



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DESTILADOR BATCH
PARA UNA MEZCLA BINARIA ETANOL-AGUA CON CONTROL
AUTOMÁTICO”**

Trabajo de Titulación

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO QUÍMICO

AUTORES: MARLON GONZALO CHUNATA MANOTOA

ANTHONY EDUARDO SILVA SANAGUANO

DIRECTOR: Ing. DARIO FERNANDO GUAMAN LOZADA

Riobamba – Ecuador

2021

©2021, Marlon Gonzalo Chunata Manotoa; Anthony Eduardo Silva Sanaguano


Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Nosotros, Marlon Gonzalo Chunata Manotoa y Anthony Eduardo Silva Sanaguano declaramos que el presente Trabajo de Titulación de tipo Proyecto Técnico denominado: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DESTILADOR BATCH PARA UNA MEZCLA BINARIA ETANOL-AGUA CON CONTROL AUTOMÁTICO” es de nuestra autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autores, asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación. El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 8 de septiembre de 2021

MARLON
GONZALO
CHUNATA
MANOTOA



Firmado digitalmente
por MARLON
GONZALO CHUNATA
MANOTOA
Fecha: 2021.10.22
16:35:49 -05'00'

Marlon Gonzalo Chunata Manotoa
Cedula de Identidad: 060551525-3

ANTHONY
EDUARDO SILVA
SANAGUANO



Firmado digitalmente por
ANTHONY EDUARDO
SILVA SANAGUANO
Fecha: 2021.10.22
13:06:10 -05'00'




Anthony Eduardo Silva Sanaguano
Cedula de Identidad: 060576250-9

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

El Tribunal de Trabajo de Integración Curricular certifica que: El trabajo de titulación: Tipo: Proyecto Técnico, “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DESTILADOR BATCH PARA UNA MEZCLA BINARIA ETANOL-AGUA CON CONTROL AUTOMÁTICO**”, de responsabilidad de los señores **MARLON GONZALO CHUNATA MANOTOA** y **ANTHONY EDUARDO SILVA SANAGUANO**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Danielita Borja M. PRESIDENTE DEL TRIBUNAL	 Firmado electrónicamente por: DANIELITA FERNANDA BORJA MAYORGA _____	2021-09-08
Ing. Darío Guamán L. DIRECTOR DE TRABAJO DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR	 Firmado electrónicamente por: DARIO FERNANDO GUAMAN LOZADA _____	2021-09-08
Ing. Adrián Rodríguez P. MIEMBRO DEL TRIBUNAL	 Firmado electrónicamente por: ADRIAN ALEJANDRO RODRIGUEZ PINOS _____	2021-09-08

DEDICATORIA

El presente trabajo de integración va dedicado en primer lugar a Dios por darme la sabiduría, la fuerza y la voluntad de culminar uno de los objetivos en mi vida. En segundo lugar a mis padres Luis y Cecilia quienes son los que me apoyaron tanto emocional como económicamente para realizar este sueño. En tercer lugar y no menos importante a toda mi familia que siempre estuvo ahí cuando me iba bien o mal ellos nunca me dejaron, este trabajo es para usted y gracias por ser parte de este logro importante en mi vida.

Marlon Chunata

El presente trabajo se lo dedico especialmente a mis padres, quienes han sido mi ejemplo a seguir y mis pilares de vida, por su incondicional apoyo y sus consejos a lo largo de mi trayectoria estudiantil y porque han sido ellos los que supieron cuidarme desde la niñez y guiarme para ser una persona con valores para el futuro. De la misma manera se lo dedico al resto de mi familia quienes de una u otra forma me han apoyado con su guía y sabiduría.

Anthony Silva

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme la salud y vida necesaria para completar una etapa en mi vida, a mis padres por el apoyo incondicional, a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por brindarme la oportunidad de aprender un poco de los profesionales que imparten cada una de las materias, a la carrera de ingeniería química de Facultad de Ciencias quienes brindaron los instrumentos necesarios para mi aprendizaje. Cómo no agradecer a quienes guiaron este trabajo como son los Ingenieros Dario Guaman y Adrian Rodríguez quienes con su conocimiento nos encaminaron a poder culminar este proyecto, adicionalmente a los ingenieros Paul Palmay y Carla Haro quienes de manera externa complementaron el conocimiento que no poseía.

Marlon Chunata

Agradezco primeramente a Dios y a mis padres que me brindaron su confianza y apoyo a lo largo de mi carrera tanto en los malos y buenos momentos para llegar hasta aquí, por creer en mí desde el inicio y por motivarme siempre a cumplir con mis metas. A mi familia y amigos por la compañía y confianza inquebrantable que me han sabido transmitir, Quiero agradecer también a los ingenieros Dario Guaman y Adrian Rodríguez que gracias a su buena voluntad y conocimientos ha sido posible la culminación del presente proyecto y, al ingeniero Paul Palmay quien también estuvo pendiente de nuestro avance y siempre dispuesto a brindarnos su ayuda. A todos ellos muchas gracias por la paciencia y ayuda incondicional.

Anthony Silva

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiv
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xvi
ÍNDICE DE ECUACIONES	xvii
ÍNDICE DE ANEXOS	xix
RESUMEN	xx
ABSTRACT.....	xxi
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	3
1.1 Identificación del problema.....	3
1.2 Justificación del proyecto	4
1.3 Antecedentes.....	5
1.4 Beneficiarios directos e indirectos	6
1.4.1 <i>Beneficiarios directos</i>	6
1.4.2 <i>Beneficiarios indirectos</i>	7
1.5 Localización del proyecto	7
1.6 Objetivos del proyecto	8
1.6.1 <i>Objetivo general</i>	8
1.6.2 <i>Objetivos específicos</i>	8

CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	9
2.1 Destilación	9
2.1.1 <i>Estructura general de una columna de destilación</i>	9
2.1.2 <i>Tipos de platos</i>	10
2.1.2.1 <i>Los platos con campana de borboteo</i>	10
2.1.2.2 <i>Los platos de válvula (o placas de tapa flotante)</i>	11

2.1.2.3	<i>Los platos perforados</i>	11
2.1.3	<i>Clasificación de las columnas de destilación</i>	12
2.1.3.1	<i>Operación en continuo</i>	12
2.1.3.2	<i>Operación batch</i>	12
2.1.4	<i>Modos de operación de una destilación batch</i>	12
2.1.5	<i>Metodologías de diseño de una torre de destilación</i>	13
2.1.5.1	<i>McCabe Thiele</i>	13
2.1.5.2	<i>Ponchon y Savarit</i>	13
2.2	Teoría de control automático	13
2.2.1	<i>Sistema de control</i>	13
2.2.1.1	<i>Sistema de control de lazo abierto</i>	14
2.2.1.2	<i>Sistema de control de lazo cerrado</i>	14
2.2.2	<i>Componentes básicos de un sistema de control</i>	14
2.2.2.1	<i>Sensor</i>	14
2.2.2.2	<i>Transmisor</i>	15
2.2.2.3	<i>Controlador</i>	15
2.2.2.4	<i>Actuador</i>	15
2.2.3	<i>Modelamiento de un sistema</i>	16
2.2.4	<i>Sistemas no lineales</i>	16
2.2.5	<i>Linealización</i>	17
2.2.6	<i>Modelamiento matemático</i>	17
2.2.6.1	<i>Función de Transferencia</i>	17
2.2.7	<i>Estrategias de control</i>	17
2.2.7.1	<i>Control PID</i>	17
2.2.7.2	<i>Control On-Off</i>	18
2.3	Artefactos de control para un sistema	19
2.3.1	<i>Arduino</i>	19
2.3.1.1	<i>Arduino Mega</i>	19
2.3.1.2	<i>Programación en Arduino</i>	19
2.3.2	<i>Termocuplas</i>	20
2.3.3	<i>Módulo Wifi (NodeMCU)</i>	20
2.3.4	<i>Válvula Solenoide</i>	21
2.3.5	<i>Sensor de nivel</i>	21

CAPÍTULO III

3.	MARCO METODOLÓGICO.....	22
3.1	Cálculos para el diseño de la columna de destilación batch.....	22
3.1.1	<i>Variables de diseño en la alimentación</i>	<i>22</i>
3.1.2	<i>Balance de materia</i>	<i>23</i>
3.1.3	<i>Cálculo de los volúmenes de etanol</i>	<i>23</i>
3.1.4	<i>Cálculo de los volúmenes de agua</i>	<i>23</i>
3.1.5	<i>Cálculo de la masa de etanol en cada corriente</i>	<i>24</i>
3.1.6	<i>Cálculo de la masa de agua en cada corriente</i>	<i>24</i>
3.1.7	<i>Cálculo de la masa total en cada corriente</i>	<i>24</i>
3.1.8	<i>Cálculo del número de moles de etanol en cada corriente</i>	<i>25</i>
3.1.9	<i>Cálculo del número de moles de agua en cada corriente</i>	<i>25</i>
3.1.10	<i>Cálculo de las fracciones molares</i>	<i>25</i>
3.1.11	<i>Cálculo del número de moles totales en cada corriente</i>	<i>26</i>
3.2	Balance de energía y modelado matemático del sistema térmico	27
3.2.1	<i>Calculo de la masa de la mezcla etanol-agua.....</i>	<i>28</i>
3.2.1.1	<i>Cálculo de la densidad de la mezcla</i>	<i>29</i>
3.2.2	<i>Calculo de la capacidad calorífica de la mezcla etanol-agua</i>	<i>29</i>
3.2.3	<i>Calculo del área de transferencia de calor en el sistema</i>	<i>29</i>
3.2.3.1	<i>Cálculo de la altura de la mezcla.....</i>	<i>29</i>
3.2.4	<i>Calculo del coeficiente global de transferencia de calor en el sistema</i>	<i>30</i>
3.2.4.1	<i>Cálculo de la conductividad térmica de la mezcla</i>	<i>30</i>
3.2.5	<i>Linealización</i>	<i>30</i>
3.2.5.1	<i>Punto de Equilibrio.....</i>	<i>30</i>
3.2.5.2	<i>Series de Taylor</i>	<i>30</i>
3.2.5.3	<i>Función de transferencia</i>	<i>31</i>
3.3	Aplicación del método McCabe-Thiele.....	32
3.3.1	<i>Determinación del número de etapas teóricas</i>	<i>32</i>
3.3.2	<i>Ecuaciones para la sección de enriquecimiento</i>	<i>33</i>
3.3.3	<i>Ecuaciones para la sección de empobrecimiento</i>	<i>35</i>
3.3.4	<i>Línea de las condiciones de alimentación</i>	<i>36</i>
3.3.5	<i>Cálculo del valor de q de la alimentación.....</i>	<i>38</i>
3.3.6	<i>Diagramas de equilibrio con el método de McCabe-Thiele</i>	<i>40</i>

3.4	Construcción del equipo de destilación	41
3.5	Prácticas Experimentales	42
3.5.1	<i>Cálculo del porcentaje de recuperación de etanol</i>	43
3.5.2	<i>Cálculo del rendimiento volumétrico</i>	43
3.5.3	<i>Cálculo de la eficiencia en función de los grados °GL</i>	44
3.5.4	<i>Gráfica de los perfiles dinámicos de temperatura vs tiempo</i>	44
3.6	Procedimiento de destilación.....	45

CAPÍTULO IV

4.	RESULTADOS	47
4.1	Diseño de la columna de platos para un sistema binario etanol – agua	47
4.1.1	<i>Condiciones de trabajo</i>	47
4.1.2	<i>VARIABLES DE DISEÑO PARA LA ALIMENTACIÓN</i>	47
4.1.3	<i>Balace de materia</i>	47
4.1.4	<i>Cálculo de los volúmenes de etanol</i>	48
4.1.5	<i>Cálculo de los volúmenes de agua</i>	48
4.1.6	<i>Cálculo de la masa de etanol en cada corriente</i>	49
4.1.7	<i>Cálculo de la masa de agua en cada corriente</i>	49
4.1.8	<i>Cálculo de la masa total en cada corriente</i>	50
4.1.9	<i>Cálculo del número de moles de etanol en cada corriente</i>	51
4.1.10	<i>Cálculo del número de moles de agua en cada corriente</i>	52
4.1.11	<i>Cálculo de las fracciones molares</i>	52
4.1.12	<i>Cálculo del número de moles totales en cada corriente</i>	54
4.2	Balace de energía y modelado matemático del sistema térmico	54
4.2.1	<i>Cálculo de la densidad de la mezcla</i>	55
4.2.2	<i>Calculo de la masa de la mezcla etanol-agua</i>	55
4.2.3	<i>Calculo de la capacidad calorífica de la mezcla etanol-agua</i>	56
4.2.4	<i>Cálculo de la altura de la mezcla</i>	56
4.2.5	<i>Calculo del área de transferencia de calor en el sistema</i>	56
4.2.6	<i>Cálculo de la conductividad térmica de la mezcla</i>	56
4.2.7	<i>Calculo del coeficiente global de transferencia de calor en el sistema</i>	57
4.2.8	<i>Linealización</i>	57
4.2.8.1	<i>Punto de Equilibrio</i>	57

4.2.8.2	<i>Función de transferencia</i>	58
4.2.9	<i>Diagrama de bloques</i>	58
4.2.10	<i>Gráfico del modelado lineal del sistema térmico</i>	60
4.2.11	<i>Comparación de Modelos</i>	60
4.3	Aplicación del método de McCabe-Thiele	62
4.3.1	<i>Número mínimo de platos teóricos</i>	66
4.3.2	<i>Datos para el cálculo de la línea de operación de alimentación</i>	66
4.3.2.1	<i>Cálculo del Cp promedio</i>	67
4.3.2.2	<i>Cálculo de λ promedio</i>	67
4.3.2.3	<i>Cálculo del valor de q de la alimentación</i>	67
4.3.2.4	<i>Cálculo de la pendiente de la línea de operación de alimentación</i>	68
4.3.2.5	<i>Cálculo de la intersección en el eje de la ordenada</i>	69
4.3.3	<i>Determinación de la relación de reflujo mínima</i>	69
4.3.3.1	<i>Cálculo de la relación del reflujo mínimo y reflujo de operación</i>	70
4.3.4	<i>Determinación de las ecuaciones de las líneas de operación</i>	71
4.3.5	<i>Diseño de los platos</i>	74
4.3.6	<i>Parámetros de diseño</i>	76
4.4	Propuesta de construcción del equipo	76
4.4.1	<i>Componentes y dimensiones de la estructura del equipo</i>	77
4.4.2	<i>Tanque de alimentación</i>	78
4.4.3	<i>Torre de destilación</i>	78
4.4.4	<i>Tuberías de acero inoxidable</i>	79
4.4.5	<i>Condensador</i>	79
4.4.6	<i>Acumulador</i>	80
4.4.7	<i>Válvula de recirculación</i>	80
4.4.8	<i>Caja de control</i>	81
4.4.8.1	<i>Módulos y termocuplas</i>	81
4.4.8.2	<i>Módulo Wifi</i>	82
4.4.8.3	<i>Relé</i>	82
4.4.8.4	<i>Transformador de 110 a 3V</i>	83
4.4.8.5	<i>Selectores y relés térmicos</i>	83
4.4.8.6	<i>Breakers</i>	83
4.4.8.7	<i>Pantalla</i>	84
4.4.8.8	<i>Contactores</i>	84

4.5	Prácticas Experimentales	85
4.5.1	<i>Cálculo del porcentaje de recuperación de etanol, rendimiento volumétrico y eficiencia del equipo.....</i>	85
4.5.1.1	<i>Cálculo del porcentaje de recuperación de etanol.....</i>	85
4.5.1.2	<i>Cálculo del rendimiento volumétrico</i>	86
4.5.1.3	<i>Cálculo de la eficiencia en función de los grados °GL</i>	87
4.5.2	<i>Gráfica de los perfiles dinámicos de temperatura vs tiempo</i>	88
4.5.2.1	<i>Resultados de las temperaturas en la práctica N°1.....</i>	88
4.5.2.2	<i>Resultados de las temperaturas en la práctica N°2.....</i>	91
4.5.2.3	<i>Resultados de las temperaturas en la práctica N°3.....</i>	93
4.5.3	<i>Resultados obtenidos de las prácticas</i>	95
4.6	Análisis de Resultados	95
	CONCLUSIONES.....	97
	RECOMENDACIONES.....	99
	BIBLIOGRAFÍA	
	ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-4. Propiedades de los componentes en la alimentación	47
Tabla 2-4. Características de la resistencia calentadora de inmersión en forma de U	55
Tabla 3-4. Conductividad térmica del acero inoxidable	57
Tabla 4-4. Coeficiente de convección del aire.....	57
Tabla 5-4. Datos de temperatura en función del tiempo del tanque calefactor.....	60
Tabla 6-4. Datos de equilibrio del sistema etanol – agua a 760 mmHg	62
Tabla 7-4. Resultados del balance de materia del destilador	65
Tabla 8-4. Propiedades de los líquidos a 25°C y 1 atm.	66
Tabla 9-4. Datos del equilibrio del sistema etanol-agua necesarios para interpolación	68
Tabla 10-4. Datos necesarios para el cálculo de las líneas de operación de la destilación	71
Tabla 11-4. Relación del diámetro de la torre con el espaciamiento entre platos	74
Tabla 12-4. Datos para el diseño y dimensionamiento del equipo	76
Tabla 13-4. Datos finales de construcción del equipo	77
Tabla 14-4. Componentes del destilador batch.....	78
Tabla 15-4. Componentes de la caja de control	81
Tabla 16-4. Datos para el cálculo de la recuperación, rendimiento y eficiencia	85
Tabla 17-4. Datos de temperatura en función del tiempo correspondientes a la práctica N°1 ...	89
Tabla 18-4. Datos de temperatura en función del tiempo correspondientes a la práctica N°2 ...	91
Tabla 19-4. Datos de temperatura en función del tiempo correspondientes a la práctica N°3 ...	93
Tabla 20-4. Resultados del cálculo de la recuperación, rendimiento y eficiencia	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1.	Localización de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.....	7
Figura 1-2.	Esquema de la Columna de Destilación.....	10
Figura 2-2.	Esquema de una campana de borboteo.	11
Figura 3-2.	Esquema de un plato de válvulas	11
Figura 4-2.	Representación de un plato perforado.....	12
Figura 5-2.	Esquema de un sistema de control de lazo abierto.	14
Figura 6-2.	Esquema de un sistema de control de lazo cerrado.	14
Figura 7-2.	Componentes del sistema de control en un intercambiador de calor.	16
Figura 8-2.	Diagrama de bloques	18
Figura 9-2.	Acción de control On-Off sobre la variable temperatura para un proceso	18
Figura 10-2.	Estructura de Programación en Arduino	20
Figura 1-3.	Esquema del destilador con las variables de diseño	22
Figura 2-3.	Esquema de una torre de destilación.....	32
Figura 3-3.	Estructura de la torre de destilación para la sección de enriquecimiento	33
Figura 4-3.	Línea de operación y de equilibrio para la sección de enriquecimiento	34
Figura 5-3.	Estructura de la torre de destilación para la sección de empobrecimiento	35
Figura 6-3.	Línea de operación y de equilibrio para la sección de empobrecimiento	36
Figura 7-3.	Orientación de la línea q para las diferentes condiciones de alimentación.....	37
Figura 8-3.	Relación entre los flujos por encima y por debajo de la entrada de alimentación .	38
Figura 9-3.	Reflujo total y número mínimo de platos con el método de McCabe-Thiele.	40
Figura 10-3.	Reflujo mínimo y número infinito de platos con el método de McCabe-Thiele....	40
Figura 11-3.	Diagrama de McCabe-Thiele convencional	41
Figura 12-3.	Interfaz de ThingSpeak para la visualización de temperaturas.....	45
Figura 13-3.	Procedimiento para la destilación de alcohol etílico en el equipo	46
Figura 1-4.	Diagrama de bloques del modelado lineal	59
Figura 2-4.	Estructura y dimensiones del equipo de destilación batch	77
Figura 3-4.	Tanque de alimentación.....	78
Figura 4-4.	Torre de destilación	79
Figura 5-4.	Tuberías de acero inoxidable	79
Figura 6-4.	Condensador	80
Figura 7-4.	Acumulador de destilado	80
Figura 8-4.	Válvula de recirculación	81
Figura 9-4.	Caja de control.....	81

Figura 10-4. Módulos y termocuplas.....	82
Figura 11-4. Módulo Wifi.....	82
Figura 12-4. Relé	82
Figura 13-4. Transformador de 110V a 3V	83
Figura 14-4. Selectores y relés térmicos.....	83
Figura 15-4. Breakers.....	84
Figura 16-4. Pantalla táctil	84
Figura 17-4. Contactores.....	84

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-4.	Comportamiento dinámico del modelo lineal.....	60
Gráfico 2-4.	Comparación de comportamiento dinámico entre el modelo lineal y real	61
Gráfico 3-4.	Diagrama de equilibrio T-XY del etanol-agua a 760mm Hg.....	63
Gráfico 4-4.	Diagrama de equilibrio X-Y del etanol-agua a 760 mm Hg	64
Gráfico 5-4.	Diagrama de equilibrio X-Y del etanol-agua a 548,5 mm Hg	64
Gráfico 6-4.	Diagrama de equilibrio X-Y del etanol-agua con las composiciones de diseño ..	65
Gráfico 7-4.	Número mínimo de platos por el método McCabe-Thiele.....	66
Gráfico 8-4.	Representación de la línea de operación de alimentación.....	69
Gráfico 9-4.	Cruce de rectas de operación para reflujo mínimo	70
Gráfico 10-4.	Representación de las tres líneas de operación de la columna de destilación	73
Gráfico 11-4.	Número de platos teóricos por el método de McCabe-Thiele.....	74
Gráfico 12-4.	Regresión lineal de t en función de T con los datos de la Tabla 11-4.....	75
Gráfico 13-4.	Gráfico de temperaturas en función del tiempo correspondientes a la práctica N° 1	90
Gráfico 14-4.	Gráfico de temperaturas en función del tiempo correspondientes a la práctica N° 2	92
Gráfico 15-4.	Gráfico de temperaturas en función del tiempo correspondientes a la práctica N° 3	94

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1-3	Balance global de materia.....	23
Ecuación 2-3	Balance específico de materia	23
Ecuación 3-3	Volumen de etanol en la alimentación.....	23
Ecuación 4-3	Volumen de etanol en el destilado.....	23
Ecuación 5-3	Volumen de etanol en el residuo	23
Ecuación 6-3	Volumen de agua en la alimentación.....	23
Ecuación 7-3	Volumen de agua en el destilado	23
Ecuación 8-3	Volumen de agua en el residuo.....	24
Ecuación 9-3	Masa de etanol para cada corriente.....	24
Ecuación 10-3	Masa de agua para cada corriente	24
Ecuación 11-3	Masa total para cada corriente	24
Ecuación 12-3	Número de moles de etanol para cada corriente	25
Ecuación 13-3	Número de moles de agua para cada corriente.....	25
Ecuación 14-3	Fracción molar de etanol para cada corriente	26
Ecuación 15-3	Fracción molar de agua para cada corriente.....	26
Ecuación 16-3	Número de moles totales para cada corriente	26
Ecuación 17-3	Balance global de energía del sistema térmico	27
Ecuación 18-3	Calor de entrada del sistema térmico	27
Ecuación 19-3	Calor de salida del sistema térmico	27
Ecuación 20-3	Variación de calor con respecto al tiempo	28
Ecuación 21-3	Variación de calor con respecto al tiempo aplicando derivadas.....	28
Ecuación 22-3	Calor absorbido por el sistema térmico	28
Ecuación 23-3	Balance general de energía del sistema térmico.....	28
Ecuación 24-3	Masa de la mezcla etanol-agua	28
Ecuación 25-3	Densidad de la mezcla etanol-agua.....	29
Ecuación 26-3	Capacidad calorífica de la mezcla etanol-agua	29
Ecuación 27-3	Área de transferencia de calor en el sistema	29
Ecuación 28-3	Altura de la mezcla al interior del sistema	29
Ecuación 29-3	Coeficiente global de transferencia de calor	30
Ecuación 30-3	Conductividad térmica de la mezcla etanol-agua.....	30
Ecuación 31-3	Función de modelado del sistema térmico	30
Ecuación 32-3	Temperatura del sistema en estado estacionario	30
Ecuación 33-3	Función de modelado del sistema aplicada la serie de Taylor	31

Ecuación 34-3	Función de modelado del sistema aplicada la transformada de Laplace	31
Ecuación 35-3	Función de transferencia del sistema térmico	31
Ecuación 36-3	Relación de reflujo	33
Ecuación 37-3	Balance global de materia en la sección de rectificación	333
Ecuación 38-3	Balance específico de materia en la sección de rectificación	34
Ecuación 39-3	Recta de operación de rectificación	344
Ecuación 40-3	Recta de operación de rectificación en función de la relación de reflujo	35
Ecuación 41-3	Balance global de materia en la sección de empobrecimiento	355
Ecuación 42-3	Balance específico de materia en la sección de empobrecimiento	36
Ecuación 43-3	Recta de operación de empobrecimiento	366
Ecuación 44-3	Variable “q” para las condiciones de entrada de la alimentación.....	37
Ecuación 45-3	Número de moles del reflujo líquido en el plato “m”	377
Ecuación 46-3	Número de moles de vapor en el plato “n”	377
Ecuación 47-3	Balance específico de materia en la sección de rectificación (reordenado).....	388
Ecuación 48-3	Balance específico de materia en la sección de empobrecimiento (reordenado)	388
Ecuación 49-3	Relación de sustracción de los balances específicos de materia.....	388
Ecuación 50-3	Recta de operación de alimentación	388
Ecuación 51-3	Variable “q” de la alimentación en función de las entalpías	39
Ecuación 52-3	Calor latente de la mezcla de alimentación.....	39
Ecuación 53-3	Sustracción de las entalpías de la alimentación al rocío y en la entrada.....	39
Ecuación 54-3	Variable “q” de la alimentación (reordenada).....	3939
Ecuación 55-3	Calor latente de cada componente en la mezcla.....	39
Ecuación 56-3	Porcentaje de recuperación de etanol.....	433
Ecuación 57-3	Rendimiento volumétrico de la operación	433
Ecuación 58-3	Eficiencia de la operación en función de los grados °GL	44

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A. PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO

ANEXO B. PRUEBAS EXPERIMENTALES DE DESTILACIÓN

ANEXO C. PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DEL ETANOL Y AGUA

ANEXO D. HOJA DE CÁLCULO EN EXCEL REALIZADA PARA EL DISEÑO DEL EQUIPO

ANEXO E. PLANOS DE DISEÑO DE LOS PLATOS PERFORADOS, DE LA TORRE DE DESTILACIÓN Y DEL TANQUE DE ALIMENTACIÓN

ANEXO F. MANUAL DE OPERACIÓN DEL EQUIPO

ANEXO G. PLATAFORMA WEB “THINGSPEAK”

ANEXO H. ESQUEMA DEL CIRCUITO ELÉCTRICO EN EL EQUIPO

ANEXO I. PROGRAMACIÓN EN ARDUINO DE LOS SENSORES DE TEMPERATURA

ANEXO J. PROGRAMACIÓN EN ARDUINO DE LA PANTALLA TÁCTIL

ANEXO K. CERTIFICADO DE ENTREGA Y VALIDACIÓN DEL EQUIPO

RESUMEN

El presente proyecto técnico consistió en diseñar una columna de destilación batch mediante cálculos y ecuaciones correspondientes al método gráfico McCabe-Thiele. La determinación del número de etapas teóricas y por consiguiente el diámetro y la altura de la torre se desarrollaron a partir de una mezcla binaria etanol-agua en condiciones normales de temperatura y presión. Para la construcción final del equipo se estableció un diámetro de 20,32 cm y una altura de 1,55 m para la torre, así como también la instalación de 9 platos perforados, un hervidor, un condensador y un acumulador del condensado con opción de recirculación. En el equipo se instauró sensores de temperatura y de nivel para el control automático de la resistencia calefactora y de la válvula solenoide de reflujo respectivamente. La vigilancia de las temperaturas con termocuplas en los platos 1, 5 y 9 se llevó a cabo mediante el uso de la plataforma web ThingSpeak y la programación con Arduino. La validación del funcionamiento óptimo de la columna se lo desarrolló a través de 3 prácticas experimentales con las mismas condiciones iniciales de concentración de alcohol, 49°GL y un volumen de carga de 10L. Para cada práctica se trabajó con una variación del 0%, 50% y 100% de apertura de la válvula de reflujo, obteniéndose así diferentes tiempos de operación, volúmenes y concentraciones de alcohol en el destilado. Se concluyó que para un mejor porcentaje de recuperación de etanol, rendimiento volumétrico y eficiencia en grados alcohólicos se debe operar con una válvula al 100% de apertura en la cual se obtuvieron resultados de 84,86%, 49,5% y 71,43% respectivamente en un tiempo de operación de 160 minutos.

Palabras clave: <INGENIERÍA QUÍMICA>, <MEZCLA BINARIA>, <TORRE DE DESTILACIÓN>, <MÉTODO DE MCCABE-THIELE>, <CONTROL AUTOMÁTICO>.

LUIS
ALBERTO
CAMINOS
VARGAS

Firmado digitalmente por
LUIS ALBERTO CAMINOS
VARGAS
Nombre de reconocimiento
(DN): c=EC, o=RCBAMBA,
serialNumber=0502766974,
cn=LUIS ALBERTO
CAMINOS VARGAS
Fecha: 2021.04.26 15:56:19
+05'00'



1068-DBRA-UTP-2021

ABSTRACT

The objective of this study was to design a batch distillation column using calculations and equations corresponding to the McCabe-Thiele graphical method. To determine the number of theoretical stages and consequently the diameter and height of the tower, a binary mixture of ethanol-water was developed under normal conditions of temperature and pressure. For the final construction of the equipment, a diameter of 20.32 cm and a height of 1.55 m were established for the tower, nine perforated plates, a kettle, a condenser, and a condensate accumulator with a recirculation option were also installed. Temperature and level sensors were implemented in the equipment for the automatic control of the heating resistance and the solenoid reflux valve, respectively. The monitoring of the temperatures with thermocouples on plates 1, 5 and 9 was done using the Arduino programming language on the Thing Speak web platform. The validation of the optimal functioning of the column was developed through three experimental practices with the same initial conditions of alcohol concentration, 49 ° GL and a loading volume of 10L. In each practice we worked with a variation of 0%, 50% and 100% of the reflux valve opening, thus obtaining different operating times, volumes and concentrations of alcohol in the distillate. It was concluded that for a better percentage of recovery of ethanol, volumetric yield and efficiency in alcoholic degrees, a valve should be operated at 100% opening in which results of 84.86%, 49.5% and 71.43% were obtained respectively in an operating time of 160 minutes.

Keywords: <CHEMICAL ENGINEERING AND TECHNOLOGY>, <BINARY MIXING>, <DISTILLATION TOWER>, <MCCABE-THIELE METHOD>, <AUTOMATIC CONTROL>

INTRODUCCIÓN

La destilación es el procedimiento de separación de sustancias químicas más antiguo e importante de la industria. Es uno de los métodos de purificación al que más uso se le da por delante de la cristalización y por ende, uno de los de mayor investigación que se conoce. La época en la que mayor actividad se ha destinado esta rama de investigación fue alrededor de los años 70, aunque de igual manera a día de hoy se lo considera un área de estudio con gran relevancia para el ámbito industrial y universitario.

Para poder entender el fundamento teórico de la destilación binaria se revisa la manera en cómo los autores Suárez y Castillo lo definen:

La destilación binaria es una operación unitaria que consiste en la separación de una mezcla líquida mediante la fase de evaporación y condensación sucesiva; esta separación se basa en una diferencia térmica de los compuestos mezclados, en donde el compuesto con menor punto de ebullición se separa del elemento con el de mayor punto mediante una evaporación. (Suárez Cerquera y Castillo Acosta, 2016, pp.161-174)

El procedimiento de la destilación es considerado un principio imprescindible en el área concerniente a la fabricación de cuantiosos productos a nivel industrial, aunque con creces es la industria petroquímica, aquella en la cual la destilación tiene mayor relevancia e influencia para la manufactura. Actualmente existen desarrollos y estudios que abarcan un sinnúmero de conocimiento referente a la transferencia de calor y masa, lo cual ha permitido implementar equipos que cumplan con tal operación unitaria de manera eficiente.

Las denominadas columnas de destilación que se usan para llevar a cabo este proceso son la parte constitutiva que representa el mayor porcentaje de inversión económica cuando se desea poner en funcionamiento una planta química o refinería de cualquier tipo. La puesta en marcha y operación de las columnas de destilación tiene un coste muy alto dentro de la mayoría de procesos industriales donde se las requiere (Duro Carralero y Morilla García, 2013). Debido a ello, es indispensable contar con técnicas prácticas y efectivas para la modelación de columnas de destilación que sean realistas y, de la misma manera, el desarrollo de sistemas de control fiables y eficaces que contribuyan a obtener un funcionamiento fructuoso y seguro en los sistemas de destilación industrial.

El objetivo de este trabajo es el modelado y posterior construcción de una columna de destilación tipo batch que posea todas las características necesarias para destilar cualquier tipo

de mezcla y que contenga integrado un control automatizado. El equipo diseñado representa una columna de destilación binaria de tipo discontinua, con dos productos finales (destilado y fondos) y N platos perforados ideales en su interior. El principio de funcionamiento propuesto para esta destilación binaria se basa en una operación por lotes donde la mezcla a alimentar se carga en un recipiente hervidor y se somete a ebullición para vaporizar y desprender el componente más volátil hasta condensarlo y recolectarlo.

Mediante la realización de este trabajo se dispondrá de una torre de destilación tipo batch en el laboratorio de procesos industriales con el fin de reforzar de manera práctica los conocimientos de los estudiantes y facilitar la comprensión de alguna cátedras como Operaciones Unitarias, Balance de Masa y Energía, Procesos Industriales, Mantenimiento y Corrosión de Materiales, etc.

La Escuela de Ingeniería Química y demás carreras de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH serán las beneficiarias del proyecto y contarán con un equipo de destilación lo suficientemente útil para desempeñar la separación de cualquier componente químico en todo tipo de mezcla. Del mismo modo, con la construcción del equipo se brindará opciones de solución para problemas de costos de producción en cualquier actividad destinada al interior de la institución e inclusive será una opción de respuesta para problemas de purificación y aprovechamiento de residuos líquidos y sólidos.

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

1.1 Identificación del problema

La necesidad de complementar los conocimientos teóricos obtenidos durante una formación académica con la parte práctica, semejante al manejo de una operación unitaria básica en una industria, hace que el proceso de destilación se considere un tema de gran interés para la Ingeniería Química. La implementación de equipos que sustenten y potencien la educación integral y profesional de los ingenieros químicos es un factor recurrente que no debe ser del olvido de las instituciones de educación.

Luego de una observación no sistematizada se evidencia que los estudiantes de la escuela de Ingeniería Química, facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en la asignatura de Operaciones Unitarias presentan la dificultad de realizar el destilado de mezclas con diferentes sustancias y el uso de un destilador con las condiciones óptimas de funcionamiento en el laboratorio de Procesos Industriales.

Considerando lo estipulado anteriormente, algunos autores (Vega et al., 2014) indican que el uso de equipos prácticos de destilación aportará una experiencia cercana al del ambiente laboral. Es por ello que por medio de este trabajo se pretende donar un equipo tipo batch que ayude a la comunidad politécnica y en particular a los futuros estudiantes de la carrera de ingeniería química permitiéndoles familiarizarse con el proceso de destilación de una forma didáctica.

La unidad de destilación propuesta separará etanol a un porcentaje alto a partir de una mezcla inicial con agua. Las aplicaciones del alcohol etílico son muy variadas, pero de forma general y además de usarse con fines culinarios (bebida alcohólica), el etanol se utiliza ampliamente en muchos sectores industriales. De acuerdo a Barrientos Felipa (2014: pp.115-136) a nivel mundial el etanol contempla varias utilidades en las cuales, de entre todas, se destacan los siguientes usos: como combustible ya sea para mezclar o en reemplazo del petróleo y sus derivados, representando un 65,4% de la producción mundial; como insumo en la industria procesadora, donde el 21% de la producción mundial se destina a las industrias de cosméticos, farmacéutica,

química, entre otras, y finalmente; como insumo en la elaboración de bebidas que utiliza alrededor del 13% de la producción mundial.

El control de destiladores es un tema que ha sido estudiado durante muchos años debido a que la destilación es una de las operaciones de separación más empleada en los procesos industriales. La mayor problemática que existe en el control automático de destiladores radica en satisfacer unos objetivos de control al menor coste posible diseñando un sistema de control fundamentado en una estrategia de control adecuada.

El objetivo primordial que se debe perseguir para un control automático adecuado es el de cerciorar una operación segura y estable donde se cumpla con el balance de materia en la columna, es decir que la suma de las cantidades de las corrientes de productos sea igual a la de la corriente de alimentación. Por ello Navas Herrera (2014: pp.24-27) manifiesta que se debe controlar el inventario de líquido en la columna, lo cual se consigue controlando los niveles de líquido tanto en el tanque de reflujo como en el fondo de la columna.

1.2 Justificación del proyecto

Los estudiantes de la escuela de Ingeniería Química, facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en la asignatura de Operaciones Unitarias no disponen de un equipo de destilación simple que cumpla con las condiciones óptimas de funcionamiento y contemple un correcto sistema de control automatizado.

Estos indicadores reflejan problemas de dominio de práctica en la temática de destilación de sustancias, en este sentido varios autores (Vega et al., 2014), manifiestan que el desarrollo didáctico de proyectos en ingeniería química y optimización de procesos son esenciales para los estudiantes universitarios en este campo, debido a que fortalecen la enseñanza y los procesos de aprendizaje en áreas como control de procesos, gestión de proyectos, diseños de ingeniería y montajes eléctricos.

Por consiguiente, se propone el diseño y construcción de un destilador tipo Batch para una mezcla binaria etanol-agua que llevará integrado un sistema de control automático y monitoreo de datos reales de la operación de dicho proceso. Se estipula que el destilador para mezcla binaria será un equipo que logrará una separación del etanol-agua en un rendimiento aceptable y cumplirá con las restricciones marcadas por la operación de la columna, como por ejemplo, los límites de presión, temperaturas inferiores a las que se provoca una descomposición térmica en los productos, y la omisión de inundaciones o derrames en el fondo.

Bajo la misma línea conceptual, los cambios en los caudales del proceso deben ser suaves y graduales para no alterar el comportamiento del destilador, así como también que la operación se desarrolle dentro de la ventana de operación correcta del equipo.

La obtención del producto final, en este caso etanol en altas concentraciones, corresponde a un proceso de separación simple en la columna de rectificación donde, tanto el destilado como los fondos poseerán una concentración acorde con los requerimientos y variables de diseño previamente planteadas para la construcción. Por los motivos expresados anteriormente, se estima que el destilador tipo batch será diseñado y construido con el fin último de mejorar el proceso de enseñanza-aprendizaje de los estudiantes que cursen la carrera de Ingeniería Química.

1.3 Antecedentes

La primera destilación analítica registrada fue constituida por Boyle al destilar alcohol a partir de madera y vinagre, y obtener así varias fracciones y componentes en función de sus puntos de ebullición. Hasta el año 1800 Rumford introdujo al vapor de agua como agente donador de energía térmica. Por aquellos tiempos las denominadas columnas de destilación fueron diseñadas y examinadas por primera vez por investigadores franceses hasta evolucionar y mejorar en 1813 con la invención de la columna de rectificación del científico Cellier Blumenthal. (Ortiz Calderon y Pinzon Castillo, 2007: p. 3)

Después del florecimiento de los equipos fabricados con metal y cerámica a mediados del siglo pasado se descubrió una técnica de elaboración de vidrio transparente, el cual sería un material con mayor ductilidad y mayor aventajamiento en cuanto a su resistencia al calor y enfriamiento progresivos. Sus mejoradas características de resistencia química y maleabilidad significaron la fabricación de instrumentos de laboratorio nuevos y de mayor complicación de construcción. (Ortiz Calderon y Pinzon Castillo, 2007: p. 3)

En sus inicios y apogeo la destilación fue considerada un arte, por lo cual varios estudios a nivel científico fueron desarrollados en torno a su fundamentación teórica en el siglo XIX, donde destacan la invención de varios artefactos y elementos como los platos perforados, las campanas de burbujeo y los condensadores. Del mismo modo se desarrollaron principios de mejora en la eficiencia del proceso, tales como el reflujo, el precalentamiento de la mezcla de alimentación y el ajuste de la operación por lotes a operación continua. (Ortiz Calderon y Pinzon Castillo, 2007: p. 3)

A partir de mediados del anterior siglo ya se utilizaban en las industrias en su gran mayoría los equipos de destilación de acero y otros tipos de metal. Estos equipos fueron denominados columnas de destilación o a su vez columnas de rectificación y poseían en su estructura los

siguientes elementos: un calderín o rehervidor (para la transferencia de calor), una columna vertical con platos o empaques al interior (para una mejorada transferencia de masa y energía entre los flujos de vapor y líquido en contracorriente) y un intercambiador de calor o condensador (donde se condensa el vapor saliente de la columna vertical hasta convertirse en líquido y ser extraído como producto o recirculado como reflujo según corresponda). (Bonilla Bermeo y Alvarez Macias, 2011: p. 17)

Los científicos WL. Mc.Cabe y E.W Thiele en el año 1925 publicaron un estudio (McCabe y Thiele, 1925) ante la American Chemical Society, en el cual se muestra una metodología nueva dotada de sencillez, rapidez y fundamentada en una técnica ilustrativa para determinar, mediante cálculos relativamente cortos, el número de platos teóricos que debería poseer una columna de destilación para lograr la separación de los componentes en una mezcla binaria. Las aportaciones de Mc. Cabe, a través de este y otros trabajos, significaron un gran avance en el diseño de unidades de destilación y tuvieron una enorme influencia en el desarrollo de nuevas tecnologías y métodos en los sistemas de cracking que aparecieron en 1936. (Bonilla Bermeo y Alvarez Macias, 2011: p. 17)

Contrario al pensamiento lógico de que la operación unitaria de destilación presenta toda duda e interrogante solventada, debido a un sinnúmero de bibliografía y estudios dedicados para sí misma, aún se siguen efectuando trabajos de investigación que demuestran que todavía no se ha agotado el campo y que no existe una última palabra en cuanto al diseño de equipos y aparatos de destilación.

Actualmente en la industria, para llevar a cabo una destilación continua, se hace uso de un aparato compuesto por tres dispositivos integrados: un generador de vapor mediante manipulación de temperatura, una columna con empaques o platos para el contacto de vapor y líquido, y un condensador para el vapor del componente más volátil.

1.4 Beneficiarios directos e indirectos

1.4.1 Beneficiarios directos

El presente proyecto de integración curricular tiene como beneficiarios principales a los estudiantes de la Escuela de Ingeniería Química de la ESPOCH, el propósito principal es poder enriquecer los conocimientos teóricos ya aprendidos no solo en la materia de operaciones unitarias sino también en la asignatura de control automático de procesos, ya que en los laboratorios no existe muchos equipos que tienen esta facilidad de aprendizaje.

1.4.2 Beneficiarios indirectos

Para este proyecto se pueden ver beneficiados los estudiantes de otras carreras que pertenecen a la ESPOCH, así como también estudiantes de otras universidades que deseen utilizar el equipo.

1.5 Localización del proyecto

El presente proyecto de integración curricular se va a implementar en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo de la ciudad de Riobamba, específicamente en el laboratorio de Procesos Industriales de la Facultad de Ciencias, carrera de Ingeniería Química.

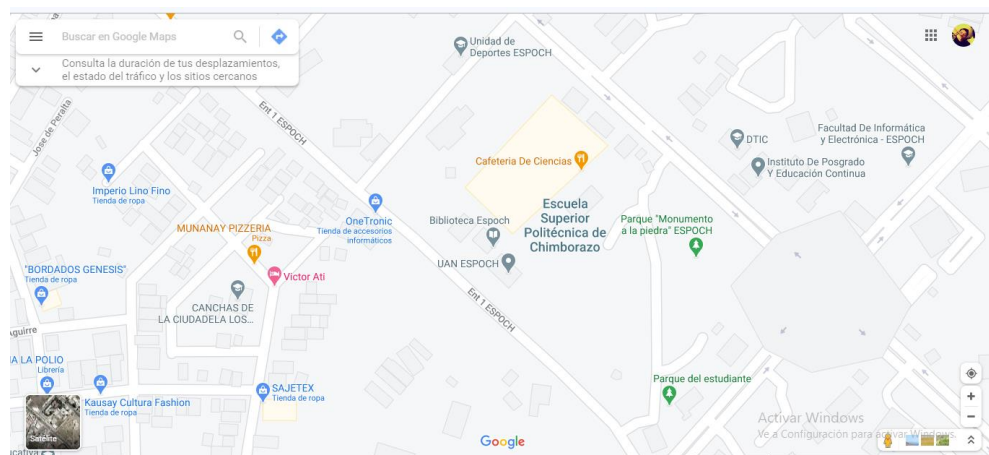


Figura 1-1. Localización de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Fuente: Chunata, M.; Silva, A.2021

1.6 Objetivos del proyecto

1.6.1 Objetivo general

Diseñar y construir un destilador Batch de mezcla binaria Etanol-Agua con control automático para usarlo como herramienta didáctica para Operaciones Unitarias.

1.6.2 Objetivos específicos

- Diseñar y modelar matemáticamente un destilador Batch que sirva para una mezcla binaria mediante la implementación del método McCabe-Thiele.
- Implementar un control automático para las variables de temperatura y nivel en la operación unitaria de destilación, mediante el uso de plataformas de uso libre.
- Validar el funcionamiento óptimo del destilador tipo Batch mediante la realización de prácticas experimentales
- Crear un manual de usuario que sirva como herramienta de guía para el manejo y control automático del equipo.

CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Destilación

Se conoce como destilación a la separación de los componentes de una solución por medio de la diferencia de temperatura, es decir, los más volátiles son los que se separan primero y se denominarán como destilado, los menos volátiles son los que quedarán en el fondo tomando el nombre de residuos. Según Brito (2001: pp.4-23), “Este proceso de separación alcanza sus objetivos mediante la creación de dos o más zonas que coexisten y que tienen diferencias de temperatura, presión, composición y fase”. Utiliza fases de vapor y de líquido, esencialmente a la misma temperatura y presión.

Cuando tenemos la diferencia entre los puntos de ebullición de los componentes de la mezcla es grande, se puede obtener una separación de buena calidad fácilmente por medio de una destilación en una sola etapa. Por otro lado, si los puntos de ebullición cambian ligeramente, es probable que se requieran más etapas para un mismo grado de separación (García Armario, 2017).

2.1.1 Estructura general de una columna de destilación

“Una columna de destilación es una unidad de separación que consta de varios componentes fundamentales, cada uno es utilizado con el objetivo de transferir energía en forma de calor (energía calorífica) o mejorar la transferencia de materia” (Pérez Sánchez, 2007). Usualmente posee los siguientes componentes:

- Un armazón o carcasa vertical en la que se produce la separación de los componentes del líquido.
- Platos/bandejas o rellenos que aumentan y promueven una mejor separación de componentes.
- Reboiler o calderín que provee la energía para llevar a cabo la evaporización necesaria para el proceso de destilación.
- Un condensador que se utiliza para enfriar y condensar el vapor saliente de la cabeza de la columna.

- Un tanque o acumulador de reflujo que maneja el vapor condensado de la parte superior de la columna con la finalidad de que el líquido (reflujo) pueda recircularse a la columna (Pérez Sánchez, 2007).

El esquema de una unidad de destilación típica de alimentación simple y dos flujos de productos se muestra a continuación:

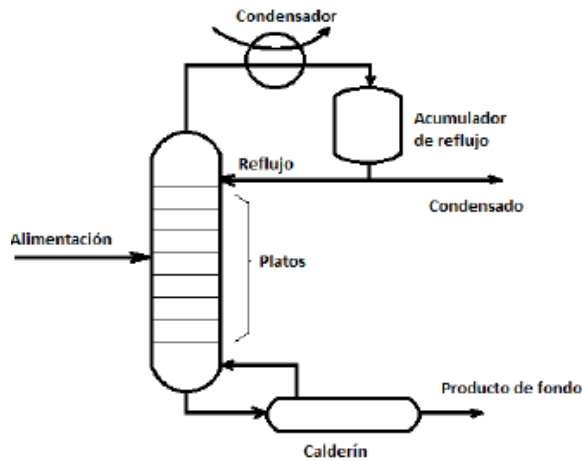


Figura 1-2. Esquema de la Columna de Destilación

Fuente: Pérez, J.2007

En esta columna la mezcla entra por la parte superior y viaja en forma descendente por acción de la gravedad, pasa a través de las etapas que contiene dicha columna hasta la etapa inferior. Por su parte el vapor sube pasando por los orificios de dichas etapas (platos), burbujeando en el líquido y formando una espuma que posteriormente se va a separar para pasar al plato superior.

2.1.2 Tipos de platos

Cuando hablamos de platos para una columna de destilación podemos decir que existen varios tipos de diseños de platos, de entre los cuales se resaltan como los más comunes a los platos de campana de borboteo, platos de válvula y platos perforados.

2.1.2.1 Los platos con campana de borboteo

Se puede lograr un mejor contacto gas-líquido con tapas de burbujas en la bandeja en muy bajas tasas de flujo de líquido. Un tapón de burbuja consiste en un elevador (también llamado chimenea) fijado a la bandeja a través de un orificio y una tapa está montada sobre el elevador.

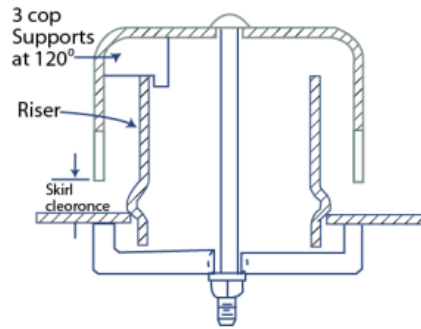


Figura 2-2. Esquema de una campana de borboteo.

Fuente: Treybal, R. 1981

2.1.2.2 Los platos de válvula (o placas de tapa flotante)

Son el diseño modificado de las bandejas de tamiz donde relativamente las grandes perforaciones de la placa están cubiertas por tapas / válvulas móviles (NPTEL, s.f.). El vapor que fluye levanta las tapas, creando, de ese modo, una zona para el paso del vapor. La tapa móvil hace que el vapor fluya horizontalmente hacia el líquido, aportando una mezcla mejor que en los platos perforados.

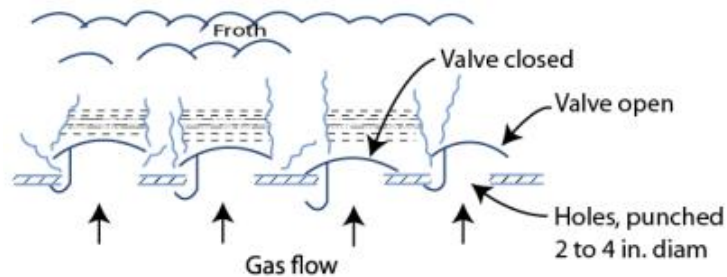


Figura 3-2. Esquema de un plato de válvulas

Fuente: Perry, R.; Green, D. 1997

2.1.2.3 Los platos perforados

Son simplemente platos de metal con agujeros en ellos. El vapor pasa hacia arriba y a través del líquido del plato. La disposición, número y tamaño de los agujeros son parámetros de diseño. Debido a su eficiencia, amplio rango de operación, facilidad de mantenimiento y factores de coste, los platos perforados y de válvula han reemplazado a los platos de campana de borboteo en muchas aplicaciones. (Perry y Green, 1997)

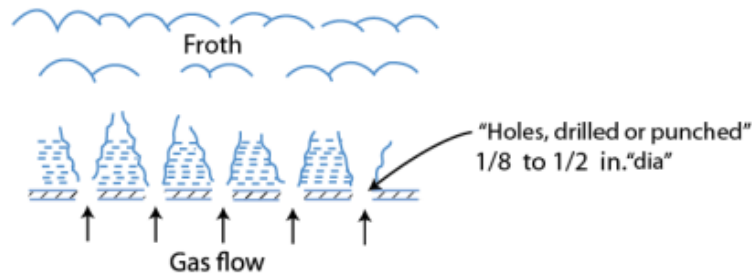


Figura 4-2. Representación de un plato perforado

Fuente: Perry, R.; Green, D.1997

2.1.3 Clasificación de las columnas de destilación

Existe varias clasificaciones para columnas de destilación, cada una de estas está diseñada para realizar separaciones determinadas, a continuación, se muestra la clasificación en función como operan:

2.1.3.1 Operación en continuo

Las columnas en modo continuo procesan un flujo continuo de alimentación. No hay interrupciones, a menos que se trate de algún fallo y se precise una parada. Son capaces de alcanzar grandes rendimientos y es el tipo más común de los dos (Mascarell Miguélez, 2017).

2.1.3.2 Operación batch

La destilación batch se entiende como un proceso que se utiliza para separar mezclas de volúmenes pequeños, recuperación de solventes y obtención de productos de carácter farmacéutico y biotecnológico (Narváez García et al., 2013). Generalmente solo un equipo de destilación batch puede realizar diferentes operaciones fácilmente, es muy fácil de modificar y favorece en la limpieza y reduce el inventario de materias primas (Turton et al., 2012).

La operación de una columna de destilación discontinua se puede describir en tres partes: el período de puesta en marcha, el período de producción, y el período de parada. Antes de la puesta en marcha, la alimentación se carga normalmente al rehervidor y luego se calienta (Górak y Sorensen, 2014).

2.1.4 Modos de operación de una destilación batch

En una operación de tipo discontinua permite obtener la misma cantidad de producto y la misma pureza en promedio, con la diferencia en el tiempo de operación. La destilación discontinua o por lotes utiliza dos modos de operación que se detalla a continuación (Smallwood, 2002):

- **Reflujo constante:** la relación de reflujo se ajusta a un valor predefinido, que se mantiene durante la duración del corte dado. La destilación se continúa hasta que el destilado medio ha alcanzado el valor deseado, y después se cambia el corte (Smallwood, 2002).
- **Reflujo variable:** cuando se desea mantener una composición de destilación constante, se debe aumentar constantemente el reflujo a lo largo del corte o de la operación. A medida que avanza el tiempo, el componente más volátil se está continuamente agotando. La relación de reflujo aumentara progresivamente (Smallwood, 2002).

2.1.5 Metodologías de diseño de una torre de destilación

2.1.5.1 McCabe Thiele

Es el método más sencillo para el cálculo de etapas teóricas de una torre de destilación, la resolución de éste está basada en encontrar la relación entre dos composiciones la primera es el vapor que se desprende de un plato y la otra es la del líquido presente en el plato siguiente. Por consecuencia, el número de veces que se aplique la relación de estas dos composiciones va a ser el número de etapas teóricas que se necesitará para separar la mezcla en residuo y destilado. (Urbina del Raso, 1990: p. 181)

2.1.5.2 Ponchon y Savarit

Al igual que el método de McCabe Thiele este también es un método gráfico, con la diferencia que es más riguroso, ya que para su cálculo implica balances de materia y de entalpía que pueden ser usados para cualquier mezcla binaria sin que tenga alguna restricción. Por ende, para el cálculo de este se necesita datos de equilibrio de las fases que intervienen en la mezcla. (Labarta, 2001: p. 38)

2.2 Teoría de control automático

2.2.1 Sistema de control

El control automático se ha considerado pieza fundamental en los procesos industriales de fabricación moderna, este resulta ser indispensable en las operaciones industriales logrando controlar así la presión, temperatura, viscosidad y flujo en algunos procesos. Tener un sistema de control resulta ser parte vital en las industrias y sus aplicaciones se pueden encontrar en todos lados. Cuando hablamos de un sistema de control podemos decir que este integra diversos procesos para cumplir un conjunto de especificaciones en la salida de los procesos. En la actualidad los sistemas de control nos ayudan a manejar grandes maquinas con precisión y exactitud al regular su posición y velocidad (Perez et al., 2008).

2.2.1.1 Sistema de control de lazo abierto

Cuando hablamos de sistemas de control existen dos diferentes tipos uno de ellos se denomina control de lazo abierto, en este tipo de sistemas el cual la salida no tiene efecto sobre la acción de control, la salida de la planta no se mide, es decir, es independiente de las entradas de control. Este tipo de controladores son empleados únicamente si la relación de la entrada con la salida es conocida y no existen perturbaciones tanto interna como externa, por esta razón es que este tipo de sistema es simple y económico (Lázaro Castillo, 2008).

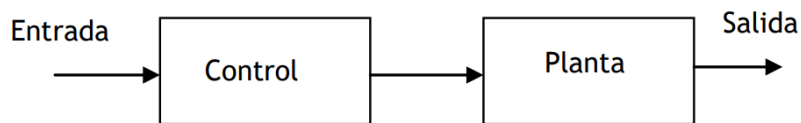


Figura 5-2. Esquema de un sistema de control de lazo abierto.

Fuente: Lázaro, I.2008

2.2.1.2 Sistema de control de lazo cerrado

En los sistemas de control de lazo cerrado la señal posee un efecto que actúa directamente sobre la acción del control, esto quiere decir que son sistemas realimentados por la razón de que la salida es comparada con una referencia y la señal de error que arroja alimenta al controlador el cual genera una señal que ayuda a reducir el error y obtener en la salida el valor deseado (Lázaro Castillo, 2008).

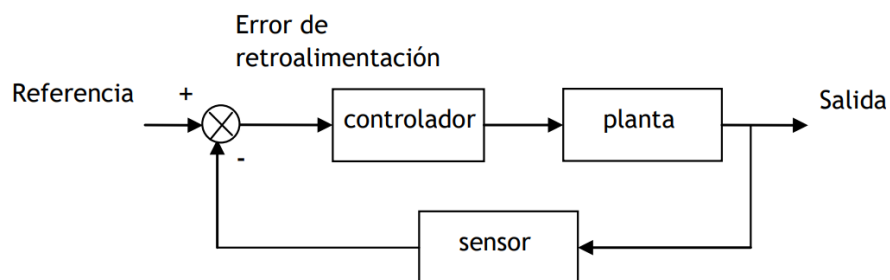


Figura 6-2. Esquema de un sistema de control de lazo cerrado.

Fuente: Lázaro, I.2008

2.2.2 Componentes básicos de un sistema de control

2.2.2.1 Sensor

El sensor en un sistema de control es el elemento encargado de medir el valor de la variable que se desea controlar en pequeños rangos establecidos de tiempo. Dentro del diagrama de control

se sitúa en la realimentación y permite captar la variable de salida. Los sensores constan de dos partes, el detector y un transductor o transmisor. (Angulo Bahón y Raya Giner, 2004: p.31)

2.2.2.2 Transmisor

El transmisor es el componente que permite la recolección de las señales emitidas por el sensor para luego modificarlas con la intención de compararlas con la señal consignada y configurada en el control. Mediante la comparación de señales, un transmisor emite una señal de error que será transmitida hacia el controlador.

2.2.2.3 Controlador

El controlador o también denominado regulador, es el elemento del sistema de control que compensa o corrige el proceso con la finalidad de conseguir la salida anhelada. Es diseñado para controlar el comportamiento global del proceso. (Angulo Bahón y Raya Giner, 2004: p.31)

De acuerdo al autor Ogata Katsuhiko (2003: p.63), a nivel industrial los controladores se clasifican en función de sus acciones de control, tal como sigue:

- De dos posiciones o controladores on-off
- Controladores proporcionales
- Controladores integrales
- Controladores proporcionales-integrales
- Controladores proporcionales-derivativos
- Controladores proporcionales-integrales-derivativos

2.2.2.4 Actuador

El actuador constituye el elemento final de control que se ocupa de intervenir directamente sobre el sistema de control y modificar la señal de salida. Frecuentemente suele tratarse de válvulas de control, bombas de velocidad variable, transportadores o motores eléctricos. (Smith y Corripio, 2012: p.19)

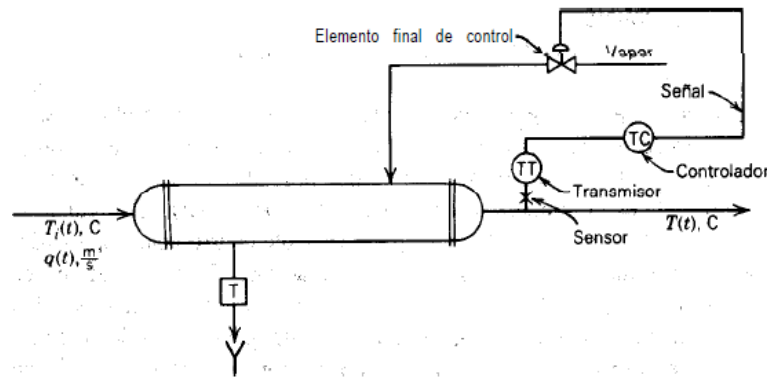


Figura 7-2. Componentes del sistema de control en un intercambiador de calor.

Fuente: Smith, C.; Corripio, A.2012

2.2.3 Modelamiento de un sistema

El modelamiento o caracterización matemática de un sistema consiste en la descripción de su comportamiento de la forma más exacta, simple y completa posible, con el propósito de analizarlo detalladamente y así desarrollar el diseño de controladores funcionales que se acoplen y condicionen a los requerimientos de diseño. (Reyes Sierra y Montaña Ortega, 2010)

El comportamiento de un sistema de interés puede ser representado en una o varias ecuaciones sin que se contradigan entre sí las unas a las otras. Por ello, es de gran utilidad encontrar un modelo matemático que brinde información de interés para cada problema en particular. Para la realización de un modelo físico se debe abordar dos aspectos importantes: encontrar las características dinámicas del sistema a partir de la teoría matemática, prácticas experimentales y la información disponible de la planta; para subsiguientemente llevar a cabo aproximaciones válidas que simplifiquen el resultado. (Reyes Sierra y Montaña Ortega, 2010)

2.2.4 Sistemas no lineales

La gran mayoría de sistemas de la naturaleza no presentan un comportamiento lineal en su proceder, por lo cual no presentan la idealidad y deben ser caracterizados mediante aproximaciones lineales.

Varios fenómenos naturales no se encuentran dentro del equilibrio y es en éstos donde se da la competencia entre la introducción y la disipación de cualquier cantidad física medible, tal como lo son la materia o la energía. Estos sistemas suelen ser descritos por una pila de ecuaciones cuyas variables no presentan una relación lineal. El tipo de ecuación ocupada dependerá de la naturaleza discreta (mapas) o continua (ecuaciones diferenciales) de los sistemas. (Laroze, 2016)

2.2.5 Linealización

La linealización es una herramienta metodológica que consiste en aproximar las ecuaciones no lineales que representan el comportamiento de un sistema, a ecuaciones lineales que puedan ser analizadas mediante transformadas de Laplace. La manipulación de las ecuaciones linealizadas resulta más sencilla y simplificada a través de la utilización de las variables de desviación o perturbación. (Smith y Corripio, 2012: pp. 65-66)

A pesar de que la linealización constituye una técnica eficiente para el diseño de un sistema de control, ésta posee ciertas limitaciones un tanto complejas. Al ser una aproximación en la cercanía de un punto de operación, la linealización solo puede predecir el comportamiento del sistema en esta sección mas no el comportamiento global de todo el sistema. De esta forma no puede asumirse una predicción general del sistema utilizando modelos completamente lineales. (Khalil, 2001)

2.2.6 Modelamiento matemático

El modelamiento matemático de los procesos controlados, es el paso más importante en el diseño y análisis de sistemas de control. Los sistemas pueden ser modelados no solo gráficamente sino también algebraicamente, así como la función de transferencia.

2.2.6.1 Función de Transferencia

Se considera un modelado algebraico ya que necesita métodos de resolución en los que intervienen operaciones matemáticas para tener como resultado final una ecuación diferencial lineal, la función de transferencia relaciona la entrada y la salida de un sistema de control, también es llamado como una descripción entrada-salida de un proceso. Este es aplicado cuando un sistema tiene condiciones iniciales nulas. La función de transferencia generalmente está definida únicamente para sistemas linealizados y procesos que no varían con el tiempo. La mayoría de los sistemas de transferencia son de tipo propio esto quiere decir que el orden que tiene el numerador debe ser menor o igual al orden del denominador. (ICAI, 2015)

2.2.7 Estrategias de control

2.2.7.1 Control PID

Los controladores de acción proporcional integradora derivativa, son utilizados principalmente en la industria. Su estructura es muy simple y esto hace que no se puedan controlar de una forma satisfactoria. (Mazzone, 2002: p. 2)

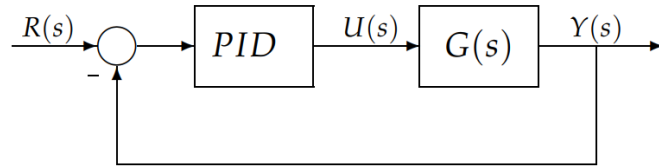


Figura 8-2. Diagrama de bloques

Fuente: Mazzone, V. 2002, p. 2

Este controlador es el más complejo de los controladores ya que incrementa una acción derivativa la cual logra anticipar a dónde va el proceso. Para la síntesis de un control PID se parte desde su algoritmo elemental, la respuesta del control resulta de la adición de sus tres términos el proporcional, el integral y la derivada del error. (Cova, 2005: pp. 4-5)

2.2.7.2 Control On-Off

También llamado como controlador de dos posiciones, se caracteriza por cambiar solo entre dos valores, encendido o apagado. Este control no tiene la capacidad de arrojar un valor exacto para una variable controlada. Este control tiene un algoritmo simple el cual revisa la variable para ver si está por encima o por debajo de un punto de operación.

A nivel operacional y de manera un tanto generalizada la acción de control On-Off genera tiempos de encendido muy cortos en el dispositivo final de control, lo cual produce más desgaste por los continuos ciclos de arranque y parada a los que es sometido. (Gelvéz-Arocha et al., 2012: pp. 73-82)

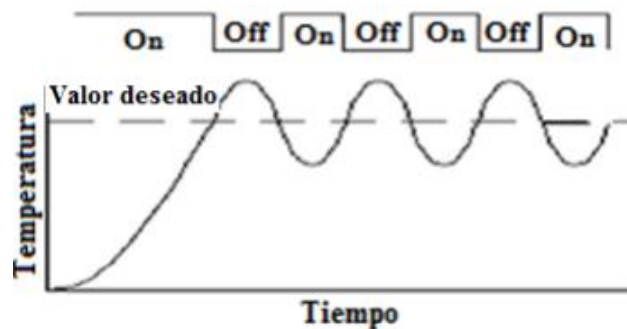


Figura 9-2. Acción de control On-Off sobre la variable temperatura para un proceso

Fuente: Bricio, E.2015

2.3 Artefactos de control para un sistema

2.3.1 *Arduino*

Arduino es una placa de control que conforma un software IDE (Entorno integrado de desarrollo) y una plataforma de hardware libre. Es utilizado para escribir código y manipular el hardware en la creación de proyectos en electrónica. Para la programación en Arduino es necesario descargar la plataforma de manera gratuita desde la página web de su autoría y para programar se utiliza un lenguaje de programación basado en C++. (Herger y Bodarky, 2015)

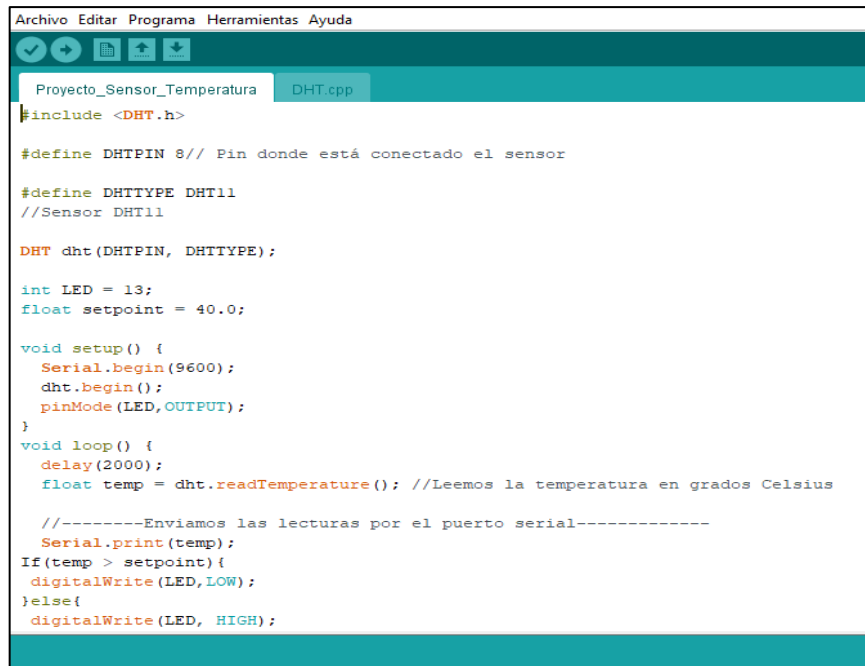
2.3.1.1 *Arduino Mega*

El Arduino Mega es una de las placas más completas y potentes de la familia Arduino, a nivel electrónico se basa en el microcontrolador Atmega 2560, la cual posee un requerimiento de voltaje operativo de 5V y una entrada de voltaje de entre 7 a 12V. La placa consta de 54 pines digitales de entrada y salida, además de 16 entradas análogas y un botón de reinicio. Para la comunicación entre la computadora, el microcontrolador tiene conexión USB y cuenta con un oscilador de 16MHz. Al igual que el resto de placas Arduino, esta placa se programa desde la plataforma de Arduino IDE y funciona con un voltaje límite externo de 6 a 20V. (Tapia Ayala y Manzano Yupa, 2013, pp. 45)

2.3.1.2 *Programación en Arduino*

La programación en arduino consiste en la traducción de tareas automatizadas a líneas de código, para ello se requiere de una aplicación sencilla que está disponible para móviles y PC. Proporciona un entorno sencillo para la programación con herramientas necesarias para transmitir la información a la placa Arduino mediante un USB. La estructura de un proyecto Arduino es simple ya que está compuesto de al menos dos partes que son obligatorias, las cuales son la declaratoria o instrucción, estas llevan como nombre “setup()” y “loop()”. (Tapia Ayala y Manzano Yupa, 2013, pp. 76)

El lenguaje utilizado en esta aplicación se denomina C++, cabe recalcar que tiene adaptaciones de otro sistema llamado avr-libc. Dentro de la estructura básica del lenguaje de programación, setup () es la parte donde se recoge la configuración y loop () es la sección en la cual el programa se ejecuta de manera cíclica. Adicionalmente existen comandos para poder escribir una breve descripción sobre el proyecto que se está realizando. (Tapia Ayala y Manzano Yupa, 2013: p. 76)



```
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
Proyecto_Sensor_Temperatura DHT.cpp
#include <DHT.h>

#define DHTPIN 8 // Pin donde está conectado el sensor

#define DHTTYPE DHT11
//Sensor DHT11

DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);

int LED = 13;
float setpoint = 40.0;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  dht.begin();
  pinMode(LED, OUTPUT);
}

void loop() {
  delay(2000);
  float temp = dht.readTemperature(); //Leemos la temperatura en grados Celsius

  //-----Enviamos las lecturas por el puerto serial-----
  Serial.print(temp);
  If(temp > setpoint){
    digitalWrite(LED, LOW);
  }else{
    digitalWrite(LED, HIGH);
  }
}
```

Figura 10-2. Estructura de Programación en Arduino

Fuente: Chunata, M.; Silva, A.2021

2.3.2 Termocuplas

Las termocuplas ayudan a la medición de las temperaturas de manera industrial, estas se basan en tres principios físicos que son:

- **Efecto Thomson:** Un gradiente de temperatura siempre va acompañado de un gradiente de voltaje el cual su magnitud y signo únicamente dependen del metal que se esté usando (Zujew, 2019).
- **Efecto Peltier:** Cuando una corriente eléctrica pasa a través de una unión de dos metales diferentes absorbe calor, en cambio, cuando la corriente eléctrica viaja en la misma dirección de la corriente Seebeck, el calor es absorbido en la unión caliente y arrojado en una unión fría (Zujew, 2019).
- **Efecto Seebeck:** Cuando se une dos alambres de distinto material formando un circuito, se presenta una corriente eléctrica en las uniones que se encuentren a diferentes temperaturas (Zujew, 2019).

2.3.3 Módulo Wifi (NodeMCU)

NodeMCU es una placa que tiene como fin hacer la vida más fácil a las personas que gustan de desarrollar dispositivos que estén conectados unos con otros. Esta placa de desarrollo es totalmente abierta en cuanto tiene que ver el software y hardware, de la misma manera que con

Arduino facilita la programación de un microcontrolador o MCU. La principal diferencia entre NodeMCU y Arduino está en la conexión wifi (Hernández, 2017).

2.3.4 Válvula Solenoide

Las válvulas solenoides son instrumentos que operan por electricidad y tienen como objetivo controlar el flujo de fluidos como líquidos o gases. Se tratan de dispositivos que trabajan acoplados a la estrategia de control On-Off debido a que solo funcionan en dos posiciones, completamente abiertas o completamente cerradas, y por tal limitación una válvula solenoide no puede ser utilizado para regular flujos. El principio de funcionamiento para el cierre de este tipo de válvula se basa en la gravedad, presión o acción de un resorte que permiten el traslado de un émbolo que opera eléctricamente. (Muñoz Llamuca y Torres Torres, 2017: p. 6)

2.3.5 Sensor de nivel

El sensor de nivel RLT-1000 fue desarrollado con el objetivo de medir niveles de líquidos, está elaborado con acero inoxidable con el fin de implementarlo en equipos de alimentos. Para la medición usa un imán que tiene incorporado el cual acciona con su campo magnético una cadena de medición que tiene integrada en el tubo guía. La resistencia medida tiene la proporción al nivel de llenado del tubo, adicionalmente puede suministrarse con una salida analógica de 4 a 20 mA. (WIKA S.A.U, 2019).

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1 Cálculos para el diseño de la columna de destilación batch

El diseño de una columna de destilación por lotes es similar al diseño de una columna de destilación continua en la que deben determinarse los siguientes parámetros principales (Richardson, 2002):

- Número de etapas o placas en la sección de columna (y por lo tanto la altura de la columna)
- Diámetro de la columna
- Tamaño del rehervidor (tamaño del lote y área de transferencia de calor)
- Tamaño del condensador (área de transferencia de calor)
- Tamaño del tambor de reflujo

3.1.1 Variables de diseño en la alimentación

Se establecen las composiciones volumétricas de diseño que se desea implementar en cada flujo y en función del componente más volátil (etanol) de la mezcla binaria. Para este caso particular se estipula una composición volumétrica del 90% en etanol debido a que mientras mayor sea el grado alcohólico de la mezcla, mejores propiedades tendrá para ser utilizada como materia prima para productos químicos o inclusive para la creación de combustibles.

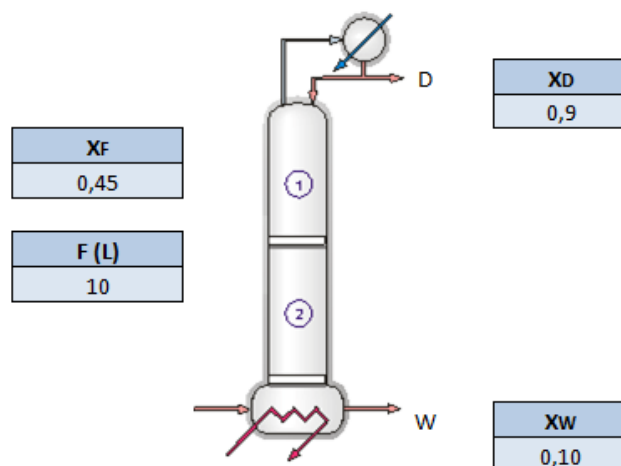


Figura 1-3. Esquema del destilador con las variables de diseño

Fuente: Chunata, M.; Silva, A.2021

3.1.2 Balance de materia

$$D + W = F \text{ (Ecuación 1-3)}$$

Dónde:

D = Destilado, (L)

W = Residuo, (L)

F = Alimentación, (L)

$$X_D D + X_W W = X_F F \text{ (Ecuación 2-3)}$$

Dónde:

X_D = Composición volumétrica de etanol en el destilado

X_W = Composición volumétrica de etanol en el residuo

X_F = Composición volumétrica de etanol en la alimentación

Resolviendo el sistema de ecuaciones y reemplazando los valores de diseño se obtendrá los volúmenes correspondientes al destilado (D) y al residuo (W).

3.1.3 Cálculo de los volúmenes de etanol

Para el cálculo de los volúmenes de etanol en cada corriente del destilador se multiplica el porcentaje volumétrico de cada composición con el volumen neto de la alimentación, el destilado y el residuo según corresponda:

$$F_{etanol} = F * \% V/V_{etanol} \text{ (Ecuación 3-3)}$$

$$D_{etanol} = D * \% V/V_{etanol} \text{ (Ecuación 4-3)}$$

$$W_{etanol} = W * \% V/V_{etanol} \text{ (Ecuación 5-3)}$$

3.1.4 Cálculo de los volúmenes de agua

Para el caso semejante de los volúmenes del agua en cada corriente se restan los volúmenes de etanol de los volúmenes netos anteriormente calculados:

$$F_{agua} = F - F_{etanol} \text{ (Ecuación 6-3)}$$

$$D_{agua} = D - D_{etanol} \text{ (Ecuación 7-3)}$$

$$W_{agua} = W - W_{etanol} \text{ (Ecuación 8-3)}$$

3.1.5 Cálculo de la masa de etanol en cada corriente

Para calcular la masa de etanol en cada corriente se transforma el volumen de etanol correspondiente mediante multiplicación con la densidad del etanol.

$$m_{etanol} = V_{etanol} * \rho_{etanol} \text{ (Ecuación 9-3)}$$

Dónde:

m_{etanol} = Masa de etanol en cada corriente según corresponda ($m_{F_{etanol}}$, $m_{D_{etanol}}$, $m_{W_{etanol}}$), (kg)

V_{etanol} = Volumen de etanol en cada corriente según corresponda (F_{etanol} , D_{etanol} , W_{etanol}), (L)

ρ_{etanol} = Densidad del etanol, (kg/L)

3.1.6 Cálculo de la masa de agua en cada corriente

Para el cálculo de la masa de agua en cada corriente de igual forma se realiza la misma relación de multiplicación con la densidad del agua.

$$m_{agua} = V_{agua} * \rho_{agua} \text{ (Ecuación 10-3)}$$

Dónde:

m_{agua} = Masa de agua en cada corriente según corresponda ($m_{F_{agua}}$, $m_{D_{agua}}$, $m_{W_{agua}}$), (kg)

V_{agua} = Volumen de agua en cada corriente según corresponda (F_{agua} , D_{agua} , W_{agua}), (L)

ρ_{agua} = Densidad del agua, (kg/L)

3.1.7 Cálculo de la masa total en cada corriente

La masa total de cada corriente en el destilador se establece mediante la suma del número de kilogramos de cada componente.

$$m_T = m_{etanol} + m_{agua} \text{ (Ecuación 11-3)}$$

Dónde:

m_T = Masa total en cada corriente según corresponda (m_F , m_D , m_W)

Alimentación:

$$m_F = m_{F_{etanol}} + m_{F_{agua}}$$

Destilado:

$$m_D = m_{D_{etanol}} + m_{D_{agua}}$$

Residuo:

$$m_W = m_{W_{etanol}} + m_{W_{agua}}$$

3.1.8 Cálculo del número de moles de etanol en cada corriente

El número de moles de etanol en cada corriente se determina mediante la división de su masa sobre la masa molecular del etanol.

$$n_{etanol} = \frac{m_{etanol}}{M_{etanol}} \text{ (Ecuación 12-3)}$$

Dónde:

n_{etanol} = Número de moles de etanol en cada corriente según corresponda (n_{agua} , $n_{D_{agua}}$, n_{agua}), (mol)

M_{etanol} = Masa molecular del etanol, (kg/mol)

3.1.9 Cálculo del número de moles de agua en cada corriente

El número de moles de agua en cada corriente se determina igualmente mediante la división de su masa sobre la masa molecular del agua.

$$n_{agua} = \frac{m_{agua}}{M_{agua}} \text{ (Ecuación 13-3)}$$

Dónde:

n_{etanol} = Número de moles de etanol en cada corriente según corresponda (n_{agua} , $n_{D_{agua}}$, n_{agua}), (mol)

M_{agua} = Masa molecular del agua, (kg/mol)

3.1.10 Cálculo de las fracciones molares

Para expresar en fracción molar cada corriente del destilador se divide el número de moles de cada componente (en este caso, etanol y agua) sobre el número de moles totales perteneciente a la respectiva corriente.

$$X_{etanol} = \frac{n_{etanol}}{n_{etanol} + n_{agua}} \text{ (Ecuación 14-3)}$$

$$X_{agua} = 1 - X_{etanol} \text{ (Ecuación 15-3)}$$

Dónde:

X_{etanol} = Composición molar de etanol en cada corriente según corresponda ($X_{F(etanol)}$, $X_{D(etanol)}$, $X_{W(etanol)}$)

X_{agua} = Composición molar de agua en cada corriente según corresponda ($X_{F(agua)}$, $X_{D(agua)}$, $X_{W(agua)}$)

Alimentación:

$$X_{F(etanol)} = \frac{n_{Fetanol}}{n_{Fetanol} + n_{Fagua}}$$

$$X_{F(agua)} = 1 - X_{F(etanol)}$$

Destilado:

$$X_{D(etanol)} = \frac{n_{Detanol}}{n_{Detanol} + n_{Dagua}}$$

$$X_{D(agua)} = 1 - X_{D(etanol)}$$

Residuo:

$$X_{W(etanol)} = \frac{n_{Wetanol}}{n_{Wetanol} + n_{Wagua}}$$

$$X_{W(agua)} = 1 - X_{W(etanol)}$$

3.1.11 Cálculo del número de moles totales en cada corriente

Las moles totales de cada corriente en el destilador se determinan mediante la suma del número de moles de cada componente.

$$n_T = n_{etanol} + n_{agua} \text{ (Ecuación 16-3)}$$

Dónde:

n_T = Número de moles totales en cada corriente según corresponda (n_F , n_D , n_W)

Alimentación:

$$n_F = n_{Fetanol} + n_{Fagua}$$

Destilado:

$$n_D = n_{D_{etanol}} + n_{D_{agua}}$$

Residuo:

$$n_W = n_{W_{etanol}} + n_{W_{agua}}$$

3.2 Balance de energía y modelado matemático del sistema térmico

El balance de energía del sistema térmico accionado por la resistencia calefactora se representa con la expresión:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = Q_{in} - Q_{out} \text{ (Ecuación 17-3)}$$

Dónde:

$\frac{\Delta Q}{\Delta t}$ = Variación de calor en función del tiempo

Q_{in} = Calor de entrada del sistema

Q_{out} = Calor de salida del sistema

El calor de entrada está dado por:

$$Q_{in} = \alpha Q_i \text{ (Ecuación 18-3)}$$

Dónde:

α = Factor que relaciona la salida del calentador con la potencia disipada

Q_i = Potencia de salida del calentador

El calor de salida está definido por los tres modos de transferencia (conducción, convección y radiación) y, para este caso en particular, se puede despreciar la transmisión de calor por radiación, obteniéndose así la ecuación:

$$Q_{out} = UA(T - T_{\infty}) \text{ (Ecuación 19-3)}$$

Dónde:

U = Coeficiente global de transferencia de calor

A = Área de transferencia

T = Temperatura de la resistencia

T_{∞} = Temperatura del ambiente

Reemplazando los respectivos datos en la ecuación del balance de energía tenemos:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \alpha Q_i + U A(T_{\infty} - T) \text{ (Ecuación 20-3)}$$

Aplicando el concepto de derivada

$$\frac{dQ}{dt} = \alpha Q_i + U A(T_{\infty} - T) \text{ (Ecuación 21-3)}$$

Adicional a ello se puede calcular el calor absorbido mediante el uso del calor específico, tal como se observa:

$$Q = mc_p(T - T_{ref}) \text{ (Ecuación 22-3)}$$

Con el reemplazo de la ecuación en el balance general obtenemos:

$$mc_p \frac{dT}{dt} - mc_p \frac{dT_{ref}}{dt} = \alpha Q_i + U A(T_{\infty} - T)$$

Donde la temperatura de referencia se la considera una constante y se anula su término derivativo:

$$mc_p \frac{dT}{dt} = \alpha Q_i + U A(T_{\infty} - T) \text{ (Ecuación 23-3)}$$

De los términos presentes en la Ecuación 23-3 se calcula la masa, el área de transferencia y la capacidad calorífica a partir de las características que posee la mezcla etanol-agua y el recipiente que lo contiene.

Para una mayor aproximación a los datos reales del modelo, el cálculo de la densidad y la conductividad térmica de la mezcla etanol-agua se lo realiza con la aplicación de los modelos propuestos por los autores (Pérez Ones et al., 2010a: pp. 62-74) y, del mismo modo, para el cálculo de la capacidad calorífica se utiliza el modelo presentado por los mismos autores (Pérez Ones et al., 2010b: pp. 47-61) en función de la composición molar y la temperatura de la mezcla.

3.2.1 *Calculo de la masa de la mezcla etanol-agua*

$$m_{mezcla} = \rho_{mezcla} * V_{mezcla} \text{ (Ecuación 24-3)}$$

Dónde:

ρ_{mezcla} = Densidad de la mezcla etanol-agua a la entrada del equipo

V_{mezcla} = Volumen de la mezcla etanol-agua a la entrada del equipo

3.2.1.1 Cálculo de la densidad de la mezcla

Para valores de temperatura entre 0 y 80°C, la densidad se determina de la siguiente forma:

$$\rho_{mezcla} = 1003,98 - 0,3524T - 96,7916x^2 - 100,061x - 1,3996Tx + 0,8585x^2T$$

(Ecuación 25-3)

Dónde:

T = Temperatura de la mezcla

x = Composición molar del etanol en la mezcla

3.2.2 Cálculo de la capacidad calorífica de la mezcla etanol-agua

Para valores de temperatura entre 0 y 150°C, la capacidad calorífica se determina de la siguiente forma:

$$Cp_{mezcla} = 5,16765 - 0,0026108T - 3,80691x - 0,00469903x^3T + 35,1179 * 10^{-6}T^2x$$

(Ecuación 26-3)

3.2.3 Cálculo del área de transferencia de calor en el sistema

La determinación del área de transferencia se asemeja al cálculo del área de un cilindro tomando en consideración el volumen de la mezcla de alimentación y el radio del tanque de calentamiento.

$$A = 2\pi rh + 2\pi r^2$$

(Ecuación 27-3)

Dónde:

r = Radio del tanque cilíndrico

h = Altura de la figura cilíndrica formada por la mezcla

3.2.3.1 Cálculo de la altura de la mezcla

La altura de la figura cilíndrica formada por la mezcla se calcula despejándola de la fórmula del volumen de un cilindro

$$h = \frac{V_{mezcla}}{\pi r^2}$$

(Ecuación 28-3)

3.2.4 Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor en el sistema

$$U = \frac{1}{\frac{L}{k_1} + \frac{L}{k_2} + \frac{1}{h_{conv}}} \text{ (Ecuación 29-3)}$$

Dónde:

L = Longitud o espesor del material o fluido por el cual ocurre la transferencia de calor

k = Conductividad térmica del material o fluido

h_{conv} = Coeficiente de convección del fluido

3.2.4.1 Cálculo de la conductividad térmica de la mezcla

Para valores de temperatura entre 0 y 40°C, la conductividad térmica se determina de la siguiente forma:

$$k_{mezcla} = 0,5524 + 0,0025T - 0,5531x - 0,0018Tx + 0,1822x^2 \text{ (Ecuación 30-3)}$$

3.2.5 Linealización

Para linealizar el modelo del sistema térmico se parte definiendo la Ecuación 23-3 como una función:

$$f(T, Q_i) = \frac{dT}{dt} = \frac{\alpha}{mc_p} Q_i + \frac{UA}{mc_p} (T_{\infty} - T) \text{ (Ecuación 31-3)}$$

3.2.5.1 Punto de Equilibrio

Considerando un sistema en estado estacionario se puede asumir que no existe variación de calor y por ende, su derivada es nula:

$$0 = \alpha Q_{is} + U A (T_{\infty s} - T_s)$$

$$(UA)T_s = \alpha Q_{is} + UAT_{\infty s}$$

$$T_s = \frac{\alpha Q_{is} + UAT_{\infty s}}{UA} \text{ (Ecuación 32-3)}$$

Una vez reordenado los términos se procede a encontrar el valor de la temperatura en el cual el sistema alcanzaría el estado estacionario.

3.2.5.2 Series de Taylor

La expresión por series de Taylor alrededor de los puntos $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ está dada por:

$$\begin{aligned}
f[x(t), y(t), z(t)] &= f(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) + \frac{\partial f}{\partial x}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})[x(t) - \bar{x}] + \frac{\partial f}{\partial y}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})[y(t) - \bar{y}] \\
&+ \frac{\partial f}{\partial z}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})[z(t) - \bar{z}] + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})[x(t) - \bar{x}]^2 \\
&+ \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})[y(t) - \bar{y}]^2 + \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})[x(t) - \bar{x}][y(t) - \bar{y}] + \dots
\end{aligned}$$

La aproximación lineal consiste en eliminar los términos de segundo orden o superior, para obtener:

$$\begin{aligned}
f[x(t), y(t), z(t)] &= f(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) + \frac{\partial f}{\partial x}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})[x(t) - \bar{x}] + \frac{\partial f}{\partial y}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})[y(t) - \bar{y}] \\
&+ \frac{\partial f}{\partial z}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})[z(t) - \bar{z}]
\end{aligned}$$

Por tanto la serie de Taylor aplicada a la función modelada del sistema térmico se desarrolla de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
\frac{dT}{dt} &= \left. \frac{\partial f}{\partial T} \right|_{T_s, Q_{is}} (T - T_s) + \left. \frac{\partial f}{\partial Q_i} \right|_{T_s, Q_{is}} (Q_i - Q_{is}) + f(T_s, Q_{is}) \\
\frac{dT}{dt} &= \left(-\frac{UA}{mc_p} \right) \Delta T + \left(\frac{\alpha}{mc_p} \right) \Delta Q + \left. \frac{dT}{dt} \right|_{T_s, Q_{is}} \\
\frac{d\Delta T}{dt} &= \left(-\frac{UA}{mc_p} \right) \Delta T + \left(\frac{\alpha}{mc_p} \right) \Delta Q \quad (\text{Ecuación 33-3})
\end{aligned}$$

3.2.5.3 Función de transferencia

La función de transferencia se obtiene a partir de implementar la transformada de Laplace al modelo lineal alcanzado.

$$\Delta T(s)s + \left(\frac{UA}{mc_p} \right) \Delta T(s) = \left(\frac{\alpha}{mc_p} \right) \Delta Q(s) \quad (\text{Ecuación 34-3})$$

Donde reordenando los términos correspondiente se obtiene la función de transferencia del sistema:

$$\frac{\Delta T(s)}{\Delta Q(s)} = \frac{\frac{\alpha}{mc_p}}{s + \frac{UA}{mc_p}} \quad (\text{Ecuación 35-3})$$

3.3 Aplicación del método McCabe-Thiele

Este método, aunque menos riguroso que el de Ponchon y Savarit, es muy útil, puesto que no requiere datos detallados de entalpía. Si estos datos se tienen que aproximar a partir de información fragmentaria, se pierde mucha de la exactitud del método de Ponchon-Savarit, en cualquier caso. Excepto cuando las pérdidas de calor o los calores de solución son extraordinariamente grandes, el método de McCabe-Thiele se adecua a la mayoría de los fines (Treybal 1981). La importancia del trabajo de Mc. Cabe y Thiele fue el haber desarrollado un método gráfico sencillo para el cálculo de columnas de rectificación de mezclas binarias que permite visualizar su comportamiento y estudiar fácilmente la influencia de los cambios en las condiciones de operación (Valiente Barderas, 2010).

3.3.1 Determinación del número de etapas teóricas

En el presente trabajo se presenta una alternativa de realizar los cálculos por el método propuesto de McCabe-Thiele utilizando una Hoja de Cálculo de Excel. La propuesta consiste en encontrar una solución numérica y gráfica del método de McCabe-Thiele para determinar el número de platos teóricos, la composición de cada plato teórico, el reflujo total y el reflujo mínimo.

El método propuesto es sencillo de utilizar y los datos obtenidos pueden ser usados como un estimado preliminar del diámetro, altura de la columna, el número de etapas, el consumo de energía, las dimensiones del hervidor y el condensador a utilizarse para la separación.

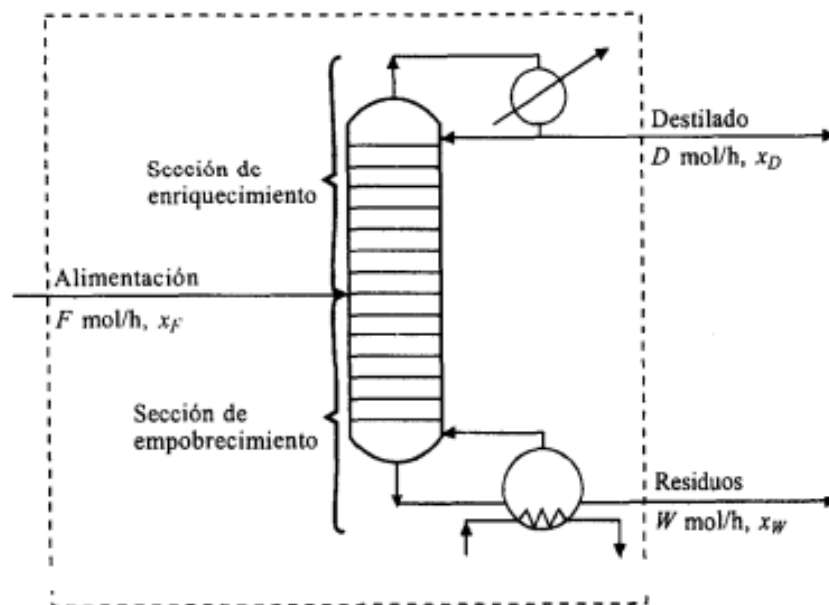


Figura 2-3. Esquema de una torre de destilación

Fuente: Geankoplis, C.1998

Balance Global

$$F = D + W$$

Balance para el Componente más Volátil

$$F x_F = D x_D + W x_W$$

Relación de reflujo:

Una parte del líquido que se condensa regresa a la columna como reflujo líquido (L_0) y el líquido restante se convierte en el producto destilado (D) (Hines y Maddox, 1984).

$$R = \frac{L_n}{D} \text{ (Ecuación 36-3)}$$

3.3.2 Ecuaciones para la sección de enriquecimiento

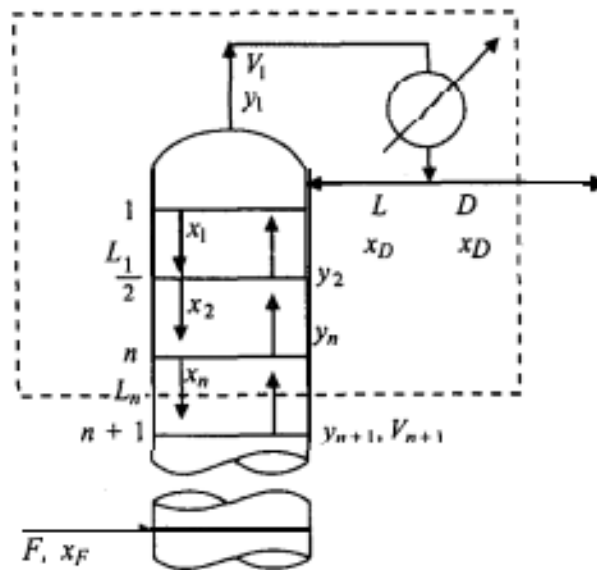


Figura 3-3. Estructura de la torre de destilación para la sección de enriquecimiento

Fuente: Geankoplis, C.1998

Generando un balance total de masa en la zona de sección de enriquecimiento o rectificación se tiene:

$$V_{n+1} = L_n + D \text{ (Ecuación 37-3)}$$

Dónde:

V_{n+1} = Número de moles de vapor del plato n+1

L_n = Número de moles del reflujo líquido del plato n

D = Número de moles de destilado

Al realizar un balance de materia en relación al componente más volátil:

$$V_{n+1} * y_{n+1} = L_n x_n + D x_D \text{ (Ecuación 38-3)}$$

Dónde:

y_{n+1} = Composición molar del vapor del plato n+1

x_n = Composición molar del reflujo líquido del plato n

x_D = Composición molar del destilado

Al despejar y_{n+1} de la ecuación, se obtiene la ecuación final de la recta de operación de rectificación.

$$y_{n+1} = \frac{L_n}{V_{n+1}} x_n + \frac{D x_D}{V_{n+1}} \text{ (Ecuación 39-3)}$$

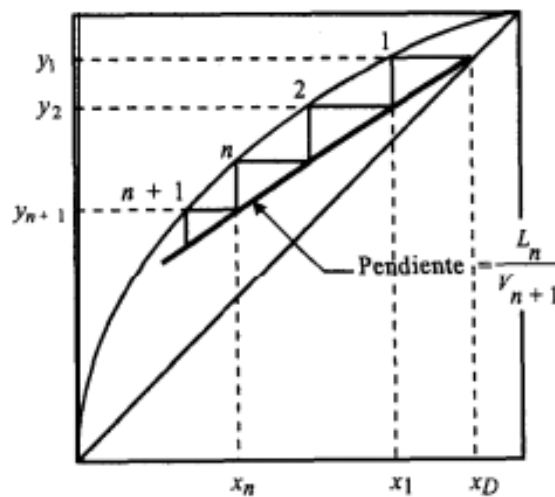


Figura 4-3. Línea de operación y de equilibrio para la sección de enriquecimiento

Fuente: Geankoplis, C.1998

Otra forma de expresar la ecuación de la línea de operación de rectificación en función de la relación de reflujo ($R = \frac{L_n}{D}$), es a través de sustitución de variables.

$$y_{n+1} = \frac{L_n}{L_n + D} x_n + \frac{D x_D}{L_n + D}$$

$$y_{n+1} = \frac{\frac{L_n}{D}}{\frac{L_n + D}{D}} x_n + \frac{\frac{D}{D} x_D}{\frac{L_n + D}{D}}$$

$$y_{n+1} = \frac{\frac{L_n}{D}}{\frac{L_n}{D} + 1} x_n + \frac{x_D}{\frac{L_n}{D} + 1}$$

Resultando en la ecuación:

$$y_{n+1} = \frac{R}{R+1} x_n + \frac{x_D}{R+1} \text{ (Ecuación 40-3)}$$

Dónde:

R = Relación de reflujo constante que es fijada,

3.3.3 Ecuaciones para la sección de empobrecimiento

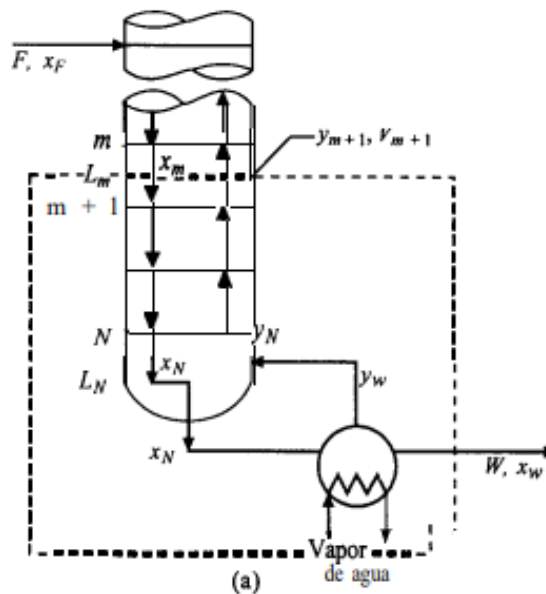


Figura 5-3. Estructura de la torre de destilación para la sección de empobrecimiento

Fuente: Geankoplis, C.1998

Efectuando un balance total de masa en la zona de sección de empobrecimiento se tiene:

$$V_{m+1} = L_m - W \text{ (Ecuación 41-3)}$$

Dónde:

V_{m+1} = Número de moles de vapor del plato $m+1$

L_m = Número de moles del reflujo líquido del plato m

W = Número de moles del residuo

Al realizar un balance de materia en relación al componente más volátil:

$$V_{m+1} * y_{m+1} = L_m x_m - W x_w \text{ (Ecuación 42-3)}$$

Dónde:

y_{m+1} = Composición molar del vapor del plato m+1

x_m = Composición molar del reflujo líquido del plato m

x_w = Composición molar del residuo

Al despejar y_{m+1} de la ecuación, se obtiene la ecuación final de la recta de operación de empobrecimiento.

$$y_{m+1} = \frac{L_m}{V_{m+1}} x_m - \frac{W x_w}{V_{m+1}} \text{ (Ecuación 43-3)}$$

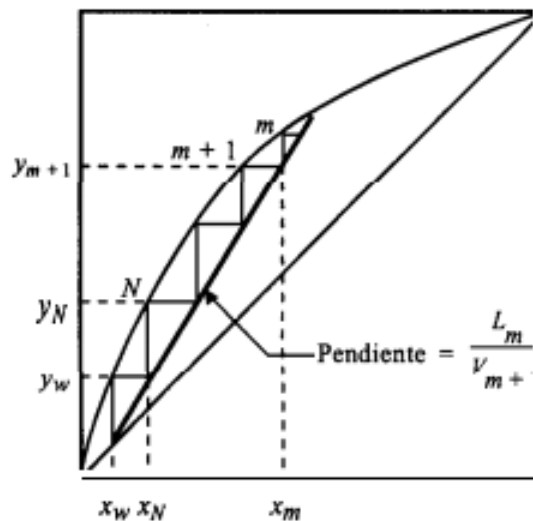


Figura 6-3. Línea de operación y de equilibrio para la sección de empobrecimiento

Fuente: Geankoplis, C.1998

3.3.4 Línea de las condiciones de alimentación

Por conveniencia de cálculo las condiciones de alimentación se expresan en una variable q , la cual se determina a través de la siguiente expresión

$$q = \frac{H_V - H_F}{H_V - H_L} \text{ (Ecuación 44-3)}$$

Dónde:

H_V = Entalpía de la alimentación al punto de rocío,

H_L = Entalpía de la alimentación al punto de ebullición (punto de burbuja), y

H_F = Entalpía de la alimentación en las condiciones de entrada.

El valor de q depende de las condiciones de entrada de la alimentación, así:

- Si entra como vapor saturado (vapor en su punto de rocío), $q = 0$;
- Si entra como líquido en su punto de ebullición $q = 1$;
- Si la alimentación es líquida en frío, $q > 1$; y
- Cuando la alimentación es en parte líquida y en parte vapor, $0 < q < 1$.

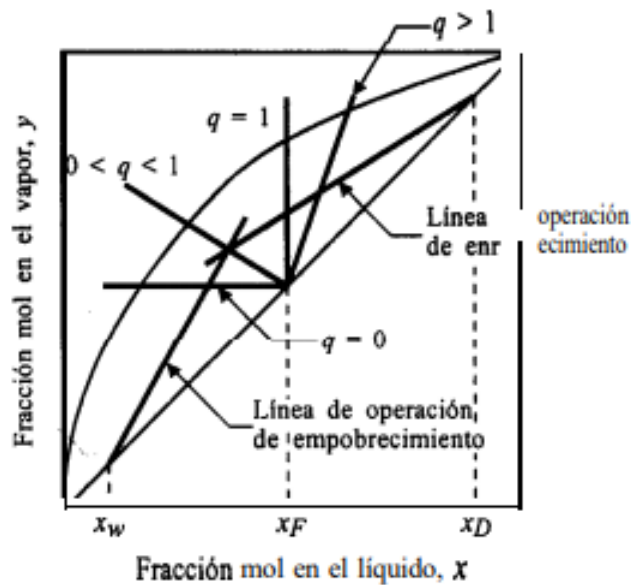


Figura 7-3. Orientación de la línea q para las diferentes condiciones de alimentación

Fuente: Geankoplis, C.1998

En función de la definición de q , y de la relación mostrada en la Figura 8-3 entre los flujos por arriba y por abajo de la entrada de alimentación, se pueden establecer algunas otras ecuaciones:

$$L_m = L_n + qF \text{ (Ecuación 45-3)}$$

$$V_n = V_m + (1 - q)F \text{ (Ecuación 46-3)}$$

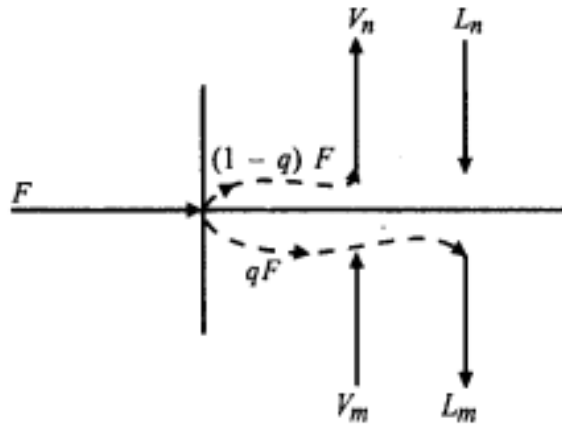


Figura 8-3. Relación entre los flujos por encima y por debajo de la entrada de alimentación

Fuente: Geankoplis, C.1998

Reescribiendo la Ecuación 38-3 y la Ecuación 42-3 sin los subíndices de los platos se obtienen las ecuaciones:

$$V_n y = L_n x + D x_D \text{ (Ecuación 47-3)}$$

$$V_m y = L_m x - W x_W \text{ (Ecuación 48-3)}$$

Y restando ambas ecuaciones, se obtiene:

$$(V_m - V_n)y = (L_m - L_n)x - (D x_D + W x_W) \text{ (Ecuación 49-3)}$$

Al sustituir la Ecuación 2-3, la Ecuación 45-3 y la Ecuación 46-3 en la Ecuación 49-3 se reordena y obtiene la siguiente expresión:

$$y = \frac{q}{q-1} x - \frac{x_F}{q-1} \text{ (Ecuación 50-3)}$$

Dónde:

x_F = Composición molar del componente más volátil en la alimentación.

3.3.5 Cálculo del valor de q de la alimentación

De la Ecuación 44-3,

$$q = \frac{H_V - H_F}{H_V - H_L}$$

El valor del denominador de la Ecuación 44-3 corresponde al calor latente,

$$H_V - H_L = \bar{\lambda} \text{ (Ecuación 51-3)}$$

Dónde:

$\bar{\lambda}$ = Calor latente de la mezcla

El valor del numerador de la Ecuación 44-3 es,

$$H_V - H_F = (H_V - H_L) + (H_L - H_F) \text{ (Ecuación 52-3)}$$

Adicional a ello

$$H_L - H_F = \overline{C_{pL}}(T_B - T_F) \text{ (Ecuación 53-3)}$$

Dónde:

$\overline{C_{pL}}$ = Capacidad calorífica de la mezcla líquida de la alimentación

T_B = Temperatura de ebullición de la alimentación

T_F = Temperatura de entrada de la alimentación

Reemplazando la Ecuación 51-3, Ecuación 52-3 y Ecuación 53-3, resulta en la expresión:

$$q = \frac{(H_V - H_L) + \overline{C_{pL}}(T_B - T_F)}{H_V - H_L}$$

$$q = 1 + \frac{\overline{C_{pL}}(T_B - T_F)}{\bar{\lambda}} \text{ (Ecuación 54-3)}$$

Para el cálculo singular del calor latente promedio de una mezcla se procede aplicando la ecuación:

$$\bar{\lambda} = \sum x_i \lambda_i \text{ (Ecuación 55-3)}$$

Dónde:

λ_i = Calor latente de cada componente en la mezcla, (kJ/kg)

3.3.6 Diagramas de equilibrio con el método de McCabe-Thiele

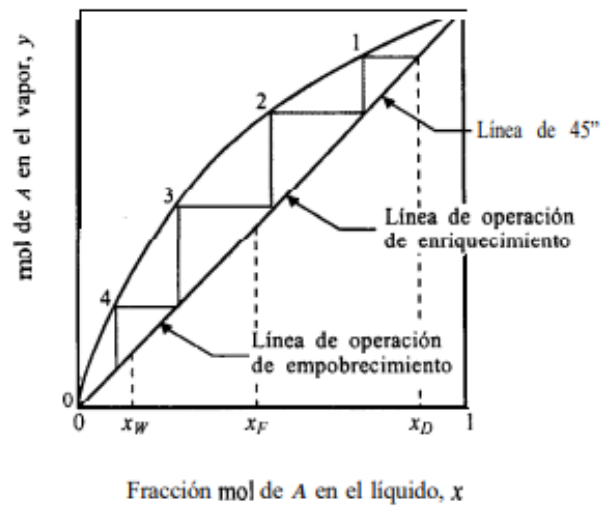


Figura 9-3. Reflujo total y número mínimo de platos con el método de McCabe-Thiele.

Fuente: Geankoplis, C.1998

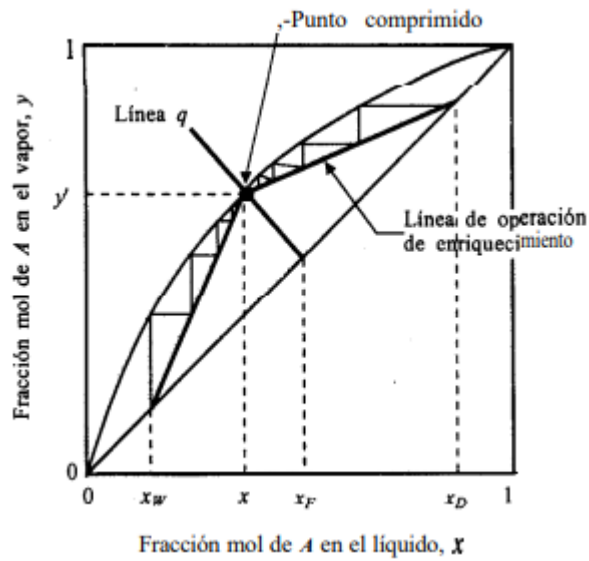


Figura 10-3. Reflujo mínimo y número infinito de platos con el método de McCabe-Thiele.

Fuente: Geankoplis, C.1998

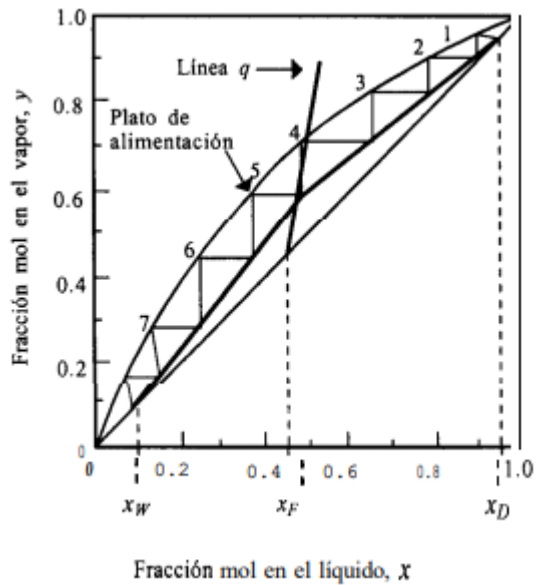


Figura 11-3. Diagrama de McCabe-Thiele convencional

Fuente: Geankoplis, C.1998

3.4 Construcción del equipo de destilación

Los materiales y elementos de control que son necesarios para la construcción del equipo propuesto, son los que se especifica a continuación:

Materiales

- Plancha de acero inoxidable de 2 mm de espesor.
- 2 Tubos de ½ pulgada redondos en acero inoxidable.
- Tubo de 1 pulgada redondo en acero inoxidable.
- 4 Niples de ¾" x 3" en acero inoxidable.
- Niple de 1" x 3" en acero inoxidable.
- Unión de 1" en acero inoxidable.
- Válvula de ½" en acero inoxidable.
- Válvula de ¾" en acero inoxidable.
- Válvula de 1" en acero inoxidable.
- 6 Ferrulas de 1" en acero inoxidable.
- Abrazaderas tipo clamp en acero inoxidable.

- 6 Ferrulas de 8” en acero inoxidable.
- 3 Clanes abrazaderas de 8” en acero inoxidable.

Elementos para el control automático del equipo

- Válvula Solenoide normalmente Cerrada 110V
- Sensor de Nivel de Acero Inoxidable Grado Alimenticio 5 A
- Contactores 3 Polos 110V. 12 A
- Kit Termocupla Tipo k, Tornillo 2 m. Cable + MAX6675 Tarjet
- Kit Cables Arduino Macho Hembra
- Kit Arduino Mega Pantalla Táctil 2,2 ”
- Módulo Node MCU LUA WIFI
- Módulo Rele 5V con Optacopladores
- Fuente de Energía Arduino
- Bornera Cable 18 AWG
- Puente Bornera 18 AWG
- Cable 18 AWG
- Rieldin Aluminio
- Canaleta Tablero
- Selector Doble Acción
- Luz Piloto Verde 110V
- Breaker Principal 2 Polos
- Gabinete Eléctrico 60X 40

3.5 Prácticas Experimentales

Una vez terminada la fase de construcción del equipo se realizan una serie de pruebas experimentales con el fin de verificar el correcto funcionamiento del sistema eléctrico y el control automático. De la misma manera se comprueba que no existiesen fugas a lo largo de la columna o pérdidas significativas de calor que interfiriesen con la eficiencia del equipo.

Para el caso particular de este proyecto se ha planteado la elaboración de tres pruebas en función de tres grados diferentes de apertura de la válvula de recirculación. Estas prácticas, además de su utilidad como comprobantes de un óptimo funcionamiento del equipo, se llevan a cabo con la finalidad de aprovechar y observar el efecto del reflujo sobre el rendimiento y la eficiencia obtenida en cuanto al grado alcohólico en el destilado.

Luego de culminar cada una de las pruebas experimentales se anotan los valores obtenidos de los volúmenes y grados alcohólicos de las corrientes de destilado y residuo para el respectivo cálculo del porcentaje de recuperación de etanol, el rendimiento volumétrico y la eficiencia con referencia a los grados °GL.

Para la determinación del grado alcohólico de la mezcla binaria, se extrae 100 ml del líquido destilado en una probeta, se coloca un instrumento para la medición, en este caso el alcoholímetro, el cual es una herramienta graduada que toma valores del 1 al 100.

3.5.1 Cálculo del porcentaje de recuperación de etanol

$$\% \text{ Recuperación} = \frac{\text{volumen de etanol destilado}}{\text{volumen de etanol alimentado}} * 100\%$$

$$\% \text{ Recuperación} = \frac{^{\circ}GL_D * \rho_{\text{etanol}} * D}{^{\circ}GL_F * \rho_{\text{etanol}} * F} * 100\%$$

Dónde:

$^{\circ}GL_D$ = Grado alcohólico del destilado

ρ_{etanol} = Densidad del etanol

D = Volumen de destilado (L)

$^{\circ}GL_F$ = Grado alcohólico de la alimentación

F = Volumen de la alimentación (L)

Simplificando la ecuación anterior se obtiene:

$$\% \text{ Recuperación} = \frac{^{\circ}GL_D * D}{^{\circ}GL_F * F} * 100\% \text{ (Ecuación 56-357)}$$

3.5.2 Cálculo del rendimiento volumétrico

$$\text{Rendimiento} = \frac{V_s}{V_e} * 100\% \text{ (Ecuación 58-3)}$$

Dónde:

V_s = Volumen de salida, destilado (V_D), L

V_e = Volumen de entrada, alimentación (V_F), L

3.5.3 Cálculo de la eficiencia en función de los grados °GL

$$\eta = \frac{^{\circ}GL_D - ^{\circ}GL_F}{^{\circ}GL_F} * 100\% \text{ (Ecuación 59-3)}$$

Dónde:

η = Eficiencia

$^{\circ}GL_D$ = Grado alcohólico del destilado

$^{\circ}GL_F$ = Grado alcohólico de la alimentación

3.5.4 Gráfica de los perfiles dinámicos de temperatura vs tiempo

Adicional al control automatizado del equipo orientado a la temperatura de la resistencia calefactora en el tanque de alimentación, se instalaron 3 termocuplas para la medición de la temperatura en los platos 1, 5 y 9 de la columna de destilación. El objetivo de implementar estos sensores de temperatura se lo realizó con el objetivo de visualizar las temperaturas en tiempo real mientras se desarrolla el proceso de destilación.

A través del uso de la plataforma web gratuita “ThingSpeak” se almacena y recoge datos de los sensores en la nube mediante conexión a internet y, con ayuda del análisis de MATLAB y demás herramientas de la plataforma, se observa las gráficas de las temperaturas en función del tiempo.



Figura 12-3. Interfaz de ThingSpeak para la visualización de temperaturas

Fuente: Chunata, M.; Silva, A.2021

3.6 Procedimiento de destilación

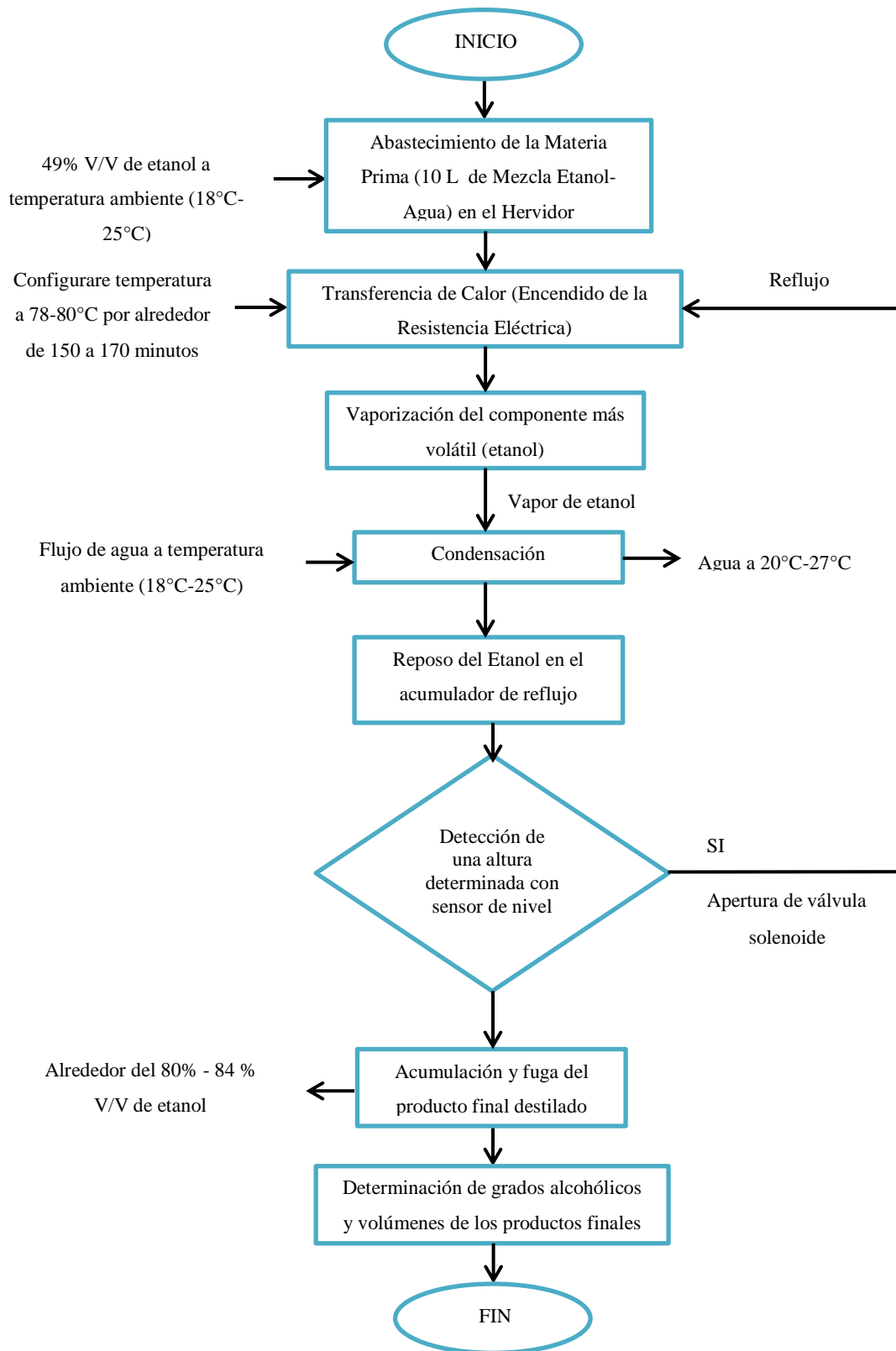


Figura 13-3. Procedimiento para la destilación de alcohol etílico en el equipo

Realizado por: Chunata, M.; Silva, A.2021

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS

4.1 Diseño de la columna de platos para un sistema binario etanol – agua

4.1.1 Condiciones de trabajo

Para simplificar los cálculos se considerará una presión atmosférica de 760 mmHg (1 atm) y una temperatura de 25°C. La selección de estas condiciones se justifica por la facilidad de encontrar datos tabulados de la densidad y peso molecular, tal cual aparecen en la Tabla 1-4.

Tabla 1-4. Propiedades de los componentes en la alimentación

A 1 atm y 25°C	Etanol	Agua
Densidad (Kg/L)	0,789	0,997
Masa Molecular (g/mL)	46,07	18,02
Punto de Ebullición (°C)	78,2	100

Fuente: Cengel, Y.; Boles, M.2011

Realizado por: Chunata, M.; Silva, A.2021

4.1.2 Variables de diseño para la alimentación

La composición volumétrica de la mezcla binaria es de aproximadamente un 55% de etanol y un 45% de agua para un volumen de alimentación de 10 L.

La fracción volumétrica del destilado será de 90 % del componente más volátil (etanol) y de un 10 % en el residuo tal como se muestra en la Figura 1-3.

4.1.3 Balance de materia

$$D + W = F \text{ (Ecuación 1-3)}$$

$$D + W = 10$$

$$X_D D + X_W W = X_F F \text{ (Ecuación 2-3)}$$

$$0,9 D + 0,1 W = (0,45)(10)$$

$$0,9 D + 0,1 W = 4,5$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones se obtiene:

$$D = 4,375 L$$

$$W = 5,625 L$$

4.1.4 Cálculo de los volúmenes de etanol

$$F_{etanol} = F * \% V / V_{etanol} \text{ (Ecuación 3-3)}$$

$$F_{etanol} = 10 L * \frac{45}{100}$$

$$F_{etanol} = 4,5 L$$

$$D_{etanol} = D * \% V / V_{etanol} \text{ (Ecuación 4-3)}$$

$$D_{etanol} = 4,375 L * \frac{90}{100}$$

$$D_{etanol} = 3,9375 L$$

$$W_{etanol} = W * \% V / V_{etanol} \text{ (Ecuación 5-3)}$$

$$W_{etanol} = 5,625 L * \frac{10}{100}$$

$$W_{etanol} = 0,5625 L$$

4.1.5 Cálculo de los volúmenes de agua

$$F_{agua} = F - F_{etanol} \text{ (Ecuación 6-3)}$$

$$F_{agua} = (10 - 4,5) L$$

$$F_{agua} = 5,5 L$$

$$D_{agua} = D - D_{etanol} \text{ (Ecuación 7-3)}$$

$$D_{agua} = (4,375 - 3,9375) L$$

$$D_{agua} = 0,4375 L$$

$$W_{agua} = W - W_{etanol} \text{ (Ecuación 8-3)}$$

$$W_{agua} = (5,625 - 0,5625) L$$

$$W_{agua} = 5,0625 L$$

4.1.6 Cálculo de la masa de etanol en cada corriente

$$m_{etanol} = V_{etanol} * \rho_{etanol} \text{ (Ecuación 9-3)}$$

Alimentación:

$$m_{F_{etanol}} = F_{etanol} * \rho_{etanol}$$

$$m_{F_{etanol}} = 4,5 L * 0,789 \frac{kg}{L}$$

$$m_{F_{etanol}} = 3,5505 kg$$

Destilado:

$$m_{D_{etanol}} = D_{etanol} * \rho_{etanol}$$

$$m_{D_{etanol}} = 3,9375 L * 0,789 \frac{kg}{L}$$

$$m_{D_{etanol}} = 3,1067 kg$$

Residuo:

$$m_{W_{etanol}} = W_{etanol} * \rho_{etanol}$$

$$m_{W_{etanol}} = 0,5625 L * 0,789 \frac{kg}{L}$$

$$m_{W_{etanol}} = 0,4438 kg$$

4.1.7 Cálculo de la masa de agua en cada corriente

$$m_{agua} = V_{agua} * \rho_{agua} \text{ (Ecuación 10-3)}$$

Alimentación:

$$m_{F_{agua}} = F_{agua} * \rho_{agua}$$

$$m_{F_{agua}} = 5,5 L * 0,997 \frac{kg}{L}$$

$$m_{F_{agua}} = 5,4835 kg$$

Destilado:

$$m_{D_{agua}} = D_{agua} * \rho_{agua}$$

$$m_{D_{agua}} = 0,4375 L * 0,997 \frac{kg}{L}$$

$$m_{D_{agua}} = 0,4362 kg$$

Residuo:

$$m_{W_{agua}} = W_{agua} * \rho_{agua}$$

$$m_{W_{agua}} = 5,0625 L * 0,997 \frac{kg}{L}$$

$$m_{W_{agua}} = 5,0473 kg$$

4.1.8 Cálculo de la masa total en cada corriente

$$m_T = m_{etanol} + m_{agua} \text{ (Ecuación 11-3)}$$

Alimentación:

$$m_F = m_{F_{etanol}} + m_{F_{agua}}$$

$$m_F = 3,5505 kg + 5,4835 kg$$

$$m_F = 9,034 kg$$

Destilado:

$$m_D = m_{D_{etanol}} + m_{D_{agua}}$$

$$m_D = 3,1067 kg + 0,4362 kg$$

$$m_D = 3,5429 \text{ kg}$$

Residuo:

$$m_W = m_{W_{etanol}} + m_{W_{agua}}$$

$$m_W = 0,4438 \text{ kg} + 5,0473 \text{ kg}$$

$$m_W = 5,4911 \text{ kg}$$

4.1.9 Cálculo del número de moles de etanol en cada corriente

$$n_{etanol} = \frac{m_{etanol}}{M_{etanol}} \text{ (Ecuación 12-3)}$$

Alimentación:

$$n_{F_{etanol}} = \frac{m_{F_{etanol}}}{M_{etanol}}$$

$$n_{F_{etanol}} = \frac{3,5505 \text{ kg}}{46,07 \frac{\text{g}}{\text{mol}} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}}}$$

$$n_{F_{etanol}} = 77,0675 \text{ mol}$$

Destilado:

$$n_{D_{etanol}} = \frac{m_{D_{etanol}}}{M_{etanol}}$$

$$n_{D_{etanol}} = \frac{3,1067 \text{ kg}}{46,07 \frac{\text{g}}{\text{mol}} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}}}$$

$$n_{D_{etanol}} = 67,4341 \text{ mol}$$

Residuo:

$$n_{W_{etanol}} = \frac{m_{W_{etanol}}}{M_{etanol}}$$

$$n_{W_{etanol}} = \frac{0,4438 \text{ kg}}{46,07 \frac{\text{g}}{\text{mol}} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}}}$$

$$n_{W_{etanol}} = 9,6332 \text{ mol}$$

4.1.10 Cálculo del número de moles de agua en cada corriente

$$n_{agua} = \frac{m_{agua}}{M_{agua}} \text{ (Ecuación 13-3)}$$

Alimentación:

$$n_{F_{agua}} = \frac{m_{F_{agua}}}{M_{agua}}$$

$$n_{F_{agua}} = \frac{5,4835 \text{ kg}}{18,02 \frac{\text{g}}{\text{mol}} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}}}$$

$$n_{F_{agua}} = 304,3008 \text{ mol}$$

Destilado:

$$n_{D_{agua}} = \frac{m_{D_{agua}}}{M_{agua}}$$

$$n_{D_{agua}} = \frac{0,4362 \text{ kg}}{18,02 \frac{\text{g}}{\text{mol}} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}}}$$

$$n_{D_{agua}} = 24,2057 \text{ mol}$$

Residuo:

$$n_{W_{agua}} = \frac{m_{W_{agua}}}{M_{agua}}$$

$$n_{W_{agua}} = \frac{5,0473 \text{ kg}}{18,02 \frac{\text{g}}{\text{mol}} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}}}$$

$$n_{W_{agua}} = 280,095 \text{ mol}$$

4.1.11 Cálculo de las fracciones molares

$$X_{etanol} = \frac{n_{etanol}}{n_{etanol} + n_{agua}} \text{ (Ecuación 14-3)}$$

$$X_{agua} = 1 - X_{etanol} \text{ (Ecuación 15-3)}$$

Alimentación:

$$X_{F(etanol)} = \frac{n_{Fetanol}}{n_{Fetanol} + n_{Fagua}}$$

$$X_{F(etanol)} = \frac{77,0675 \text{ mol}}{77,0675 \text{ mol} + 304,3008 \text{ mol}}$$

$$X_{F(etanol)} = 0,2021$$

$$X_{F(agua)} = 1 - X_{F(etanol)}$$

$$X_{F(agua)} = 1 - 0,2021$$

$$X_{F(agua)} = 0,7979$$

Destilado:

$$X_{D(etanol)} = \frac{n_{Detanol}}{n_{Detanol} + n_{Dagua}}$$

$$X_{D(etanol)} = \frac{67,4341 \text{ mol}}{67,4341 \text{ mol} + 24,2057 \text{ mol}}$$

$$X_{D(etanol)} = 0,7359$$

$$X_{D(agua)} = 1 - X_{D(etanol)}$$

$$X_{D(agua)} = 1 - 0,7359$$

$$X_{D(agua)} = 0,2641$$

Residuo:

$$X_{W(etanol)} = \frac{n_{Wetanol}}{n_{Wetanol} + n_{Wagua}}$$

$$X_{W(etanol)} = \frac{9,6334 \text{ mol}}{9,6334 \text{ mol} + 280,095 \text{ mol}}$$

$$X_{W(etanol)} = 0,0332$$

$$X_{W(agua)} = 1 - X_{W(etanol)}$$

$$X_{W(a\text{gua})} = 1 - 0,0332$$

$$X_{W(a\text{gua})} = 0,9668$$

4.1.12 Cálculo del número de moles totales en cada corriente

$$n_T = n_{\text{etanol}} + n_{\text{agua}} \text{ (Ecuación 16-3)}$$

Alimentación:

$$n_F = n_{F_{\text{etanol}}} + n_{F_{\text{agua}}}$$

$$n_F = 77,0675 \text{ mol} + 304,3008 \text{ mol}$$

$$n_F = 381,3683 \text{ mol}$$

Destilado:

$$n_D = n_{D_{\text{etanol}}} + n_{D_{\text{agua}}}$$

$$n_D = 67,4341 \text{ mol} + 24,2057 \text{ mol}$$

$$n_D = 91,6398 \text{ mol}$$

Residuo:

$$n_W = n_{W_{\text{etanol}}} + n_{W_{\text{agua}}}$$

$$n_W = 9,6334 \text{ mol} + 280,095 \text{ mol}$$

$$n_W = 289,7284 \text{ mol}$$

4.2 Balance de energía y modelado matemático del sistema térmico

Para el modelamiento matemático del sistema térmico accionado por la resistencia calefactora se parte del balance de energía previamente desglosado en el marco metodológico:

$$m c_p \frac{dT}{dt} = \alpha Q_i + U A (T_\infty - T) \text{ (Ecuación 23-3)}$$

El factor (α) y la potencia (Q_i) del calentador se determinan a partir de la Tabla 2-4, donde se observa las especificaciones y características de la resistencia calentadora implementada:

Tabla 2-4. Características de la resistencia calentadora de inmersión en forma de U

Material	Longitud (L_R)	Factor del calentador (α)	Masa (m_R)	Potencia a 220V (Q_i)
Acero Inoxidable	0,18 m	1,5117	0,28 kg	500 W

Realizado por: Chunata, M.; Silva, A.2021

De la misma manera para el cálculo de la densidad, capacidad calorífica y conductividad térmica de la mezcla etanol-agua se debe partir de la composición molar de etanol y de la temperatura que ésta posee en el sistema.

Para el sistema que se desea modelar se parte de una temperatura ambiente a la cual se encuentra la ciudad de Riobamba y 10 L de una mezcla de alimentación de 49°GL:

$$T_{mezcla} = 25^{\circ}C = 298,15^{\circ}K$$

$$x_{etanol-mezcla} = 0,229$$

Ambos valores corresponden a las condiciones iniciales de operación que se manejaron durante las prácticas experimentales.

4.2.1 Cálculo de la densidad de la mezcla

$$\rho_{mezcla} = 1003,98 - 0,3524T - 96,7916x^2 - 100,061x - 1,3996Tx + 0,8585x^2T$$

(Ecuación 25-3)

$$\rho_{mezcla} = 1003,98 - 0,3524(298,15) - 96,7916(0,229)^2 - 100,061(0,229) - 1,3996(298,15)(0,229) + 0,8585(0,229)^2(298,15)$$

$$\rho_{mezcla} = 788,78 \frac{kg}{m^3}$$

4.2.2 Calculo de la masa de la mezcla etanol-agua

$$m_{mezcla} = \rho_{mezcla} * V_{mezcla} \text{ (Ecuación 24-3)}$$

$$m_{mezcla} = 788,78 \frac{kg}{m^3} * \left(10dm^3 * \frac{1m^3}{1000dm^3} \right)$$

$$m_{mezcla} = 7,88 kg$$

4.2.3 Cálculo de la capacidad calorífica de la mezcla etanol-agua

$$Cp_{mezcla} = 5,16765 - 0,0026108T - 3,80691x - 0,00469903x^3T + 35,1179 * 10^{-6}T^2x \text{ (Ecuación 26-3)}$$

$$Cp_{mezcla} = 5,16765 - 0,0026108(298,15) - 3,80691(0,229) - 0,00469903(0,229)^3(298,15) + 35,1179 * 10^{-6}(298,15)^2(0,229)$$

$$Cp_{mezcla} = 4,215 \frac{kJ}{kg * ^\circ K}$$

4.2.4 Cálculo de la altura de la mezcla

El radio del tanque cilíndrico mide 0,16 m y reemplazando en la ecuación, se obtiene:

$$h = \frac{V_{mezcla}}{\pi r^2} \text{ (Ecuación 28-3)}$$

$$h = \frac{0,01 m^3}{\pi(0,16 m)^2}$$

$$h = 0,124 m$$

4.2.5 Cálculo del área de transferencia de calor en el sistema

$$A = 2\pi r h + 2\pi r^2 \text{ (Ecuación 27-3)}$$

$$A = 2\pi(0,16 m)(0,124 m) + 2\pi(0,16 m)^2$$

$$A = 0,2855 m^2$$

4.2.6 Cálculo de la conductividad térmica de la mezcla

$$k_{mezcla} = 0,5524 + 0,0025T - 0,5531x - 0,0018Tx + 0,1822x^2 \text{ (Ecuación 30-3)}$$

$$k_{mezcla} = 0,5524 + 0,0025(298,15) - 0,5531(0,229) - 0,0018(298,15)(0,229) + 0,1822(0,229)^2$$

$$k_{mezcla} = 1,058 \frac{W}{m * ^\circ K}$$

4.2.7 Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor en el sistema

Tomando en consideración a la mezcla de etanol-agua como un material estático de conducción se establece un espesor de 0,14 m y, de la misma manera, para el material del recipiente de alimentación (acero inoxidable AISI 304) se establece un espesor de 0,002 m.

En la Tabla 3-4 y la Tabla 4-4 se recopilan de diferente bibliografía los valores de conductividad térmica del acero inoxidable AISI 304 y el coeficiente de convección del aire respectivamente.

Tabla 3-4. Conductividad térmica del acero inoxidable

Material	Conductividad Térmica (k)
Acero inoxidable AISI 304	$14,9 \frac{W}{m \cdot ^\circ K}$

Fuente: Incropera, F.; DeWitt, D.1999

Realizado por: Chunata, M.; Silva, A.2021

Tabla 4-4. Coeficiente de convección del aire

Fluido	Velocidad	Coeficiente de Convección (h_{conv})
Aire	3,33 m/s o menos	$23,3 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K}$

Fuente: Bautista, A.2008

Realizado por: Chunata, M.; Silva, A.2021

Reemplazando los valores respectivos en la ecuación, se obtiene:

$$U = \frac{1}{\frac{L}{k_1} + \frac{L}{k_2} + \frac{1}{h_{conv}}} \text{ (Ecuación 29-3)}$$

$$U = \frac{1}{\frac{0,14 \text{ m}}{1,058 \frac{W}{m \cdot ^\circ K}} + \frac{0,002 \text{ m}}{14,9 \frac{W}{m \cdot ^\circ K}} + \frac{1}{23,3 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K}}}$$

$$U = 5,702 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K}$$

4.2.8 Linealización

4.2.8.1 Punto de Equilibrio

Para la determinación de la temperatura en el estado estacionario se asume una inyección nula de potencia por parte de la resistencia ($Q_{is} = 0$) y una temperatura ambiente ($T_{\infty S}$) de 25°C

$$T_s = \frac{\alpha Q_{is} + UAT_{\alpha s}}{UA} \text{ (Ecuación 32-3)}$$

$$T_s = \frac{UAT_{\alpha s}}{UA}$$

$$T_s = T_{\alpha s}$$

$$T_s = 25^\circ C = 298,15^\circ K$$

4.2.8.2 Función de transferencia

$$\frac{\Delta T(s)}{\Delta Q(s)} = \frac{\frac{\alpha}{mc_p}}{s + \frac{UA}{mc_p}} \text{ (Ecuación 35-3)}$$

$$\frac{\Delta T(s)}{\Delta Q(s)} = \frac{\frac{1,5117}{(7,88kg)(4215 \frac{J}{kg * ^\circ K})}}{s + \frac{(5,702 \frac{W}{m^2 * ^\circ K})(0,2855 m^2)}{(7,88kg)(4215 \frac{J}{kg * ^\circ K})}}$$

$$\frac{\Delta T(s)}{\Delta Q(s)} = \frac{4,5514 * 10^{-5}}{s + 4,9013 * 10^{-5}}$$

$$\frac{\Delta T(s)}{\Delta Q(s)} = \frac{0,929}{20402,75 s + 1}$$

4.2.9 Diagrama de bloques

Una vez calculada la respectiva función de transferencia se procede a la representación del modelo en un diagrama de bloques acoplado a un sistema de control on-off.

Para el diagrama de bloques mostrado en la Figura 1-4 se realizó la introducción de los siguientes componentes:

- **Step:** Bloque denominado para la inserción de un valor que controla una variable.
- **Sum:** Conector que manda o recibe señales para modificar en la función de transferencia.
- **Relay:** Utilizado para fijar un rango en el cual el control va a tener un déficit, también denominado Histéresis.

- **Transfer Fcn:** EL más importante de los bloques para este tipo de control, pues es el que desarrolla la función de transferencia previamente calculada y el que le da valores para ver su comportamiento.
- **Constant:** Bloque utilizado para fijar un valor que no va a ser variable con el tiempo.
- **Dashboard Scope:** Elemento en el cual se verán reflejado los resultados de nuestra función de transferencia, generalmente refleja una curva en el plano cartesiano.

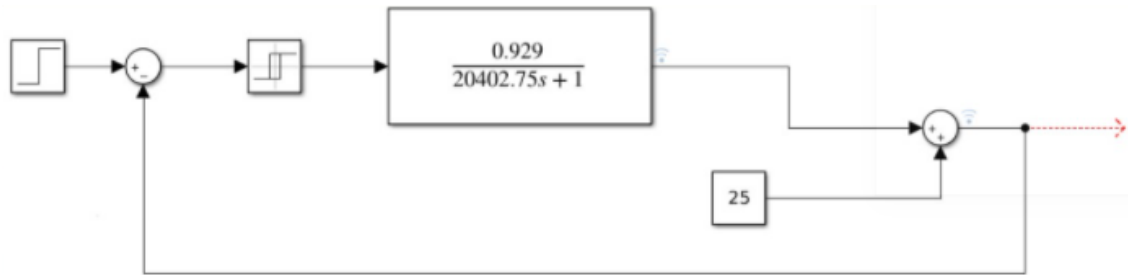


Figura 1-4. Diagrama de bloques del modelado lineal

Fuente: Chunata, M.; Silva, A.2021

La Figura 1-4 refleja el diseño de un control automático de dos etapas también llamado On-Off, para lo cual en el bloque “step” se ingresa un valor final de 80° C el cual hace referencia a la temperatura a la que ebulle el etanol, posteriormente es conectado mediante una función matemática “sum” a un “relay” en el cual se fija un intervalo de histéresis de [-1,1] el cual no significa más que el rango de temperatura en grados Celsius en el cual la resistencia se enciende o se apaga. Consecuente a esto se llega a nuestro bloque de transferencia que se encarga de la resolución de la función de transferencia antes calculada, este bloque se enlaza a un conector donde se suma la constante de 25° C la cual pertenece a la temperatura del ambiente, posteriormente manda una señal de salida a nuestro Scope que se encarga de reflejar los datos necesarios para observar el comportamiento de nuestro control, adicional a esto el conector final se enlaza a la inicial el cual va a reflejarnos la temperatura real del sistema térmico.

4.2.10 Gráfico del modelado lineal del sistema térmico

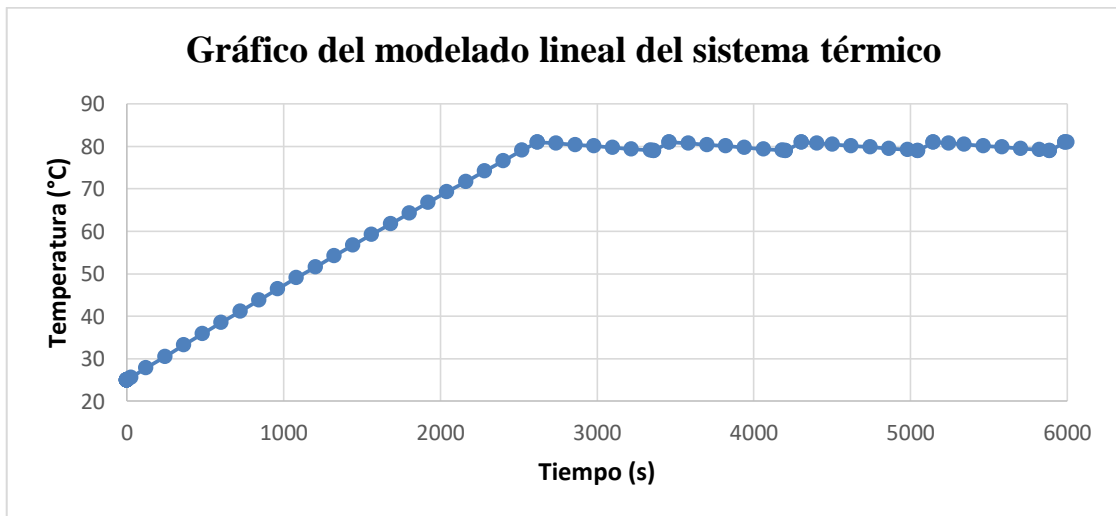


Gráfico 1-4. Comportamiento dinámico del modelo lineal

Fuente: Chunata, M.; Silva, A.2021

El Gráfico 1-4 muestra el comportamiento del modelado lineal de un control On- Off, en el cual podemos ver que su punto de partida va desde el número 20, esto se debe a que el proceso iniciará desde la temperatura ambiente hasta llegar a la temperatura de operación configurada previamente (set-point). Al pasar 2621 segundos nuestro equipo llega a la temperatura deseada (80°C), el alcohol empieza a transformarse en vapor y posteriormente a ser separado de la mezcla para salir como líquido condensado. Mientras el proceso continúe, cada 370 segundos aproximadamente el valor de la temperatura medida en el tanque aumentará un grado o disminuirá un grado debido a la histéresis que se programa durante el control automático.

4.2.11 Comparación de Modelos

Una vez realizada la práctica experimental con las mismas condiciones iniciales impuestas en el modelado lineal del sistema térmico, se recopilaron los datos de temperatura medidos por el sensor en el interior del tanque de alimentación cada 5 minutos, obteniendo así la Tabla 5-4.

Tabla 5-4. Datos de temperatura en función del tiempo del tanque calefactor

Tiempo (min)	Temperatura (°C) – Modelo Real
0	27
5	33
10	37
15	43
20	47
25	51
30	56

35	61
40	65
45	70
50	73
55	74
60	74
65	75
70	76
75	77
80	77
85	76
90	76
95	76
100	76

Realizado por: Chunata, M.; Silva, A.2021

Realizando la gráfica del comportamiento dinámico de ambos modelos, tanto el lineal como el real, se compara la variación existente y se concluye que el grado de perturbación del modelo real con el set- point dista de aproximadamente 4°C y que su temperatura límite (76-77°C) tiende a estabilizarse de manera similar a la conducta del modelado matemático planteado con la estrategia de control on-off.

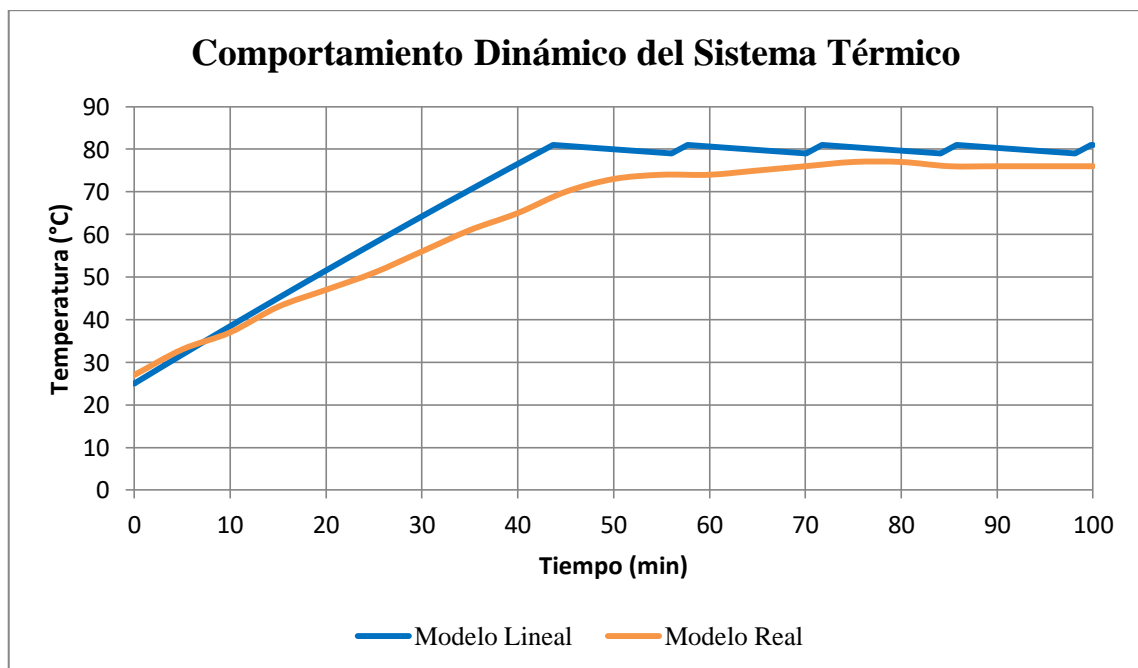


Gráfico 2-4. Comparación de comportamiento dinámico entre el modelo lineal y real

Fuente: Chunata, M.; Silva, A.2021

4.3 Aplicación del método de McCabe-Thiele

Para implementar el método gráfico de McCabe-Thiele se parte de una tabla de datos de equilibrio de la mezcla a analizar (en este caso etanol-agua) donde se relacione las composiciones molares en líquido (x) y en vapor (y) de cada componente con su respectiva temperatura de ebullición (Tb).

Tabla 6-4. Datos de equilibrio del sistema etanol – agua a 760 mmHg

Tb (°C)	x1	x2	y1	y2
100	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000
99,3	0,0028	0,9972	0,0320	0,9680
96,9	0,0118	0,9882	0,1130	0,8870
96	0,0137	0,9863	0,1570	0,8430
96	0,0144	0,9856	0,1350	0,8650
95,6	0,0176	0,9824	0,1560	0,8440
94,8	0,0222	0,9778	0,1860	0,8140
93,8	0,0246	0,9754	0,2120	0,7880
93,5	0,0302	0,9698	0,2310	0,7690
92,9	0,0331	0,9669	0,2480	0,7520
90,5	0,0519	0,9481	0,3180	0,6820
90,5	0,0530	0,9470	0,3140	0,6860
89,4	0,0625	0,9375	0,3390	0,6610
88,4	0,0673	0,9327	0,3700	0,6300
88,6	0,0715	0,9285	0,3620	0,6380
87,2	0,0871	0,9129	0,4060	0,5940
85,4	0,1260	0,8740	0,4680	0,5320
84,5	0,1430	0,8570	0,4870	0,5130
84	0,1720	0,8280	0,5050	0,4950
83,4	0,2060	0,7940	0,5300	0,4700
83	0,2100	0,7900	0,5270	0,4730
82,3	0,2550	0,7450	0,5520	0,4480
82	0,2840	0,7160	0,5670	0,4330
81,4	0,3210	0,6790	0,5860	0,4140
81,5	0,3240	0,6760	0,5830	0,4170
81,2	0,3450	0,6550	0,5910	0,4090
80,9	0,4050	0,5950	0,6140	0,3860

80,5	0,4300	0,5700	0,6280	0,3720
80,2	0,4490	0,5510	0,6330	0,3670
80	0,5060	0,4940	0,6610	0,3390
79,5	0,5450	0,4550	0,6730	0,3270
78,8	0,6630	0,3370	0,7330	0,2670
78,5	0,7350	0,2650	0,7760	0,2240
78,4	0,8040	0,1960	0,8150	0,1850
78,3	0,9170	0,0830	0,9060	0,0940
78,3	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000

Fuente: Chemical Engineering and Materials Research Information Center, 2007

Realizado por: Chunata, M.; Silva, A.2021

A partir de los datos de la Tabla 6-4 se grafican los diferentes diagramas de equilibrio (diagrama T-xy y diagrama x-y) para la mezcla etanol-agua:

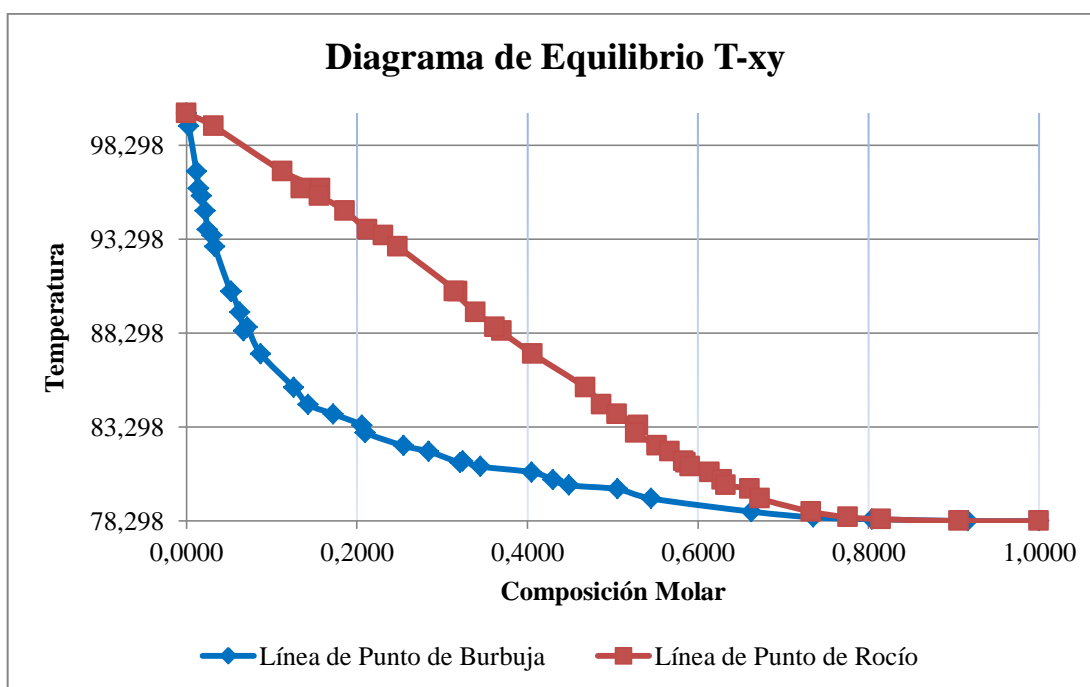


Gráfico 3-4. Diagrama de equilibrio T-XY del etanol-agua a 760mm Hg

Fuente: Chunata, M.; Silva, A.2021

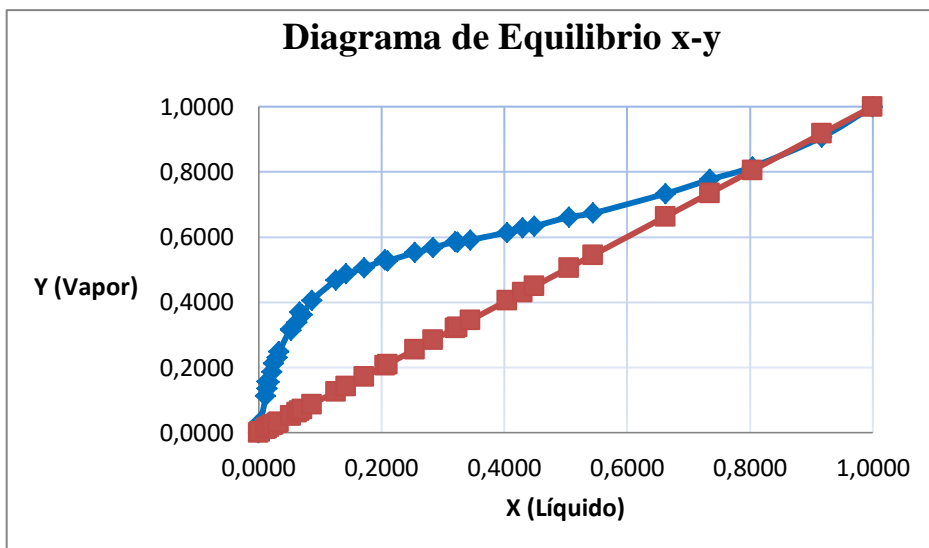


Gráfico 4-4. Diagrama de equilibrio X-Y del etanol-agua a 760 mm Hg

Fuente: Chunata, M.; Silva, A.2021

Cabe destacar que el diagrama de equilibrio x-y a 760mmHg del Gráfico 4-4 ha sido utilizado para el diseño del presente equipo con el objetivo primordial de acercar los resultados obtenidos a datos más exactos y cercanos a la realidad azeotrópica de la mezcla etanol-agua. Tal como se ilustra en el Gráfico 5-4, los diagramas de equilibrio x-y a presiones menores que la atmosférica no presentan mayores diferencias entre sí, por lo cual se concluye que el diagrama de equilibrio experimental a una presión de 548,5 mmHg (presión de Riobamba) no variará considerablemente con respecto al Gráfico 4-4.

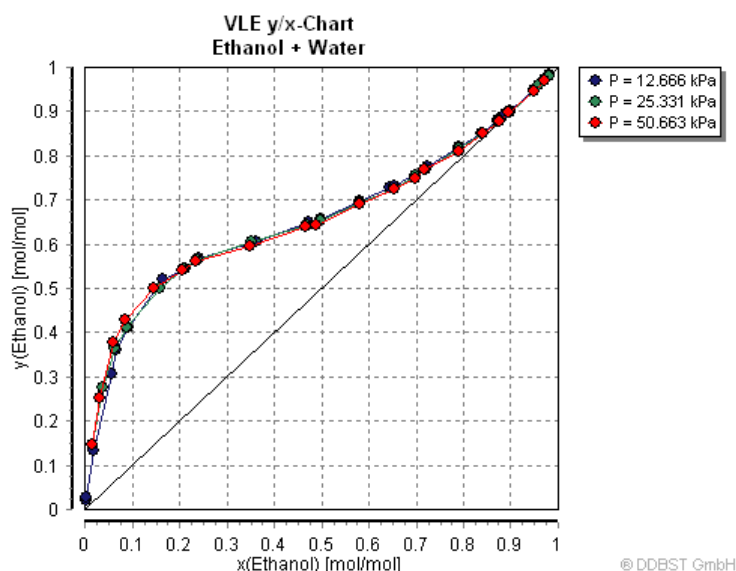


Gráfico 5-4. Diagrama de equilibrio X-Y del etanol-agua a presiones menores a la atmosférica

Fuente: Beebe et al., 1942

Fuente: Chunata, M.; Silva, A.2021

Realizando la respectiva comparativa entre los diagramas del Gráfico 4-4 y el Gráfico 5-4 se concluye que una mayor aproximación con la realidad se halla en el diagrama del Gráfico 4-4 ya que los datos ahí extraídos pertenecen a experimentaciones reales donde sí se toma en cuenta la temperatura límite de ebullición de la mezcla etanol-agua y donde se establece un máximo del 80% de concentración en moles de alcohol.

Una vez graficado el diagrama de equilibrio x-y del etanol-agua se traza las rectas correspondientes a las composiciones molares del etanol en los flujos de alimentación, destilado y residuo previamente calculadas, tal como se muestra en el Gráfico 6-4. La Tabla 7-4 muestra el número de moles y fracciones molares de cada corriente con su respectivo término: alimentación (F, XF), destilado (D, XD) y residuo (W, XW).

Tabla 7-4. Resultados del balance de materia del destilador

	Número de Moles			Fracciones Molares		
	F	D	W	XF	XD	XW
Etanol	77,068	67,434	9,633	0,202	0,736	0,033
Agua	304,301	24,206	280,095	0,798	0,264	0,967
Total	381,368	91,640	289,728	1,000	1,000	1,000

Realizado por: Chunata, M.; Silva, A.2021

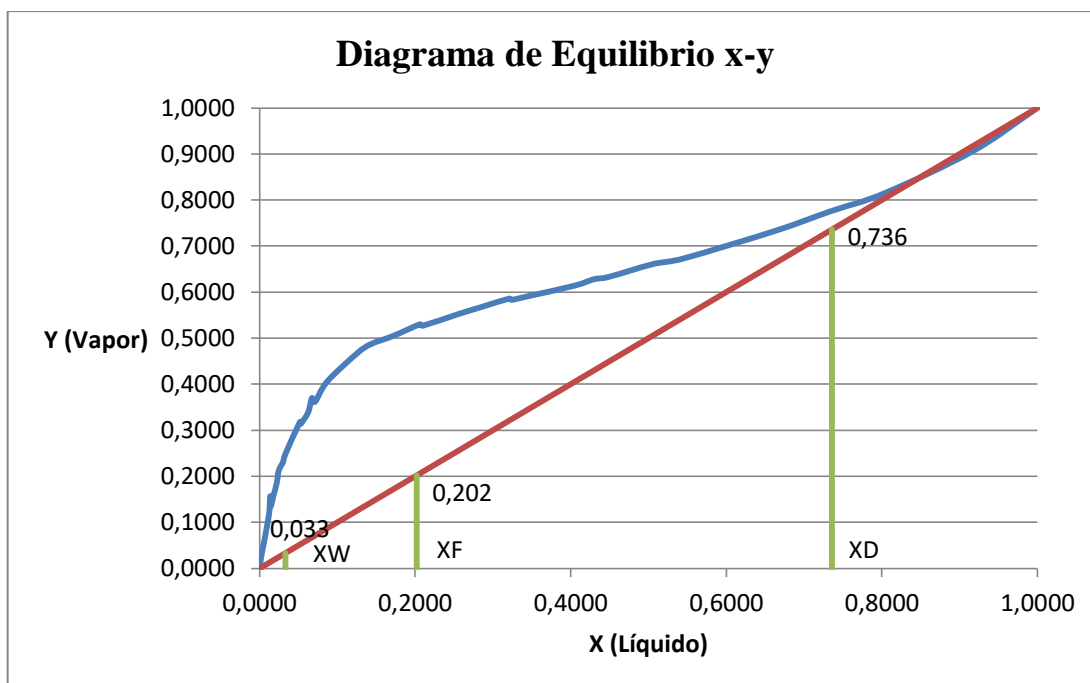


Gráfico 6-4. Diagrama de equilibrio X-Y del etanol-agua con las composiciones de diseño

Fuente: Chunata, M.; Silva, A.2021

4.3.1 Número mínimo de platos teóricos

Cuando la relación de reflujo es máxima $RR \rightarrow \infty$ la pendiente de las rectas de operación coinciden con la diagonal $X = Y$. De esta manera se obtiene el número mínimo de etapas de equilibrio o platos teóricos ($N \rightarrow N_{min}$). Tal y como se muestra en el Gráfico 7-4, para este caso, el número mínimo de etapas es de 4.

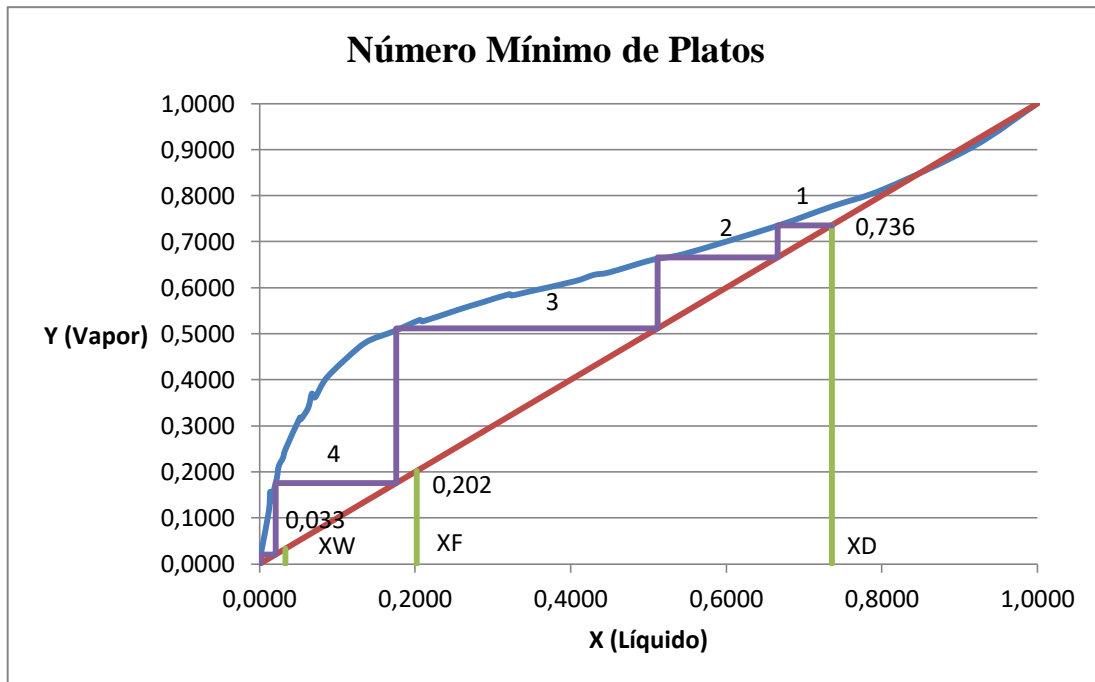


Gráfico 7-4. Número mínimo de platos por el método McCabe-Thiele

Fuente: Chunata, M.; Silva, A.2021

4.3.2 Datos para el cálculo de la línea de operación de alimentación

Debido a que para el diseño del equipo y la construcción del diagrama de equilibrio x-y se estipuló unas condiciones de 25 °C y 1 atm se debe ir a tablas para obtener los datos del calor latente (λ) de cada componente. De acuerdo a (Cengel & Boles, 2011), los valores correspondientes al agua y etanol se observan en la Tabla 8-4. **Propiedades de los líquidos a 25°C y 1 atm.:**

Tabla 8-4. Propiedades de los líquidos a 25°C y 1 atm.

	Agua	Etanol
Calor latente de vaporización λ (kJ/kg)	2257	838,3

Fuente: Cengel, Y.; Boles, M.2011

Realizado por: Chunata, M.; Silva, A.2021

4.3.2.1 Cálculo del C_p promedio

A diferencia de la capacidad calorífica calculada en el apartado 4.2.3 donde se ocupa una temperatura de 20°C, en este caso particular se da uso a una temperatura de 25°C con el fin de que coincidan las propiedades termodinámicas de la mezcla de alimentación con el cálculo del calor latente.

$$C_{p_{mezcla}} = 5,16765 - 0,0026108T - 3,80691x - 0,00469903x^3T + 35,1179 * 10^{-6}T^2x \text{ (Ecuación 26-3)}$$

$$C_{p_{mezcla}} = 5,16765 - 0,0026108(298,15) - 3,80691(0,202) - 0,00469903(0,202)^3(298,15) + 35,1179 * 10^{-6}(298,15)^2(0,202)$$

$$C_{p_{mezcla}} = 4,2393 \frac{kJ}{kg * ^\circ K}$$

4.3.2.2 Cálculo de λ promedio

$$\bar{\lambda} = \sum x_i \lambda_i \text{ (Ecuación 55-3)} \quad \bar{\lambda} = \sum x_i \lambda_i \text{ (Ecuación 55-3)} \quad \bar{\lambda} = \sum x_i \lambda_i \text{ (Ecuación 55-3)}$$

$$\bar{\lambda} = x_{F \text{ etanol}} \lambda_{F \text{ etanol}} + x_{F \text{ agua}} \lambda_{F \text{ agua}}$$

$$\bar{\lambda} = (0,202 * 838,3 \text{ kJ/kg}) + (0,798 * 2257 \text{ kJ/kg})$$

$$\bar{\lambda} = 1970,4226 \text{ kJ/kg}$$

4.3.2.3 Cálculo del valor de q de la alimentación

Para expresar la recta de alimentación es necesario calcular un parámetro, q , cuyo valor va a ser función de la vaporización de la mezcla de entrada.

Debido a que la alimentación es líquido frío, el valor de q se obtiene a partir de la ecuación.

$$q = 1 + \frac{\bar{C}_{pL}(T_B - T_F)}{\bar{\lambda}} \text{ (Ecuación 54-3)}$$

Tb se obtiene de los datos de equilibrio con el valor de la fracción de alimentación del 20,2 % que, por interpolación lineal, resulta 83,47 °C.

La Tabla 9-4 refleja solo los rangos de datos del equilibrio (previamente ilustrados en la Tabla 2-4) donde la fracción molar del líquido de alimentación (0,202) se encuentra rodeado del inmediato superior e inferior para el cálculo de interpolación lineal.

Tabla 9-4. Datos del equilibrio del sistema etanol-agua necesarios para interpolación

T_b (°C)	x₁
x₀ = 84	y₀ = 0,1720
x = ?	y = 0,2020
x₁ = 83,4	y₁ = 0,2060

Realizado por: Chunata, M.; Silva, A.2021

$$x = x_0 + \frac{x_1 - x_0}{y_1 - y_0} (y - y_0)$$

$$x = 84 + \frac{83,4 - 84}{0,206 - 0,172} (0,202 - 0,172)$$

$$x = T_b = 83,47$$

Reemplazando los datos calculados en la ecuación respectiva, tenemos:

$$q = 1 + \frac{4,2393 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} (83,47 - 25)^\circ\text{C}}{1970,4226 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}$$

$$q = 1,1258$$

Línea de operación de alimentación (LOF):

$$y_{LOF} = m_{LOF} \cdot x + b_{LOF}$$

$$y = \frac{q}{q-1} x - \frac{x_F}{q-1} \text{ (Ecuación 50-3)}$$

4.3.2.4 Cálculo de la pendiente de la línea de operación de alimentación

$$m_{LOF} = \frac{q}{q-1}$$

$$m_{LOF} = \frac{1,1258}{1,1258 - 1}$$

$$m_{LOF} = 8,9494$$

4.3.2.5 Cálculo de la intersección en el eje de la ordenada

$$b_{LOF} = -\frac{X_F}{q-1}$$

$$b_{LOF} = -\frac{0,202}{1,1258 - 1}$$

$$b_{LOF} = -1,6057$$

Se traza en el diagrama de equilibrio x-y del etanol-agua la respectiva línea de operación de alimentación, tal como se observa en el Gráfico 8-4.

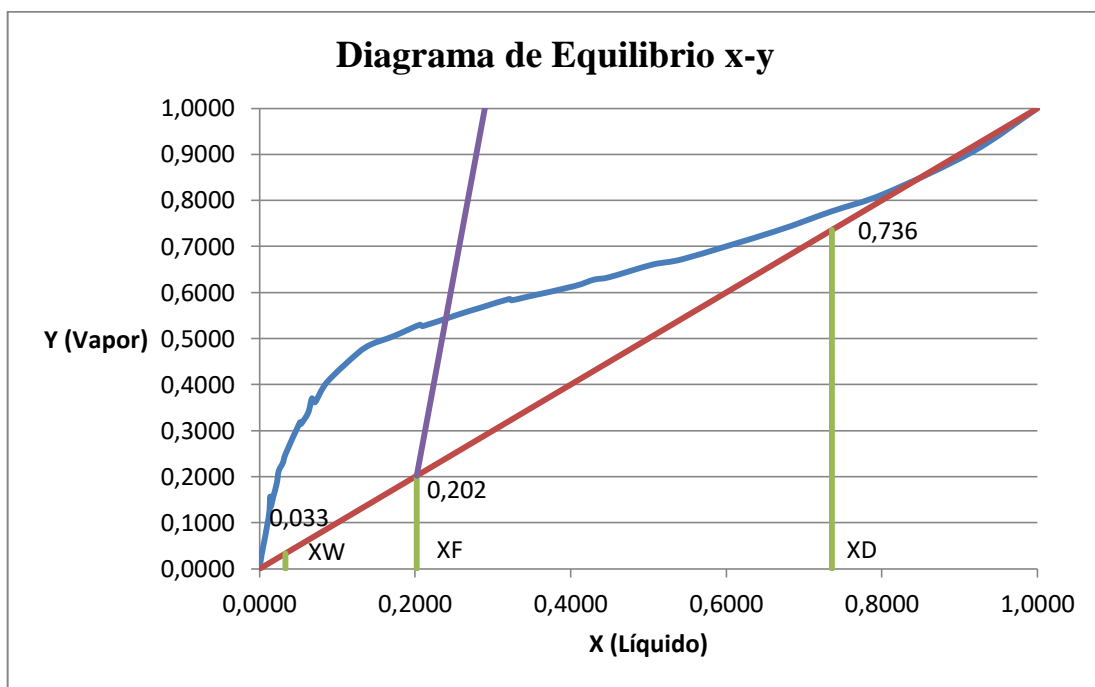


Gráfico 8-4. Representación de la línea de operación de alimentación

Fuente: Chunata, M.; Silva, A.2021

4.3.3 Determinación de la relación de reflujo mínima

El reflujo mínimo puede definirse como la máxima relación asequible que necesitará de un número infinito de platos para llevar a cabo la separación esperada de la mezcla.

Para la determinación de la relación mínima de reflujo se realiza un cruce de la recta de operación con la curva de equilibrio. Al punto de corte se lo denomina “Pinch” y, tal como se observa en el Gráfico 9-4, la pendiente de la recta de operación de reflujo resulta en 0,3885 y una intersección de 0,45 con el eje Y, por lo que la relación de reflujo mínima será 0,635.

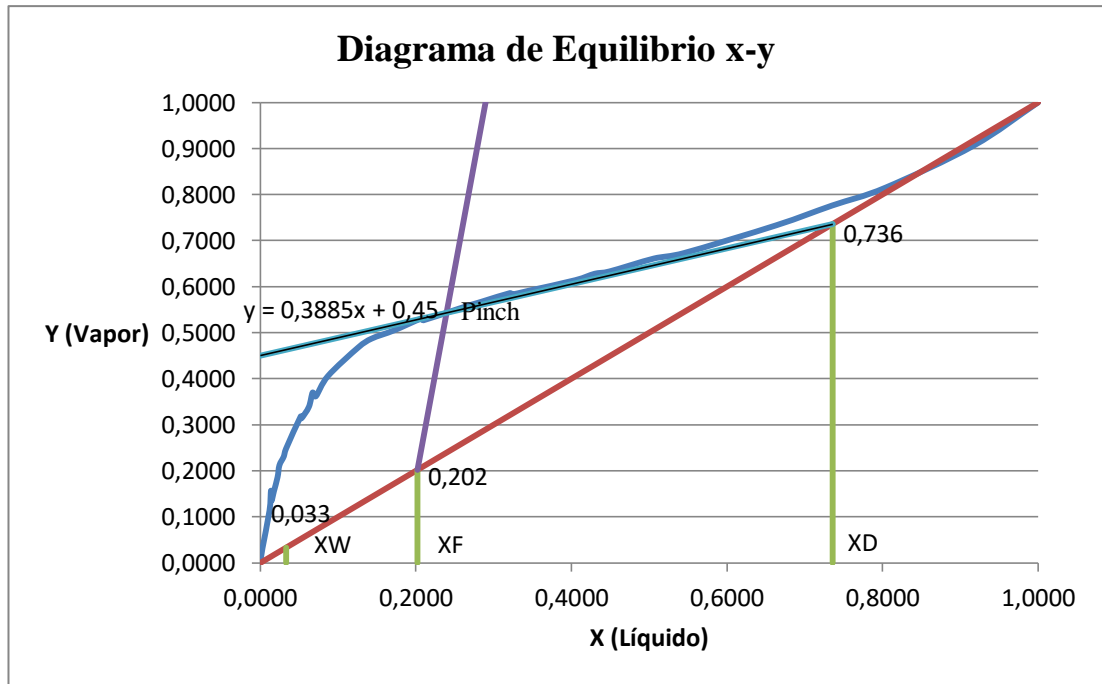


Gráfico 9-4. Cruce de rectas de operación para reflujo mínimo

Fuente: Chunata, M.; Silva, A.2021

Línea de Operación de Rectificación para Reflujo mínimo: $y = 0,3885x + 0,45$

$$y_{LOR\ min} = m_{LOR\ min} \cdot x + b_{LOR\ min}$$

$$m_{LOR\ min} = 0,3885$$

$$b_{LOR\ min} = 0,45$$

$$y_{n+1} = \frac{R}{R+1} x_n + \frac{x_D}{R+1} \text{ (Ecuación 40-3)}$$

4.3.3.1 Cálculo de la relación del reflujo mínimo y reflujo de operación

$$\frac{x_D}{R_{min} + 1} = b_{LOR\ min}$$

$$R_{min} = \frac{x_D}{b_{LOR\ min}} - 1$$

$$R_{min} = \frac{0,736}{0,45} - 1$$

$$R_{min} = 0,635$$

Para el reflujo de operación se establece una razón de 1,5 veces el reflujo mínimo (R_{min})

$$\frac{R}{R_{min}} = 1,5$$

$$R = 1,5 * R_{min}$$

$$R = 0,9529$$

4.3.4 Determinación de las ecuaciones de las líneas de operación

Tabla 10-4. Datos necesarios para el cálculo de las líneas de operación de la destilación

F	D	W	q	R
381,368	91,640	289,728	1,1137	0,9529

Realizado por: Chunata, M.; Silva, A.2021

Las ecuaciones para cada línea de operación son las siguientes:

Sección de Rectificación:

$$y_{LOR} = m_{LOR} \cdot x + b_{LOR}$$

$$y_{n+1} = \frac{L_n}{V_{n+1}} x_n + \frac{Dx_D}{V_{n+1}} \text{ (Ecuación 39-3)}$$

Sección de Alimentación:

$$y_{LOF} = m_{LOF} \cdot x + b_{LOF}$$

$$y = \frac{q}{q-1} x - \frac{x_F}{q-1} \text{ (Ecuación 50-3)}$$

Sección de Empobrecimiento:

$$y_{LOS} = m_{LOS} \cdot x + b_{LOS}$$

$$y_{m+1} = \frac{L_m}{V_{m+1}} x_m - \frac{Wx_W}{V_{m+1}} \text{ (Ecuación 43-3)}$$

Usando las ecuaciones correspondiente al balance interno de cada sección en la torre de destilación se calcula el resto de variables faltantes.

$$R = \frac{L_n}{D} \text{ (Ecuación 36-3)}$$

$$L_n = D * R$$

$$L_n = 91,640 * 0,9529$$

$$L_n = 87,3205$$

$$V_{n+1} = L_n + D \text{ (Ecuación 37-3)}$$

$$V_{n+1} = 87,3205 + 91,640$$

$$V_{n+1} = 178,96$$

$$L_m = L_n + qF \text{ (Ecuación 45-3)}$$

$$L_m = 87,3205 + (1,1137)(381,368)$$

$$L_m = 512,0504$$

$$V_{m+1} = L_m - W \text{ (Ecuación 41-3)}$$

$$V_{m+1} = 512,0504 - 289,728$$

$$V_{m+1} = 222,322$$

Reemplazando las respectivas variables en cada ecuación se obtienen las siguiente líneas de operación.

Sección de Rectificación:

$$y_{n+1} = \frac{L_n}{V_{n+1}} x_n + \frac{Dx_D}{V_{n+1}} \text{ (Ecuación 39-3)}$$

$$y_{LOR} = m_{LOR} \cdot x + b_{LOR}$$

$$y_{LOR} = \frac{87,3205}{178,96} x + \frac{(91,640)(0,736)}{178,96}$$

$$y_{LOR} = 0,4879x + 0,3768$$

Sección de Alimentación:

$$y = \frac{q}{q-1} x - \frac{x_F}{q-1} \text{ (Ecuación 50-3)}$$

$$y_{LOF} = m_{LOF} \cdot x + b_{LOF}$$

$$y_{LOF} = \frac{1,1137}{1,1137 - 1} x - \frac{0,202}{1,1137 - 1}$$

$$y_{LOF} = 9,795x - 1,7773$$

Sección de Empobrecimiento:

$$y_{m+1} = \frac{L_m}{V_{m+1}} x_m - \frac{Wx_W}{V_{m+1}} \text{ (Ecuación 43-3)}$$

$$y_{LOS} = m_{LOS} \cdot x + b_{LOS}$$

$$y_{LOS} = \frac{512,0504}{222,322} x - \frac{(289,728)(0,033)}{222,322}$$

$$y_{LOS} = 2,3032x - 0,0433$$

Graficando cada una de las líneas de operación calculadas en el diagrama de equilibrio x-y del etanol-agua se obtiene el Gráfico 10-4.

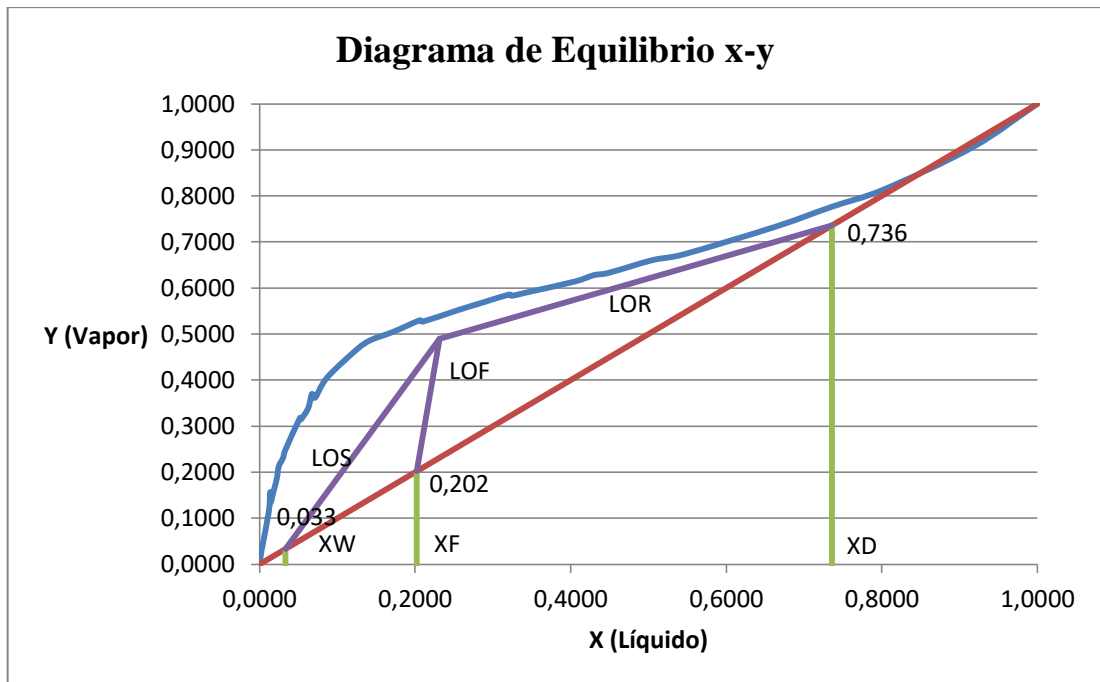


Gráfico 10-4. Representación de las tres líneas de operación de la columna de destilación

Fuente: Chunata, M.; Silva, A.2021

Adicionalmente se aplica el método gráfico de McCabe-Thiele y se traza las respectivas etapas teóricas en forma de escalones. En el Gráfico 11-4 se puede visualizar el número mínimo de etapas teóricas que corresponde a un valor aproximado de 9 platos.

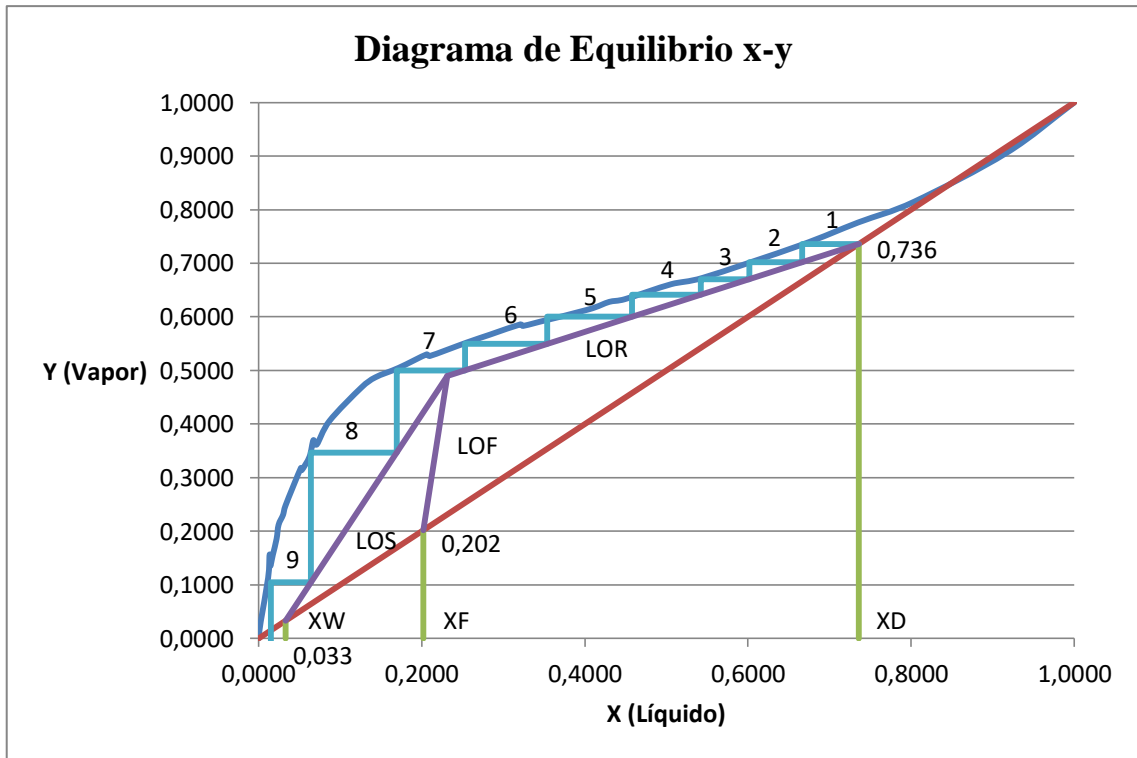


Gráfico 11-4. Número de platos teóricos por el método de McCabe-Thiele

Fuente: Chunata, M.; Silva, A.2021

4.3.5 Diseño de los platos

Para la construcción de la torre de destilación del presente proyecto se ha escogido la incorporación de platos de tipo perforado. La elección de este tipo de platos se debe a que permiten un mejor contacto entre las fases de vapor y líquido y también debido a su facilidad de construcción.

En lo referente al diámetro y el distanciamiento entre los platos se ha seleccionado como base los datos de la Tabla 11-4 en la cual se relacionan los valores de los diámetros de la columna con la distancia entre platos designada para cada rango.

Tabla 11-4. Relación del diámetro de la torre con el espaciamento entre platos

Diámetro de la torre, T(m)	Espaciamento entre platos, t (m)
	0,15 (mínimo)
<1	0,5
1-3	0,6
3-4	0,75
4-8	0,9

Fuente: Treybal, R.1981

Acorde a las condiciones y facilidades que convienen en cuanto a la construcción, el costo y el mantenimiento del destilador, se ha propuesto un diámetro de 25 cm para la torre. Se plantea este valor debido a que se prevé una menor dificultad para desmontar el equipo al momento de brindar sostenimiento y limpieza.

Para la selección del espaciamiento entre platos se toma como referencia los datos de la Tabla 7-4 y se realiza una regresión con el fin de calcular el distanciamiento correspondiente al diámetro de la columna previamente escogida.

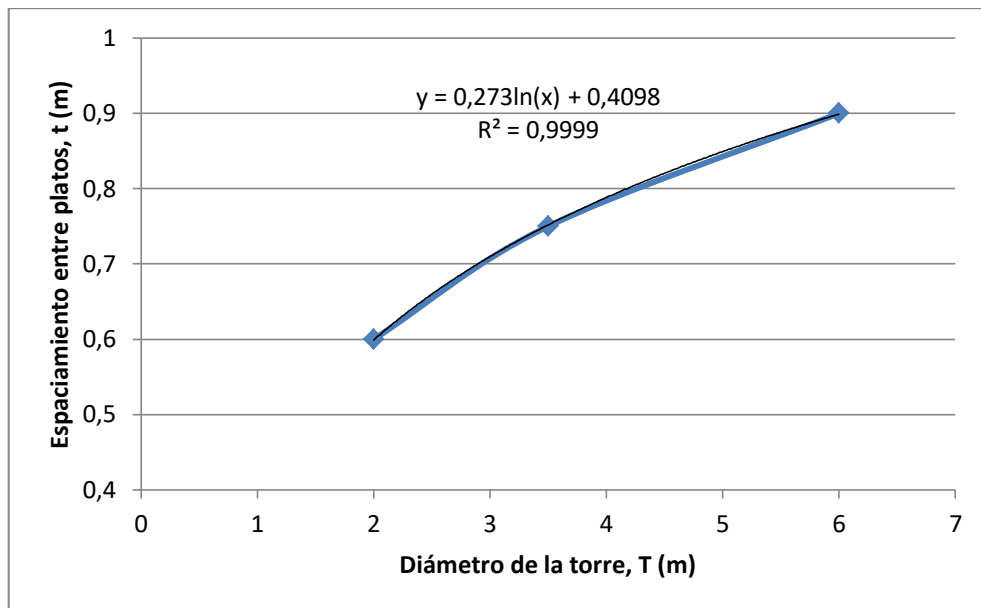


Gráfico 12-4. Regresión lineal de t en función de T con los datos de la Tabla 11-4

Fuente: Chunata, M.; Silva, A.2021

$$y = 0,273 * \ln(x) + 0,4098$$

$$y = 0,273 * \ln(0,25) + 0,4098$$

$$y = 0,0313 \text{ m}$$

$$0,0313 \text{ m} < 0,15 \text{ m (mínimo)}$$

$$t_{final} = 0,15 \text{ m}$$

En este caso especial para un diámetro de 0,25m le corresponde un espaciamiento de 0,0313m entre platos, lo cual está por debajo de la condición mínima de espaciamiento por lo cual se establece un valor final de 0,15m para la construcción de la torre.

4.3.6 Parámetros de diseño

En la Tabla 12-4 se resumen los parámetros principales de diseño para la torre de destilación previamente calculados:

Tabla 12-4. Datos para el diseño y dimensionamiento del equipo

Parámetros	Cantidad	Unidades
Volumen de alimentación (F)	10	L
Volumen de destilado (D)	4,375	L
Volumen de residuo (W)	5,625	L
Masa de alimentación (mF)	9,034	kg
Masa de destilado (mD)	3,5429	kg
Masa de residuo (mW)	5,4911	kg
Fracción molar de alimentación (XF)	0,2021	
Fracción molar de destilado (XD)	0,7359	
Fracción molar de residuo (XW)	0,0332	
Diámetro de la columna	0,25	m
Espaciamiento entre platos	0,15	m
Número de platos	9	
Relación de reflujo mínimo (Rmin)	0,635	

Realizado por: Chunata, M.; Silva, A.2021

4.4 Propuesta de construcción del equipo

Después de llevar a cabo los cálculos principales necesarios para el dimensionamiento y diseño del equipo de destilación se planteó su construcción con un material lo suficientemente resistente ante la corrosión y apropiado para la industria alimenticia, como lo es el acero inoxidable. A partir de la manejabilidad del acero se construyó el equipo con: una columna de 1,55 m de alto y 20,32 cm de diámetro, un tanque de alimentación provisto con una resistencia térmica, un condensador en serpentín y un acumulador del destilado. Adicional a ello, cabe recalcar que para el control automático se instalaron 4 sensores de temperatura para la torre y el hervidor, 2 sensores de nivel para el acumulador y una válvula solenoide para la tubería del reflujo del condensado. De la misma manera para disminuir la pérdida de calor al exterior del equipo se revistió a la torre y el hervidor con aislante térmico de aluminio y lana de vidrio.

4.4.1 Componentes y dimensiones de la estructura del equipo

Tabla 13-4. Datos finales de construcción del equipo

Parámetro	Cantidad	Unidades
Tanque de alimentación		
Volumen	18	L
Altura	20	cm
Diámetro	32	cm
Torre		
Altura	155	cm
Diámetro	20,32	cm
Numero de platos	9	-
Condensador		
Volumen	11,466	L
Altura	36,5	cm
Diámetro	20	cm
Acumulador		
Volumen	8,16	L
Altura	26	cm
Diámetro	20	cm

Realizado por: Chunata, M.; Silva, A.2021

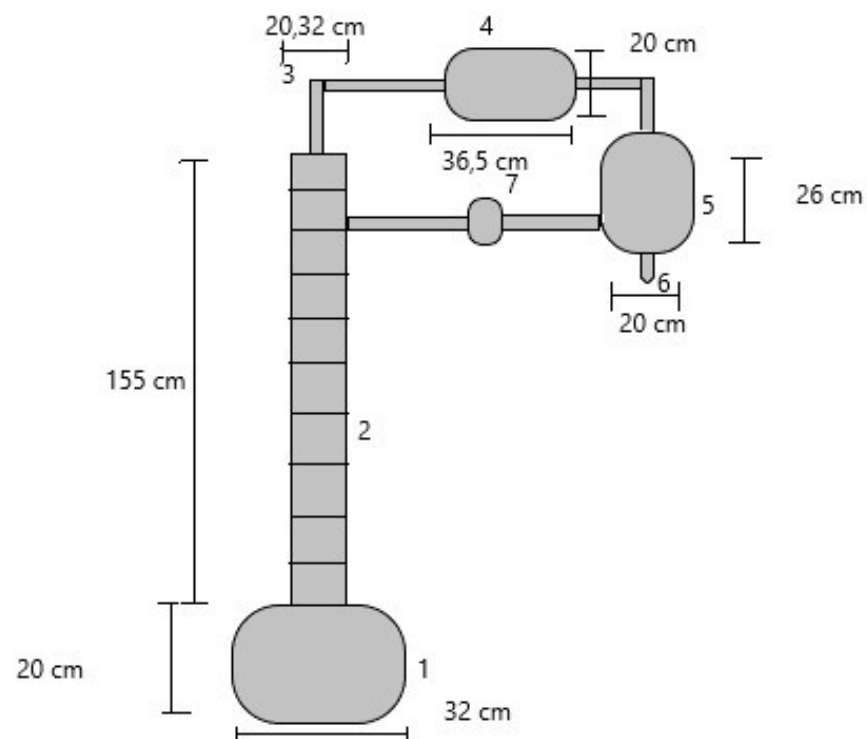


Figura 2-4. Estructura y dimensiones del equipo de destilación batch

Fuente: Chunata, M.; Silva, A.2021

Tabla 14-4. Componentes del destilador batch

Nº	Contenido
1	Tanque de alimentación
2	Torre de destilación
3	Tuberías de acero inoxidable
4	Condensador
5	Acumulador
6	Llave de salida
7	Válvula de recirculación

Realizado por: Chunata, M.; Silva, A.2021

4.4.2 *Tanque de alimentación*

Depósito diseñado para almacenar fluidos, construido en acero inoxidable y con una capacidad de 18 L. Tiene una altura de 20 cm con un desnivel de 7 cm y con diámetros de 32 cm en el inferior y 20,32 cm en el superior. Consta con una llave para desalojar el residuo de la mezcla, posee una resistencia eléctrica y una termocupla tipo J que sirve para controlar la temperatura de la mezcla. Para el funcionamiento se necesita una conexión de 220 V con un amperaje de 12 A.



Figura 3-4. Tanque de alimentación

Fuente: Chunata, M.; Silva, A.2021

4.4.3 *Torre de destilación*

Esta unidad también está hecha de acero inoxidable, con un diámetro de 20,32 cm está dividida en 3 partes la inferior de 47 cm, la parte media de 47 cm y la superior de 49 cm. Las tres partes se encuentran unidas con abrazaderas. Consta de 9 platos perforados con la función de transferir masa y generar un equilibrio entre las fases vapor-líquido. Cada una de las 3 etapas

mencionadas anteriormente posee una termocupla con el fin de medir las temperaturas generadas en ellas.



Figura 4-4. Torre de destilación

Fuente: Chunata, M.; Silva, A.2021

4.4.4 *Tuberías de acero inoxidable*

Hecha de material inoxidable con un diámetro de $\frac{3}{4}$ de pulgada a la salida de la torre, en cambio al interior del condensador cuenta con un diámetro de $\frac{1}{2}$ pulgada. El resto de tuberías que conectan el condensador con el acumulador, y de éste nuevamente a la torre para el reflujo, tienen un diámetro similar de $\frac{3}{4}$ de pulgada. Por estas tuberías pasan el vapor y el líquido que hierve de la mezcla.



Figura 5-4. Tuberías de acero inoxidable

Fuente: Chunata, M.; Silva, A.2021

4.4.5 *Condensador*

Construida de acero inoxidable con una capacidad de 11,4 L, con dimensiones de 20 cm de diámetro y 36,5 cm de alto. Este contenedor tiene como función el condensar el vapor que circula por el serpentín ubicado en el interior del mismo. Posee una entrada y una salida para

que la corriente del líquido que enfriará. La tubería que pasa por el interior tiene un diámetro de $\frac{1}{2}$ pulgada.



Figura 6-4. Condensador

Fuente: Chunata, M.; Silva, A.2021

4.4.6 Acumulador

Con una capacidad de 8,16 L en este contenedor es donde se almacena el destilado que llega después del condensador, posee una altura de 26 cm y un diámetro de 20 cm. Posee un sensor para medir el nivel de líquido condensado y ayuda a recircular el líquido obtenido para una mejor eficiencia en el equipo. Tanto la tubería de entrada como la de salida tienen un diámetro de $\frac{3}{4}$ de pulgada. Este al igual que los otros contenedores está construido de acero inoxidable, esto por la presencia de líquidos y para que tenga mayor vida útil.



Figura 7-4. Acumulador de destilado

Fuente: Chunata, M.; Silva, A.2021

4.4.7 Válvula de recirculación

Ubicada para la recirculación del equipo, está conectada y configurada para reaccionar en función del sensor del acumulador. Es controlada automáticamente por el equipo y también

cuenta con la presencia de otra válvula de bola ubicada para controlar la abertura de paso de líquido que se desea recircular.



Figura 8-4. Válvula de recirculación

Fuente: Chunata, M.; Silva, A.2021

4.4.8 Caja de control

En esta unidad, tal como su nombre lo indica, se encuentra instalado el sistema eléctrico que dará lugar al control automatizado del equipo. Consta de varios elementos que se detallan a continuación.

Tabla 15-4. Componentes de la caja de control

N.º	Contenido
1	Módulos y termocuplas
2	Módulo wifi
3	Relé
4	Transformador de 110 a 3V
5	Selectores y relés térmicos
6	Breakers
7	Pantalla
8	Contactores

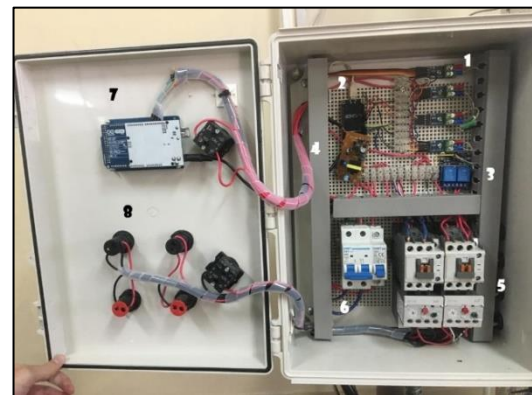


Figura 9-4. Caja de control

Fuente: Chunata, M.; Silva, A.2021

Realizado por: Chunata, M.; Silva, A.2021

4.4.8.1 Módulos y termocuplas

Ubicados en la parte superior derecha de la caja, son cuatro receptores de las termocuplas instaladas en el equipo para la transmisión de datos en la aplicación de celular.

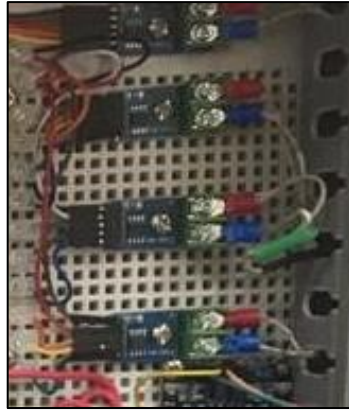


Figura 10-4. Módulos y termocuplas

Fuente: Chunata, M.; Silva, A.2021

4.4.8.2 *Módulo Wifi*

Instalado en la parte superior derecha, esta placa está unida a las tres termocuplas instaladas en la torre para posteriormente ser proyectada mediante la aplicación de celular y en la página thingspeak.com.



Figura 11-4. Módulo Wifi

Fuente: Chunata, M.; Silva, A.2021

4.4.8.3 *Relé*

Dispositivo manejado por una pequeña corriente eléctrica, está conectado al selector de la resistencia para cuando el medidor de temperatura llegue al Set Point marcado apague o prenda la resistencia.



Figura 12-4. Relé

Fuente: Chunata, M.; Silva, A.2021

4.4.8.4 Transformador de 110 a 3V

Placa utilizada para la alimentación principal de la pantalla táctil y el Arduino donde se da la proyección en tiempo real de la temperatura del hervidor.



Figura 13-4. Transformador de 110V a 3V

Fuente: Chunata, M.; Silva, A.2021

4.4.8.5 Selectores y relés térmicos

Ubicados en la parte inferior derecha de la caja, estos reciben directamente el voltaje para encender la resistencia y la válvula que activa el reflujo del producto. Los relés envían la orden para que estos se activen o se desactiven la resistencia y la válvula.



Figura 14-4. Selectores y relés térmicos

Fuente: Chunata, M.; Silva, A.2021

4.4.8.6 Breakers

Dentro la caja de control están ubicados en la parte inferior izquierda, tiene la presencia de un breaker monofásico de 20 A que es quien actúa para encender la resistencia, por otro lado, está el breaker de 1 A diseñado especialmente para el control de la parte eléctrica de todo el equipo.



Figura 15-4. Breakers

Fuente: Chunata, M.; Silva, A.2021

4.4.8.7 Pantalla

La pantalla táctil consta de un área de 6 cm x 8 cm, en la cual está enlazado el control de temperatura que actúa sobre la resistencia eléctrica. Esta pantalla está conectada a una placa Arduino Mega previamente programada para poder fijar y configurar una temperatura base para la resistencia calefactora. Junto a la pantalla se encuentra un contactor que tiene como función encender el sistema eléctrico de todo el equipo.



Figura 16-4. Pantalla táctil

Fuente: Chunata, M.; Silva, A.2021

4.4.8.8 Contactores

En la parte baja de la pantalla se encuentra otro contactor que activa o desactiva la resistencia, junto a este contactor se encuentran cuatro luces piloto, una verde y una roja para la resistencia las cuales indican que la resistencia esté funcionando perfectamente. De la misma manera las otras dos luces son para ver que la válvula esté funcionando perfectamente.



Figura 17-4. Contactores

Fuente: Chunata, M.; Silva, A.2021

4.5 Prácticas Experimentales

Se llevaron a cabo tres pruebas experimentales de destilación a partir de una mezcla de 10 L de etanol-agua de 49°GL variando en cada una la apertura de la válvula de recirculación con el propósito de calcular el porcentaje de recuperación de etanol, el rendimiento volumétrico y la eficiencia con referencia a los grados °GL.

La selección de una mezcla de alimentación de 49°GL se debe a la gran disponibilidad en el laboratorio de Procesos Industriales de tal composición y a que, a pesar de que en el diseño del equipo se estableció una alimentación de 45°GL, la variación en los parámetros de diseño por el método de McCabe-Thiele es casi nula en cuanto a la determinación de las etapas de la torre.

4.5.1 Cálculo del porcentaje de recuperación de etanol, rendimiento volumétrico y eficiencia del equipo

Se realizaron 3 prácticas de destilación con la válvula de reflujo cerrada, parcialmente abierta en un 50%, y completamente cerrada. Después de culminado cada práctica se recogieron los datos mostrados en la Tabla 16-4.

Tabla 16-4. Datos para el cálculo de la recuperación, rendimiento y eficiencia

N° Práctica	Porcentaje de apertura de la válvula de reflujo	Corrientes	X etanol (°GL)	Volumen (L)
Práctica 1	0% Apertura (Cerrada)	Alimentación (F)	0,49	10,00
		Destilado (D)	0,82	4,60
		Residuo (W)	0,15	5,40
Práctica 2	50% Apertura (Parcialmente Abierta)	Alimentación (F)	0,49	10,00
		Destilado (D)	0,82	4,74
		Residuo (W)	0,14	5,26
Práctica 3	100% Apertura (Abierta)	Alimentación (F)	0,49	10,00
		Destilado (D)	0,84	4,95
		Residuo (W)	0,14	5,05

Realizado por: Chunata, M.; Silva, A.2021

4.5.1.1 Cálculo del porcentaje de recuperación de etanol

$$\% \text{ Recuperación} = \frac{^{\circ}\text{GL}_D * D}{^{\circ}\text{GL}_F * F} * 100\% \text{ (Ecuación 56-31)}$$

Práctica 1:

$$\% \text{ Recuperación}_1 = \frac{^{\circ}GL_{D_1} * D_1}{^{\circ}GL_{F_1} * F_1} * 100\%$$

$$\% \text{ Recuperación}_1 = \frac{82^{\circ}GL * 4,6 L}{49^{\circ}GL * 10 L} * 100\%$$

$$\% \text{ Recuperación}_1 = 76,98 \%$$

Práctica 2:

$$\% \text{ Recuperación}_2 = \frac{^{\circ}GL_{D_2} * D_2}{^{\circ}GL_{F_2} * F_2} * 100\%$$

$$\% \text{ Recuperación}_2 = \frac{82^{\circ}GL * 4,74 L}{49^{\circ}GL * 10 L} * 100\%$$

$$\% \text{ Recuperación}_2 = 79,32 \%$$

Práctica 3:

$$\% \text{ Recuperación}_3 = \frac{^{\circ}GL_{D_3} * D_3}{^{\circ}GL_{F_3} * F_3} * 100\%$$

$$\% \text{ Recuperación}_3 = \frac{84^{\circ}GL * 4,95 L}{49^{\circ}GL * 10 L} * 100\%$$

$$\% \text{ Recuperación}_3 = 84,86 \%$$

4.5.1.2 Cálculo del rendimiento volumétrico

$$\mathbf{Rendimiento} = \frac{V_s}{V_e} * 100\% \text{ (Ecuación 57-3)}$$

Práctica 1:

$$\text{Rendimiento}_1 = \frac{V_{D_1}}{V_{F_1}} * 100\%$$

$$\text{Rendimiento}_1 = \frac{4,6 L}{10 L} * 100\%$$

$$\text{Rendimiento}_1 = 46 \%$$

Práctica 2:

$$\text{Rendimiento}_2 = \frac{V_{D_2}}{V_{F_2}} * 100\%$$

$$\text{Rendimiento}_2 = \frac{4,74 \text{ L}}{10 \text{ L}} * 100\%$$

$$\text{Rendimiento}_2 = 47,4 \%$$

Práctica 3:

$$\text{Rendimiento}_3 = \frac{V_{D_3}}{V_{F_3}} * 100\%$$

$$\text{Rendimiento}_3 = \frac{4,95 \text{ L}}{10 \text{ L}} * 100\%$$

$$\text{Rendimiento}_3 = 49,5 \%$$

4.5.1.3 Cálculo de la eficiencia en función de los grados °GL

$$\eta = \frac{^{\circ}GL_D - ^{\circ}GL_F}{^{\circ}GL_F} * 100\% \text{ (Ecuación 58-3)}$$

Práctica 1:

$$\eta_1 = \frac{^{\circ}GL_{D_1} - ^{\circ}GL_{F_1}}{^{\circ}GL_{F_1}} * 100\%$$

$$\eta_1 = \frac{82 \text{ } ^{\circ}GL - 49 \text{ } ^{\circ}GL}{49 \text{ } ^{\circ}GL} * 100\%$$

$$\eta_1 = 67,35 \%$$

Práctica 2:

$$\eta_2 = \frac{^{\circ}GL_{D_2} - ^{\circ}GL_{F_2}}{^{\circ}GL_{F_2}} * 100\%$$

$$\eta_2 = \frac{82 \text{ } ^{\circ}GL - 49 \text{ } ^{\circ}GL}{49 \text{ } ^{\circ}GL} * 100\%$$

$$\eta_1 = 67,35 \%$$

Práctica 3:

$$\eta_3 = \frac{^{\circ}GL_{D_3} - ^{\circ}GL_{F_3}}{^{\circ}GL_{F_3}} * 100\%$$

$$\eta_3 = \frac{84^{\circ}GL - 49^{\circ}GL}{49^{\circ}GL} * 100\%$$

$$\eta_3 = 71,43 \%$$

4.5.2 Gráfica de los perfiles dinámicos de temperatura vs tiempo

Mediante la aplicación de la plataforma web “ThingSpeak” se almacenaron todos los datos de temperatura medidos por cada uno de los sensores ubicados en los platos 1, 5 y 9 de la columna de destilación. Durante cada una de las prácticas experimentales realizadas se recogieron los diferentes datos de temperatura tal cual los iban midiendo los sensores instalados al instante.

4.5.2.1 Resultados de las temperaturas en la práctica N°1

Tabla 17-4. Datos de temperatura en función del tiempo correspondientes a la práctica N°1

Tiempo (min)	Temperatura (°C) - Plato Superior (1)	Temperatura (°C) - Plato Medio (5)	Temperatura (°C) - Plato Inferior (9)
0	14,50	16,50	19,00
5	14,25	16,25	18,75
10	14,50	16,75	19,25
15	14,25	18,00	20,50
20	13,75	19,25	21,50
25	16,50	21,25	24,25
30	22,00	24,75	27,25
35	34,50	37,50	39,25
40	54,25	59,25	66,25
45	63,25	67,25	66,75
50	71,00	70,00	69,50
55	71,00	70,25	69,75
60	71,75	70,75	70,25
65	71,00	71,00	70,25
70	71,25	70,75	70,00
75	68,75	70,25	70,00
80	68,50	70,00	69,75
85	68,75	70,25	69,75
90	68,50	70,50	70,00
95	68,75	70,25	69,75
100	68,50	70,75	69,75
105	70,00	71,00	70,25
110	70,75	71,00	70,25
115	70,25	70,50	70,75
120	69,50	71,25	71,00
125	70,00	71,50	71,50
130	71,75	72,50	72,25
135	71,00	72,75	72,00
140	71,25	73,50	73,50
145	69,25	71,25	71,50
150	66,00	67,25	66,75
155	62,50	67,00	65,50
160	72,00	65,75	63,75
165	69,75	63,75	61,75
170	69,50	62,00	60,50

Realizado por: Chunata, M.; Silva, A.2021

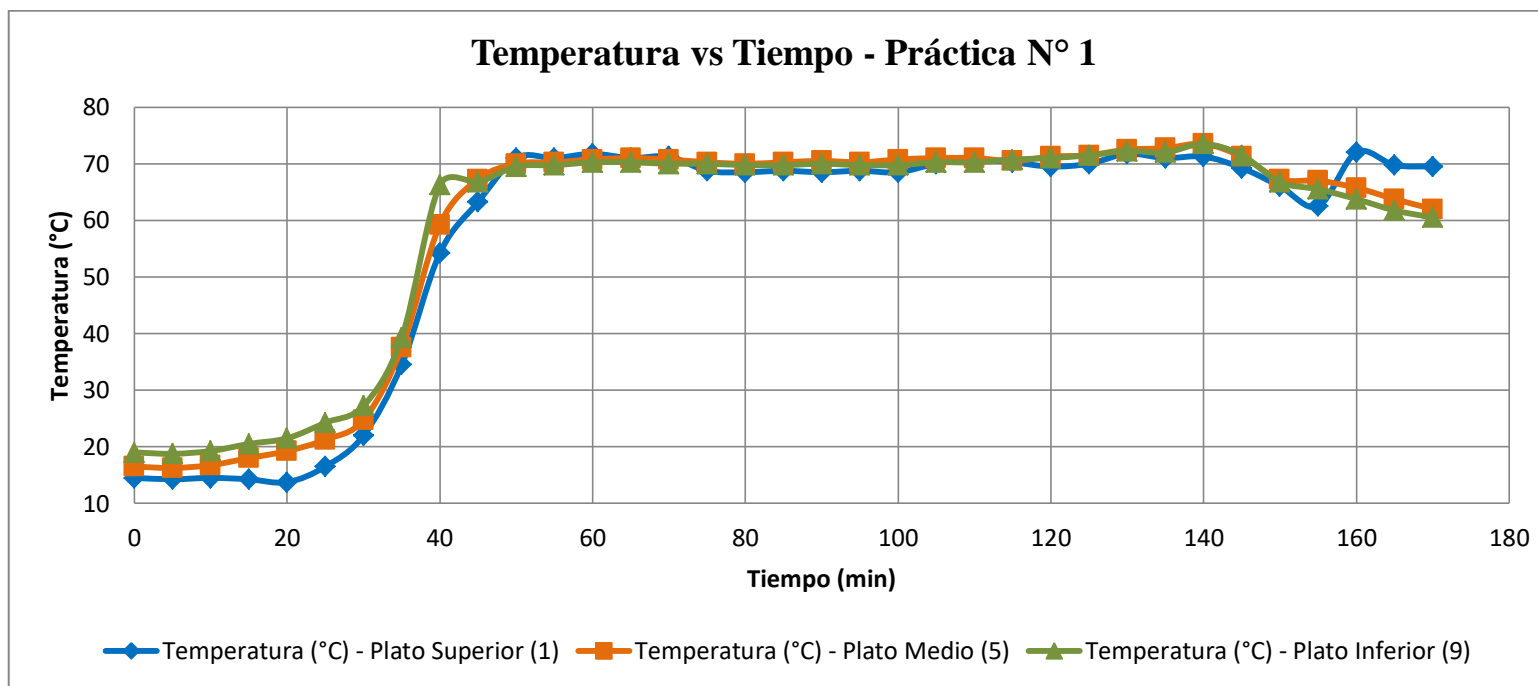


Gráfico 13-4. Gráfico de temperaturas en función del tiempo correspondientes a la práctica N° 1

Fuente: Chunata, M.; Silva, A.2021

De acuerdo al Gráfico 13-4 correspondiente a la práctica N° 1 se observa un crecimiento exponencial de las temperaturas en cada plato desde el minuto 30 hasta el minuto 45. El crecimiento de las temperaturas se ve mermado mientras más cerca se ronda los 70 °C – 72 °C, que es el rango de temperaturas en el cual se da la evaporación del etanol como el componente más volátil y al mismo tiempo se impide la evaporación del otro componente (agua). Una vez se alcanza un tiempo de 50 minutos del proceso se visualiza una tendencia lineal de las temperaturas en cada plato permaneciendo estable en un valor de 70°C ± 2°C. La baja variación de las temperaturas una vez se da la ebullición del etanol confirma el buen funcionamiento del control automático en la resistencia calefactora.

4.5.2.2 Resultados de las temperaturas en la práctica N°2

Tabla 18-4. Datos de temperatura en función del tiempo correspondientes a la práctica N°2

Tiempo (min)	Temperatura (°C) - Plato Superior (1)	Temperatura (°C) - Plato Medio (5)	Temperatura (°C) - Plato Inferior (9)
0	13,75	15,50	18,00
5	14,00	16,00	18,25
10	14,50	16,75	19,25
15	13,75	18,25	20,50
20	15,25	20,50	22,50
25	20,50	22,75	27,50
30	34,50	30,75	47,25
35	52,25	54,50	60,75
40	59,75	57,75	65,25
45	67,25	58,25	69,25
50	68,00	59,00	70,50
55	69,00	60,75	70,75
60	69,00	59,50	69,75
65	68,75	58,75	70,25
70	69,00	60,75	70,75
75	68,00	60,25	70,00
80	67,50	59,75	70,50
85	67,75	58,50	70,00
90	67,75	58,50	70,25
95	68,00	58,25	69,75
100	66,50	50,00	70,25
105	66,50	50,00	70,50
110	67,00	50,25	70,75
115	67,25	52,25	71,25
120	67,25	51,25	71,25
125	72,25	61,00	70,25
130	72,75	62,50	71,00
135	73,00	63,25	71,75
140	73,50	63,50	72,00
145	75,75	66,50	72,75
150	70,75	65,75	67,25
155	69,50	64,00	63,75
160	68,25	61,75	61,50
165	66,50	59,00	59,50
170	64,50	57,00	57,25

Realizado por: Chunata, M.; Silva, A.2021

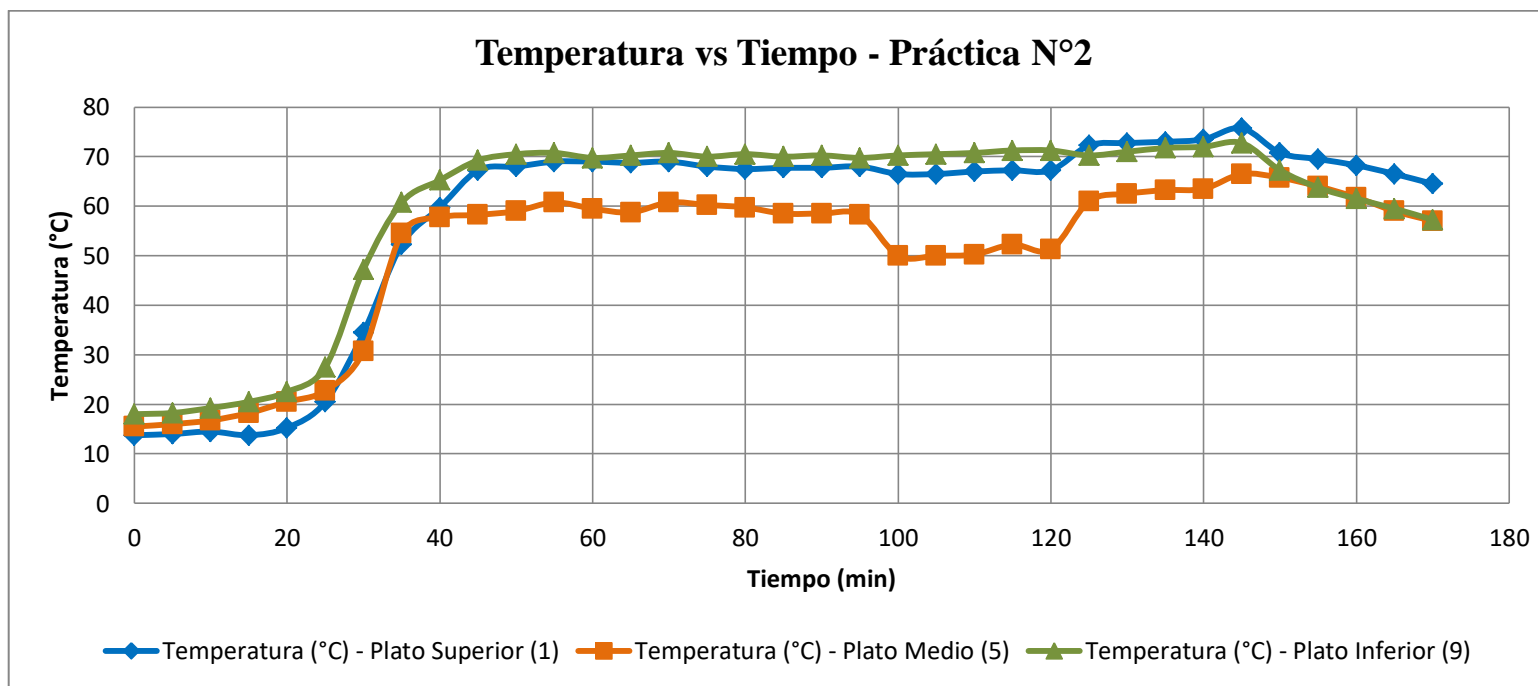


Gráfico 14-4. Gráfico de temperaturas en función del tiempo correspondientes a la práctica N° 2

Fuente: Chunata, M.; Silva, A.2021

De acuerdo al Gráfico 14-4 correspondiente a la práctica N° 2 se observa un crecimiento exponencial de las temperaturas en cada plato desde el minuto 20 hasta el minuto 45, que es el tiempo donde comienza la evaporación del etanol como el componente más volátil. Debido a la configuración de la temperatura límite que debe alcanzar la mezcla de alimentación a través del control automático, las temperaturas en los 3 platos no sobrepasan los 74 °C, impidiendo así la ebullición del otro componente (agua). Al existir una corriente de recirculación de etanol líquido por la apertura de la válvula se puede apreciar una disminución de la temperatura en el plato medio de la torre, siendo más notorio en el lapso de tiempo entre los 100 y 120 minutos del proceso. Esto ocurre debido a la disposición del sensor en el plato que entra en contacto con el líquido frío recirculado.

4.5.2.3 Resultados de las temperaturas en la práctica N°3

Tabla 19-4. Datos de temperatura en función del tiempo correspondientes a la práctica N°3

Tiempo (min)	Temperatura (°C) - Plato Superior (1)	Temperatura (°C) - Plato Medio (5)	Temperatura (°C) - Plato Inferior (9)
0	14,50	16,75	19,00
5	14,25	16,50	18,75
10	14,00	16,75	19,75
15	14,00	18,25	20,50
20	15,25	19,00	22,75
25	21,75	24,25	27,00
30	35,25	41,25	47,75
35	53,75	58,75	65,75
40	64,75	69,25	67,00
45	69,00	72,00	69,25
50	70,00	72,75	69,25
55	71,25	68,75	69,25
60	69,50	72,00	69,75
65	70,25	72,50	69,25
70	71,25	62,75	68,75
75	70,50	60,50	68,75
80	71,75	62,25	68,50
85	70,75	59,50	69,00
90	70,25	59,50	69,00
95	67,25	58,25	69,00
100	66,25	60,75	69,50
105	66,50	60,50	69,50
110	66,00	60,25	69,50
115	67,00	60,50	70,25
120	68,25	61,50	70,75
125	68,75	61,00	70,75
130	69,50	61,50	72,00
135	71,00	62,50	72,50
140	72,75	62,75	73,75
145	74,75	62,50	74,25
150	68,50	58,50	68,00
155	67,25	56,50	64,50
160	66,25	55,50	63,25

Realizado por: Chunata, M.; Silva, A.2021

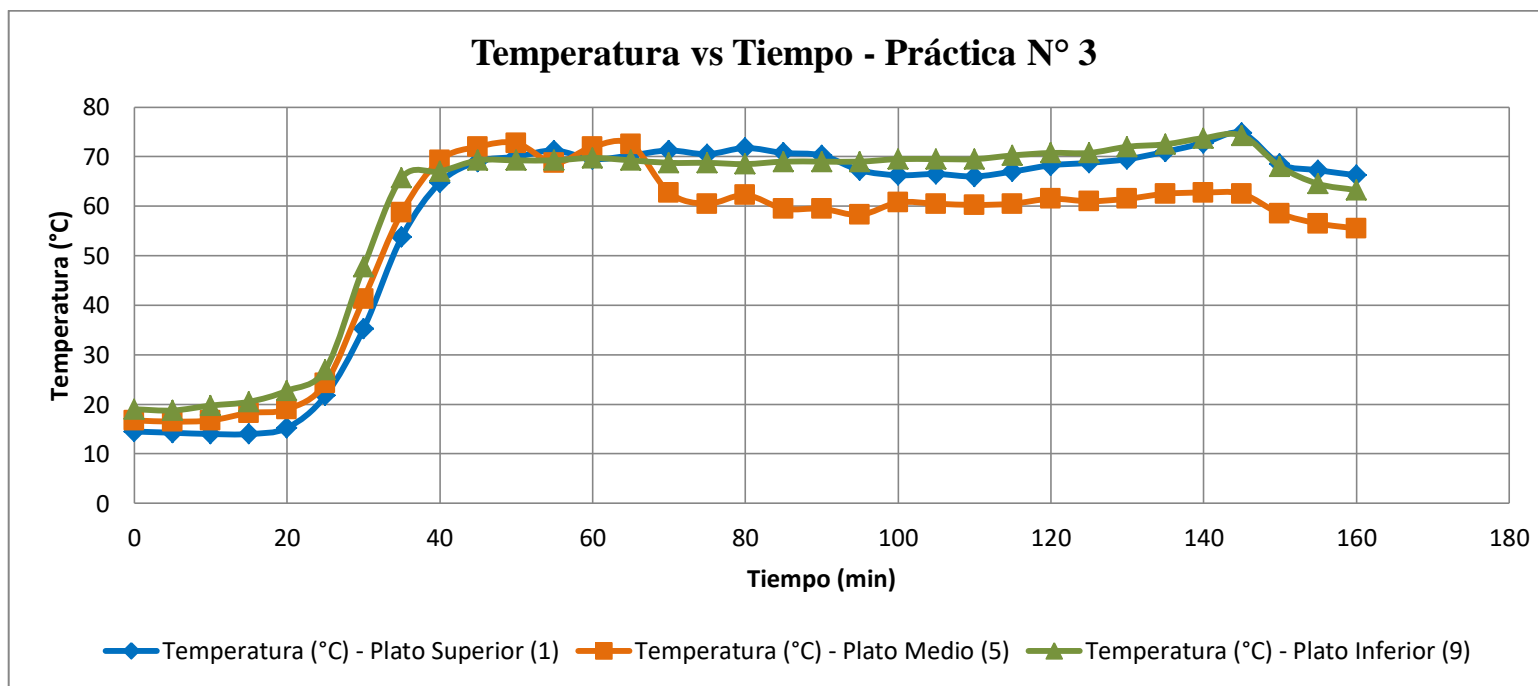


Gráfico 15-4. Gráfico de temperaturas en función del tiempo correspondientes a la práctica N° 3

Fuente: Chunata, M.; Silva, A.2021

De acuerdo al Gráfico 15-4 correspondiente a la práctica N° 3 se observa un crecimiento exponencial de las temperaturas en cada plato desde el minuto 20 hasta el minuto 40, a partir del cual comienza a darse la evaporación del etanol como el componente más volátil y por ende, debido a la configuración del control automático, las temperaturas no sobrepasan el rango de 68 °C – 74 °C con el fin de no alcanzar el punto de ebullición del otro componente (agua). Desde el minuto 40 hasta el minuto 145 se visualiza una tendencia casi lineal de las temperaturas en los 3 platos salvo una pequeña excepción del plato medio en el cual existe un decrecimiento de temperatura a partir del minuto 70 debido a que el etanol líquido recirculado toma contacto con el sensor, produciendo una decadencia de temperatura de entre 59 °C – 62 °C.

4.5.3 Resultados obtenidos de las prácticas

Tabla 20-4. Resultados del cálculo de la recuperación, rendimiento y eficiencia

N° Práctica	Porcentaje de apertura de la válvula de reflujo	Recuperación de Etanol	Rendimiento Volumétrico	Eficiencia	Tiempo
Práctica 1	0% Apertura (Cerrada)	76,98 %	46 %	67,35 %	145 min
Práctica 2	50% Apertura (Parcialmente Abierta)	79,32 %	47,4 %	67,35 %	150 min
Práctica 3	100% Apertura (Abierta)	84,86 %	49,5 %	71,43 %	160 min

Realizado por: Chunata, M.; Silva, A.2021

En la Tabla 20-4 se observa mejores resultados para las prácticas con recirculación (práctica 2 y 3), existiendo una relación proporcional en cuanto a optimización y eficiencia mientras mayor sea la apertura de la válvula de reflujo. De igual forma se llega a la apreciación de que mientras mayor apertura tenga la válvula mayor tiempo llevará la finalización del proceso de destilación desde el encendido hasta el apagado de la resistencia calefactora del hervidor.

4.6 Análisis de Resultados

Luego de realizar los cálculos referentes al diseño y construcción de la torre de destilación se puede evidenciar que los resultados de la composición volumétrica de los productos obtenidos (destilado y residuo) al probar el equipo no variaron mucho de las variables de diseño inicialmente planteadas (90% de etanol para el destilado y 10% de etanol en el residuo). Tomando como referencia los resultados de la práctica 3 con recirculación (84% de etanol en el destilado y 14% en el residuo) se demuestra una desigualdad del 6% de etanol en el destilado y un 4% de etanol en el residuo. Tales diferencias se pueden justificar con la pérdida de calor que pueda existir en el equipo, además de que al momento de fijar la temperatura en el control automático implementado, ésta no llega a su límite, existiendo así un diferencial de temperatura.

De acuerdo a los datos obtenidos en las prácticas de destilación con el equipo construido se deduce que tanto el porcentaje de recuperación de etanol, el rendimiento volumétrico y la eficiencia en cuanto a los grados °GL son mayores en la práctica realizada con el 100% de apertura de la válvula de recirculación (84,86%, 49,5% y 71,43% respectivamente). Estos resultados contrastan con los de la práctica 1 con una diferencia de 7,88% en cuanto a la recuperación de etanol, 3,5% en cuanto al rendimiento volumétrico y 4,08% en cuanto a la eficiencia de los grados alcohólicos. Estas diferencias se minimizan en la práctica 2 en un 5,54%, 2,1% y 4,08% respectivamente.

Las gráficas de temperatura vs tiempo de las tres prácticas experimentales resaltan de manera general pequeñas perturbaciones que representan una variación máxima de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ al llegar a la temperatura de control. Los diagramas obtenidos de igual manera corroboran el comportamiento de un esquema de control automático ON-OFF y por su bajo nivel de perturbaciones permiten concluir que el control implementado supera con creces el objetivo planteado en la destilación.

CONCLUSIONES

- Se realizó el diseño de un destilador tipo batch mediante el modelo matemático propuesto por McCabe-Thiele. La construcción del equipo se elaboró con materiales de acero inoxidable debido a que, al trabajar con líquidos en la mezcla de alimentación, este fenómeno representa una de las dificultades que interfieren en la vida útil. Adicional a ello se colocó un recubrimiento de lana de vidrio como aislante térmico con el objetivo de minimizar las pérdidas de calor.
- Se diseñó un destilador tipo Batch a partir de las ecuaciones y gráficas del modelo matemático propuesto por McCabe-Thiele a través del cual se determinó un número mínimo de 4 platos teóricos ante una relación de reflujo máxima y un número de 9 etapas teóricas ante las condiciones de diseño planteadas ($X_F=0,202$, $X_D=0,736$, $X_W=0,033$). Se seleccionó la instalación de 9 platos perforados para una torre de destilación de 0,2032 m de diámetro, 1,55 m de altura y un espaciamiento de 0,15 m entre platos. Para la construcción del resto de componentes del equipo se dimensionó un volumen de 18 L para el tanque de alimentación, 11,466 L para el condensador y 8,16 L para el acumulador del destilado.
- Se implementó un control automático en el sistema del hervidor del equipo, el mismo que es controlado mediante la lectura de un sensor de temperatura que envía la orden para que la resistencia calefactora se encienda o apague dependiendo de la diferencia entre el valor medido y el valor configurado y establecido al inicio de la operación. De manera complementaria se dispuso 3 termocuplas tipo J para los platos 1, 5 y 9 de la torre de destilación con la finalidad de medir las temperaturas en tiempo real y leerlas mediante un programa de uso libre llamado ThingSpeak, el cual refleja en una gráfica las temperaturas en función del tiempo. Para el sistema de recirculación se implementó un control de nivel al interior del acumulador del líquido destilado con el fin de abrir o cerrar la válvula de reflujo dependiendo del volumen almacenando.
- Para la validación del destilador se realizaron tres prácticas experimentales con condiciones iniciales similares (10 L de mezcla de alimentación a 49% V/V de etanol) y variando el porcentaje de apertura de la válvula manual de recirculación (0%, 50%, 100%). A partir de los resultados obtenidos de volúmenes y grados alcohólicos en cada producto se comprobó el correcto funcionamiento del equipo y, de igual forma, se determinó que el porcentaje de recuperación de etanol, el rendimiento volumétrico y la

eficiencia en grados alcohólicos son mayores en la práctica con recirculación al 100% de apertura de la válvula, obteniéndose unos valores de 84,86%, 49,5% y 71,43% respectivamente. Las diferencias mostradas con el resto de prácticas fueron de 7,88%, 3,5% y 4,08% para la práctica 1 (0% de apertura) y de 5,54%, 2,1 % y 4,08% para la práctica 2 (50% de apertura) respectivamente.

- Se creó un manual de uso del equipo construido para que el usuario que desee utilizarlo en futuras operaciones de destilación pueda manipular correctamente el encendido o apagado de la resistencia y circuito eléctrico, la configuración del control automático mediante el pre establecimiento de la temperatura límite en la pantalla táctil e inclusive para que pueda visualizar las gráficas dinámicas de temperatura de los 3 platos en la plataforma web de uso libre ThingSpeak. Como requisitos de partida para dar inicio a la operación de destilación se plantea de disponibilidad de una fuente de 220V, una corriente continua de agua fría para actuar como refrigerante y de una conexión a la red de internet que dé lugar a la recolección de datos de temperatura en la nube.

RECOMENDACIONES

- Para el diseño de una torre de destilación un tanto menos riguroso es recomendable utilizar el método gráfico de McCabe-Thiele debido a su menor complejidad de cálculo y a su gran aproximación con los datos exactos. Para la construcción considerar utilizar el tipo de plato perforado para la columna de destilación con el propósito de maximizar el contacto entre fases y tener mejor interacción entre la masa del vapor y la masa del líquido que ingresa con el reflujo.
- Utilizar acero inoxidable en la construcción de equipos que trabajen con líquidos permite minimizar el fenómeno de la corrosión y evitar un deterioro rápido del equipo. Además de su poca vulnerabilidad a la corrosión también es considerado un material lo suficientemente resistente a altas temperaturas o presiones.
- Colocar la mezcla líquida a separar en el hervidor antes de encender la resistencia con la intención de no deteriorarla. Del mismo modo no olvidar que el equipo funciona a una conexión de 220V con 12A y que al apagar el equipo se debe dejar bajados los breakers que se encuentran en el interior de la caja de control para prevenir problemas con la resistencia.
- Para la visualización de los datos de temperatura en los platos en función del tiempo el equipo debe estar conectado a una red wifi previamente configurada con las especificaciones puntuales que se indican en el manual de usuario. Caso contrario al no contar con conexión a internet no se podrá almacenar los datos de temperatura medidos.
- Al realizar la limpieza del equipo se debe tener cuidado al abrir las bisagras ya que puede aislarse el tornillo. De la misma manera se debe prevenir no tales medidas y de no ser así, se deberá contactar a la empresa que lo distribuye.

BIBLIOGRAFÍA

ANGULO BAHÓN, C. y RAYA GINER, C., 2004. *Tecnología de sistemas de control*. Barcelona: Edicions UPC. ISBN 84-8301-778-4.

BARRIENTOS FELIPA, P., 2014. Los biocombustibles y la producción de etanol. *Pensamiento Crítico* [en línea], no. 9, pp. 115-136. ISSN 1728-502X. DOI 10.15381/pc.v9i0.9027. Disponible en: <http://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/econo/article/view/9027>.

BAUTISTA KURI, A., 2008. Cálculo de transmisión en elementos constructivos y temperatura de sus superficies. [en línea]. [Consulta: 21 febrero 2021]. Disponible en: <https://www.mundohvacr.com.mx/2008/07/calculo-de-transmision-en-elementos-constructivos-y-temperatura-de-sus-superficies/>.

BEEBE et al., 1942. Equilibria in Ethanol-Water System at Pressures Less Than Atmospheric. *Ind.Eng.Chem.* [en línea], vol. 34, pp. 1501-1504. Disponible en: [http://www.ddbst.com/en/EED/VLE/VLE Ethanol%3BWater.php](http://www.ddbst.com/en/EED/VLE/VLE%20Ethanol%3BWater.php).

BONILLA BERMEJO, S.M. y ALVAREZ MACIAS, D.A., 2011. *Diseño, construcción y puesta en marcha de una columna piloto de destilación de platos perforados con alimentación dual* [en línea]. S.l.: Universidad de Guayaquil. Disponible en: <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/2078/1/1065.pdf>.

BRICIO BARRIOS, E.E., 2015. *Implementación y Análisis de Estrategias Numéricas Estocásticas de Optimización Global sobre Esquemas de Control de Procesos* [en línea]. S.l.: Instituto Tecnológico de Aguascalientes. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Elena-Bricio-Barrios/publication/281154965_IMPLEMENTACION_Y_ANALISIS_DE ESTRATEGIAS NUMERICAS_ESTOCASTICAS_DE_OPTIMIZACION_GLOBAL_SOBRE_ESQUEMAS_DE_CONTROL_DE_PROCESO/links/55d9272d08aeb38e8a87c7b2/IMPLEMENTACION-Y-ANA.

BRITO, H., 2001. *Texto básico de Operaciones unitarias II*. Riobamba: s.n.

CENGEL, Y.A. y BOLES, M.A., 2011. *Thermodynamics. An Engineering Approach*. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc.

Chemical Engineering and Materials Research Information Center, 2007. Binary Vapor-Liquid Equilibrium Data. *CHERIC* [en línea]. [Consulta: 20 noviembre 2020]. Disponible en: <https://www.thermo.com/research/kdb/hcvle/showvle.php?vleid=475>.

COVA, W.J.D., 2005. Control PID Un Enfoque Descriptivo. [en línea]. Buenos Aires: Disponible en: http://www.frlr.utn.edu.ar/archivos/alumnos/electronica/catedras/38-sistemas-de-control-aplicado/Publicaciones/Control_PID_Enfoque_Descriptivo.pdf.

DURO CARRALERO, N. y MORILLA GARCÍA, F., 2013. Modelado y simulación de columnas binarias de destilación con control de inventario. [en línea]. [Consulta: 16 enero 2021]. Disponible en: http://www.dia.uned.es/~fmorilla/Web_FMorilla_Julio_2013/Ultimas_publicaciones/2001_CD_MMSS2001.pdf.

GARCÍA ARMARIO, G., 2017. *Modelado y Control Avanzado de una Columna de Destilación*. S.l.: Universidad de Sevilla.

GEANKOPLIS, C.J., 1998. *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. 3°. Mexico: Compañía Editorial Continental.

GELVÉZ-AROCHA et al., 2012. Estudio Experimental de las Estrategias de Control On-Off y Control Continuo en un Sistema de Refrigeración. *Revista UIS Ingenierías* [en línea], vol. 11, no. 1, pp. 73-82. Disponible en: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias/article/view/73-82/3418>.

GÓRAK, A. y SORENSEN, E., 2014. *Distillation* [en línea]. London: Elsevier Inc. ISBN 9780123865472. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/C20100669239>.

HERGER, L.M. y BODARKY, M., 2015. Engaging Students with Open Source Technologies and Arduino. *IEEE Integrated STEM Education Conference*. S.l.: s.n., pp. 27-32.

HERNÁNDEZ, L. del V., 2017. NodeMCU tutorial paso a paso desde cero. [en línea]. Disponible en: <https://programarfacil.com/podcast/nodemcu-tutorial-paso-a-paso/#:~:text=NodeMCU no es un microcontrolador,de placas sería el siguiente>.

HINES, A. y MADDOX, R., 1984. *Transferencia de Masa. Fundamentos y Aplicaciones*. México: Prentice-Hall Hispanoamericana S.A.

ICAI, 2015. Sistemas Dinámicos. Máster Ingeniería Industrial. [en línea]. Madrid: Disponible en: https://www.cartagena99.com/recursos/alumnos/apuntes/Cap_3_SD.pdf.

INCROPERA, F.P. y DEWITT, D.P., 1999. *Fundamentos de la Transferencia de Calor*. 4°. Mexico: Prentice Hall.

KHALIL, H.K., 2001. *Nonlinear Systems*. 3°. S.l.: Pearson. ISBN 978-0130673893.

LABARTA, J.A., 2001. *Diseño de columnas de rectificación y extracción multicomponente: cálculo del reflujo mínimo* [en línea]. S.l.: Universidad de Alicante. Disponible en: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/10023/6/Reyes-Labarta-Juan-Antonio_5.pdf.

LAROZE, D., 2016. Sobre la importancia de sistemas no lineales en ciencias e ingeniería. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería* [en línea], vol. 24, no. 3. DOI <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052016000300001>. Disponible en: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052016000300001.

LÁZARO CASTILLO, I.I., 2008. *Indeniería de sistema de control continuo* [en línea]. Morelia: s.n. Disponible en: http://isidrolazaro.com/wp-content/uploads/2013/01/Preview_Control_Continuo_1ed.pdf.

MASCARELL MIGUÉLEZ, J.J., 2017. *Diseño de una columna de rectificación a vacío para la obtención de cerveza de bajo contenido alcohólico a partir de cervezas artesanales*. S.l.: Universidad de Cádiz.

MAZZONE, V., 2002. Controladores PID. [en línea]. Bernal: Disponible en: <https://www.eng.newcastle.edu.au/~jhb519/teaching/caut1/Apuntes/PID.pdf>.

MCCABE, W.L. y THIELE, E.W., 1925. Graphical Design of Fractionating Columns. *Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 17, no. 6, pp. 605-611.

MUÑOZ LLAMUCA, F.G. y TORRES TORRES, V.S., 2017. *Diseño y construcción de inductores de baja potencia de fabricación nacional aplicada en válvulas solenoides* [en línea]. S.l.: Escuela Superior Politécnica del Litoral. Disponible en: <https://www.dspace.espol.edu.ec/retrieve/128703/D-CD88631.pdf>.

NARVÁEZ GARCÍA et al., 2013. Método corto para la destilación discontinua multicomponente considerando una política de reflujo variable. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* [en línea], vol. 12, no. 3, pp. 621-637. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmiq/v12n3/v12n3a23.pdf>.

NAVAS HERRERA, S.J., 2014. *Control de Columnas de Destilación*. Sevilla: Departamento de Ingeniería Química y Ambiental Escuela Técnica Superior de Ingenieros Universidad de Sevilla.

NPTEL, [sin fecha]. Process Design of Mass Transfer Column: Design of Distillation and Absorption Column. [en línea]. [Consulta: 7 diciembre 2020]. Disponible en: <https://nptel.ac.in/content/storage2/courses/103103027/pdf/mod7.pdf>.

OGATA, K., 2003. *Ingeniería de Control Moderna*. 4°. Madrid: Pearson Educación. ISBN 84-205-3678-4.

ORTIZ CALDERON, J. y PINZON CASTILLO, X., 2007. *Rediseño de la Columna de Destilación del Laboratorio de Operaciones Unitarias a Proceso Continuo y la posterior Adaptación de un Filtro Molecular para la Obtención de Alcohol Anhidro* [en línea]. S.l.: Universidad de Guayaquil. Disponible en:

<http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/1610/1/998.pdf>.

PEREZ et al., 2008. *Introducción a los sistemas de control y modelo matemático para sistemas lineales invariantes en el tiempo*. [en línea]. San Juan: s.n. Disponible en: <http://dea.unsj.edu.ar/control1b/teoria/unidad1y2.pdf>.

PÉREZ ONES et al., 2010. Evaluación de propiedades físicas de mezclas etanol-agua (II). *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia* [en línea], no. 52, pp. 62-74. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0120-62302010000200006&lng=es&nrm=is&tlng=es.

PÉREZ SÁNCHEZ, J.L., 2007. *Diseño de una planta para la separación de parafinas lineales procedentes de queroseno*. S.l.: Universidad de Cádiz.

PERRY, R.H. y GREEN, D.W., 1997. *Perry's Chemical Engineer's Handbook*. Séptima. S.l.: Editorial McGraw-Hill Companies.

REYES SIERRA, H.I. y MONTAÑA ORTEGA, M.F., 2010. *Modelamiento y Control Digital de Temperatura para Horno Eléctrico* [en línea]. S.l.: Pontificia Universidad Javeriana. Disponible en: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/7044/tesis489.pdf;jsessionid=76A648DADB23FE2F9420986DF47835C2?sequence=1>.

RICHARDSON, J.F., 2002. *Particle technology and separation processes*. Oxford: Elsevier Ltd.

SMALLWOOD, I.M., 2002. *Solvent Recovery Handbook*. Segunda. S.l.: Wiley-Blackwell. ISBN 0632056479.

SMITH, C.A. y CORRIPIO, A.B., 2012. *Control Automático de Procesos. Teoría y Práctica*. S.l.: Limusa (Noriega Editores). ISBN 6070507215.

SUÁREZ CERQUERA, A. y CASTILLO ACOSTA, C., 2016. Separación de una mezcla binaria etanolagua en columna de destilación de platos UDCC por densimetría. *Ontare. Revista de Investigación de la Facultad de Ingeniería*, vol. 3, no. 2, pp. 161-174.

TAPIA AYALA, C.H. y MANZANO YUPA, H.M., 2013. *Evaluación de la Plataforma Arduino e Implementación de un Sistema de Control de Posición Horizontal* [en línea]. S.l.: Universidad Politécnica Salesiana. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5522/1/UPS-GT000511.pdf>.

TREYBAL, R.E., 1981. *Mass Transfer Operations*. Tercera. S.l.: Editorial McGraw-Hill, Inc.

TURTON et al., 2012. *Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes* [en línea]. New Jersey: Pearson Education, Inc. ISBN 0-13-261812-5. Disponible en:

<https://ptgmedia.pearsoncmg.com/images/9780132618120/samplepages/0132618125.pdf>.

URBINA DEL RASO, A., 1990. El método de McCabe-Thiele según lo impartía el maestro Estanislao Ramírez. *Educación Química* [en línea], vol. 1, no. 4, pp. 181. Disponible en: <http://revistas.unam.mx/index.php/req/article/view/66979/58875>.

VALIENTE BARDERAS, A., 2010. *Destilación por el método de Mc Cabe – Thiele* [en línea]. México D.F.: Departamento de Ingeniería Química - UNAM, C.U. Disponible en: https://www.academia.edu/22317664/Destilación_por_el_método_de_Mc_Cabe_Thiele.

VEGA et al., 2014. Experiencias de aprendizaje en Ingeniería Química: diseño, montaje y puesta en marcha de una unidad de destilación a escala laboratorio mediante el aprendizaje basado en problemas. *Formación Universitaria*, vol. 7, no. 1.

WIKA S.A.U, 2019. Sensor de nivel Versión en acero inoxidable, para aplicaciones industriales Modelo RLT-1000. *WIKA Alexander Wiegand SE & Co. KG* [en línea]. Disponible en: https://www.wika.com.ar/upload/DS_LM5002_es_es_81717.pdf.

ZUJEW, C.A., 2019. Máquinas eléctricas de Corriente Continua. [en línea]. Disponible en: http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/73931/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

ANEXOS

ANEXO A. PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO



a)



b)



c)



d)

NOTAS:		CATEGORIA DEL DIAGRAMA:	ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS CARRERA DE INGENIERIA QUIMICA ELABORADO POR: Chunata Marlon; Silva Anthony, 2021	PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO		
				LÁMINA	ESCALA	FECHA
a)	Construcción de los platos perforados	<input type="checkbox"/> Aprobado <input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/> Información <input type="checkbox"/> Preliminar <input type="checkbox"/> Por aprobar <input checked="" type="checkbox"/> Por calificar	1	1:5	03/01/2021	
b)	Soldado de los 9 platos perforados en las tres secciones de la columna					
c)	Ensamblaje de las tres secciones de la columna con el uso de abrazaderas					
d)	Construcción final del condensador y el tanque de recirculación					

ANEXO B. PRUEBAS EXPERIMENTALES DE DESTILACIÓN



a)



b)



c)



d)

NOTAS:

- a) Encendido del equipo y configuración de la temperatura límite de operación.
- b) Puesta en funcionamiento del equipo junto con la corriente de agua como refrigerante.
- c) Medición de los grados alcohólicos °GL de los productos.
- d) Determinación de la densidad del destilado.

CATEGORIA DEL DIAGRAMA:

- Aprobado
- Certificado
- Información
- Preliminar
- Por aprobar
- Por calificar

**ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA
DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS**

CARRERA DE INGENIERIA QUIMICA

ELABORADO POR:

Chunata Marlon; Silva Anthony, 2021

PRUEBAS EXPERIMENTALES DE
DESTILACIÓN

LÁMINA

ESCALA

FECHA

1

1:5

02/03/2021

ANEXO C. PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DEL ETANOL Y AGUA

TABLA A-3

Propiedades de líquidos, sólidos y alimentos comunes

a) Líquidos

Sustancia	Datos de ebullición a 1 atm		Datos de congelación		Propiedades de líquidos		
	Punto de ebullición normal, °C	Calor latente de vaporización h_{fg} , kJ/kg	Punto de congelación, °C	Calor latente de fusión h_{if} , kJ/kg	Temperatura, °C	Densidad ρ , kg/m ³	Calor específico c_p , kJ/kg · K
Aceite comestible (ligero)					25	910	1.80
Agua	100	2257	0.0	333.7	0	1000	4.22
					25	997	4.18
					50	988	4.18
					75	975	4.19
					100	958	4.22
Alcohol etílico	78.6	855	-156	108	20	789	2.84
Amoníaco	-33.3	1357	-77.7	322.4	-33.3	682	4.43
					-20	665	4.52
					0	639	4.60
					25	602	4.80
Argón	-185.9	161.6	-189.3	28	-185.6	1394	1.14
Benceno	80.2	394	5.5	126	20	879	1.72
n-Butano	-0.5	385.2	-138.5	80.3	-0.5	601	2.31
Dióxido de carbono	-78.4*	230.5 (a 0°C)	-56.6	—	0	298	0.59
Etanol	78.2	838.3	-114.2	109	25	783	2.46
Etilén glicol	198.1	800.1	-10.8	181.1	20	1109	2.84
Glicerina	179.9	974	18.9	200.6	20	1261	2.32
Helio	-268.9	22.8	—	—	-268.9	146.2	22.8
Hidrógeno	-252.8	445.7	-259.2	59.5	-252.8	70.7	10.0
Isobutano	-11.7	367.1	-160	105.7	-11.7	593.8	2.28
Mercurio	356.7	294.7	-38.9	11.4	25	13,560	0.139
Metano	-161.5	510.4	-182.2	58.4	-161.5	423	3.49
					-100	301	5.79
Metanol	64.5	1100	-97.7	99.2	25	787	2.55
Nitrógeno	-195.8	198.6	-210	25.3	-195.8	809	2.06
					-160	596	2.97
Octano	124.8	306.3	-57.5	180.7	20	703	2.10
Oxígeno	-183	212.7	-218.8	13.7	-183	1141	1.71
Petróleo	—	230-384	—	—	20	640	2.0
Propano	-42.1	427.8	-187.7	80.0	-42.1	581	2.25
					0	529	2.53
					50	449	3.13
Queroseno	204-293	251	-24.9	—	20	820	2.00
Refrigerante 134a	-26.1	217.0	-96.6	—	-50	1443	1.23
Salmuera (20% de cloruro de sodio a base másica)	103.9	—	-17.4	—	20	1150	3.11
					-26.1	1374	1.27
					0	1295	1.34
					25	1207	1.43

* Temperatura de sublimación. (A presiones por debajo de la presión de punto triple de 518 kPa, el dióxido de carbono existe como un sólido o un gas. También, la temperatura de punto de congelamiento del dióxido de carbono es la temperatura de punto triple de -56.5°C.)

ANEXO D. HOJA DE CÁLCULO EN EXCEL REALIZADA PARA EL DISEÑO DEL EQUIPO

Excel interface showing the design of the equipment. The spreadsheet includes the following data and calculations:

Pressure: 548,5 mmHg, 0,72 atm

Properties at 1 atm and 25°C:

	Etanol	Agua
Densidad (g/ml)	0,789	0,997
Peso Molecular	46,07	18,02

Process Parameters:

Parámetro	% Vol. de Etanol	Flujo (L/h)	Fracción Molar (X)	Alimentación	Litros/h	moles/h	Residuo	Litros/h	moles/h	Destilado	Litros/h	moles/h
Composición Alimentación	45	4,50	0,202	Etanol	4,5	77,0675	Etanol	0,56250	9,6334	Etanol	3,93750	67,4341
Composición Residuo	10	0,56	0,033	Agua	5,5	304,3008	Agua	5,06250	280,0950	Agua	0,43750	24,2057
Composición Destilado	90	3,94	0,736	Total	10	381,3683	Total	5,62500	289,7285	Total	4,37500	91,6398
Caudal de Alimentación (L)	10											

Balance de Materia:

	D	B	F
1	1	1	10
0,9	0,9	0,1	4,5

Matriz Inversa:

-0,125	1,25
1,125	-1,25

Equations:
 $D + B = F$
 $X_D D + X_B B = X_F F$

Diagrama: A schematic diagram of a distillation column with two trays. Inlet F (L) enters at the bottom, and outlet D (L) exits from the top. The bottom product is W (L) and the top product is X (L).

Table 1. Volatilidades relativas del etanol en los sistemas:

Mixtura	Volatilidad relativa
Etanol-Agua	1,00
Etanol-Agua-Etanol	1,37
Etanol-Agua-Etanol-PAN	4,99
Etanol-Agua-Etanol-PAN-CaCl ₂	1,15
Etanol-Agua-Etanol-PAN-KCO ₃ K	4,81

Excel interface showing the design of the equipment. The spreadsheet includes the following data and calculations:

Reflujo Mínimo (R_{min}):

m LOR	b LOR	min
0,3884706	0,45	
0,736	0,736	
0	0,45	

Reflujo de Operación R:

R _{min}	0,635
R/R _{min}	1,5
R	0,95

Balances Internos:

F	D	B	q	R	L _n	V _n	L _m	V _m
381,368	91,640	289,728	1,1137	0,952867	87,320509	178,960	512,0504	222,322

Líneas de Operación:

LOR	m LOR	b LOR	LOS	m LOS	b LOS	LOF	m LOF	b LOF
	0,736	0,736		0,487932	0,37681		3,795075	-1,777323
	0,231449425	0,489742		2,303194	-0,043331			
	0,033	0,033						
	0,231449425	0,489742						

Equations:
 $L_m = V_m + B$
 $V_n = L_n + D$
 $L_n = D + R$
 $V_n = V_m + (1 - q)F$
 $L_m = L_n + q \cdot F$
 $q = \frac{L_m - L_n}{F}$

Diagrama: A schematic diagram of a distillation column with two trays. The top tray has inlet Y_{1,0} X_{1,0} and outlet Y_{1,1} X_{1,1}. The bottom tray has inlet Y_{2,0} X_{2,0} and outlet Y_{2,1} X_{2,1}. The feed is F and the bottom product is B.

Equations for Tray Balances:

$$y_{1,0} = m_{LOR} x_{1,0} + b_{LOR}$$

$$y_{1,1} = \frac{L_n}{V_n} x_{1,1} + \frac{D + xD}{V_n}$$

$$y_{2,0} = \frac{R}{R+1} x_{2,0} + \frac{xD}{R+1}$$

$$y_{2,1} = m_{LOF} x_{2,1} + b_{LOF}$$

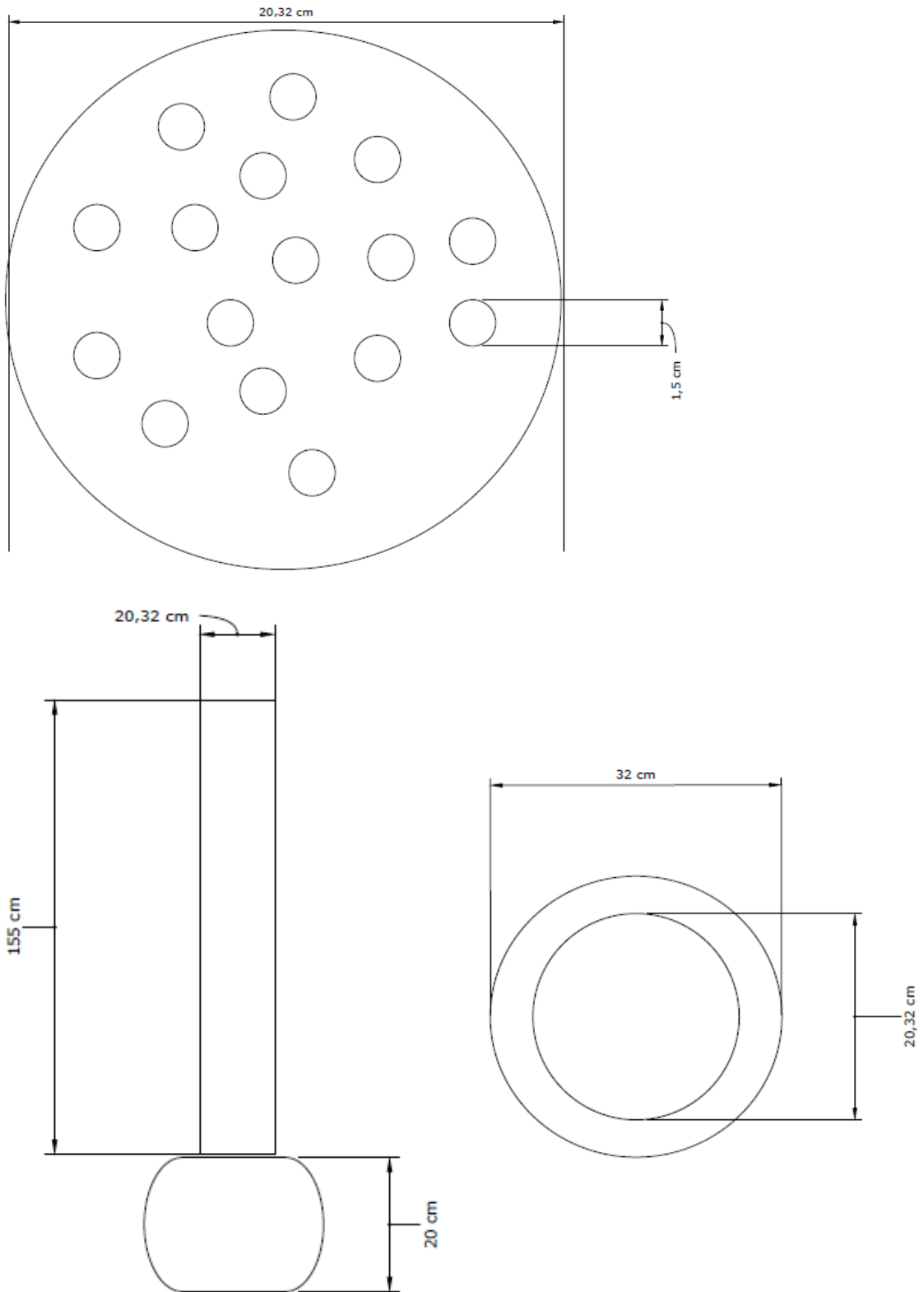
$$y_{2,0} = \frac{q}{q-1} x_{2,0} - \frac{x}{q-1}$$

$$y_{2,1} = m_{LOS} x_{2,1} + b_{LOS}$$

$$y_{2,0} = \frac{1+R}{R} x_{2,0} + \frac{xB}{R}$$

$$y_{2,1} = \frac{L_m}{V_m} x_{2,1} + \frac{B + xB}{V_m}$$

ANEXO E. PLANOS DE DISEÑO DE LOS PLATOS PERFORADOS, DE LA TORRE DE DESTILACIÓN Y DEL TANQUE DE ALIMENTACIÓN



ANEXO F. MANUAL DE OPERACIÓN DEL EQUIPO

Previo Encendido

- Colocar el líquido en el hervidor verificando que la llave de desfogue este completamente cerrada.
- Conectar el equipo a la fuente que proporciona el voltaje de 220V.
- Abrir la caja de control para subir los breakers que manejan la resistencia y el sistema eléctrico de la caja.
- Colocar las mangueras en el sistema que se va a utilizar para la condensación.

Encendido

- Cerrar la caja de control y con el contactor superior de color negro que se encuentran en la parte de afuera de la caja encender la pantalla girando estos hacia la derecha.
- Colocar la temperatura base en la cual se va a operar el equipo en el botón táctil que dice Set Point, esta no debe sobrepasar los 130° C.
- Regresar al menú de opciones, luego presionar el botón que dice temperatura para observar que la termocupla si arroje una temperatura.
- Con el contactor de color negro que se encuentra en la parte inferior de la caja encender la resistencia.
- Encender el sistema de enfriamiento que se va a utilizar.

Graficas en App

- Descargar la aplicación que lleva como nombre ThingView en el caso se IOS y para Android se le encuentra con el nombre de ThingShow
- Encender el modo Mobile Hotspot o zona portátil y anclaje de red. En el nombre de red se debe ingresar “stvz” con la siguiente contraseña “123456789”.
- Abrir la aplicación que se descargó previamente, presionar el botón (+) en el cual se desplegará un registro, donde se debe desactivar la opción “Public”.
- En el apartado “Channel ID” se colocará lo siguiente “1289563” y como contraseña “VBX1WWC3FQUYGV67” y finalmente se da al botón buscar.

Graficas en PC

- Encender el computador y por medio de la red inalámbrica conectarse a la misma red wifi del teléfono móvil.
- Abrir el buscador de Google y colocar la siguiente dirección www.thingspeak.com,
- Colocarse en el apartado que dice “Sign In” en cual se procede a iniciar sesión.
- En el cuadro que dice “Email” colocar lo siguiente temperatura_DB@hotmail.com.
- Una vez ingresado el correo pedirá una contraseña donde se va a escribir la siguiente “Tem12345.” Y para finalizar darle al botón “Enter”.

- Al entrar a la página colocarse en un canal que lleva el nombre de “Temperaturas” y al pulsar en el apartado que dice “Privado” se puede visualizar las tres gráficas.

Características de las Gráficas

- Cada una de las gráficas lleva el nombre de la termocupla que está midiendo.
- La gráfica se muestra en un plano cartesiano en el cual la región de las abscisas está el rango de tiempo y, por consiguiente, en el de las ordenadas está el valor de la temperatura que lee.
- Si se desea cambiar el rango de medición de tiempo se debe ubicar en la parte superior de cada gráfica, presionar el botón que dice “Chart Options”.
- Se desplegará un menú donde el cambio debe realizarse en el apartado que lleva por nombre “Results”.

Exportación de Datos

- En la parte superior de la página se encuentra un menú de opciones, presionar en el botón “Data/Import/Export/”.
- Se desplegará un menú, en el lugar donde dice “Export” darle al botón de download, se empezará a descargar un documento en formato CSV el cual será visible en Excel.

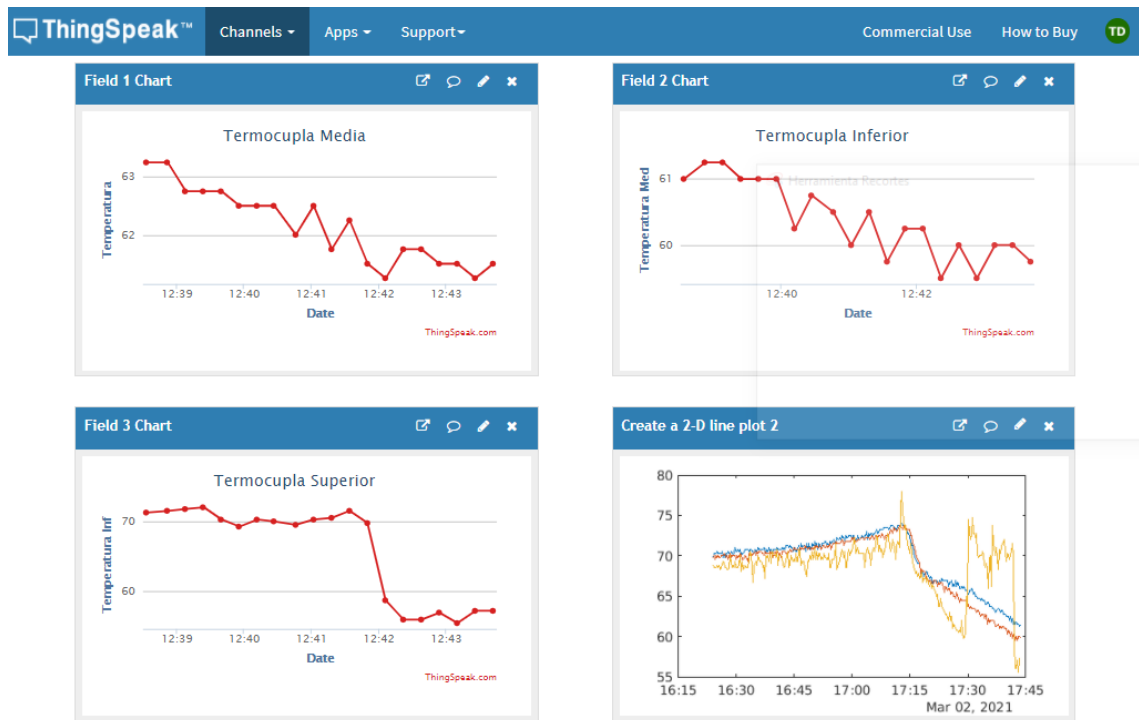
Apagado del equipo

- Girar a la izquierda el controlador inferior que pertenece a la resistencia eléctrica.
- Bajar el breaker mas grande que esta en el interior de la caja.
- Dejar que se enfríe completamente el equipo.
- Cerrar o apagar el sistema de enfriamiento, posteriormente vaciar el tanque de condensación.
- Vaciar el hervidor con el líquido restante, así como también el acumulador.
- Lavar con agua el hervidor, después girar a la izquierda el controlador superior.
- Desconectar de la fuente de 220 V y posteriormente bajar el breaker restante.

Limpieza

- Después de apagar completamente el equipo, con cuidado sacar el tornillo de la bisagra inferior, lavar bien el hervidor.
- Los útiles necesarios para limpiar son: trapos, jabón, estropajo (de ser necesario), agua.
- Asegurar las bisagras bien con los empaques.

ANEXO G. PLATAFORMA WEB “THINGSPEAK”



The screenshot shows the ThingsSpeak web interface with the MATLAB code editor open for the "Create a 2-D line plot 2" visualization. The interface includes a top navigation bar, a breadcrumb trail, a "Name" field, a "MATLAB Code" editor, and a "Channel Info" sidebar.

Name: Create a 2-D line plot 2

MATLAB Code:

```

1 % Template MATLAB code for visualizing data from a channel as a 2D line
2 % plot using PLOT function.
3
4 % Prior to running this MATLAB code template, assign the channel variables.
5 % Set 'readChannelID' to the channel ID of the channel to read from.
6 % Also, assign the read field ID to 'fieldID1'.
7
8 % TODO - Replace the [] with channel ID to read data from:
9 readChannelID = 1289563;
10 % TODO - Replace the [] with the Field ID to read data from:
11 fieldID1 = [];
12
13 % Channel Read API Key
14 % If your channel is private, then enter the read API
15 % Key between the '' below:
16 readAPIKey = 'NS1Y6XQD19C8CIZV';
17
18 %% Read Data %%
19
20 [data, time] = thingSpeakRead(readChannelID, 'Field', fieldID1, 'NumPoints', 300, 'ReadKey', r
21
22
23 %% Visualize Data %%
24
25 plot(time, data);

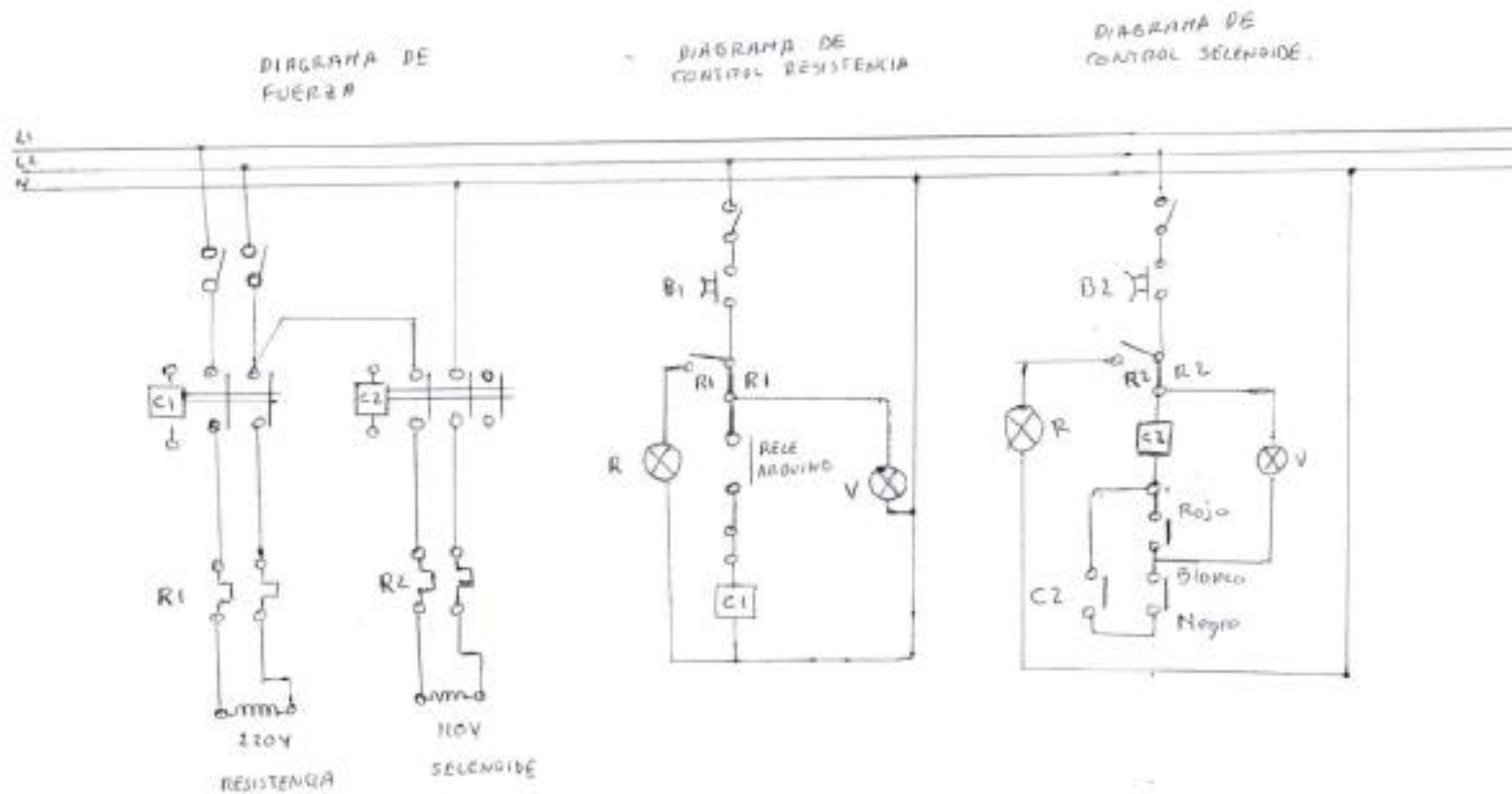
```

Channel Info:

- Name: Temperaturas
- Channel ID: 1289563
- Access: Private
- Read API Key: NS1Y6XQD19C8CIZV
- Write API Key: VBX1W3FQYGV67
- Fields:
 - 1: Temperatura Sup
 - 2: Temperatura Med
 - 3: Temperatura Inf

Buttons: Save and Run, Save

ANEXO H. ESQUEMA DEL CIRCUITO ELÉCTRICO EN EL EQUIPO



ANEXO I. PROGRAMACIÓN EN ARDUINO DE LOS SENSORES DE TEMPERATURA

```
temperatura_3_sensores-esp8626

#include "max6675.h"
MAX6675 ts(D6, D7, D8);
MAX6675 ts1(D0, D1, D2);
MAX6675 ts2(D3, D4, D5);
#include <ESP8266WiFi.h>
#include "secrets.h"
#include "ThingSpeak.h" // always include thingspeak header file after other header files and custom macros

char ssid[] = "stvz"; // your network SSID (name)
char pass[] = "123456789"; // your network password
int keyIndex = 0; // your network key Index number (needed only for WEP)
WiFiClient client;

unsigned long myChannelNumber = 1289563;
const char * myWriteAPIKey = "VBX1WWC3FQUYGV67";

// Initialize our values
float number1 = 0;
float number2 = 0;
float number3 = 0;

String myStatus = "";

void setup() {
  Serial.begin(115200); // Initialize serial
  while (!Serial) {
    ; // wait for serial port to connect. Needed for Leonardo native USB port only
  }

  WiFi.mode(WIFI_STA);
  ThingSpeak.begin(client); // Initialize ThingSpeak
}

void loop() {

  // Connect or reconnect to WiFi
  if(WiFi.status() != WL_CONNECTED){
    Serial.print("Attempting to connect to SSID: ");
    Serial.println(SECRET_SSID);
    while(WiFi.status() != WL_CONNECTED){
      WiFi.begin(ssid, pass); // Connect to WPA/WPA2 network. Change this line if using open or WEP network
      Serial.print(".");
      delay(5000);
    }
    Serial.println("\nConnected.");
  }

  // set the fields with the values
  ThingSpeak.setField(1, number1);
  ThingSpeak.setField(2, number2);
  ThingSpeak.setField(3, number3);

  // figure out the status message
  if(number1 > number2){
    myStatus = String("field1 is greater than field2");
  }
  else if(number1 < number2){
    myStatus = String("field1 is less than field2");
  }
  else{
    myStatus = String("field1 equals field2");
  }

  // set the status
  ThingSpeak.setStatus(myStatus);
}
```



```
// write to the ThingSpeak channel
int x = ThingSpeak.writeFields(myChannelNumber, myWriteAPIKey);
if(x == 200){
    Serial.println("Channel update successful.");
}
else{
    Serial.println("Problem updating channel. HTTP error code " + String(x));
}

// change the values
number1=ts.readCelsius();
Serial.println(ts.readCelsius(), 2);
number2 = tsl.readCelsius();
Serial.println(tsl.readCelsius(), 2);

// write to the ThingSpeak channel
int x = ThingSpeak.writeFields(myChannelNumber, myWriteAPIKey);
if(x == 200){
    Serial.println("Channel update successful.");
}
else{
    Serial.println("Problem updating channel. HTTP error code " + String(x));
}

// change the values
number1=ts.readCelsius();
Serial.println(ts.readCelsius(), 2);
number2 = tsl.readCelsius();
Serial.println(tsl.readCelsius(), 2);
number3 = ts2.readCelsius();
Serial.println(ts2.readCelsius(), 2);

delay(15000); // Wait 20 seconds to update the channel again
}
```

ANEXO J. PROGRAMACIÓN EN ARDUINO DE LA PANTALLA TÁCTIL

```
touch_original

#include <UTFT.h>
#include <URTouch.h>
#include "max6675.h"
#include <EEPROM.h>
//==== Creating Objects
//setPoint//
float SetPoint;
int eeAddress = 0;

UTFT myGLCD(ILI9341_16,38,39,40,41); //Parameters should be adjusted to your Display/Schield model
URTouch myTouch( 6, 5, 4, 3, 2);
//==== Defining Variables
float tem;
extern uint8_t SmallFont[];
extern uint8_t BigFont[];
extern uint8_t SevenSegNumFont[];
extern unsigned int bird01[0x41A];
int x, y;
char currentPage, selectedUnit;
//Ultrasonic Sensor
const int VCC = 13;
//const int trigPin = 11;
//const int echoPin = 12;
MAX6675 ts(10, 11, 12);
long duration;
int distanceInch, distanceCm;
// RGB LEDs
const int redLed = 9;

const int greenLed = 9;
const int Rele = 8;
int xR=38;
int xG=38;
int xB=38;
// Floppy Bird
int xP = 319;
int yP = 100;
int yB = 30;
int fallRateInt = 0;
float fallRate =0;
int score=0;
const int button = 14;
int buttonState = 0;
void setup() {
// Initial setup
SetPoint=EEPROM.get( eeAddress, SetPoint );
Serial.begin(9600);
myGLCD.InitLCD();
myGLCD.clrScr();
myTouch.InitTouch();
myTouch.setPrecision(PREC_MEDIUM);
// Defining Pin Modes
pinMode(VCC, OUTPUT); // VCC
// pinMode(trigPin, OUTPUT); // Sets the trigPin as an Output
// pinMode(echoPin, INPUT); // Sets the echoPin as an Input
pinMode(redLed, OUTPUT);
```

```

pinMode(greenLed, OUTPUT);
pinMode(Rele, OUTPUT);
pinMode(button, INPUT);
digitalWrite(VCC, HIGH); // +5V - Pin 13 as VCC
digitalWrite(Rele, HIGH);
drawHomeScreen(); // Draws the Home Screen
currentPage = '0'; // Indicates that we are at Home Screen
selectedUnit = '0'; // Indicates the selected unit for the first example, cms or inches
}
void loop() {
  tem=ts.readCelsius();
  delay(250);

  if(tem<=(SetPoint-3)){
    digitalWrite(Rele, LOW);
    delay(1000);
  }

  if(tem>=SetPoint){
    digitalWrite(Rele, HIGH);
    delay(1000);
  }
  // Home Screen
  if (currentPage == '0') {
    if (myTouch.dataAvailable()) {
      myTouch.read();
      x=myTouch.getX(); // X coordinate where the screen has been pressed
      y=myTouch.getY(); // Y coordinates where the screen has been pressed
      // If we press the Distance Sensor Button
      if ((x>=35) && (x<=285) && (y>=90) && (y<=130)) {
        drawFrame(35, 90, 285, 130); // Custom Function -Highlights the buttons when it's pressed
        currentPage = '1'; // Indicates that we are the first example
        myGLCD.clrScr(); // Clears the screen
        drawDistanceSensor(); // It is called only once, because in the next iteration of the loop, this
      }
      // If we press the RGB LED Control Button
      if ((x>=35) && (x<=285) && (y>=48) && (y<=84)) {
        drawFrame(35, 140, 285, 180);
        currentPage = '2';
        myGLCD.clrScr();
        drawLedControl();
      }
    }
  }
  // Distance Sensor Example
  if (currentPage == '1') {

    getDistance(); // Gets distance from the sensor and this function is repeatedly called while we are

    if (myTouch.dataAvailable()) {
      myTouch.read();
      x=myTouch.getX();
      y=myTouch.getY();
      Serial.println(myTouch.getX());
      Serial.println(myTouch.getY());
      // If we press the Centimeters Button
      if ((x>=10) && (x<=78) && (y>=68) && (y<=99)) {
        selectedUnit = '0';
      }
      // If we press the Inches Button
      if ((x>=10) && (x<=80) && (y>=28) && (y<=56)) {
        selectedUnit = '1';
      }
      // If we press the Back Button
      if ((x>=10) && (x<=135) && (y>=178) && (y<=211)) {
        drawFrame(10, 10, 60, 36);
        currentPage = '0'; // Indicates we are at home screen
        myGLCD.clrScr();
        drawHomeScreen(); // Draws the home screen
      }
    }
  }
}

```

```

// RGB LED Control
if (currentPage == '2') {
  setLedColor();
  if (myTouch.dataAvailable()) {
    myTouch.read();
    x=myTouch.getX();
    y=myTouch.getY();
    Serial.println(myTouch.getX());
    Serial.println(myTouch.getY());
    // If we press the Centimeters Button
    if ((x>=10) && (x<=78) &&(y>=68) && (y<=99)) {
      selectedUnit = '0';
      SetPoint=SetPoint+1;
    }
    // If we press the Inches Button
    if ((x>=10) && (x<=80) &&(y>=28) && (y<=56)) {
      selectedUnit = '1';
      SetPoint=SetPoint-1;
    }
    // If we press the Back Button
    if ((x>=10) && (x<=135) &&(y>=178) && (y<=211)) {

      drawFrame(10, 10, 60, 36);
      EEPROM.put( eeAddress, SetPoint );
      currentPage = '0'; // Indicates we are at home screen
      myGLCD.clrScr();
      drawHomeScreen(); // Draws the home screen
    }
  }
}

// ===== Custom Funtions =====
// drawHomeScreen - Custom Function
void drawHomeScreen() {
  // Title
  myGLCD.setBackgroundColor(0,0,0); // Sets the background color of the area where the text will be printed to
  myGLCD.setColor(255, 255, 255); // Sets color to white
  myGLCD.setFont(BigFont); // Sets font to big
  myGLCD.print("CONTROL TEMPERATURA", CENTER, 10); // Prints the string on the screen
  myGLCD.setColor(255, 0, 0); // Sets color to red
  myGLCD.drawLine(0,32,319,32); // Draws the red line
  myGLCD.setColor(255, 255, 255); // Sets color to white
  myGLCD.setFont(SmallFont); // Sets the font to small
  myGLCD.print("CONSTRUCTORA TORRES", CENTER, 41); // Prints the string
  myGLCD.setFont(BigFont);
  myGLCD.print("MENU", CENTER, 64);

  // Button - TEMPERATURA
  myGLCD.setColor(16, 167, 103); // Sets green color
  myGLCD.fillRoundRect (35, 90, 285, 130); // Draws filled rounded rectangle
  myGLCD.setColor(255, 255, 255); // Sets color to white
  myGLCD.drawRoundRect (35, 90, 285, 130); // Draws rounded rectangle without a fill, so the overall app:
  myGLCD.setFont(BigFont); // Sets the font to big
  myGLCD.setBackgroundColor(16, 167, 103); // Sets the background color of the area where the text will be prii
  myGLCD.print("TEMPERATURA", CENTER, 102); // Prints the string

  // Button - SET POINT
  myGLCD.setColor(16, 167, 103);
  myGLCD.fillRoundRect (35, 140, 285, 180);
  myGLCD.setColor(255, 255, 255);
  myGLCD.drawRoundRect (35, 140, 285, 180);
  myGLCD.setFont(BigFont);
  myGLCD.setBackgroundColor(16, 167, 103);
  myGLCD.print("SET POINT", CENTER, 152);
}

// Highlights the button when pressed
void drawFrame(int x1, int y1, int x2, int y2) {
  myGLCD.setColor(255, 0, 0);
  myGLCD.drawRoundRect (x1, y1, x2, y2);
  while (myTouch.dataAvailable())
    myTouch.read();
  myGLCD.setColor(255, 255, 255);
  myGLCD.drawRoundRect (x1, y1, x2, y2);
}
//=====

```

```

void drawDistanceSensor() {
  myGLCD.setColor(100, 155, 203);
  myGLCD.fillRoundRect (10, 10, 60, 36);
  myGLCD.setColor(255, 255, 255);
  myGLCD.drawRoundRect (10, 10, 60, 36);
  myGLCD.setFont(BigFont);
  myGLCD.setBackgroundColor(100, 155, 203);
  myGLCD.print("<-", 18, 15);
  myGLCD.setBackgroundColor(0, 0, 0);
  myGLCD.setFont(SmallFont);
  myGLCD.print("Menu", 70, 18);
  myGLCD.setFont(BigFont);
  myGLCD.print("Temperatura", CENTER, 50);
  myGLCD.print("MAX-6675", CENTER, 76);
  myGLCD.setColor(255, 0, 0);
  myGLCD.drawLine(0,100,319,100);
  myGLCD.setBackgroundColor(0, 0, 0);
  myGLCD.setColor(255, 255, 255);
  myGLCD.setFont(SmallFont);
  myGLCD.print("Select Unit", 10, 114);
  myGLCD.setFont(BigFont);
  myGLCD.print("Temperatura:", 130, 120);

  myGLCD.setColor(223, 77, 55);
  myGLCD.fillRoundRect (10, 135, 75, 163);
  myGLCD.setColor(225, 255, 255);
  myGLCD.drawRoundRect (10, 135, 75, 163);
  myGLCD.setBackgroundColor(223, 77, 55);
  myGLCD.setColor(255, 255, 255);
  myGLCD.print("C", 33, 140);
  myGLCD.setColor(223, 77, 55);
  myGLCD.fillRoundRect (10, 173, 75, 201);
  myGLCD.setColor(255, 255, 255);
  myGLCD.drawRoundRect (10, 173, 75, 201);
  myGLCD.setBackgroundColor(223, 77, 55);
  myGLCD.setColor(255, 255, 255);
  myGLCD.print(" F", 17, 180);
}
//=====
//===== getDistance - Custom Function
void getDistance() {
  // Clears the trigPin

  // Reads the echoPin, returns the sound wave travel time in microseconds
  duration = ts.readCelsius();
  // Calculating the distance
  distanceCm= duration;
  distanceInch= distanceCm;

  // Prints the distance in centimeters
  if (selectedUnit == '0' && distanceCm <=400) {
    myGLCD.setFont(SevenSegNumFont);
    myGLCD.setColor(0, 255, 0);
    myGLCD.setBackgroundColor(0, 0, 0);
    myGLCD.printNumI( ts.readCelsius(),130, 145, 3,'0');
    delay(500);
    myGLCD.setFont(BigFont);
    myGLCD.print("C ", 235, 178);
  }
  // Prints the distance in inches
  if (selectedUnit == '1' && distanceCm <=160) {
    myGLCD.setFont(SevenSegNumFont);
    myGLCD.setColor(0, 255, 0);
    myGLCD.setBackgroundColor(0, 0, 0);
    myGLCD.printNumI(ts.readFahrenheit(),130, 145, 3,'0');
    myGLCD.setFont(BigFont);
    myGLCD.print("F", 235, 178);
  }
  delay(10);
}
//=====
void drawLedControl() {
  myGLCD.setColor(100, 155, 203);
  myGLCD.fillRoundRect (10, 10, 60, 36);
  myGLCD.setColor(255, 255, 255);

```

```

myGLCD.drawRoundRect (10, 10, 60, 36);
myGLCD.setFont(BigFont);
myGLCD.setBackgroundColor(100, 155, 203);
myGLCD.print("<-", 18, 15);
myGLCD.setBackgroundColor(0, 0, 0);
myGLCD.setFont(SmallFont);
myGLCD.print("Menu", 70, 18);
myGLCD.setFont(BigFont);
myGLCD.print("SetPoint", CENTER, 50);
myGLCD.print("MAX-6675", CENTER, 76);
myGLCD.setColor(255, 0, 0);
myGLCD.drawLine(0,100,319,100);
myGLCD.setBackgroundColor(0, 0, 0);
myGLCD.setColor(255, 255, 255);
myGLCD.setFont(SmallFont);
myGLCD.print("", 10, 114);
myGLCD.setFont(BigFont);
myGLCD.print("Temperatura:", 130, 120);
myGLCD.setColor(223, 77, 55);
myGLCD.fillRoundRect (10, 135, 75, 163);
myGLCD.setColor(225, 255, 255);
myGLCD.drawRoundRect (10, 135, 75, 163);
myGLCD.setBackgroundColor(223, 77, 55);
myGLCD.setColor(255, 255, 255);

myGLCD.print(" -", 17, 180);
}
//=====
//===== setLedColor() - Custom Funtion
void setLedColor() {
  duration = ts.readCelsius();
  // Calculating the distance
  distanceCm= duration;
  distanceInch= distanceCm;
  // Prints the distance in centimeters
  if (selectedUnit == '0' && distanceCm <=400) {
    myGLCD.setFont(SevenSegNumFont);
    myGLCD.setColor(0, 255, 0);
    myGLCD.setBackgroundColor(0, 0, 0);
    myGLCD.printNumI( SetPoint,130, 145, 3,'0');
    delay(500);
    myGLCD.setFont(BigFont);
    myGLCD.print("C ", 235, 178);
  }

  if (selectedUnit == '1' && distanceCm <=160) {
    myGLCD.setFont(SevenSegNumFont);
    myGLCD.setColor(0, 255, 0);
    myGLCD.setBackgroundColor(0, 0, 0);
    myGLCD.printNumI(SetPoint,130, 145, 3,'0');
    myGLCD.setFont(BigFont);
    myGLCD.print("C", 235, 178);
  }
}
//=====
<

```

ANEXO K. CERTIFICADO DE ENTREGA Y VALIDACIÓN DEL EQUIPO



ESPOCH

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

Oficio No. 01. D.FC.2021
Riobamba, 26 de agosto de 2021

Ingenieros
COMISIÓN DE INTEGRACIÓN CURRICULAR
Presente.

De mi consideración:

Con un cordial saludo, mediante la presente me permito indicar que los estudiantes: *Marlon Gonzalo Chunata Manotoa* y *Anthony Eduardo Silva Sanaguano* con CI. 060551525-3 y 060576250-9 de la Carrera de Ingeniería Química realizaron la entrega del equipo Destilador tipo Bach, así como los manuales y documentos requeridos para el laboratorio de procesos Industriales, el cual se recibe en óptimas condiciones y fue previamente validado por su comisión como parte del trabajo de titulación denominado: "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DESTILADOR BATCH OPARA UNA MEZCLA BINARIA ETANOL-AGUA CON CONTROL AUTIMÁTICA".

Por su gentil atención y aceptación al presente anticipo mi sincero agradecimiento

Atentamente,



Ing. Carla Haro
TÉCNICO DE LABORATORIO



c.c. Estudiantes





ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE
CHIMBORAZO
DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS DEL
APRENDIZAJE



UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS
REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 21 / 10 / 2021

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)

Nombres – Apellidos: Marlon Gonzalo Chunata Manotoa
Anthony Eduardo Silva Sanaguano

INFORMACIÓN INSTITUCIONAL

Facultad: *Ciencias*

Carrera: Ingeniería Química

Título a optar: *Ingeniero Químico*

f. Analista de Biblioteca responsable: *Lic. Luis Caminos Vargas Mgs.*

SWQIA
QSOOUVU
OCF QLUU
XCEUOCU

OSU ASBUT 11eA
11 SWARECOUUA
OEF QULAUOCES
OEMO MEOARECOUUA
OEF QULAUOCES
MQUOOF OCE
11 QEF 11eA 11eA
11eA 11eA
11eA 11eA
11eA 11eA



1068-DBRA-UTP-2021