctil, el interruptor de llave, un pulsador, la luz piloto y un pulsador de emergencia.



**Figura 2.28.** Vista externa del tablero de control

A continuación se detallaran los elementos que están allí presentes.

### 2.8.1.1 Interruptor con Llave

Es el interruptor de encendido, que energiza el tablero de control, y arranca el PLC para iniciar el proceso.

Es de marca EBCHQ el voltaje de trabajo es hasta 400 [V], corriente de 10 [A], en la figura 2.29 se puede ver el interruptor que se menciona.



**Figura 2.29.** Interruptor con llave

### 2.8.1.2 Pulsador de Inicio

Este pulsador de inicio (figura 2.30) energiza la pantalla táctil que mostrara las pantallas para el manejo de la planta.

Su voltaje de trabajo es hasta 400 [V], corriente de 10 [A] y de marca EBCHQ.



**Figura 2.30.** Pulsador

### 2.8.1.3 Paro de Emergencia

El botón de paro de emergencia permite detener el proceso en caso de alguna falla, al accionarse desactiva todos los actuadores.

Es un contacto normalmente cerrado, que se activa al presionarlo, y se desactiva rotando la perilla (figura 2.31).

Es de marca EBCHQ, trabaja hasta 400 [V] y 10 [A].



**Figura 2.31.** Paro de emergencia

#### **2.8.1.4 Luz de Encendido**

Esta luz (figura 2.32) indica que el PLC está energizado (después de activar el interruptor con llave), con lo que ya podemos encender el panel táctil con el pulsador de inicio.

La luz es de marca EBCHQ, que trabaja a 24 [V] y una corriente de 20 [mA].



**Figura 2.32.** Luz piloto

## **2.8.2 TABLERO DE POTENCIA**

Este tablero se encuentra en la parte superior del tablero de control, el cual contiene los elementos de potencia y los relés para la activación de los actuadores.

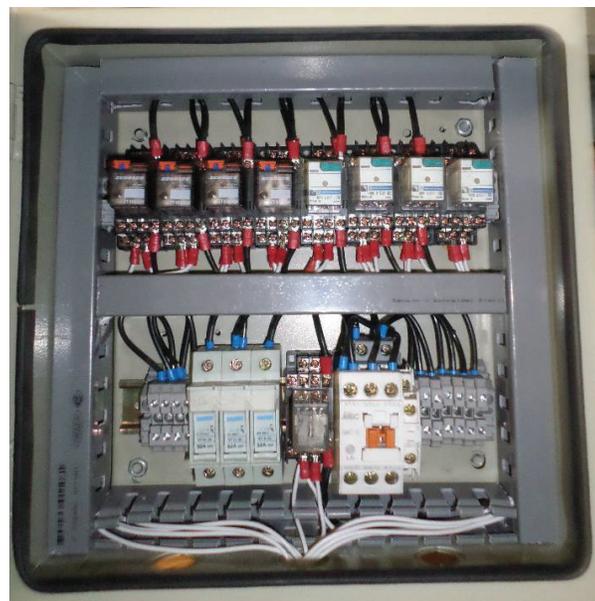
En la figura 2.33 se observa la parte exterior del tablero.



**Figura 2.33.** Vista externa del tablero de potencia

En el cual se pueden observar las luces piloto que se activarán acorde al actuador que correspondan como son: calentar (V3), refrigerar (V6), desechar (bomba 1 $\emptyset$ ) y evacuar (V5).

En la figura 2.34 se observa el contenido de la parte interior de este tablero.



**Figura 2.34.** Vista interna del tablero de potencia

En el cual se pueden observar los relés de todos los actuadores, las borneras, el contactor trifásico, y la base porta fusibles con sus respectivos fusibles

### 2.8.2.1 Relés Industriales de Potencia

El relé o relevador, es un dispositivo electromecánico, que funciona como un interruptor controlado por un circuito eléctrico en el que, por medio de una bobina y un electroimán, se acciona un juego de uno o varios contactos que permiten abrir o cerrar otros circuitos eléctricos independientes.



**Figura 2.35.** Relé industrial SCHRACK

Las marcas de los relés usados fueron SCHRACK (figura 2.35) y TELEMECANIQUE cuya bobina se activa a 24 [V<sub>DC</sub>], y trabajan a 110 [V<sub>AC</sub>]. Ambas opciones tienen 4 contactos cerrados y abiertos, por lo que al activarse la bobina, todos cambian de estado.

### 2.8.2.2 Contactor Trifásico 220 [V]

Los contactores son utilizados como interruptores electromagnéticos para la conexión o desconexión en circuitos de elevada tensión y potencia, como en el caso del motor trifásico presente en la planta.

Se seleccionó un contactor de tres polos marca MEC (figura 2.36), cuyo modelo es GMCD-9 que trabaja acorde a los datos del motor.

Sus datos de trabajo son los siguientes:

- Voltaje de 200-240 [V]
- Amperaje de 11 [A]
- Potencia de 2.5 [KW]



**Figura 2.36.** Contactor trifásico MEC 220 [V]

### 2.8.2.3 Fusibles

Los fusibles que se usaron son cilíndricos de la serie RT18 de marca SASSIN (figura 2.37), cuyo rango de tensión es de 380 voltios, con un alto poder de corte de 20 [KA] y de calibre 2 [A].

Los fusibles se escogieron ya que sirven de protección para el motor trifásico de desplazamiento positivo, cuyo amperaje de trabajo es de 1,5 [A] por lo que los elementos seleccionados son los correctos para proteger el motor.



**Figura 2.37.** Tipos de fusibles SASSIN [9]

Los fusibles van colocados en su base porta fusibles (figura 2.38) cuyo rango de tensión es de 230 a 500 [V].



**Figura 2.38.** Porta fusibles SASSIN [9]

#### 2.8.2.4 Luces de Señalización

Se ubicaron luces señalizadores en el tablero marca STROM (figura 2.39) que trabajan desde 110 hasta 220 [V] y corriente de trabajo de 20 [mA] para visualizar la activación determinadas electroválvulas del proceso, como son la alimentación de vapor, la evacuación de los desechos, activación de la bomba del pozo y la activación de los refrigerantes.



**Figura 2.39.** Luces piloto

## 2.9 MONTAJE

En la tabla 2.7 se detalla los cambios de hardware realizados:

**Tabla 2.7.** Elementos Instalados

<b>ELEMENTO</b>	<b>CONDICIÓN</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
PLC	Nuevo	Para realizar el control de la Columna
Módulo Analógico	Nuevo	Para acondicionar las señales obtenidas de los RTDs y transductor de Presión
Pantalla Táctil	Nuevo	Para visualizar el HMI
Sensor de Temperatura RTD	Nuevo	Se sustituyó los sensores analógicos LM35 por RTDs PT100
Sensor de Nivel del Calderín	Adecuado	Se realizó mantenimiento y se obtuvo las señales requeridas
Sensor de Nivel del Pozo Alto	Adecuado	Se adecuo el sensor para obtener la señal requerida
Sensor de Nivel del Pozo Bajo	Nuevo	Se instaló un nuevo sensor para el apagado de la bomba de desechos
Transductor de Presión	Nuevo	Se instaló un nuevo sensor para determinar la presión de ingreso de vapor y mostrarlo en el HMI
Bomba de Pistón 1Ø	Adecuado	Se adecuo para su correcto funcionamiento
Bomba de Pistón 3Ø	Adecuado	Se adecuo para habilitar la etapa de realimentación
Electroválvula	Nuevo	Se instalaron 5 nuevas electroválvulas y se adecuo la de refrigerante
Solenoides Cilíndrico DC	Adecuado	Se adecuo para mejorar la etapa de recolección
Válvulas Manuales	Adecuado	Se mantuvieron para seguridad y mantenimiento

### 2.9.1 TABLERO DE CONTROL

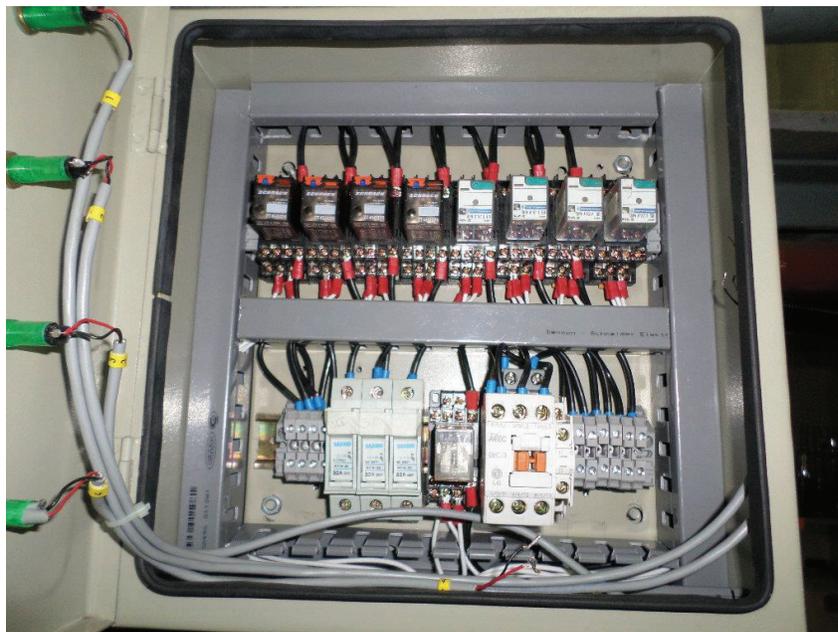
Al tablero de control llegaron los cables de los sensores presentes en la planta, cables de conexión de los pulsadores, luz de inicio, y el cable de comunicación XVP entre el PLC y el panel táctil como se observa en la figura 2.40.



**Figura 2.40.** Montaje de los elementos presentes en el tablero de control

## 2.9.2 TABLERO DE POTENCIA

Al tablero de potencia se conectaron los cables para la activación o desactivación de los diferentes actuadores presentes en la columna, en la figura 2.41 se puede observar dichas conexiones.



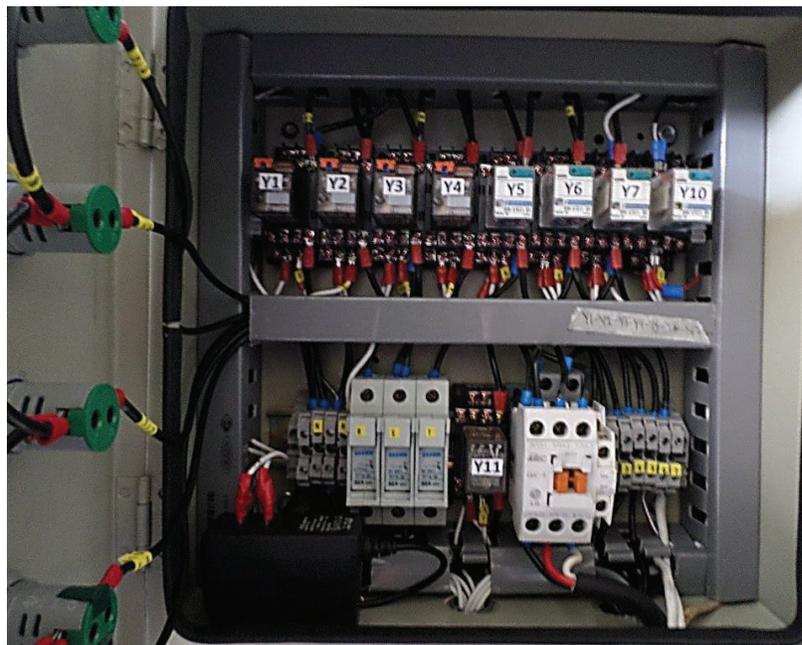
**Figura 2.41.** Montaje de los elementos presentes en el tablero de potencia

### 2.9.3 SEÑALIZACIÓN DEL CABLEADO

Para la señalización del cableado se usan marquillas para determinar el elemento conectado, para la identificación de los RTDs se utilizan las iniciales T con el respectivo número de sensor de temperatura, para los diferentes sensores de nivel se ocupan la respectiva entrada que se asignó para su conexión (Tabla 2.5).

Para los actuadores se usa la marca de la respectiva salida del PLC (Tabla 2.6) tanto en el tablero de control como en el de potencia, se puede observar en la figura 2.42 la señalización del cableado.

Se usan borneras para la conexión como por ejemplo de la conexión a 24 [V] en el tablero de control, o el punto común en el tablero de potencia.



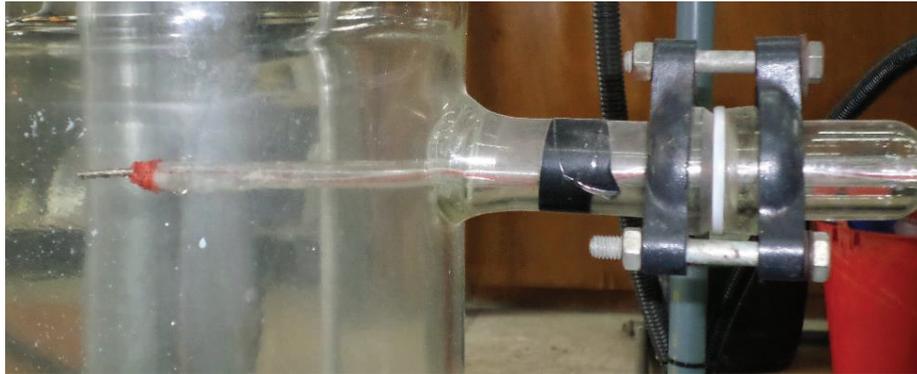
**Figura 2.42.** Señalización del tablero de potencia

### 2.9.4 INSTALACIÓN DE SENSORES

Se instalaron 5 sensores de temperatura en la columna, el transductor de presión cerca de la electroválvula de ingreso de vapor y el sensor de nivel bajo en el pozo de los desechos.

#### 2.9.4.1 Sensores de Temperatura

Los diferentes sensores de temperatura están colocados en el calderín y en las diferentes etapas de la columna con los acoples propios de la misma como se ve en la figura 2.43.



**Figura 2.43.** Montaje de los sensores de temperatura RTD en la columna

#### 2.9.4.2 Sensores de Nivel

El sensor de nivel se ubica en la parte inferior del pozo para determinar el desalojo total de los desechos del mismo y desactivar la bomba de desalojo de desechos, el cableado tiene protección de una tubería de cobre para evitar el contacto con el agua como se observa en la figura 2.44.



**Figura 2.44.** Montaje del sensor de nivel tipo flotador en el pozo de desechos

### 2.9.4.3 Sensores de Presión

El sensor de presión está colocado sobre la electroválvula de ingreso de vapor, mediante una T de bronce con reducción como se ve en la figura 2.45.



**Figura 2.45.** Montaje del transmisor de presión en la tubería de ingreso de vapor

### 2.9.5 INSTALACIÓN DE ELECTROVALVULAS

Las electroválvulas de bronce están colocadas en la tubería de ingreso de vapor, en la etapa de purga y a la salida de la trampa de vapor.

Están instaladas con neplos y uniones de cobre y se acopló parte de la tubería en las cuales se requería como se muestra en la figura 2.46.



**Figura 2.46.** Montaje de las electroválvulas en la tubería de ingreso de vapor

Para el ingreso de mezcla y desalojo de la misma, se usó electroválvulas de menor peso, ya que se tenían que instalar en partes sensibles de la columna, por lo que se optó por colocar electroválvulas plásticas que resistan la temperatura de la mezcla que están en el calderín como se observa en la figura 2.47.



**Figura 2.47.** Montaje de la electroválvula en el ingreso de la mezcla

### 2.9.6 REHABILITACIÓN DE LA ETAPA DE REALIMENTACIÓN

Para rehabilitar la etapa de realimentación (figura 2.48) se adecuaron las tuberías necesarias para el ingreso de la mezcla hacia el calderín, además de las conexiones eléctricas del motor de desplazamiento positivo que será activado mediante la implementación de un sistema de control desde el PLC.



**Figura 2.48.** Etapa de realimentación de la mezcla

### 2.9.6.1 Habilitación de la Etapa de Calentamiento

Se habilitó esta etapa a partir de la electroválvula de trampa, que al cerrarse permite que los condensados que salen de la trampa de vapor pasen por una tubería, llegando al depósito por el cual la mezcla ingresa a la etapa de realimentación. La trampa de vapor tiene por objetivo eliminar los condensados que se producen en la tubería del serpentín, esos desechos eran evacuados al pozo, por los que se instaló la electroválvula para aprovechar esos condensados y precalentar la mezcla como se ve en la figura 2.49.



**Figura 2.49.** Montaje de la electroválvula de trampa

Se añadió la tubería para que los condensados entren desde la trampa de vapor y salgan directo al desagüe (figura 2.50), permitiendo que la mezcla que pasa por la bomba de desplazamiento positivo se precaliente antes de ingresar a la columna.



**Figura 2.50.** Depósito de calentamiento

## 2.10 P&ID ACTUAL

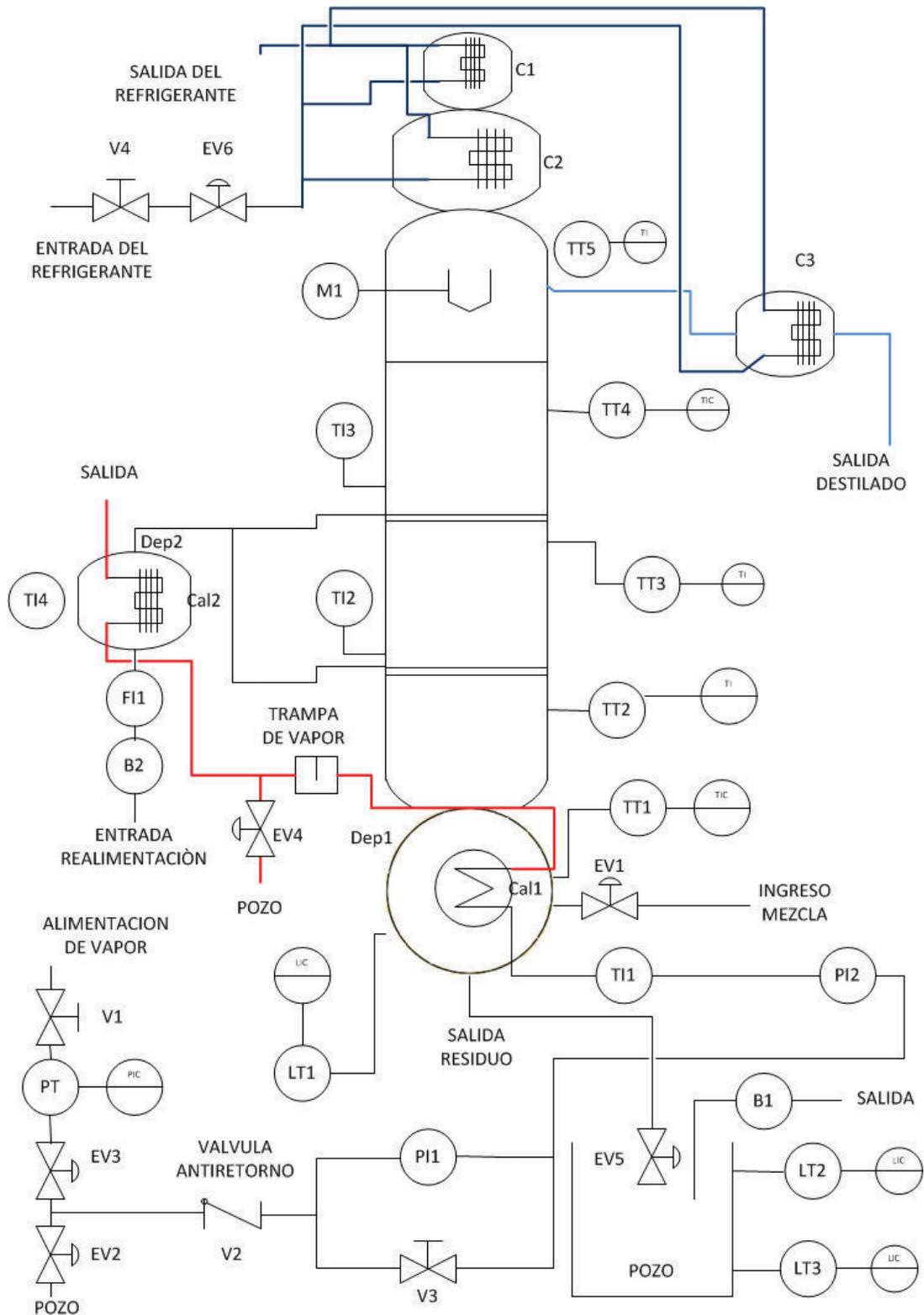


Figura 2.51 P&ID actual de la columna de destilación atmosférica

Se estableció un nuevo esquema para la planta en el cual se especifica la ubicación de las electroválvulas añadidas, los actuadores y sensores instalados y/o adecuados de la columna y los elementos de manejo.

### **2.10.1 NOMENCLATURA UTILIZADA**

- TT = Transmisor de Temperatura
- LT = Transmisor de Nivel
- PT = Transmisor de Presión
- TI = Indicador de Temperatura
- FI = Indicador de Flujo
- PI = Indicador de Presión
- TIC = Controlador Indicador de Temperatura
- PIC = Controlador Indicador de Presión
- LIC = Controlador Indicador de Nivel
- V = Válvula
- EV = Electroválvula
- B = Bomba
- M = Motor Solenoide
- C = Condensador
- LC = Control Local
- Dep = Depósito de Almacenamiento
- Cal = Calderín

En la figura 2.52 se observa la columna de destilación atmosférica después de la instalación de los elementos mencionados y lista para su utilización.



Figura 2.52 Columna de destilación atmosférica actual

## **CAPÍTULO 3**

### **DISEÑO DE SOFTWARE**

#### **3.1 INTRODUCCIÓN**

El control del proceso se lo realiza mediante el uso de un PLC que sirve para la automatización del mismo, el cual se encarga de recibir las señales de los sensores, de los pulsadores, procesarlas y ejecutar las acciones que se hayan programado.

Además se encarga de recibir y enviar información al panel táctil, que es el dispositivo que permite la visualización de los datos que han sido ingresados, en qué estado se encuentra el proceso, los datos procesados, curvas de las señales, entre otras características.

#### **3.2 PROGRAMAS USADOS PARA PROGRAMACIÓN DEL PLC Y HMI**

Los programas usados para la programación tanto del PLC y del panel táctil son los siguientes:

##### **3.2.1 XC SERIES PROGRAM TOOL**

Es el software libre que se utiliza para la programación del PLC XINJE de las series XC, la programación se la puede realizar mediante lenguaje ladder o mediante código de instrucciones, que son lenguajes de programación muy didácticos para el programador.

Adicionalmente permite la visualización (observar los diferentes registros, contadores, timer, marcas, salidas), edición (modificar el programa que se está ejecutando, para ello el PLC debe estar en modo STOP) y control del programa (colocar en RUN o STOP al PLC y forzar los estados lógicos de las entradas, marcas y asignar valores a los diferentes registros) que se está ejecutando en el

PLC, así como configurar los diferentes módulos de entrada y salida que se desee conectar.

### **3.2.2 TOUCHWIN EDIT TOOL**

Es el software libre que se utiliza para la programación del HMI XINJE de las series TH765, la programación se la realiza mediante pantallas (screen) que es un lenguaje conocido, didáctico y fácil de programar.

Permite como en la mayoría de los HMI ingresar botones de inicio (interruptores, pulsadores), teclado, luces piloto, alarma (buzzer), display (numérico, texto), gráficos, curvas en tiempo real. La configuración de la comunicación del HMI con el PLC al igual que la configuración para descargar el programa realizado al HMI es sencilla.

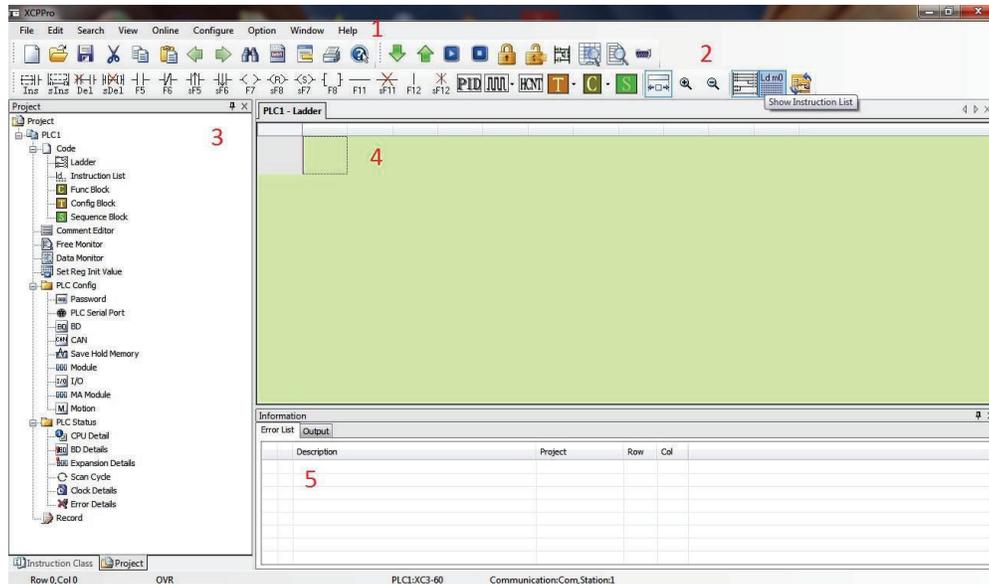
## **3.3 REQUISITOS DE INSTALACIÓN Y ENTORNO DE TRABAJO:**

### **3.3.1 XC SERIES PROGRAM TOOL**

Para la instalación del programa y su correcto funcionamiento se necesita mínimo los siguientes requerimientos tanto de hardware como software:

- Sistema operativo Windows XP o 7, aún no está disponible para Windows 8 ni 10
- Procesador Pentium 4 o superior
- Memoria RAM de 1 GB
- Espacio en el disco donde se instalará 200 MB
- Puerto USB 2.0
- Cable USB – SERIAL para la comunicación entre la PC y el PLC

Una vez que se haya instalado el programa, al momento de iniciarlo se tiene la siguiente ventana de trabajo como se muestra en la figura 3.1, donde se tiene 5 áreas definidas:



**Figura 3.1.** Pantalla de trabajo de XC Series Program Tool

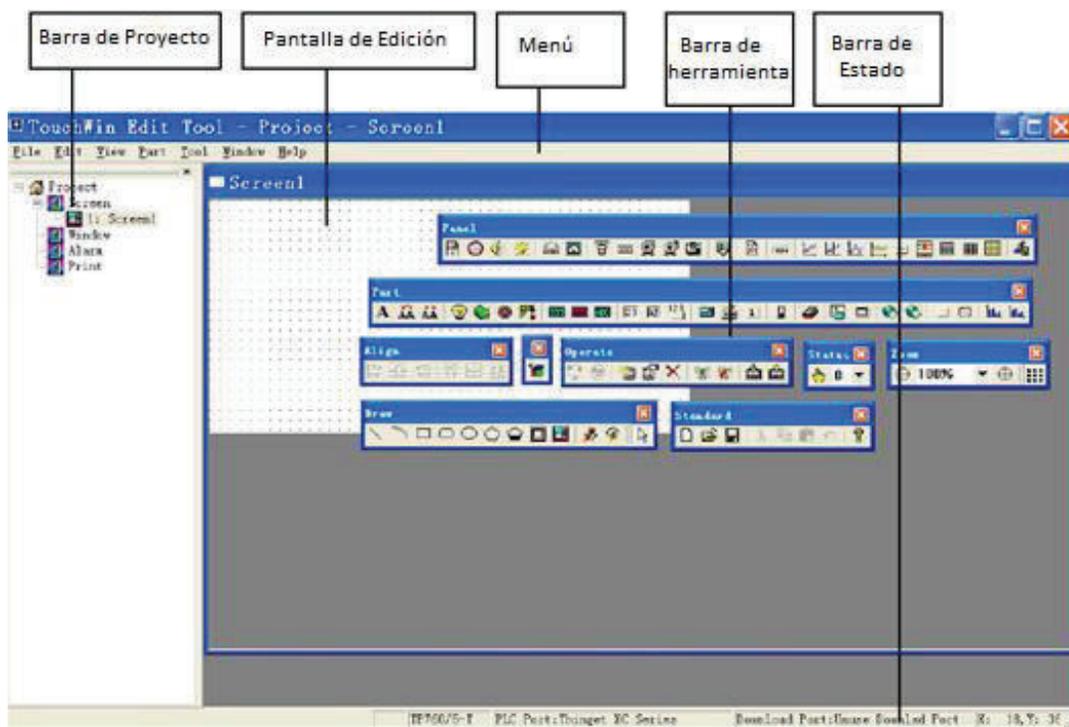
1. Barra de menú: es donde se tiene todas las opciones del XC Pro, como por ejemplo guardar o abrir un programa, cortar y pegar, buscar, configurar la comunicación, etc.
2. Barra de herramientas o accesos rápidos: presenta íconos relevantes o frecuentemente usados para la programación o edición de archivos.
3. Barra de proyecto: es la barra que permite cambiar el lenguaje de programación, insertar bloques de funciones, añadir una contraseña, configurar la comunicación serial, es decir, es la barra donde se puede configurar todos parámetros del PLC.
4. Área de trabajo: es donde se desarrolla el programa que se cargara al PLC para su ejecución.
5. Área de información: es donde se tiene información sobre la compilación del programa, si hay alguna instrucción errónea o si no se ha podido guardar en la memoria del PLC el programa desarrollado por el usuario.

### 3.3.2 TOUCHWIN EDIT TOOL

Los requisitos mínimos para su instalación y buen funcionamiento del programa para la programación del panel táctil son los siguientes:

- Sistema operativo Windows 7 o superior
- Procesador Pentium 4 o superior
- Memoria RAM de 1GB
- Espacio libre en el disco duro de 200 MB
- Puerto USB 2.0
- Cable AAB

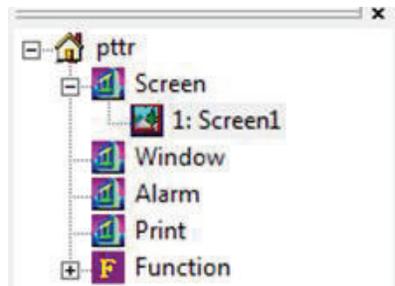
Para empezar con el diseño del HMI se debe tener en cuenta los diferentes elementos de la pantalla de trabajo (figura 3.2):



**Figura 3.2.** Pantalla de trabajo de TouchWin Edit Tool [6]

### 3.3.2.1 Barra de Proyecto

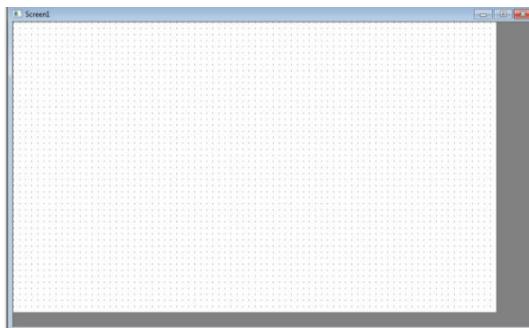
Presenta el nombre del proyecto (figura 3.3), la pantalla (screen) en la que se está trabajando, la ventana (window) que nos permite añadir una ventana que nos sirva de señalización, el botón de impresión (print), el botón de alarma y el botón de función (en el caso de usar un PID).



**Figura 3.3.** Barra de proyecto de TouchWin Edit Tool

### 3.3.2.2 Área de Edición

Esta es el área de trabajo (figura 3.4) en la que se diseñan las diferentes pantallas de presentación del HMI del proceso, en base a los iconos de la barra de herramientas.



**Figura 3.4.** Área de edición de TouchWin Edit Tool

### 3.3.2.3 Menú

La barra de menú nos permite la selección de diferentes opciones de archivo, apertura de nuevos proyectos, edición de los mismos, y las opciones de herramientas de trabajo (es muy parecido a las opciones que presenta Word).

### 3.3.2.4 Barra de Herramientas

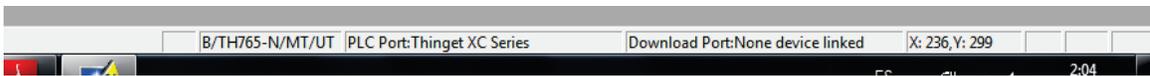
En la barra de herramientas se encuentran los elementos que van en la pantalla de trabajo que permiten hacer un HMI que sea de fácil manejo y programación, como se observa en la figura 3.5, tales como pulsadores, tuberías, luces indicadores, motores, alarmas, añadir gráficos externos, etc.



**Figura 3.5.** Barra de herramientas de TouchWin Edit Tool

### 3.3.2.5 Barra de Estado

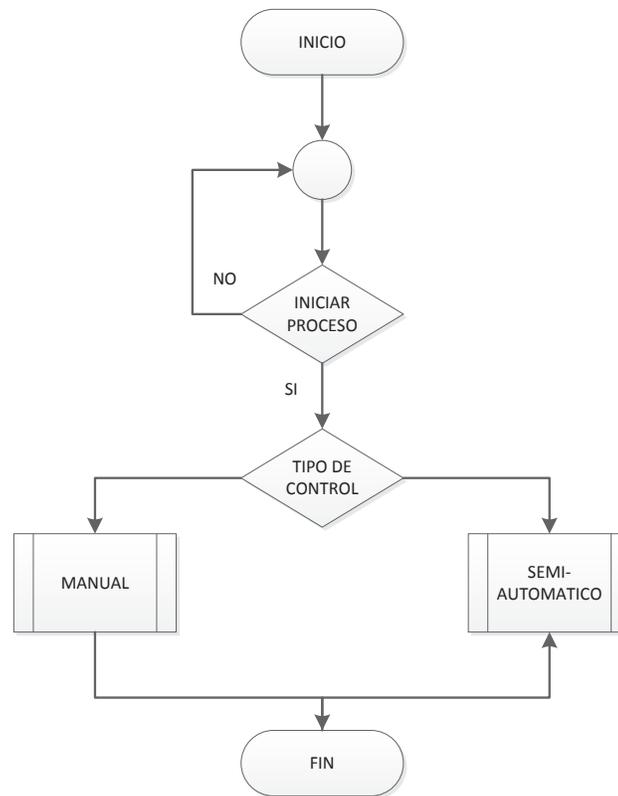
Esta indica los datos físicos establecidos al inicio de la apertura de la pantalla de trabajo (figura 3.6) como modelo del panel táctil, puerto del PLC, puerto de descarga, coordenada en la que se encuentra el ratón en la pantalla de trabajo.



**Figura 3.6.** Barra de estado de TouchWin Edit Tool

## 3.4 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA IMPLEMENTADO

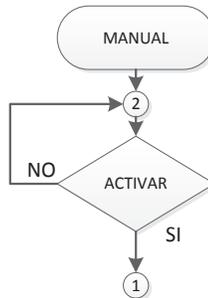
### 3.4.1 LÓGICA GENERAL



**Figura 3.7.** Inicio y selección de modo de trabajo

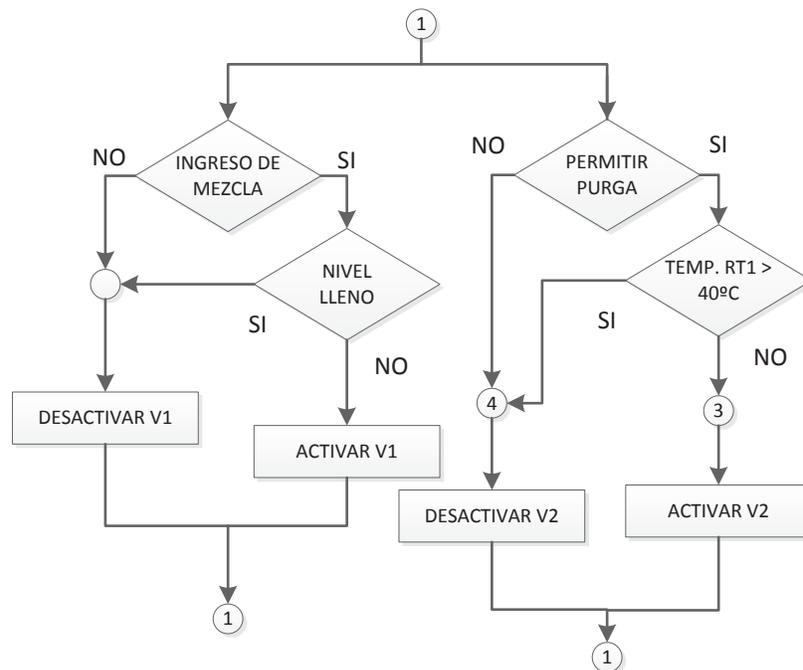
### 3.4.2 CONTROL MANUAL

Para iniciar el proceso en modo manual es necesario activar el control.



**Figura 3.8.** Activación del control manual

La activación de los actuadores en el control manual se lo puede realizar en cualquier momento, teniendo en cuenta ciertas restricciones. A continuación se describe el diagrama de flujo de cada una de ellas.



**Figura 3.9.** Activación de las electroválvulas de mezcla (V1) y purga (V2)

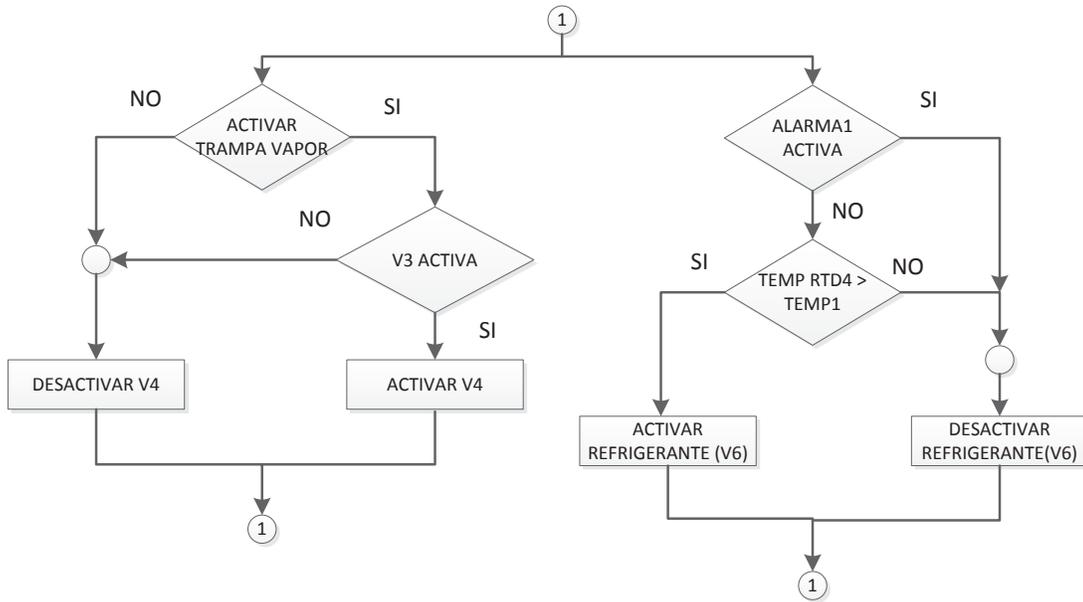


Figura 3.10. Activación de las electroválvulas de trampa (V4) y refrigerante (V6)

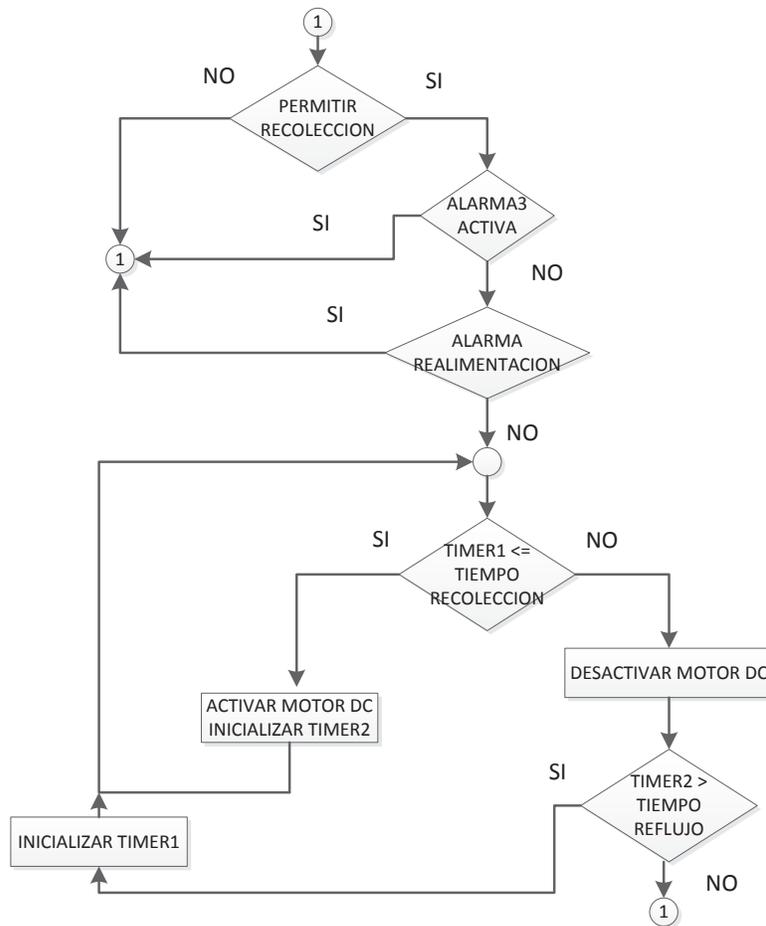
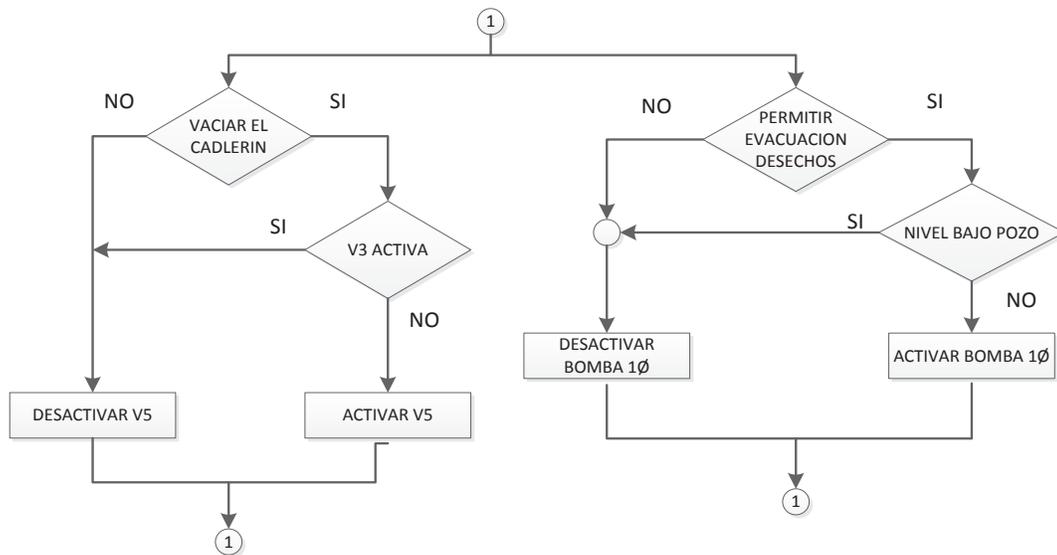
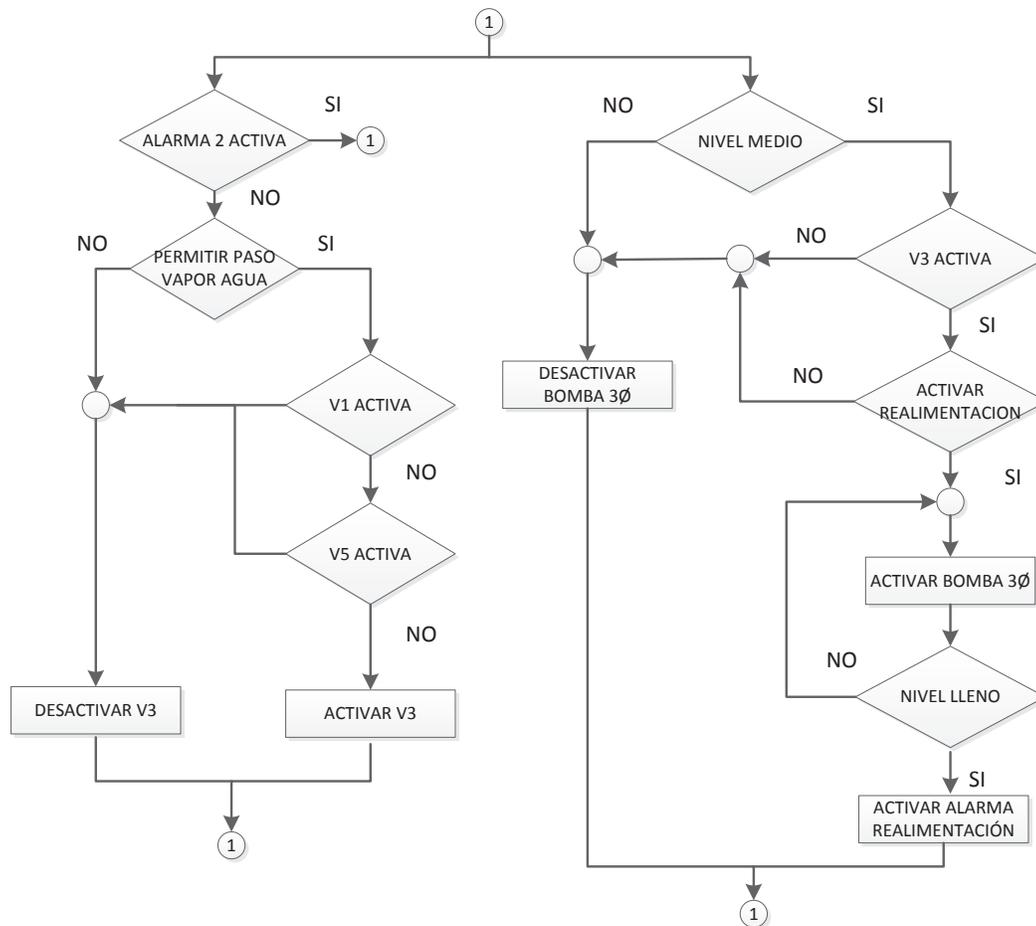


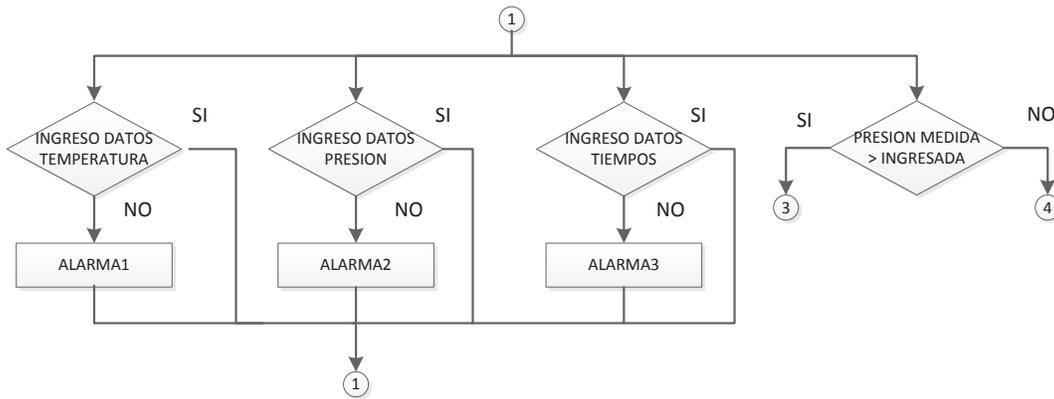
Figura 3.11. Condiciones para la activación de motor de recolección



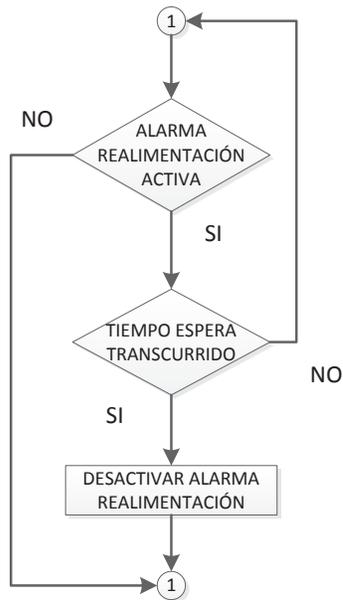
**Figura 3.12.** Activación de electroválvula de desechos (V5) y bomba del pozo



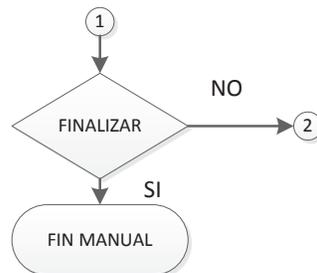
**Figura 3.13.** Condiciones para la activación de la electroválvula de vapor (V3) y la bomba trifásica de realimentación



**Figura 3.14.** Activación de alarmas



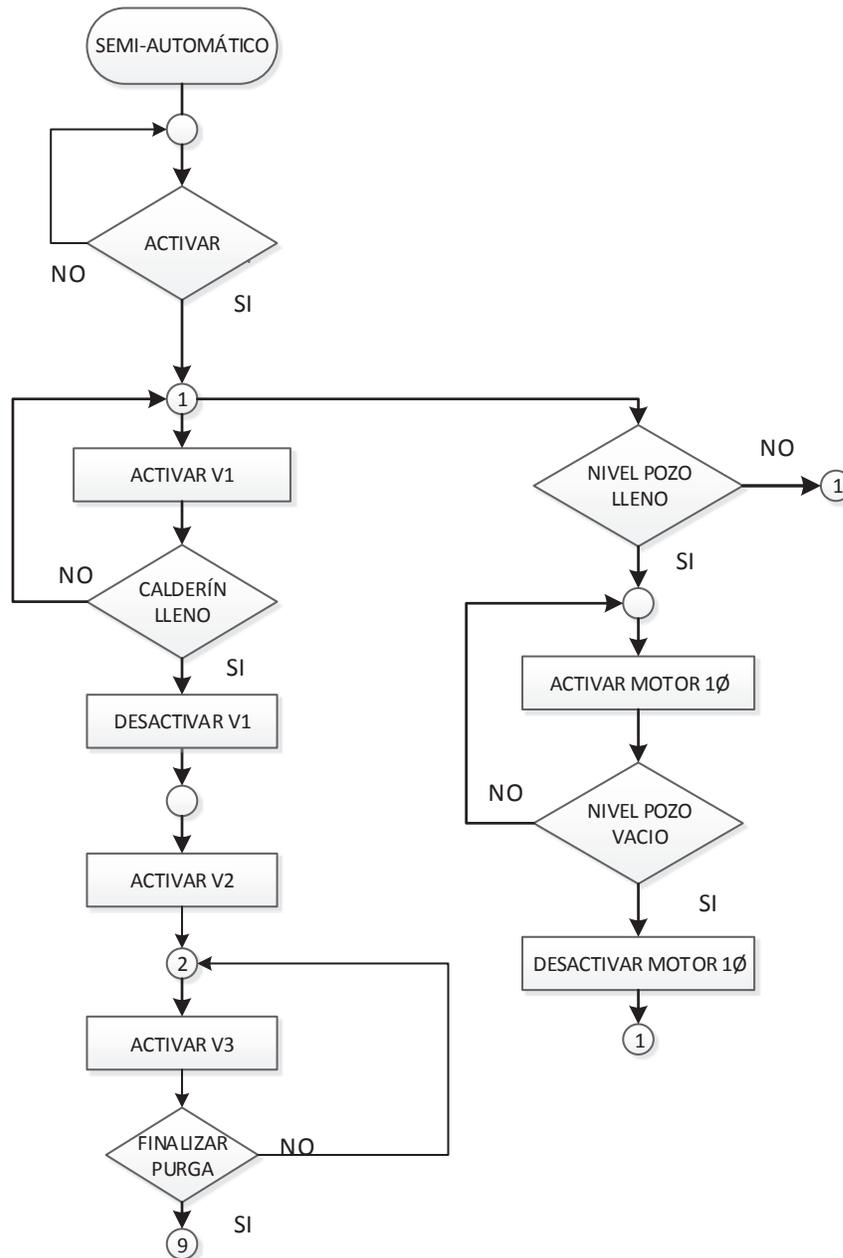
**Figura 3.15.** Activación de alarma de realimentación



**Figura 3.16.** Desactivación del control manual

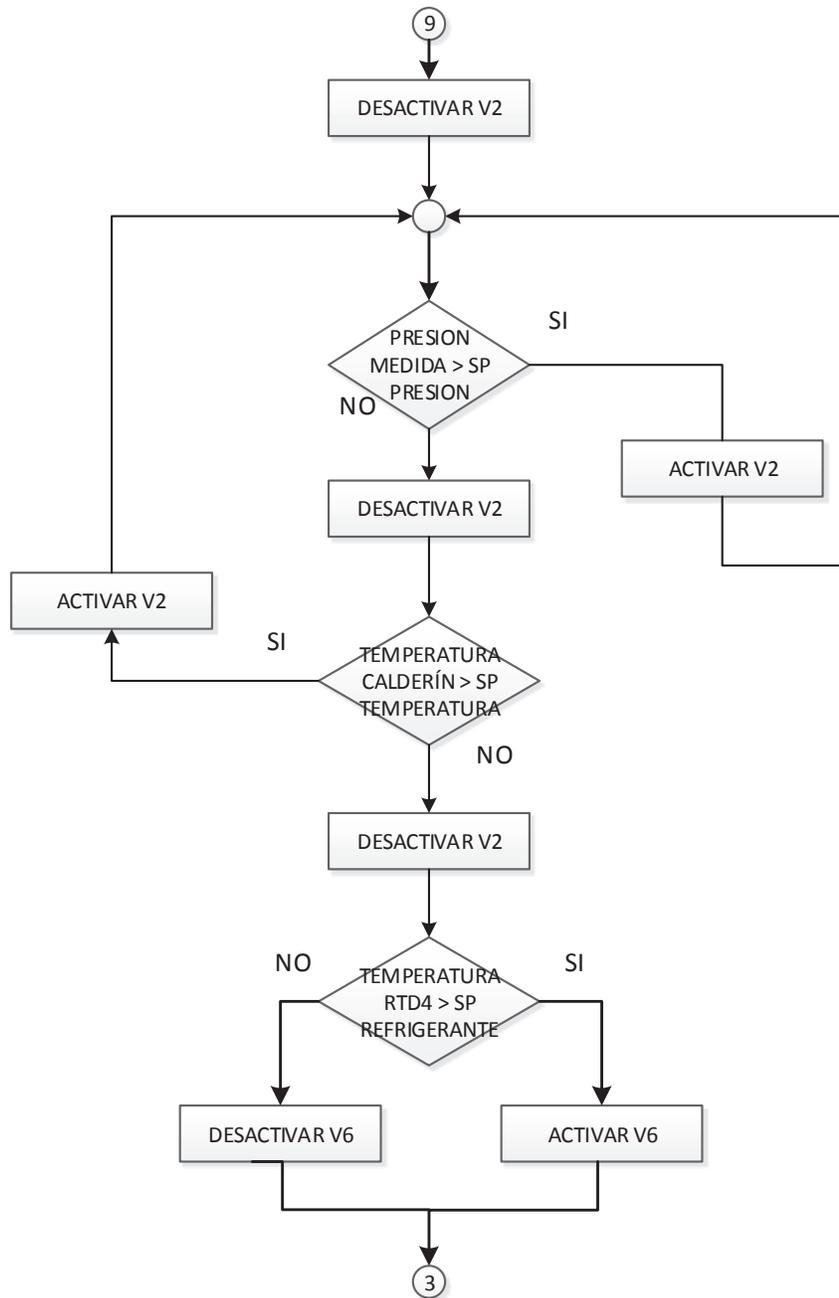
### 3.4.3 CONTROL SEMIAUTOMÁTICO

Se describe los pasos que ejecuta el PLC cuando se trabaja en modo semiautomático:



**Figura 3.17.** Etapa de ingreso de mezcla (V1), ingreso de vapor (V2), vaciado de pozo y purga (V3)

El proceso inicia activando el control e inmediatamente se activa la etapa de ingreso de mezcla y siempre se ejecuta la etapa de vaciado del pozo de desechos. Una vez terminada la etapa de llenado se ejecuta la etapa de purga.



**Figura 3.18.** Etapa de regulación de ingreso de vapor (V2) y refrigerantes (V6)

Una vez que la purga es desactivada por el usuario se ejecuta la etapa de regulación de presión y la etapa de activación de refrigerantes, donde SP es el set point tanto de la temperatura como de la presión de ingreso de vapor establecidas para el control.

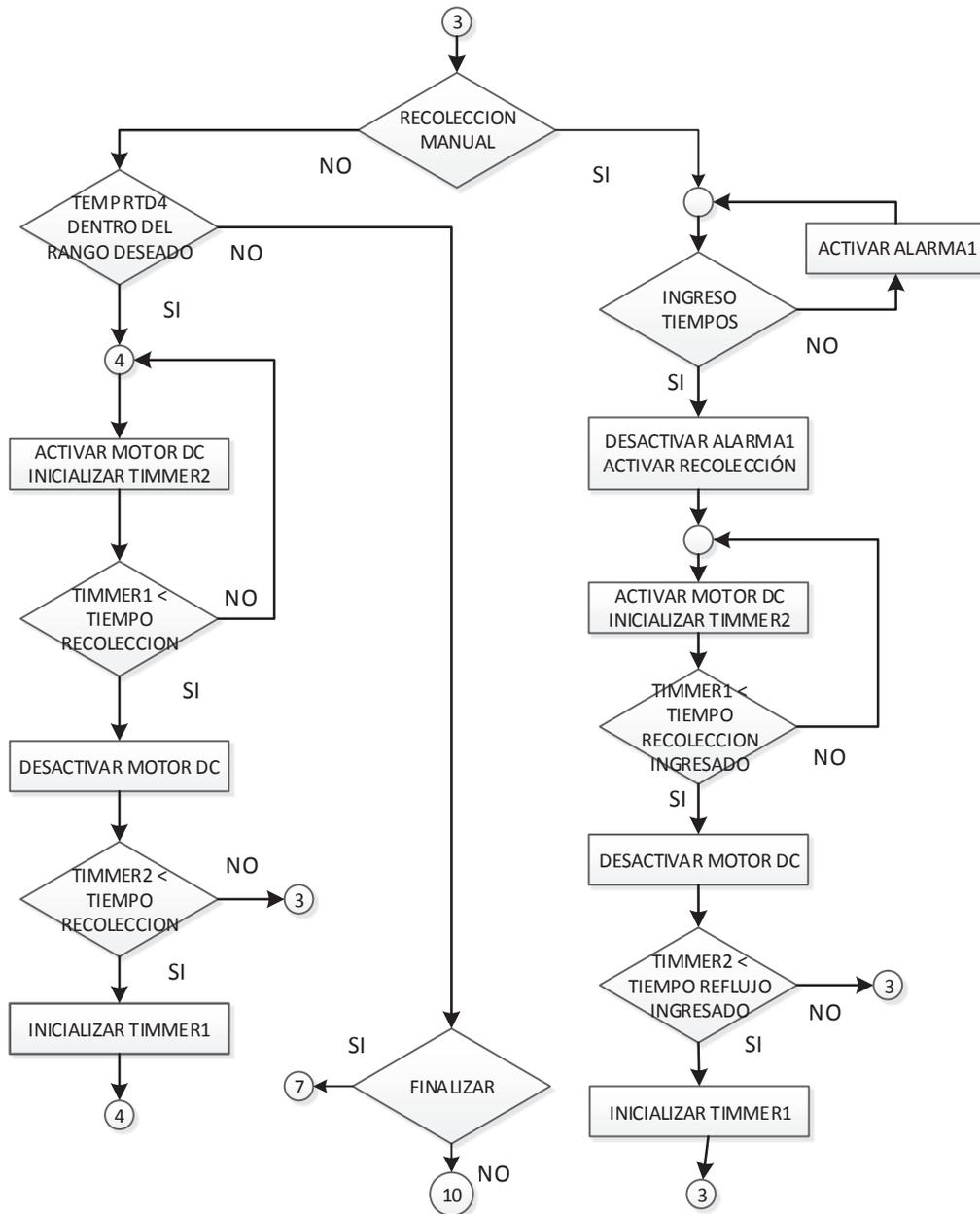
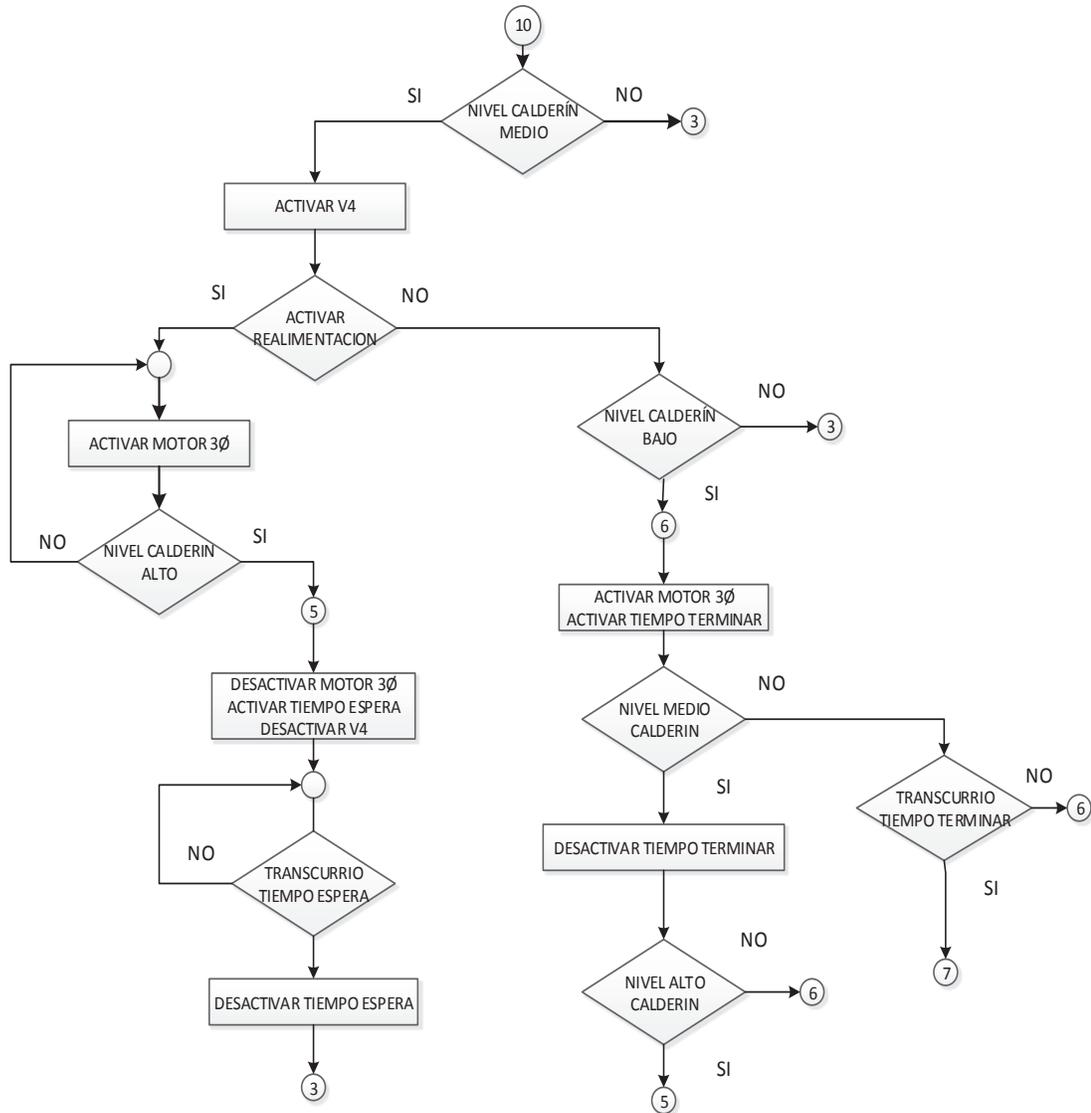


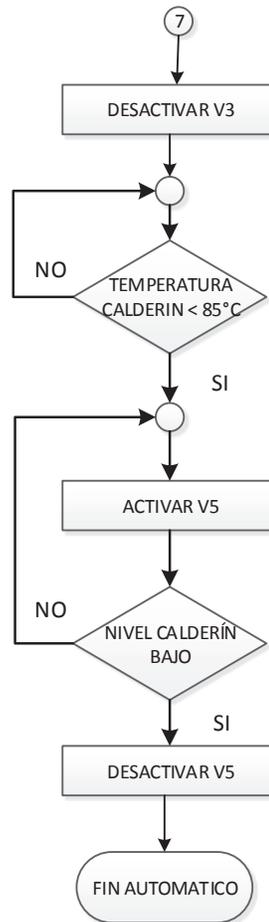
Figura 3.19. Etapa de recolección

Cuando se tiene el valor de concentración deseado se activa la etapa de recolección donde el usuario puede elegir el modo de recolección.



**Figura 3.20.** Etapa de realimentación y etapa de precalentamiento (V4)

Al haber recolectado cierta cantidad de destilado, el nivel en el calderín desciende y a partir del nivel medio se activa la etapa de realimentación.



**Figura 3.21.** Etapa de finalización

Cuando el nivel de mezcla del calderín se mantiene bajo o el usuario desea terminar el proceso se activa la etapa de finalización.

### 3.5 ESTIMACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN

Para determinar la concentración de alcohol obtenida en el producto destilado, utilizamos la estimación mediante el uso de las ecuaciones de la Ley de Dalton, la Ley de Raoult y la ecuación de Antoine.

Para lo cual, como primer paso mediante la ecuación de Antoine se determina el valor de  $T$  (temperatura de ebullición) despejada de la ecuación 1.9, de cada uno de los elementos presentes en la mezcla, que en este caso de estudio son: agua y alcohol etílico (etanol).

$$T = \frac{B}{A - \ln P} - C \quad (3.1)$$

Los valores de las constantes A, B y C de cada uno de los elementos se encuentra en la tabla 3.1, P es el valor de la presión a condiciones normales que es de 1 atm = 760 mmHg a nivel de mar, pero como la práctica se la realiza a una altitud aproximada de 2850 msnm el valor aproximado de la presión atmosférica es de 10,4 PSI que es equivalente a 537,83 mmHg que es la unidad con la que se trabaja en la expresión y T es la temperatura de ebullición cuyo resultado da en unidades de °K por lo que para obtener en °C se debe restar 273 del valor resultante.

**Tabla 3.1.** Presiones de vapor de diversas sustancias [10]

Nombre	Fórmula	Intervalo(k)	A	B	C
Ácido acético	C2H4O2	290 - 430	18,8080	3405,57	-56,34
Acetona	C3H6O	241 - 350	16,6513	2940,46	-35,93
Amoniaco	NH3	179 - 261	16,9481	2132,50	-32,98
Benceno	C6H6	280 - 377	15,9008	2788,51	-52,36
<b>Alcohol etílico</b>	<b>C2H6O</b>	<b>270 - 369</b>	<b>18,5242</b>	<b>3578,91</b>	<b>-50,50</b>
<b>Agua</b>	<b>H2O</b>	<b>284 - 441</b>	<b>18,3036</b>	<b>3816,44</b>	<b>-46,13</b>

Se obtuvo el valor de la temperatura de ebullición para el agua en 90,74 °C (aproximadamente 91°C) y para el etanol en 69,97 °C (aproximadamente 70°C), el siguiente paso es variar la temperatura de ebullición de menor valor, que es la del etanol, hasta la temperatura de ebullición de mayor valor, en pasos de 0,1 °C y así obtener las presiones parciales de cada uno de los elementos, con la ecuación de Antoine. Para la presión parcial del agua (Pa) presente en la mezcla se tiene:

$$Pa = e^{A - \frac{B}{C+T}} \quad (3.2)$$

Mientras que para la presión parcial del etanol (Pb) presente en la mezcla se tiene:

$$Pb = e^{A - \frac{B}{C+T}} \quad (3.3)$$

Ambas presiones parciales se modifican variando la temperatura, que es la que se va a tener presente en la columna de destilación. Con estos valores de las presiones parciales lo siguiente es calcular las fracciones parciales a partir de la ecuación 1.11, que es el valor de las concentraciones de los elementos en estado vapor (Y) y líquido (X).

El valor de la concentración en el estado líquido (X) se obtiene de la siguiente manera:

$$X = \frac{P - P_a}{P_b - P_a} \quad (3.4)$$

Mientras que la concentración para el estado de vapor (Y) se obtiene a partir de la ecuación 1.14:

$$Y = \frac{P_b * X}{P} \quad (3.5)$$

Cabe recalcar que estos valores de concentración calculados son para el etanol que es el elemento más volátil de la mezcla. Como se mencionó la variación de la temperatura se la realizó en pasos de 0,1°C en el paquete computacional de Microsoft Excel y así obtener los diferentes valores de presiones parciales y fracciones parciales (concentración del etanol en estado líquido (X) y vapor (Y)).

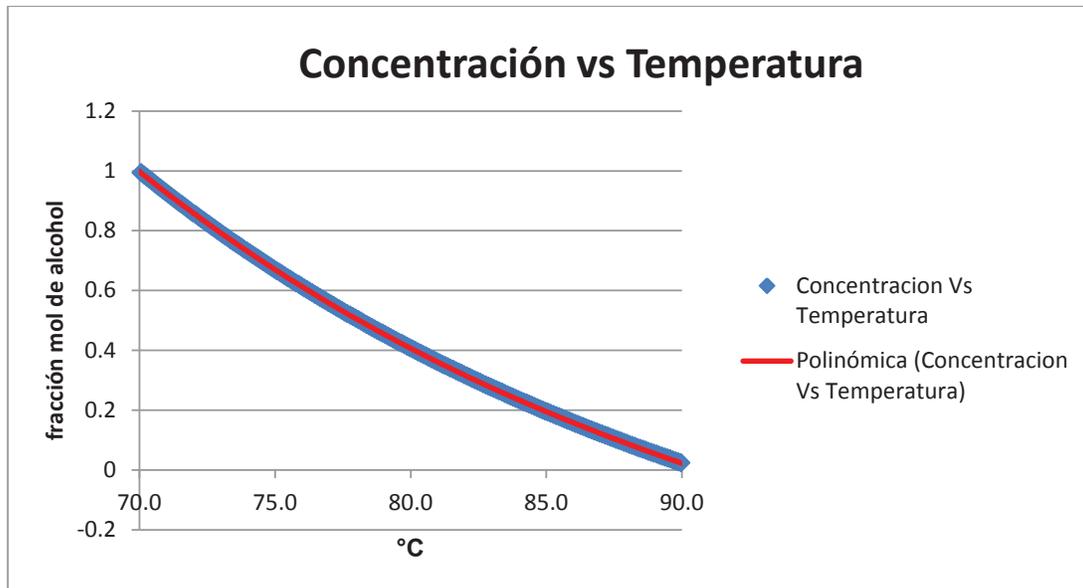
Los valores para realizar la gráfica de la ecuación se mostrarán en el ANEXO 1.

### 3.5.1 CÁLCULO DE LA ECUACIÓN

Una vez obtenidos los valores de la concentración del etanol a diferentes valores de temperatura se utilizó dos paquetes computaciones diferentes para determinar la ecuación del valor estimado de la concentración de alcohol del producto destilado en términos de la variación de la temperatura.

Mediante el paquete computacional Excel se procede a insertar un gráfico de dispersión donde los valores del eje vertical (Y) son de la concentración y los valores del eje horizontal (X) son los valores de la variación de la temperatura.

Una vez obtenida la curva se agrega una línea de tendencia donde la más aproximada es una curva polinómica de segundo orden, cuyo grafico se muestra en la figura 3.22.



**Figura 3.22.** Gráfica de la ecuación de tendencia de concentración vs temperatura

Cuya ecuación para expresar el valor la concentración del destilado en base a la variación de la temperatura es la siguiente:

$$y = 0,001x^2 - 0,2102x + 10,74 \quad (3.6)$$

Donde x representa el valor de la temperatura en cualquier instante e y la concentración del destilado en dicho instante.

Para comprobar el trabajo que se realiza se usará Matlab.

Este paquete computacional trabaja con matrices, por lo que los valores de la temperatura y de la concentración fueron arregladas en matrices de [1 x 127] con los valores obtenidos experimentalmente. Dichas matrices fueron ingresadas y se utilizó el comando POLYFIT, el cual ordena en el plano (x, y) las matrices ingresadas y realiza un ajuste en el polinomio de orden n (por ejemplo n=1 para una recta), dicha función devuelve un vector con los valores de los coeficientes de la ecuación de la gráfica obtenida en orden decreciente de grado.

Para realizar este procedimiento se genera un archivo .m en el cual se varían los valores ingresados y también cambiar el orden del polinomio de ajuste. En la gráfica 3.23 podemos observar el código implementado:

```

1  %Concentracion vs temperatura
2  %Temperatura
3  temp = [69.996245 70.096245 70.196245 70.296245 70.396245 70.496245 70.596245]
4  %Liquido
5  x = [1 0.992659392 0.985352764 0.978079934 0.970840719 0.963634938 0.956462411 0.949322959]
6  %Coeficientes de la ecuacion liquido
7  A=polyfit(temp,x,2)
8

```

**Figura 3.23.** Ecuación concentración vs temperatura

Donde la matriz temp representa la variación de la temperatura y x el valor de la concentración obtenida al variar el valor de la temperatura, una vez ejecutado (RUN) dicho programa, se obtuvo la siguiente la ecuación:

$$y = 0,001x^2 - 0,2072x + 10,6277 \quad (3.7)$$

Como podemos observar la ecuación 3.6 y la ecuación 3.7 tienen sus coeficientes con valores muy similares, por lo que se escogió la ecuación obtenida con el MATLAB para ser ingresada al PLC y luego con la ayuda de los diferentes comandos se pueda visualizar el valor de la concentración en el HMI.

### 3.6 DISEÑO DEL PROGRAMA IMPLEMENTADO EN EL PLC

El programa implementado en el PLC para el control de la columna de destilación, fue desarrollado por etapas como se detalla a continuación.

#### 3.6.1 ENTRADAS Y SALIDAS UTILIZADAS

Se determinó las entradas y salidas físicas que se van a tener conectadas en el PLC, luego se asignó el bit o registro a ser utilizado en el programa de control.

Donde las entradas utilizadas fueron las siguientes (Tabla 3.2):

**Tabla 3.2.** Entradas usadas en el PLC

<b>ENTRADAS</b>	
<b>FISICA</b>	<b>BIT/REGISTRO</b>
Pulsador inicio (encender panel)	X0
Pulsador PARO/EMERGENCIA	X1
Señal baja calderín	X2
Señal alta calderín	X3
Señal alta pozo	X4
Señal baja pozo	X5
Señal media calderín	X6
RTD1	ID103
RTD2	ID104
RTD3	ID100
RTD4	ID105
RTD5	ID106
Sensor de presión	ID101

Mientras que en la tabla 3.3 se observa las salidas utilizadas:

**Tabla 3.3.** Salidas usadas en el PLC

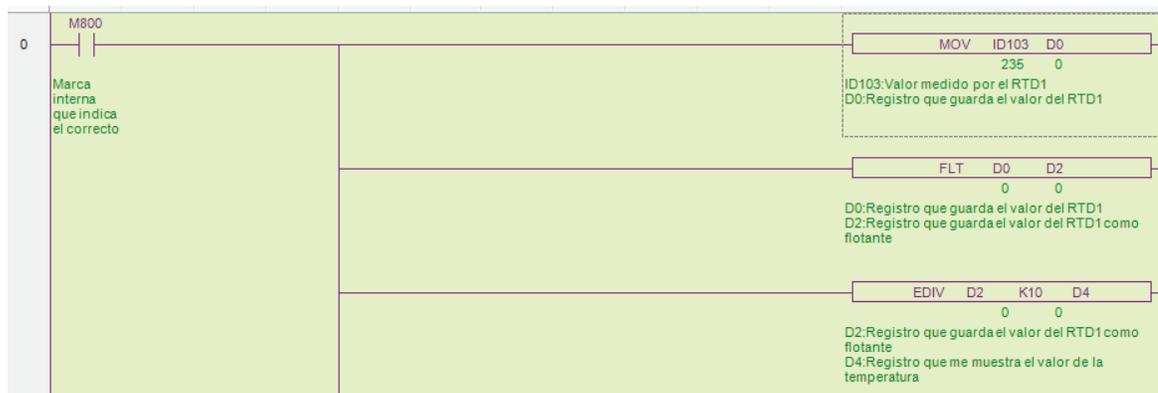
<b>SALIDAS</b>	
<b>FISICA</b>	<b>BIT</b>
Encendido panel táctil y luz de encendido	Y0
Electroválvula alimentación mezcla (V1)	Y1
Electroválvula purga (V2)	Y2
Electroválvula alimentación vapor (V3)	Y3
Electroválvula trampa de vapor (V4)	Y4
Electroválvula residuos (V5)	Y5
Electroválvula refrigerante(V6)	Y6
Bomba de 110 (V) pozo	Y7
Motor DC de recolección	Y10
Bomba de 220 (V) realimentación	Y11

### 3.6.2 OBTENCION DE DATOS

Se realizará el proceso para obtener, codificar y visualizar las diferentes variables (temperatura, nivel y presión) presente en la columna de destilación.

#### 3.6.2.1 De temperatura

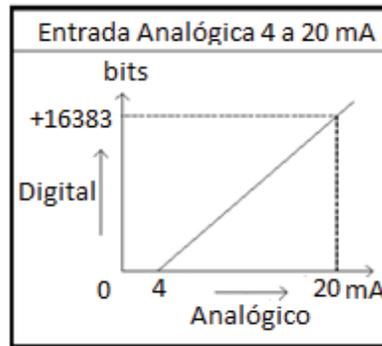
Para los RTD1, RTD2, RTD4 y RTD5 presente en la columna de destilación la conexión se la realizo directamente al módulo XC-3AD4PT2DA que tiene capacidad para la conexión de 4 RTDs, los comandos y secuencia utilizada fue el siguiente (figura 3.24):



**Figura 3.24.** Registro de ingreso de datos de temperatura en el PLC

Donde la marca M8000 es una marca interna del PLC que se activa cuando la inicialización del PLC fue correcta, el módulo de expansión entrega el valor de la señal obtenida en un registro con 3 cifras enteras, este valor se envía a otro registro (utilizando el comando MOV) que permite trabajar con los datos obtenidos, dicho valor se debe convertir en flotante (utilizando el comando FLT) para trabajar con valores decimales y se guarda en otro registro, al cual finalmente se lo divide para una constante (10) cuyo valor se muestra en el HMI.

Para el RTD3 se usa el transmisor de 4 a 20 [mA], el cual también va conectado al módulo XC-3AD4PT2DA que posee 2 entradas analógicas. El valor de la corriente que se obtiene se guarda en el registro ID100, de acuerdo a la figura 3.25.



**Figura 3.25.** Gráfica de la ecuación de entrada digital vs entrada analógica [5]

Como se puede observar en la figura 3.37, el valor que se tiene en el registro ID100 tiene un rango desde 0 hasta 16383 y es proporcional a la variación de corriente, que varía dependiendo de la temperatura que se tenga en el RTD.

Para la conversión del dato que se obtiene en el registro, se realiza pruebas de comportamiento y funcionamiento en conjunto con los RTDs, un termómetro y el transmisor conectado al RTD. Para dichas pruebas en un recipiente se colocó agua a temperatura ambiente y se sumergió los sensores antes mencionados y se tomó una medida de cada uno de ellos, luego con un calentador del laboratorio se fue incrementando en pasos pequeños la temperatura del agua y los valores obtenidos fueron almacenados en la tabla 3.4:

**Tabla 3.4.** Datos para determinar la Ecuación Trasmisor vs Temperatura

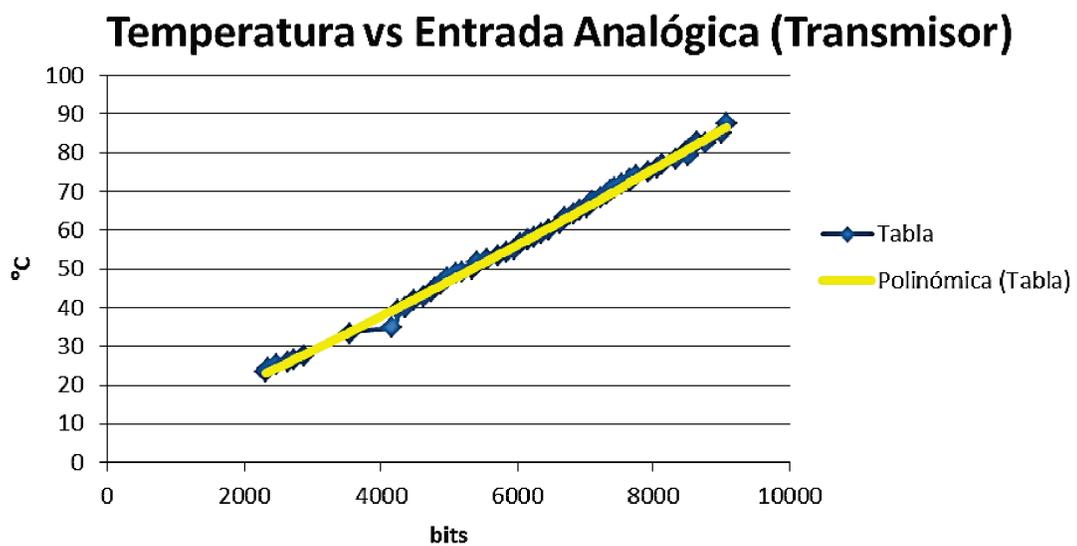
ID100(Transmisor)	RTDs/PROMEDIO	Termómetro
2310	23,5	23,0
2352	24,4	24,5
2475	25,2	25,0
2645	25,9	26,0
2725	26,5	26,5
2875	27,4	27,5
3540	33,4	33,5
4165	35	35,0
4242	39,3	39,5
4360	40	40,0

4480	41,8	41,5
4620	43	43,0
4735	44,2	44,5
4790	45,1	45,0
4875	46	46,0
4970	47,5	47,5
5105	48,8	48,5
5195	49,3	49,5
5340	49,9	50,0
5383	50,8	51,0
5410	51,7	51,5
5552	52,3	52,5
5710	53,3	53,5
5830	54,3	54,5
5946	55	55,0
6040	56,5	56,5
6147	57,6	57,5
6239	58,3	58,5
6340	59,1	59,0
6452	60,1	60,0
6625	61,6	61,5
6683	63,4	63,5
6810	64,3	64,5
6907	65,1	65,0
7020	66	66,0
7090	67,3	67,5
7210	68,4	68,5
7310	69,3	69,3
7350	70,2	70,0
7413	70,9	71,0
7525	71,8	72,0
7659	72,5	72,5

7670	73,3	73,5
7760	74,2	74,0
7930	75,1	75,0
8070	76	76,0
8140	77,1	77,0
8340	78,4	78,5
8510	79,3	79,5
8487	80,2	80,0
8535	81	81,0
8650	82,7	82,5
8770	82,6	83,0
9005	85	85,0
9070	87,6	88,0

Con estos datos y mediante Excel se ingresa un gráfico de dispersión el cual nos ayudará a obtener una ecuación de la temperatura en base a la variación del registro ID100.

Luego se inserta una línea de tendencia para determinar una curva aproximada a la que obtuvo con los datos de la tabla 3.3 y obteniendo la curva de la figura 3.26.

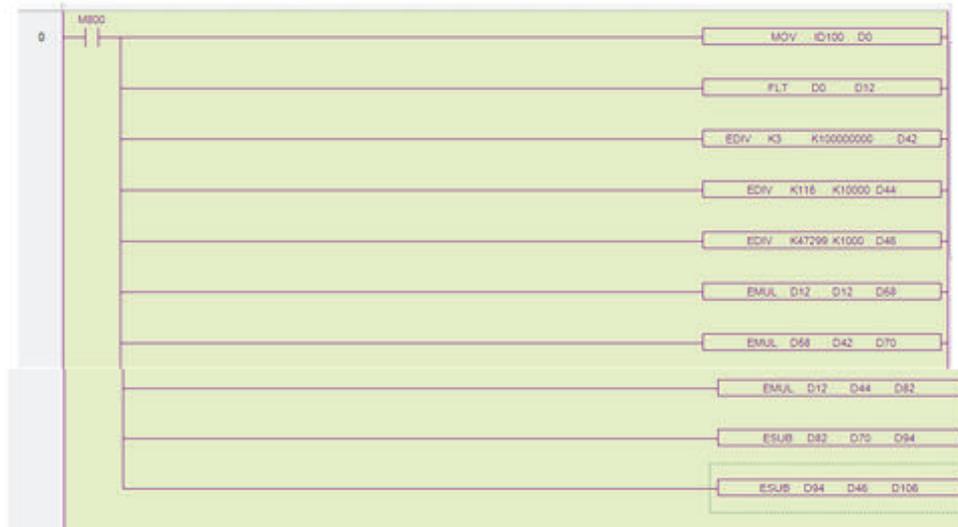


**Figura 3.26.** Gráfica de la ecuación de tendencia de temperatura vs transmisor

Donde la ecuación que se obtuvo para expresar la temperatura fue la siguiente:

$$y = 1E-07x^2 + 0,0079x + 3,9291 \quad (3.8)$$

Esta ecuación fue ingresada al PLC para luego ser mostrada en el HMI, la secuencia y comando utilizados fueron los siguientes (figura 3.27):



**Figura 3.27.** Comandos de manejo de la ecuación de transmisor vs temperatura

Donde el valor del registro ID100 se mueve (MOV) al registro D0 para convertirlo en flotante (FLT) para trabajar con valores decimales. Los valores de los coeficientes de la ecuación fueron ingresados mediante el comando EDIV que permite dividir dos valores enteros y el valor del cociente es guardado en otro registro. Luego se debe elevar la variable al cuadrado por lo que ocupamos el comando EMUL que multiplica dos valores del registro que tenga formato de flotante, obteniendo el primer término de la ecuación de igual manera ocupando el comando EMUL, pero multiplicando el primer coeficiente por el término al cuadrado, luego se obtiene el segundo término y se realiza la suma del primer y segundo término para lo cual se usa el comando ESUB, a continuación se suma el tercer término para finalmente obtener el valor de la temperatura y ser mostrada en el panel táctil.

### 3.6.2.2 De nivel

Los sensores de nivel fueron directamente conectados a las entradas del PLC, ya que al activarse cierran el contacto y activa la señal dentro del programa del PLC.

#### En el calderín:

Tenemos un sensor de nivel de tres posiciones:

- Nivel Bajo
- Nivel Medio
- Nivel Alto

Los cuales se activan dependiendo de la cantidad de mezcla que se tenga en el depósito del calderín y con ello se iniciará o terminará cierta etapa del proceso de destilación. En el panel táctil se podrá visualizar cuando este activa cualquiera de las tres posiciones.

#### En el pozo de desechos:

Se tiene 2 sensores de nivel tipo magnético, uno para nivel alto (pozo lleno) y otro para nivel bajo (pozo vacío), que se activará o desactivará la bomba de desalojo de desechos respectivamente.

Para los sensores de nivel se ocuparon contactos abiertos o cerrados, y estos activan o desactivan marcas dependiendo de lo que se requiera, como se puede ver en el gráfico 3.28.



**Figura 3.28.** Señal digital del sensor nivel del calderín

### 3.6.2.3 De presión

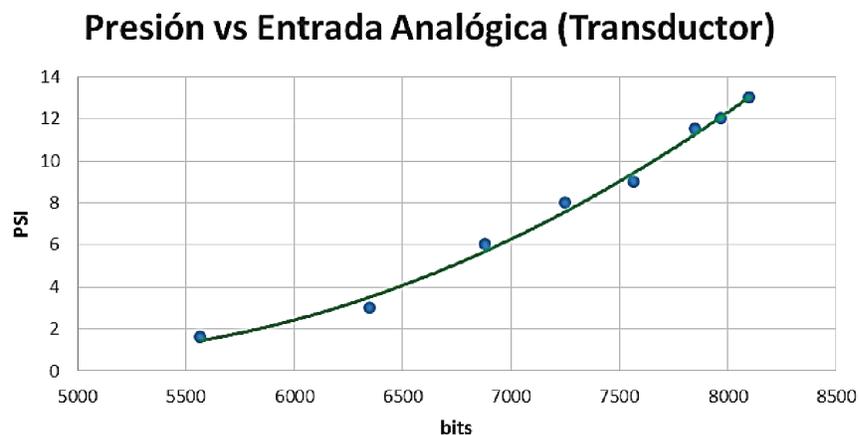
Para determinar el valor de la presión a la cual ingresa el vapor del agua al serpentín del calderín se utiliza el transductor CS-PT100 que como se menciona anteriormente debe ser alimentado con 24 V<sub>DC</sub> y entrega un valor de salida de 4 a

20 [mA] además tiene un rango de medida desde 0 hasta 20 PSI. La conexión se la realizo directamente al módulo XC-3AD4PT2DA que posee 2 entradas analógicas. Dicho valor se muestra en el PLC en el registro ID101 y para observar la variación del registro con la variación de la presión se realizaron pruebas, para lo cual se permitió el ingreso de vapor al calderín y se compara con el valor obtenido en el manómetro. Los valores del registro y los medidos en el manómetro fueron ingresados en una tabla en Excel, para obtener un gráfico y poder deducir la ecuación de la presión en base de la variación del registro ID101. La tabla de los valores obtenidos es la siguiente:

**Tabla 3.5.** Datos para determinar bits del Transmisor vs Presión

PSI	ID101
1,6	5570
3	6350
6	6880
8	7250
9	7570
11,5	7850
12	7970
13	8100

Graficando los puntos obtenidos en la práctica, y con la ayuda de una línea de tendencia se puede aproximar a una curva cuyo grafico es el de la figura 3.29.

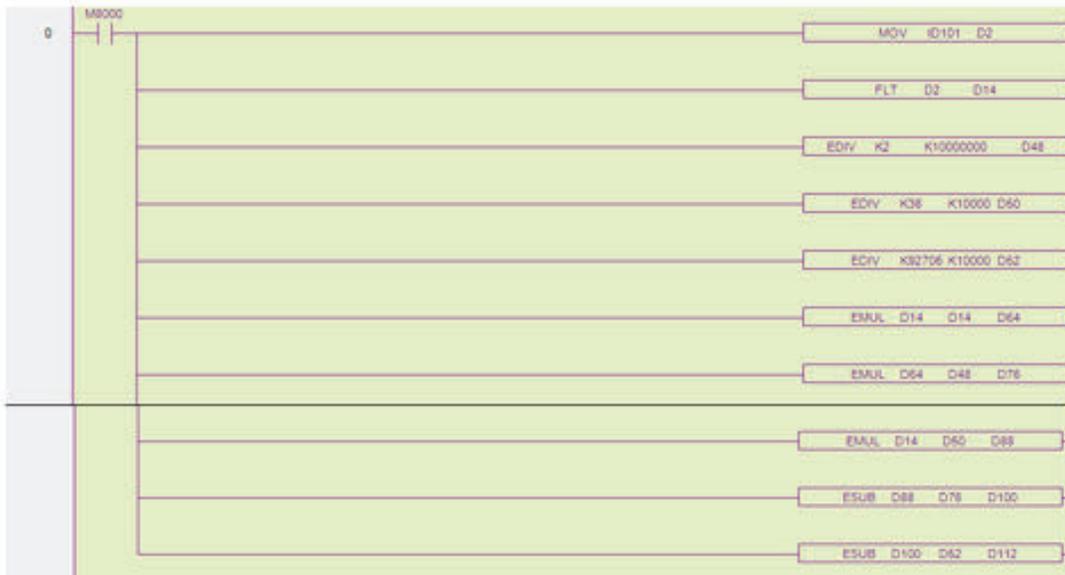


**Figura 3.29.** Gráfica de la ecuación de tendencia de presión vs entrada analógica

Y la ecuación que representa a dicha curva es la siguiente:

$$y = 1E-06x^2 - 0,0104x + 25,438 \quad (3.9)$$

Donde x es el valor del registro que se obtiene al variar la presión de ingreso de vapor de agua, y es el valor de presión que se tiene y que es mostrada en el HMI, los comandos y secuencia que se utilizó es la mostrada en la figura 3.30:



**Figura 3.30.** Datos del transmisor para el manejo de ecuación transmisor vs presión

Donde con la ayuda del comando MOV copiamos el valor del registro obtenido por la medición en otro registro que nos servirá para convertirlo en flotante mediante el comando FLT y así poder trabajar con valores decimales, luego con la ayuda de los comandos EMUL, EDIV, ESUB y EADD ingresamos la ecuación y el resultado se guarda en otro registro el valor de la presión que es lo se visualiza en el HMI.

### 3.6.3 PROGRAMA DE CONTROL

Luego de haber definido las entradas y salidas que se va a tener en el proceso y obtenidos los datos de las señales de los diferentes sensores, lo siguiente fue realizar el programa de control que dependiendo del método de trabajo (manual o

semiautomático) activará o desactivará los diferentes actuadores de acuerdo a la secuencia del diagrama de flujo de las opciones de control.

### 3.7 DISEÑO DEL HMI IMPLEMENTADO EN EL PANEL TÁCTIL

El programa que se implementa en el panel táctil va a contener todos los elementos necesarios para controlar la columna de destilación, y que se encuentren acorde a los registros que se usen en el programa de XC Series Program Tool para la adquisición de datos de los sensores y activación de los actuadores.

Cabe recalcar que la programación del HMI se realiza en pantallas (screen) en la cual se añaden los diferentes botones que en su mayoría son de la barra de herramientas, que son de fácil manejo.

A continuación se detallara las diferentes pantallas creadas para el manejo de la columna de destilación atmosférica del Laboratorio de Procesos Unitarios de la Facultad de Ingeniería Química, y los respectivos elementos con los que se trabajó en cada una de estas.

#### Pantalla 1: Presentación



Figura 3.31. Pantalla de presentación

Esta pantalla es la presentación del proyecto de titulación (figura 3.31). De la barra de herramientas se usó:

- Texto, para agregar los títulos indicados.
- Mapa que nos permite agregar figuras .jpg importadas de cualquier carpeta del computador, como es el caso de los emblemas que se añadieron.
- Botón de salto de pantalla que nos permite cambio de pantallas (continuar).

### Pantalla 2: Selección de Modo de Trabajo



**Figura 3.32.** Pantalla de selección de modo de trabajo

Esta pantalla (figura 3.32) muestra los modos de trabajo de la columna (manual y semiautomático).

De la barra de herramientas se utiliza:

- Texto, para agregar el título.
- Mapa para agregar figuras .jpg importadas del computador (imagen de la columna de destilación e icono de la mascota de la EPN).

- Botón de salto de pantalla que permite el cambio de pantallas, en este caso los botones de manual y semiautomático permiten continuar con el manejo de la columna, además de tener un botón de Regresar
- En el caso de seleccionar la opción de manual se tienen las siguientes pantallas:

### Pantalla 3: Indicaciones de Manejo

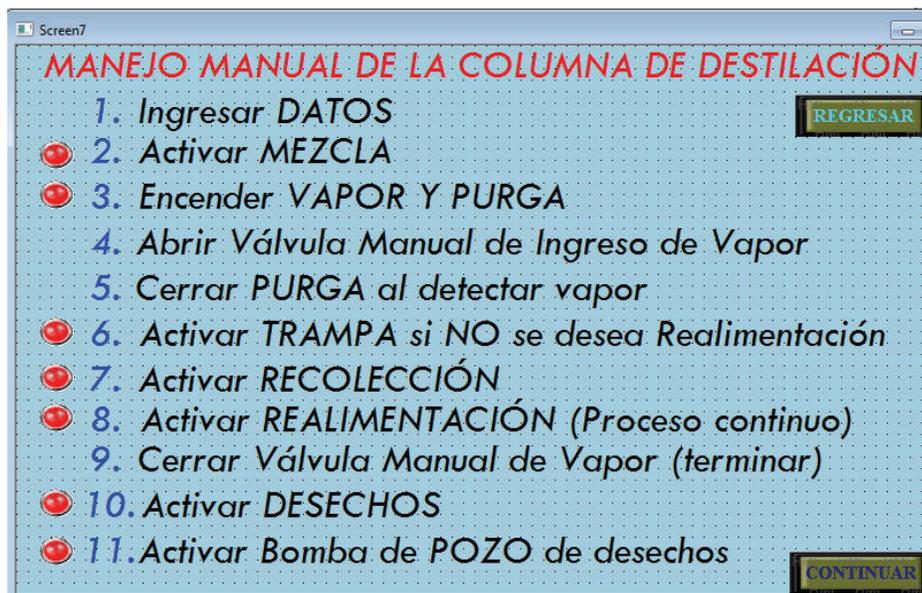


Figura 3.33. Pantalla de Indicaciones de Manejo

Esta pantalla (figura 3.33) nos muestra en breves rasgos el procedimiento a seguir para el manejo correcto de la columna de destilación atmosférica en su modo manual.

De la barra de herramientas se utiliza:

- Texto para agregar título, numeración y descripción de las partes principales para el manejo del proceso.
- Botón de salto de pantalla que permite el cambio de pantallas, (continuar y regresar).
- Lámpara que es un indicador que se activará para mostrar que etapa del proceso se ha activado (en este caso se usó una luz que se activa cambiando de rojo a verde).

#### Pantalla 4: Ingreso de Datos y Alarmas



**Figura 3.84.** Pantalla de ingreso de datos y alarmas en modo manual

Esta primera pantalla (figura 3.34) del modo manual nos permite el ingreso de los datos con los que la columna de destilación va a trabajar, además se encuentran las luces de alarma que se activarán en caso de que alguna de dichas alarmas se encuentre activa.

De la barra de herramientas se utiliza:

- Texto para agregar el título, unidades y los nombres de los datos y alarmas presentes.
- Botón de salto de pantalla que permite el cambio de pantallas, (siguiente y regresar).
- Display digital de entrada que permite el ingreso de datos numéricos para temperaturas, tiempos y presión. Cada elemento tiene su límite superior e inferior
- Lámpara que se encenderá indicando las señales de alarma que se presentan en el modo manual de la columna de destilación.

## Pantalla 5: Pantalla de Trabajo

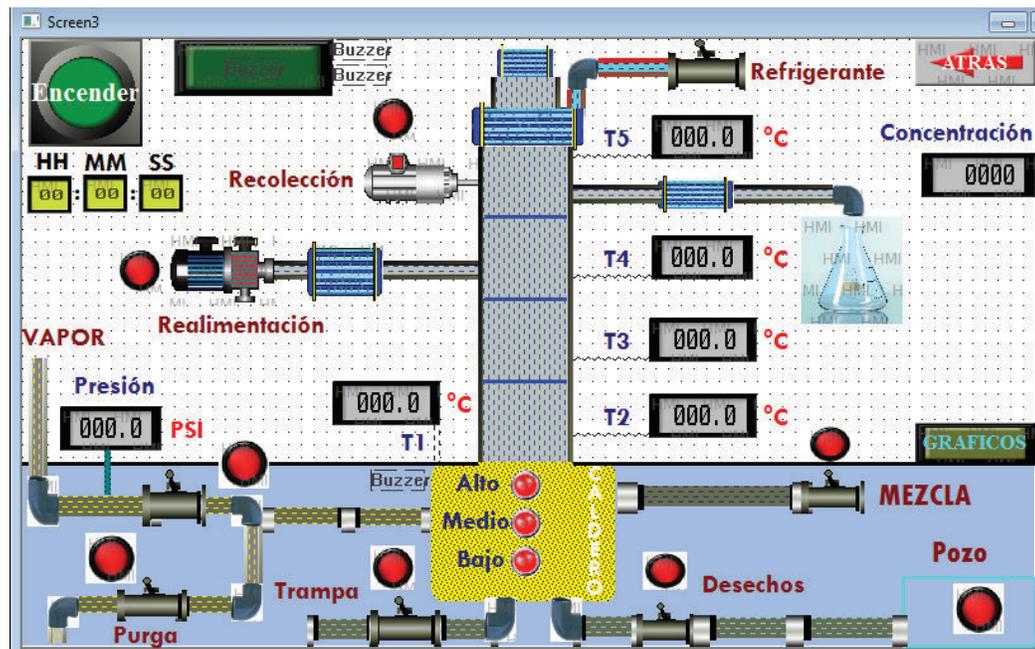


Figura 3.35. Pantalla de trabajo de la columna en modo manual

Esta será la pantalla de trabajo (figura 3.35) en la que se visualiza un esquema de la columna de destilación, además de poder activar las diferentes electroválvulas, así como la visualización de los diferentes sensores presentes.

De la barra de herramientas se usó:

- Texto para agregar unidades y los nombres de los actuadores que se encuentran presentes en la planta y que pueden ser activados.
- Botón que permite activar (encender) o terminar (apagar) el proceso y en nuestro caso está activado como reversible.
- Botón de salto de pantalla que permite el cambio de pantallas, (gráficos o regresar).
- Botón lámpara que permite la activación de los diferentes motores y válvulas, al pulsar el botón, este cambia de rojo a verde.
- Lámpara que nos indica la activación del sensor de nivel en el calderín (alto, medio y bajo), o cuando hay alguna alarma activada en el proceso.

- Rectángulo redondeado que representa al calderín donde la mezcla se calienta, y representa el nivel inferior de la columna de destilación atmosférica.
- Mapa para agregar figuras .jpg importadas del computador como la representación de los condensadores, codos y receptor de destilado.
- Válvula que representan como su nombre lo indican todas las electroválvulas que están presentes en el proceso.
- Tubería que representan las tuberías por donde ingresa el vapor, el líquido de los condensadores, o la tubería principal por donde la mezcla se evapora.
- Motor que representa al motor DC que permite la recolección del alcohol.
- Bomba que representa la bomba trifásica para la etapa de realimentación.
- Display que nos muestra las temperaturas en las etapas de la columna, la concentración estimada, valor de la presión de vapor, horas minutos y segundos.
- Buzzer que se acciona en caso de que alguna alarma se active.
- Línea para delimitar ciertas partes de la presentación.

### Pantalla 6: Gráfica de Temperaturas

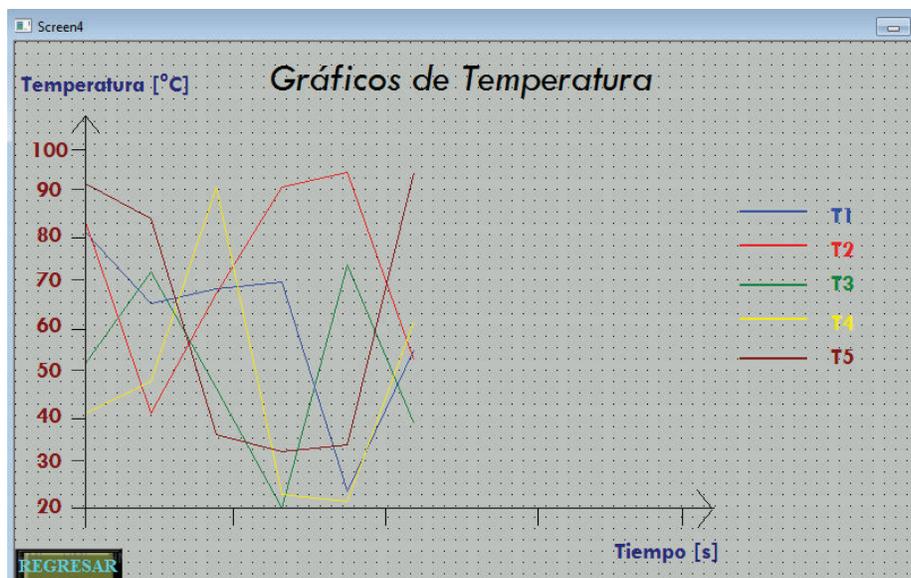


Figura 3.36. Pantalla de gráfica de temperaturas (RTD) vs tiempo

Esta pantalla (figura 3.36) nos mostrara la variación de la temperatura de los diferentes RTDs con respecto al tiempo.

De la barra de herramientas se usó:

- Texto para agregar el título, unidades y los nombres de los diferentes RTDs presentes en la columna de destilación.
- Botón de salto de pantalla que permite el regresar a la pantalla anterior.
- Sistema de tendencia en tiempo real que nos muestra el cambio de temperatura de los diferentes RTDs con respecto al tiempo.

En caso de escoger el modo de trabajo semiautomático las pantallas de instrucciones de manejo, ingreso de datos, pantalla de trabajo y gráfica de temperaturas usaran los mismos comandos, con la diferencia de que la intervención del operador será mínima.

Por ejemplo, la pantalla de trabajo de la columna en modo semiautomático (figura 3.37) será la siguiente:

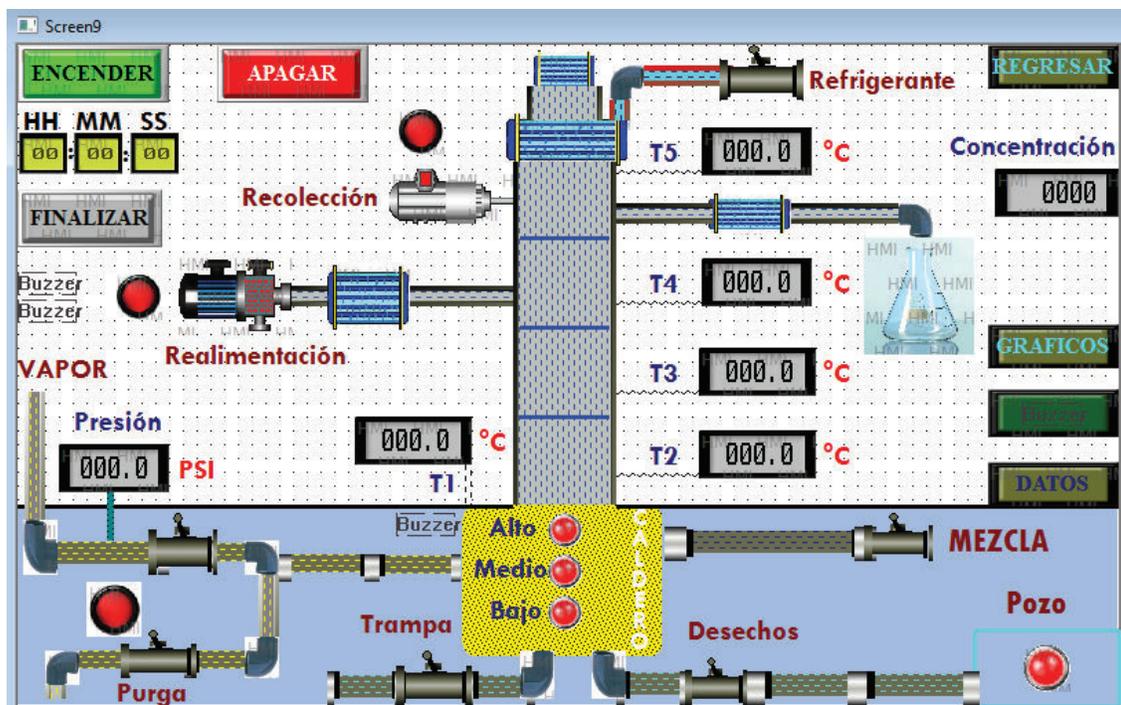


Figura 3.37. Pantalla de trabajo de la columna en modo semiautomático

## **CAPÍTULO 4**

### **PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO**

En este capítulo se detallan las pruebas que se realizaron para comprobar el funcionamiento de la columna de destilación atmosférica en el modo manual y en el modo automático, pero se debe tener en cuenta que hay parámetros externos a la planta con los que también se tiene que trabajar que a continuación se detallan.

#### **4.1 PARÁMETROS EXTERNOS**

Para la realización de las pruebas se debe tener en cuenta los parámetros externos de trabajo de la columna de destilación.

##### **4.1.1 MEZCLA**

La capacidad del depósito en el calderín es de aproximadamente 60 litros, para lo cual en el laboratorio se realiza una mezcla de agua y alcohol etílico, con una relación de 2 a 1, respectivamente. El alcohol etílico tiene una concentración de 96° y cuando se realiza la mezcla la concentración desciende a 30°. Dicha mezcla se realiza en el tanque de almacenamiento.

##### **4.1.2 ALIMENTACIÓN DE VAPOR**

El caldero que genera vapor para la alimentación de la columna, trabaja para todo el laboratorio, por lo que su activación queda a cargo de la persona encargada del laboratorio. El caldero se demora alrededor de 40 minutos en generar vapor.

#### **4.2 ENCENDIDO GENERAL**

Para iniciar el proceso se tiene un interruptor con llave, que permite el encendido del PLC, se tiene un pulsador de inicio para encender el panel táctil, que empieza con la pantalla de presentación y luego se selecciona el modo de operación.

### 4.2.1 CONTROL MANUAL

Luego se genera la pantalla de ingreso de datos en la cual se ingresa tiempos de recolección y reflujo, temperatura de encendido de condensadores, y límite de presión, además se visualiza las posibles alarmas que se activaran en caso de no haber ingresado los datos que se piden, cuando el pozo de los desechos este lleno, o si se debe regular la válvula manual del alimentación de vapor en caso de exceder la presión de ingreso de vapor.

La siguiente pantalla, es la de trabajo, en la cual el usuario tiene la posibilidad de activar las electroválvulas y motores presentes en la columna, así como visualizar las temperaturas, presión de ingreso de vapor y la concentración estimada para la recolección y una pantalla de gráficos de variación de la temperatura en el tiempo.

Ahora se detalla los pasos a seguir para el manejo de la columna de destilación atmosférica.

1. Ingresar los valores en la pantalla de ingreso de datos (figura 4.1): tiempo de reflujo y tiempo de recolección, se debe tener en cuenta la relación de reflujo que se desea tener (se aconseja establecer tiempos de 10 segundos en ambos para tener un relación de 1 a 1), presión que será el límite en el cual se activará la alarma de exceso de presión, temperatura que será a la cual se activara la electroválvula de refrigerante. En caso de no ingresar los datos y pasar al siguiente paso se encenderá la alarma general.

Figura 4.1. Pantalla de ingreso de datos

2. En la pantalla de trabajo activar el botón de encendido, que permitirá el manejo vía panel táctil de la columna (figura 4.2).

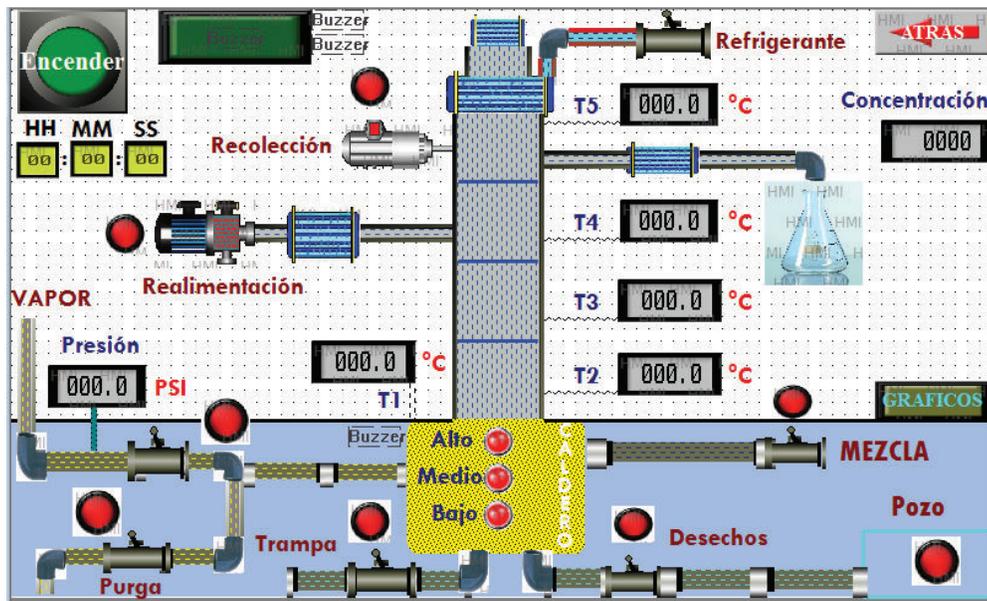


Figura 4.2. Pantalla de trabajo en modo manual

3. Encender la electroválvula de ingreso de la mezcla (comprobar que exista mezcla en el tanque de ingreso), que se cerrara automáticamente cuando el sensor de nivel alto del calderín se active.
4. Activar la electroválvula de alimentación de vapor, y la electroválvula de purga, luego se abre la válvula manual de ingreso de vapor que deberá ser regulada por el operario.
5. Para el caso de cierre de la electroválvula de purga se debe tener en cuenta que ésta permite desalojar los residuos de vapor condensado presentes en las tuberías, tanto de la columna de destilación, como de las tuberías de alimentación de vapor y debe permanecer activada hasta que empiece a salir vapor de la misma (el tiempo de desalojo de desechos varía dependiendo del uso de vapor en el laboratorio, ya que si otra planta realizo la purga, tomaría menos tiempo purga la tubería de la columna de destilación).

6. Luego del cierre de la electroválvula de purga, la presión de vapor de agua que ingresa irá aumentando, esto deberá ser regulado por el operario, pero si la presión se excede del límite establecido, para liberar presión se abrirá automáticamente la electroválvula de purga activando una alarma, dicha electroválvula se cerrará en poco tiempo. Se aconseja establecer la presión de ingreso de vapor entre 4 y 5 PSI, que se visualizan en el panel táctil.
7. La activación de la electroválvula de la trampa de vapor dependerá del operario, si se desea que la mezcla de realimentación entre con mayor temperatura a la del ambiente, se deberá mantener cerrada dicha electroválvula activando el botón en el panel, caso contrario, se abrirá para el desalojo de condensado que sale del calderín.
8. La temperatura en la columna ira aumentando etapa por etapa y se podrá comprobar su variación tanto en el pantalla de trabajos como en la pantalla de gráficos. Además se puede observar la estimación de la concentración, que deberá ser comprobada por el operario.
9. Cuando la Temperatura en el RTD4 pase los 60°, se activara una restricción de 15 minutos en la que no se podrá iniciar la recolección, ya que se necesita que la mezcla este en reflujo en la columna.
10. La electroválvula de refrigerante se activará automáticamente cuando la temperatura del RTD4 pase la temperatura establecida en la pantalla de ingreso de datos, que permitirá el ingreso de refrigerante a los condensadores presentes en la columna.
11. Para la recolección el operario deberá activar el motor de recolección y dependerá de la relación de reflujo, es decir los tiempos de recolección (cosecha de alcohol) y de reflujo (retorno del alcohol) que se estableció en la pantalla de ingreso de datos.
12. Mientras se va recolectando el alcohol, el nivel del calderín descenderá, hasta que llegue a su nivel medio, en ese momento se habilitara la opción de realimentación.

13. En caso de querer un proceso continuo, se tiene la opción de realimentación, que permite el ingreso de mezcla con la activación de la bomba trifásica de realimentación, esta mezcla puede ingresar a una temperatura más elevada. La bomba estará activada hasta que el sensor de nivel alto del calderín se active.
14. En caso de no activar realimentación, el nivel del calderín ira descendiendo, hasta que se active el sensor de nivel bajo del calderín, que detendrá la recolección automáticamente.
15. Cuando se haya recolectado todo el alcohol deseado, o cuando se desee terminar la práctica, se debe cerrar la válvula manual de alimentación de vapor, luego cerrar la electroválvula de alimentación de vapor.
16. Para desalojar la mezcla presente en el calderín se debe activar la electroválvula de desechos, que permite el paso de dichos desechos al pozo, (es aconsejable esperar cierto tiempo ya que dicha mezcla estaría a una temperatura de alrededor de 90°).
17. Los desechos van a un pozo donde se almacenan, y se desalojaran por una bomba de pistón monofásica, la cual se puede activar y desactivar en cualquier instante, en caso de que el pozo se llene se activará una alarma que advierte al operador de dicho evento. La bomba estará encendida hasta que el sensor de nivel bajo del pozo se active.
18. Cabe mencionar que en cualquier momento se puede acceder a la ventana de Gráficos, que visualiza las variables de temperatura presentes en la columna vs el tiempo, cada curva tiene un diferente color.
19. Para terminar todo el proceso se debe presionar el botón de Apagar.

#### **4.2.1.1 Resultados Obtenidos**

En las pruebas realizadas se estableció el rango de la presión que pasará por el serpentín para el calentamiento de la mezcla no debe sobrepasar las 7 PSI ya que si se excede este límite, se generará espuma cuando la mezcla hierva, que subirá por la primera etapa de los anillos Rasching, y esto no se debe permitir, ya

que solo se requiere que el alcohol evaporado suba por las etapas en la columna de destilación.

Para el ingreso de la mezcla tanto en el inicio del proceso como en la etapa de realimentación se habilitaron tanques para mejorar su forma de ingreso como se ve en la figura 4.3.



**Figura 4.3.** Tanque que se usara para la alimentación de la mezcla

En las primeras pruebas de funcionamiento del modo manual los datos obtenidos de los sensores de temperatura eran los indicados, y se los comprobó con los termómetros que se encuentran presentes en la columna (figura 4.4)



**Figura 4.4.** Resultados obtenidos al activar el modo manual

En el caso del ingreso de datos, se restringió (valor máximo y mínimo) a cada uno de ellos, para evitar que valores altos o fuera de rango puedan ser ingresados. Cada dato tiene sus valores máximos y mínimos, que se indican en el teclado de ingreso.

**Tabla 4.1.** Tabla de Valores máximos y mínimos de las Variables de Ingreso de Datos

VARIABLE	VALOR MÍNIMO	VALOR MÁXIMO	UNIDAD
Tiempos	0	100	segundos
Presión	3	7.5	PSI
Temperatura	20	70	°C

Las electroválvulas funcionaron correctamente, así como el motor de recolección (figura 4.5) y las bombas de pistón para la realimentación y para los desechos. Cabe recalcar que el accionamiento de los mismos tiene lineamientos para su activación o desactivación.



**Figura 4.5.** Motor DC de recolección

La opción de recolección del alcohol depende del usuario, pero se estableció un tiempo de espera para que exista reflujó total en toda la columna que se activará cuando la temperatura del RTD 4 llegue a un nivel superior a 60°C. En el caso de

los tiempos de reflujó y recolección, estos pueden ser cambiados en cualquier momento de la recolección.

La concentración estimada se muestra en la pantalla de trabajo, que será con la que los estudiantes se podrán guiar para su comprobación manual.

Como se muestra a continuación se realizaron pruebas con las temperaturas, la concentración estimada, y la concentración que se realiza manualmente con el alcoholímetro:

**Tabla 4.2.** Tabla de Resultados de la Concentración Medida y Estimada

<b>RTD 1 (°C)</b>	<b>RTD 2 (°C)</b>	<b>RTD 3 (°C)</b>	<b>RTD 4 (°C)</b>	<b>RTD 5 (°C)</b>	<b>C. Estimada (%)</b>	<b>C. Manual (%)</b>
87,4	72,4	72,2	<b>71,4</b>	71,5	90,7	55
88	71,6	72,1	<b>70,9</b>	71,3	94	94,5
88,3	73,3	72,1	<b>71</b>	71,3	93,3	96
89,2	79,1	72,2	<b>70,8</b>	71,3	94,6	96
89,3	88,2	72,3	<b>70,8</b>	70,8	94,6	96
89,7	89,1	74,4	<b>71,2</b>	71,3	92	95,5
90,6	90	90,2	<b>70,9</b>	71,4	94	95
90,6	90	91	<b>72,3</b>	73,1	85	93
91,6	90,8	91,3	<b>80,6</b>	81	40	80

El primer dato de concentración se debe desechar, ya que hay residuos de prácticas previas, y los últimos datos varían considerablemente porque al realizar la medición con la pipeta del alcoholímetro, este tarda en llenarse, produciendo que la concentración caiga acorde a la cantidad de alcohol que se obtenga, pero la temperatura aumenta más rápidamente.

Para determinar la concentración estimada en la pantalla de trabajo se usará la temperatura de RTD 4, que es la más cercana a la recolección.

La columna puede destilar el alcohol máximo a 96% de concentración (por su antigüedad), por lo que a partir de este límite se podrá empezar a recolectar el destilado.

Después de tener cierto tiempo de recolectar el destilado, habrá más cantidad de alcohol condensado que alcohol evaporado, por lo que la variación de temperatura hará que la concentración varíe, comprobándose que la estimada tiene un error del 3% en comparación con la concentración medida, pero cuando el sistema se estabiliza la concentración medida y estimada son las mismas.

Para la etapa de realimentación se ingresa mezcla al tanque (figura 4.6), la bomba se activa con un pulsador, y este detiene la recolección de alcohol en caso de que esta siga activa. Alrededor de 15 minutos dura el reingreso de mezcla al calderín.



**Figura 4.6.** Tanque para la realimentación de la mezcla

Después de terminar la práctica se debe vaciar el calderín cuando la temperatura del mismo haya descendido (se realiza generalmente al día siguiente por consejo de los encargados de laboratorio)

Como se comprueba, los resultados obtenidos de los sensores son satisfactorios y los actuadores se activaron acorde a las acciones realizadas en la pantalla, con lo que se puede concluir que el modo manual de la columna de destilación trabaja con los parámetros que se establecieron.

#### 4.2.2 CONTROL SEMIAUTOMÁTICO

Para trabajar con el modo semiautomático (figura 4.7), se debe tener en cuenta los puntos externos con los que la planta trabaja, como son mezcla, vapor para calentar la mezcla o el ingreso de la misma por realimentación.

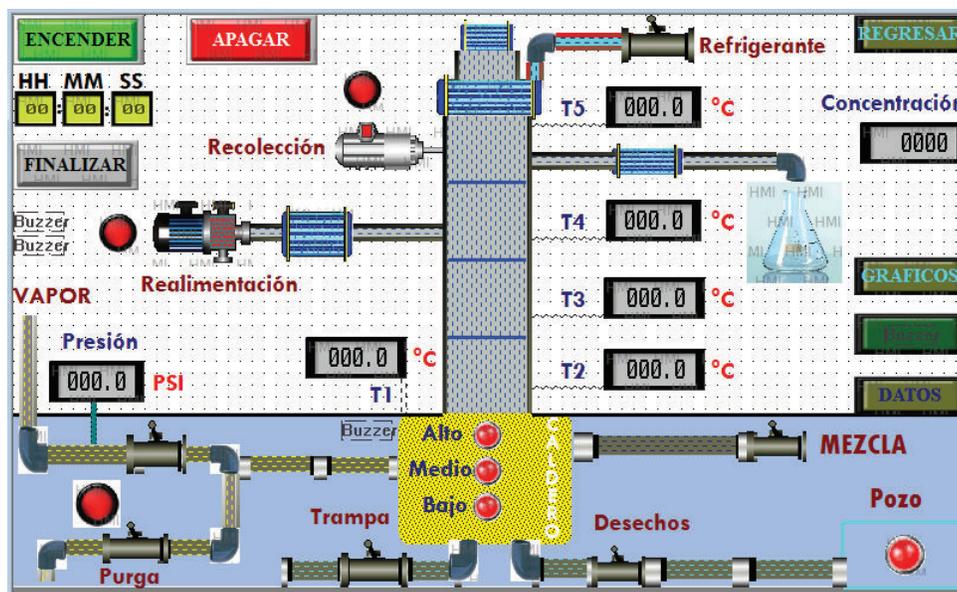


Figura 4.7. Pantalla de modo semiautomático activo

En este control se establecieron opciones manuales para facilitar el manejo del operador, ya que hay acciones externas a la columna que intervienen en el proceso (caso de recolección, realimentación y purga).

Los parámetros que se programaron a seguir en el proceso semiautomático de la columna de destilación atmosférica son los siguientes:

1. Seleccionar el modo semiautomático en el panel táctil.
2. En la pantalla de trabajo, activar el botón encender.

3. Se encenderá la electroválvula de mezcla por la cual ingresa la mezcla de agua y alcohol.
4. Después de iniciado el proceso, se puede visualizar la variación de la temperatura de cada RTD en el tiempo, seleccionando el botón de gráficos.
5. Esta se cerrará cuando el sensor de nivel alto del calderín se active (se añadió un tiempo de 10 segundos adicional para que la mezcla se estabilice en el calderín).
6. Enseguida se activarán las electroválvulas de vapor y purga (en este paso se debe abrir la válvula manual de ingreso de vapor que viene del caldero).
7. Al momento en el que empiece a salir vapor por la electroválvula de purga, esta deberá cerrarse, pulsando el botón en el panel táctil (este es uno de los pasos manuales que se establecieron).
8. Se estableció un límite de presión en el ingreso del vapor para el calentamiento de la mezcla (7,5 PSI), por lo que si se pasa del nivel, se activara una alarma que indicara exceso de presión y la electroválvula de purga por 2 segundos, permitiendo que la presión se desaloje. En este caso se debe regular la válvula manual de ingreso de vapor que viene del caldero.
9. En el caso de la electroválvula de trampa, esta se activará permitiendo que los condensados salgan al pozo de desechos.
10. Cuando la temperatura en el RTD 4 pase los 65°C se activará la electroválvula de refrigerante que permitirá el paso de agua a los condensadores.
11. La mezcla se calentará, cuando la temperatura del RTD 4 sobrepase los 60°C, se activará una restricción de 15 minutos en la que la columna estará en reflujó, después de este tiempo se podrá destilar el alcohol.
12. Luego de que transcurran estos minutos y cuando la concentración de alcohol alcance el 96% se puede activar la recolección, que en nuestro caso se la hace manual, o automáticamente.
13. Se activará en este punto el visualizador de concentración, para que los estudiantes puedan comparar los valores, previo a la recolección.

14. En el caso automático, este se activará el motor DC recolectando el destilado por 10 segundos, y se desactivará por 10 segundos permitiendo que este en reflujo (relación de reflujo de 1).
15. En el caso manual, este será similar al modo manual descrito anteriormente. Para el ingreso de datos, se debe ingresar en la pestaña datos y regresar a la pantalla de trabajo para activar o desactivar el botón de recolección.
16. En ambos casos la recolección se detendrá cuando la concentración de alcohol estimada baje del límite inferior (70%), permitiendo reflujo total en la columna.
17. Si la concentración vuelve a subir, se activará nuevamente la recolección, hasta que la concentración del destilado disminuya hasta el límite inferior.
18. En caso de realimentación manual, esta puede ser activada en la pantalla de trabajo del panel táctil, pulsando el botón de realimentación a partir de que el sensor de nivel medio del calderín se active. Cabe recalcar que mientras este activa la realimentación, la recolección se detendrá.
19. Después de la recolección, el nivel del calderín debe llegar hasta el nivel bajo. En este punto se activará la bomba de desplazamiento positivo que permite la realimentación, además enciende la alarma de nivel bajo de mezcla, activando un temporizador.
20. Cuando la mezcla presente en el calderín llegue al nivel bajo, se cerrará la electroválvula de trampa, para que los condensados que se desechan vayan al depósito de calentamiento para que la mezcla que ingresa por realimentación entre precalentada.
21. La bomba de realimentación estará activada hasta que el sensor de nivel alto del calderín se active.
22. Se esperará un tiempo de 15 minutos para que la columna este en reflujo total y la nueva mezcla se caliente.
23. Cuando haya transcurrido ese tiempo, y se tenga la concentración deseada se permitirá nuevamente la recolección tanto manual como automática.
24. En caso de tener una sola carga de mezcla, y el sensor de nivel bajo del calderín pasa activo el tiempo establecido (5 minutos), se desactivará la electroválvula de ingreso de vapor terminando así el proceso.

25. En caso de terminar el proceso en cualquier momento por parte del operador, se tiene un botón de finalizar, que apagará la electroválvula de ingreso de vapor.
26. Después de esto se activará la electroválvula de desechos (después de un tiempo de espera, ya que la mezcla estará a una temperatura que sobrepasa los  $85^{\circ}\text{C}$ ), que enviará los residuos del calderín al pozo para su desalojo.
27. El proceso de desalojo de desechos es automático, se activará cuando los desechos lleguen al nivel alto del pozo y se desactivará cuando el sensor de nivel bajo se active.
28. Cuando termine el proceso se pulsará el botón apagar.

#### 4.2.2.1 Resultados Obtenidos

Con los rangos de las variables obtenidos en las pruebas manuales, se pudo establecer los límites de dichas variables trabajarían, o activarían los actuadores automáticamente.

Con los tanques de alimentación y realimentación de mezcla ya conectados se pudo trabajar más rápidamente.

Se comprobó que en caso de exceso de presión de ingreso de vapor, se activa la electroválvula de purga que desfogó la presión, y se activa la alarma que indica que se necesita regulación de la válvula manual de vapor.

El sensor de nivel de tres posiciones se activa acorde el nivel en el que se encuentre el calderín (alto, medio y bajo) que se visualiza en el panel (figura 4.8,) se debe aclarar que el nivel bajo del calderín está establecido cuando en el depósito hay alrededor de 40 litros.



**Figura 4.8.** Gráfico de variación de nivel de tres posiciones del calderín

Después de que la temperatura del RTD 4 llegue a un valor determinado, se espera un tiempo para que la recolección se pueda activar, tanto en el control manual como en el semiautomático.

Para el caso de la concentración, esta se visualiza en la pantalla de trabajo, para que los estudiantes puedan comprobar el valor de la misma con el alcoholímetro.

Cabe recalcar que la recolección del destilado en la pipeta del alcoholímetro (figura 4.9) es lenta por lo que se pueden presentar variaciones en la concentración estimada y medida cuando la temperatura vaya aumentando.



**Figura 4.9.** Alcoholímetro (comprobación manual)

Se realizaron pruebas de concentración estimada y medida, dando resultados acordes a lo establecido.

Se comprobó que con cualquier cantidad de alcohol que este en la mezcla (10, 12, 18, 20 litros), la concentración de alcohol estimada llega a 96%, comprobando que la columna trabaja a su máximo nivel (por su antigüedad y manejo, ese es el máximo nivel de concentración al cual la columna destila el alcohol).

En el caso de recolección manual, se restringió los valores de tiempo de ingreso (0 a 100 segundos), que se detendrá cuando la concentración estimada descienda del límite inferior establecido.

Se añadieron buzzers para alertar a los operarios en caso de que el nivel del calderín este tanto en alto como en bajo, para así determinar que el deposito está lleno, o se halla en el límite inferior para que se active la realimentación, respectivamente.

Se habilito la etapa de calentamiento de la mezcla que ingresa en la etapa de realimentación, que permite aprovechar los condensados que salen del serpentín y así precalentar la mezcla que ingresa al calentador desde la bomba de desplazamiento positivo.

Se visualizó la variación de temperatura vs el tiempo en los gráficos establecidos, donde las curvas T1 a T5 corresponden a la temperatura de los sensores (PT100) presentes en la columna como se puede visualizar en el HMI (figura 4.7).



**Figura 4.10.** Gráfica de temperatura (vapor llega a T3)

En el gráfico 4.10 se visualiza la variación de temperatura del RTD3 (T3) cuando el vapor entra en contacto con el mismo, además se puede ver que la temperatura T1 es la de mayor valor, ya que el sensor se encuentra ubicado en el calderín, entrando en contacto directo con la mezcla.

En el gráfico 4.11 se observa que el vapor del destilado ha llegado a la etapa de recolección entrando en contacto con los sensores presentes en dicha etapa (T4 y T5).



Figura 4.11. Gráfica de temperatura (vapor llega a etapa de recolección T4 y T5)

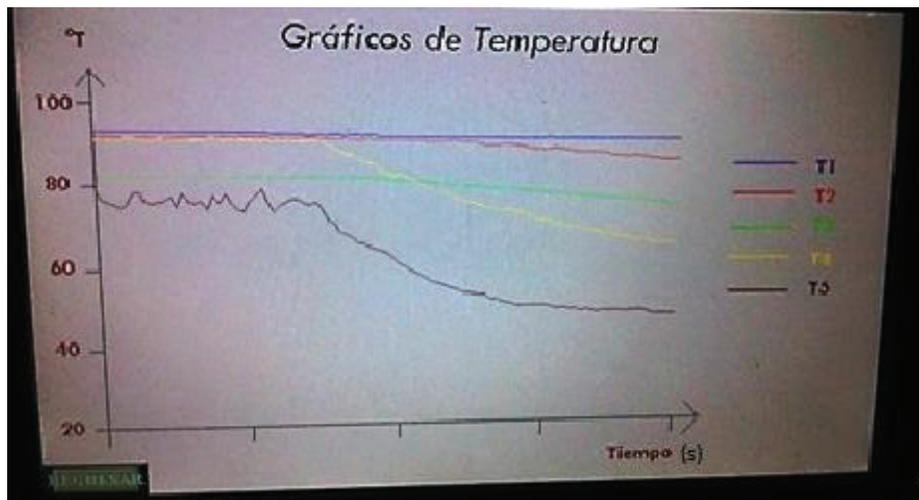


Figura 4.12. Gráfica de temperatura (realimentación activada)

Cuando se activa la realimentación para el ingreso de mezcla hacia el calderín observamos en la figura 4.12 el descenso de la temperatura en los sensores.

Se puede comprobar en los gráficos como varía la temperatura con respecto al tiempo, y al ser un proceso de larga duración, el eje de coordenadas seguirá en movimiento hasta que el proceso termine.

Después de realimentar se estableció un tiempo de espera para que la columna entre en reflujo total y así permitir que la concentración llegue al nivel requerido.

Para la etapa de desalojo de desechos (figura 4.13) deberá transcurrir cierto tiempo establecido y así disminuir la temperatura de la mezcla en el calderín, ya que si se evacua el calderín en ese momento, la mezcla se encuentra alrededor de 89°C y representa un peligro si alguien se encuentra cerca del pozo de desechos. Es aconsejable dejar que la temperatura de la mezcla descienda para realizar el desalojo de la misma en el modo manual.



**Figura 4.13.** Ingreso de vapor y salida de desechos

Después de todas las pruebas realizadas y arreglos pertinentes al modo semiautomático, se concluyó que el control realizado permite a la columna iniciar la destilación de alcohol a partir de 96% de concentración, disminuyendo el tiempo de trabajo, permitiendo la visualización de las variables y activando los actuadores presentes en la planta acorde a su modo de trabajo.

Ambos controles trabajaron acorde a las soluciones planteadas en el proyecto, además de satisfacer las necesidades de los estudiantes del Laboratorio de Procesos Unitarios.

### **4.3 COSTO DEL PROYECTO**

A continuación se detalla los elementos usados tanto para la automatización, como para los elementos de rehabilitación de la etapa de realimentación y su costo respectivo.

**Tabla 4.3.** Valores Monetarios de cada Elemento usado

<b>DETALLE</b>	<b>UNIDADES</b>	<b>VALOR U</b>	<b>VALOR TOTAL</b>
PLC XINJE XC3	1	302.40	302.40
TOUCH WIN TH765	1	840.00	840.00
MODULO DE EXPACI3N XC-E3AD4PT2DA	1	504.00	504.00
CBLE XVP	2	39.20	78.40
CABLE USB DE PLC A PANTALLA	1	39.20	39.20
RTDs	5	12.43	62.15
SENSOR DE PRESION	1	197.57	197.57
ELECTROVALVULAS DE BRONCE 3/4"	3	114.30	342.90
ELECTROVALVULAS PLÁSTICAS 1/2"	2	72.80	145.60
TRANSMISOR	1	22.35	22.35
SENSOR DE NIVEL	1	58.80	58.80
CABLE RTD	30	2.41	72.24
CABLE CONTROL 16 AWG	50	0.40	20.00
CABLE POTENCIA 12AWG	100	0.52	52.00
LUCES PILOTOS 110 VAC	4	1.29	5.16
LUZ PILOTO 24 VDC	1	1.83	1.83
INTERRUPTOR CON LLAVE	1	4.00	4.00
PULSADOR N/A	1	2.35	2.35
PARO DE EMERGENCIA	1	4.52	4.52
BREAKER 1Ø	1	9.52	9.52
BREAKER 3Ø	1	14.66	14.66
RIEL DIN	1	2.18	2.18
CANALETA 25 * 40	2	6.78	13.56
BORNERAS 12-14 AWG	12	0.34	4.08
BORNERAS 10 AWG	12	0.45	5.40
TERMINALES	4	1.82	7.28
MARQUILLAS	1	14.96	14.96
NEPLOS PVC 3/4 "	4	0.59	2.36
NEPLOS DE COBRE 1/2"	8	0.48	3.86
UNION DE PVC 3/4 "	5	0.75	3.75
UNIVERSAL PVC 1/2 "	2	2.25	4.50
CODO PVC 1/2 "	4	0.78	3.12
RELE 24 VDC	9	28.60	257.40
MANGUERA ANILLADA 3/8 "	5	0.16	0.90

MANGUERA ANILLADA 1"	5	0.33	1.85
AMARRAS	1	6.72	6.72
TEFLON	4	1.16	4.64
TAIPE	2	0.80	1.60
ZOCALOS DE RELE	9	1.11	9.99
FUSIBLE	3	0.88	2.64
ADAPTADOR DE TANQUE	3	3.07	9.21
VÁLVULA DE BOLA PVC	1	3.23	3.23
MANGUERA PLÁSTICA TRANSPARENTE 3/4	5	4.22	21.10
MANGUERA PLÁSTICA TRANSPARENTE 5/8	2	3.00	6.00
<b>TOTAL (\$)</b>			3169.38

Como se puede apreciar, el costo de los materiales que se usaron (tanto para la etapa de control y cableado, como para la etapa de acondicionamiento de tuberías) es de \$ 3169.38.

### **Costo de Mano de Obra**

Se tomaron en consideración 4 horas diarias de trabajo durante 4 meses, tiempo en el cual se desarrolló las instalaciones de los tableros de control y potencia, la programación del PLC y HMI, la adecuación de los diferentes sensores, mejoramiento y habilitación de etapas del proceso y la instalación de los nuevos sensores y actuadores.

Se consultó el valor de la mano de obra en varias empresas y se obtuvo un costo promedio por hora de \$10, en base a este valor se procedió a calcular el valor la mano de obra de dos personas:

Horas trabajadas por persona: 320 horas

Costo total de mano de obra:  $2 \times 320 \times 10 = \$ 6400,00$

El costo total del trabajo realizado sumados la mano de obra y el costo de los elementos bordearía los \$10000.

Los elementos de control fueron los de mayor costo ya que se necesitaban del número de salidas adecuado para el trabajo de la planta, además del panel táctil que facilita el manejo de la columna.

Al ser un proyecto autofinanciado, se procedió por elegir elementos acorde al presupuesto establecido y que cumplan con las necesidades de la automatización.

Además se debió comprar tubería PVC para el arreglo y acondicionamiento de ciertas etapas como en los acoples de ciertas electroválvulas, los tanques de ingreso de mezcla y en la etapa de realimentación.

Los controles que se implementaron son convenientes ya que el modo manual es un proceso didáctico para el uso de los estudiantes y el modo semiautomático permite un proceso de forma continua.

Se consultó que en el mercado existen columnas de destilación desde \$10000 en adelante, pero estas son pequeñas en tamaño y cantidad de mezcla que ingresa, en comparación a la columna que se automatizó.

Por las dimensiones, la columna de destilación presente en el Laboratorio de procesos unitarios tendría un valor aproximado de \$100000.00 debido a su tamaño y depreciación por su antigüedad.

Como se puede comprobar, la automatización de la columna presente en el laboratorio costo una décima parte de lo que costaría adquirir una nueva de las mismas dimensiones, sin tomar en cuenta los gastos que se generaría por envío e instalación de la misma, por lo que la ejecución del presente proyecto fue conveniente.

La automatización permitirá que la columna siga funcionando de forma más eficiente y tener un mejor manejo de la misma, usando todos sus sensores y actuadores para obtener el resultado que se desea.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 CONCLUSIONES

Se cumplieron con los objetivos de diseño de un sistema de control mediante un PLC, en modo manual y semiautomático así como la interfaz de usuario en el panel táctil para el manejo de la columna, la sustitución y adecuación de los sensores y la visualización de sus variables, y la estimación de la concentración de alcohol que servirá para la destilación automática del alcohol.

La implementación del sistema de control semiautomático reduce el mando del operario en la columna de destilación y por ende disminuye el error humano en el manejo de la misma.

El control manual de la columna permite activar o desactivar cada actuador de la columna teniendo un proceso totalmente didáctico para el uso de los estudiantes en el laboratorio.

Al realizar la medición de la temperatura en la etapa de recolección se realizó un control de la concentración de alcohol del producto destilado en base de la “estimación” y dicho valor fue comprobado en cada una las pruebas realizadas.

Para la recolección del alcohol destilado se estableció que el inicio del mismo será cuando la concentración estimada alcance los 96° ya que se comprobó que con cualquier cantidad de alcohol que se encuentre en la mezcla (10, 15 y 20 litros), la concentración alcanza dicho valor, que es el límite máximo que la columna puede ofrecer.

Al implementar el HMI (Interfaz Hombre-Máquina) amigable con el usuario, éste permite al operador un mejor control y visualización de todas la variables y elementos presente en la columna de destilación.

El montaje de los tableros de control y potencia permiten tener una buena protección y aislamiento del control de la columna de destilación y de los actuadores presentes en la misma.

Mediante la implementación (montaje) de los nuevos sensores de temperatura (RTD) se evitó la oxidación y reparación continua que se tenía con los antiguos sensores.

La implementación del transductor de presión permitió al operario mejorar el control de la columna de destilación ya que se evita tomar la medida de la presión en el manómetro y lo hace directamente visualizando el HMI.

Se habilitaron depósitos fijos tanto para el ingreso de mezcla en el inicio del proceso, como en la realimentación permitiendo un mejor manejo de la mezcla que se usa.

Al ser una columna que tiene casi 50 años, además de tener la mayor cantidad de etapas de vidrio, se tuvo que trabajar con cuidado, y basándonos en los parámetros que en el laboratorio se establecieron, y así evitar incidentes mayores.

La adición del sensor de nivel bajo del pozo permite que la bomba de desalojo de desechos se apague automáticamente, evitando que el operario este al pendiente de la misma.

Todas las electroválvulas seleccionadas trabajan a 110 V<sub>AC</sub> y se tuvo que trabajar con dos modelos diferentes (acero en la tubería de vapor y plástico en el ingreso y salida de mezcla) debido al peso de las mismas y al lugar donde iban instaladas.

## **5.2 RECOMENDACIONES**

Si es la primera vez que se va a trabajar con la columna, sin la presencia de los ayudantes del laboratorio, se aconseja leer el manual previamente, en el cual se establecen los parámetros de manejo y trabajo de la misma.

Previo a implementar una automatización en cualquier proceso es necesario conocer todo su funcionamiento y determinar todas las variables, sensores y actuadores presentes en el mismo.

Es aconsejable colocar la mayor cantidad de marquillas en los cables para que en el armado del tablero no se presente ningún inconveniente y de igual manera cuando se realice un mantenimiento.

Antes de energizar cualquier tablero eléctrico revisar la conexión del mismo y así evitar posibles accidentes.

Se debe realizar un HMI que sea amigable con cualquier usuario y facilite la operación del proceso a controlar.

Se recomienda realizar pruebas del sistema de control en vacío, es decir, sin colocarlo en proceso y así poder comprobar su funcionamiento y realizar las respectivas correcciones que se tenga en el mismo.

Se aconseja realizar la limpieza de las tuberías de alimentación de vapor que llegan al serpentín, ya que tienen una gran cantidad de años en uso, y al ser de acero, generan oxido que puede llegar a interferir en las electroválvulas.

Se debe mantener el convenio de trabajo entre las facultades de electrónica y química que permite a los estudiantes de nuestra carrera poder aprender de los procesos químicos y automatizar las plantas.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] C. J. Geankoplis, "Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias", México: Compañía Editorial Continental, 1998, pp. 712-723.
- [2] TecMikro, «"Teclado Matricial 4x4",» [En línea]. Available: <http://programarpicenc.com/articulos/teclado-matricial-4x4-con-los-microcontroladores-pic/>. [Último acceso: 13 agosto 2015].
- [3] Xinje, «Wuxi Xinje Electric,» [En línea]. Available: <http://www.xinje.com/en/Main.asp>.
- [4] Xinje, «Xinje Support Centre,» [En línea]. Available: <http://www.xinje-support-centre-listo.com/xinje/documentation/manuals/plc/manul021/MANUL021R2V2%20-%20PLC%20Software%20Manual.pdf>.
- [5] Xinje, «Service & Support,» [En línea]. Available: [http://kms-trade.com/downloads/manuals/XC\\_Extension\\_Manual.pdf](http://kms-trade.com/downloads/manuals/XC_Extension_Manual.pdf).
- [6] Xinje, «TouchWin Manual,» [En línea]. Available: [http://kms-trade.com/downloads/manuals/TH\\_HMI\\_Manual.pdf](http://kms-trade.com/downloads/manuals/TH_HMI_Manual.pdf).
- [7] FMK Soluciones, «Transmisor de Presión Manométrica,» [En línea]. Available: <http://www.solucionesfmk.com/productos/transmisor-presion.php>.
- [8] VALVECO, «Válvula solenoide UNI-D Modelo UW,» [En línea]. Available: [http://www.valveco.com.co/p/valvula-solenoide-uni-d-uso-general\\_4388027/valvula-solenoide-uni-d-modelo-uw\\_4396852#](http://www.valveco.com.co/p/valvula-solenoide-uni-d-uso-general_4388027/valvula-solenoide-uni-d-modelo-uw_4396852#). [Último acceso: 2016].
- [9] SASSIN Electric, «Conycal,» [En línea]. Available: <http://www.conycal.com/PDF/SASSIN/FUSIBLES.pdf>. [Último acceso: 2015].
- [10] D. Himmelblau, "Principios Básicos y Cálculos en Ingeniería Química", México: Prentice Hall, 1997, p. Apéndice G.