



**Diseño de una planta de producción de resina fenólica (espuma floral)**

Quiñonez Gómez, Edwin Alexander y Zevallos Cuzme, Angel Fabrizio

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Petroquímica

Trabajo de Unidad de Integración Curricular, previo a la obtención del título de  
Petroquímico

Ing. Sayavedra Delgado, Jonathan Javier. Msc

8 de abril del 2021



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE PETROQUÍMICA

CERTIFICACIÓN.

Certifico que el Trabajo de Unidad de Integración Curricular, "Diseño de una planta de producción de resina fenólica (espuma floral)" fue realizado por los señores Quiñonez Gómez Edwin Alexander y Zevallos Cuzme Angel Fabrizio, el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 30 de marzo del 2021.



Firmado electrónicamente por:  
JONATHAN JAVIER  
SAYAVEDRA DELGADO

Ing. Sayavedra Delgado, Jonathan Javier

C.C.: 0502865850

## Reporte de verificación



### Document Information

<b>Analyzed document</b>	UIC_QUIÑONEZ_ZEVALLOS_urkund.pdf (D100457261)
<b>Submitted</b>	4/1/2021 8:45:00 PM
<b>Submitted by</b>	Jonathan Javier Sayavedra Delgado
<b>Submitter email</b>	jjsayavedra@espe.edu.ec
<b>Similarity</b>	1%
<b>Analysis address</b>	jjsayavedra.espe@analysis.orkund.com

### Sources included in the report

<b>W</b>	URL: <a href="https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/39367/Ramos%20Rodr%C3%ADguez%2C%20Franci...">https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/39367/Ramos%20Rodr%C3%ADguez%2C%20Franci...</a> ... Fetched: 11/26/2020 11:54:48 PM	 2
<b>W</b>	URL: <a href="http://cict.umcc.cu/repositorio/tesis/Trabajos%20de%20Diploma/Ingenier%C3%ADa%20Qu...">http://cict.umcc.cu/repositorio/tesis/Trabajos%20de%20Diploma/Ingenier%C3%ADa%20Qu...</a> ... Fetched: 2/20/2021 12:50:22 PM	 1
<b>W</b>	URL: <a href="https://www.veritradecorp.com/es/ecuador/importaciones-y-exportaciones-ecuatoriana...">https://www.veritradecorp.com/es/ecuador/importaciones-y-exportaciones-ecuatoriana...</a> ... Fetched: 4/1/2021 8:46:00 PM	 1



JONATHAN JAVIER  
SAYAVEDRA DELGADO



## DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

### CARRERA DE PETROQUÍMICA

### RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Nosotros, **Quiñonez Gómez, Edwin Alexander**, con cédula de ciudadanía n°1718536178, y **Zevallos Cuzme, Angel Fabrizio**, con cédula de ciudadanía n°1311868119, declaramos que el contenido, ideas y criterios del Trabajo de Unidad de Integración Curricular: “**Diseño de una planta de producción de resina fenólica (espuma floral)**” es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 8 de abril del 2021.

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir "Quiñonez Gómez".

Quiñonez Gómez, Edwin Alexander

C.C.: 1718536178

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir "Zevallos Cuzme".

Zevallos Cuzme, Angel Fabrizio

C.C.:1311868119



## DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

### CARRERA DE PETROQUÍMICA

### AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Nosotros, **Quiñonez Gómez, Edwin Alexander**, con cédula de ciudadanía n° 1718536178, y **Zevallos Cuzme, Angel Fabrizio**, con cédula de ciudadanía n° 1311868119, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el presente Trabajo de Unidad de Integración Curricular: “**Diseño de una planta de producción de resina fenólica (espuma floral)**” en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Latacunga, 8 de abril del 2021.

Una firma manuscrita en tinta azul, que parece ser 'Quiñonez'.

Quiñonez Gómez, Edwin Alexander

C.C.: 1718536178

Una firma manuscrita en tinta azul, que parece ser 'Zevallos'.

Zevallos Cuzme, Angel Fabrizio

C.C.:1311868119

## **Dedicatoria**

El presente trabajo se encuentra dedicado con todo mi cariño a mi madre Ángela que, con todo su amor y cariño estuvo siempre apoyándome hasta cumplir mis objetivos dentro de la etapa universitaria. Por siempre indicarme los valores correctos, confiar en mi desde el día que le dije que mi meta es convertirme en un profesional de bien, le agradezco por cada día repetirme que el mejor regalo que podía darme no eran cosas.

Al recuerdo de mi padre Merlín y sus palabras de las metas planteadas se puede lograr si se hace con cariño, paciencia, dedicación y correctamente.

A mi abuelito Alonso, el cual me enseñó a trabajar muy duro desde pequeño para cumplir mis objetivos. Por su cariño al cuidarme y el regalo de su sonrisa siempre que lo visitaba.

A mi hermana Verónica, Miguel, Christian, y Jessica por sus consejos y la confianza que depositaron en mi supieron apoyarme siempre durante mis estudios. En especial a Verónica y Christian por sacarme sonrisas en los momentos más difíciles de mi vida.

**Edwin Alexander Quiñonez Gómez**

## **Dedicatoria**

Dedico este proyecto y mi carrera universitaria con mucho amor y cariño a mis padres Fernando y Rubilú que, con sacrificio y esfuerzo me brindaron todo su apoyo. Por haberme formado como un ser humano lleno de valores y como un gran profesional. Por ser el faro de luz que me guía el camino en los momentos más oscuros de mi vida.

A mis hermanos Leonardo, Fernanda, María, Fernando y Valentina, por sus consejos, afecto y apoyo.

A mis abuelos paternos Julieta y Angel que, con su sabiduría y buen ejemplo cuidaron y formaron un niño con grandes aspiraciones.

A Edcio y Uvaldina, que más que mis abuelos maternos fueron mis padres. Por inculcarme el deseo de superación y enseñarme el valor del trabajo duro.

A mi amor, Andrea, por su compañía incondicional a lo largo de este camino.

**Angel Fabrizio Zevallos Cuzme**

## **Agradecimiento**

Agradecemos en especial a la Carrera de Ingeniería Petroquímica de la Universidad de las Fuerzas Armadas Sede Latacunga, a nuestros profesores por su enseñanza, paciencia y dedicación. Al Ing. Javier Sayavedra, quien, permitió la realización del presente trabajo y nos sirvió de guía en el desarrollo del mismo. Sin su gran ayuda nada de esto hubiese sido posible. A nuestros compañeros, que se convirtieron en grandes amigos. Y a todas las personas que hicieron posible que este sueño se convierta en realidad.

**Edwin Alexander Quiñonez Gómez**

**Angel Fabrizio Zevallos Cuzme**



## Tabla de contenidos

Carátula.....	1
Certificación.....	2
Reporte de verificación.....	3
Responsabilidad de autoría.....	4
Autorización de publicación.....	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento.....	8
Tabla de contenidos.....	9
Índice de tablas.....	13
Índice de figuras.....	14
Índice de ecuaciones.....	16
Resumen.....	17
Abstract.....	18
Introducción.....	19
Antecedentes.....	19
Planteamiento del problema.....	21
Justificación e importancia.....	22
Objetivos.....	24
<i>Objetivo general</i> .....	24
<i>Objetivos específicos</i> .....	24
Hipótesis.....	24
Variables de investigación.....	24
<i>Variable dependiente</i> .....	24
<i>Variable independiente</i> .....	25
Marco teórico.....	26
Resina fenólica.....	26

<i>Composición de las resinas fenólicas</i> .....	26
<i>Tipos de resinas fenólicas</i> .....	27
<b>Espumas fenólicas</b> .....	29
<i>Espuma floral</i> .....	29
<b>Descripción de tecnología y producción de espuma floral</b> .....	30
<i>Tecnología de producción de espuma floral</i> .....	31
<i>Tecnología de deshidratación de la resina fenólica</i> .....	32
<b>Diseño de proceso</b> .....	33
<i>Introducción al diseño</i> .....	33
<i>Etapas del diseño de proceso</i> .....	33
<b>Diagramas de flujo</b> .....	38
<i>Diagrama de flujo de bloques (bdf)</i> .....	38
<i>Diagrama de flujo de procesos (pfd)</i> .....	39
<b>Reactores tipo batch</b> .....	41
<i>Tiempo de reacción</i> .....	42
<i>Agitación</i> .....	42
<i>Objetivos de la agitación</i> .....	43
Tipos de agitadores.....	43
<b>Procesos de separación</b> .....	46
<i>Destilación</i> .....	48
<i>Destilación flash</i> .....	49
<i>Destilación binaria</i> .....	50
<i>Destilación al vacío</i> .....	51
<i>Destilación batch</i> .....	51
<b>Selección de bombas</b> .....	53
<i>Factores involucrados en el criterio de selección de bombas</i> .....	53
<b>Metodología</b> .....	54

Demanda de espuma floral en ecuador.....	54
Descripción general del proceso.....	55
<i>Materias primas</i> .....	55
<i>Propiedades de las materias primas</i> .....	55
<i>Propiedades de los modificadores</i> .....	57
Obtención de resina fenólica.....	58
Diagramas de proceso.....	60
<i>Diagrama de flujo (BFD)</i> .....	60
<i>Diagrama PFD</i> .....	61
Cinética química de la reacción de policondensación.....	62
<i>Reacción química</i> .....	63
Diseño del reactor.....	63
Volumen.....	63
<i>Agitadores</i> .....	64
<i>Ecuación de diseño</i> .....	64
<i>Tiempo de residencia</i> .....	65
Simulación.....	65
<i>Selección del modelo termodinámico</i> .....	65
<i>Ingreso de componentes no disponibles en el databank de process engineering v10.2</i> .....	66
<i>Simulación del reactor</i> .....	70
<i>Neutralización del resol</i> .....	71
<i>Eliminación de agua</i> .....	72
<i>Tanque de espumado</i> .....	73
<i>Almacenamiento</i> .....	74
Criterio de selección de bombas para fluidos de alta viscosidad.....	74
Resultados y discusiones.....	77

<b>Alimentación del proceso .....</b>	<b>77</b>
<b>Obtención de resina tipo resol.....</b>	<b>78</b>
<b>Balance de masa del proceso .....</b>	<b>79</b>
<b>Composiciones en el reactor en función del tiempo.....</b>	<b>80</b>
<b>Energía utilizada en el proceso.....</b>	<b>81</b>
<b>Reactor .....</b>	<b>82</b>
<i>Volumen estimado del reactor.....</i>	<i>82</i>
<i>Sistema de agitación del reactor.....</i>	<i>83</i>
<b>Recuperación de agua del proceso .....</b>	<b>83</b>
<b>Análisis de sensibilidad .....</b>	<b>85</b>
<b>Estimación de la presión y temperatura de la separación al vacío .....</b>	<b>86</b>
<b>Bombas .....</b>	<b>88</b>
<b>Propiedades de la resina obtenida en la simulación.....</b>	<b>88</b>
<b>Tiempo de operación de la planta.....</b>	<b>89</b>
<b>Obtención de espuma floral .....</b>	<b>89</b>
<b>Molde y área de secado.....</b>	<b>90</b>
<b>Propuesta de reactor con mayor volumen.....</b>	<b>90</b>
<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>92</b>
<b>Conclusiones .....</b>	<b>92</b>
<b>Recomendaciones .....</b>	<b>92</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>94</b>

## Índice de tablas

<b>Tabla 1.</b> <i>Propiedades físicas de la resina tipo resol.</i> .....	30
<b>Tabla 2.</b> <i>Importaciones de resina fenólica. Período 2015-2019.</i> .....	54
<b>Tabla 3.</b> <i>Propiedades físicas del fenol.</i> .....	55
<b>Tabla 4.</b> <i>Propiedades físicas del formaldehído.</i> .....	56
<b>Tabla 5.</b> <i>Propiedades físicas y químicas del catalizador.</i> .....	57
<b>Tabla 6.</b> <i>Propiedades mecánicas de PC.</i> .....	58
<b>Tabla 7.</b> <i>Constantes de velocidad de la reacción.</i> .....	62
<b>Tabla 8.</b> <i>Datos ingresados al reactor batch.</i> .....	71
<b>Tabla 9.</b> <i>Datos ingresados al tanque de neutralización.</i> .....	72
<b>Tabla 10.</b> <i>Datos ingresados al tanque de espumado.</i> .....	74
<b>Tabla 11.</b> <i>Flujos másicos por componente en el reactor.</i> .....	77
<b>Tabla 12.</b> <i>Balance de masa.</i> .....	79
<b>Tabla 13.</b> <i>Composiciones másicas vs tiempo.</i> .....	80
<b>Tabla 14.</b> <i>Energía requerida para el proceso de obtención de resol.</i> .....	82
<b>Tabla 15.</b> <i>Composición de la corriente de vapor S16.</i> .....	84
<b>Tabla 16.</b> <i>Composición de la corriente de líquido S15.</i> .....	85
<b>Tabla 17.</b> <i>Resultados obtenidos en la corriente S21.</i> .....	85
<b>Tabla 18.</b> <i>Resultados del análisis de sensibilidad presión del condensador.</i> .....	86
<b>Tabla 19.</b> <i>Flujos másicos que ingresan al tanque de espumado.</i> .....	89
<b>Tabla 20.</b> <i>Flujos másicos de la propuesta de reactor.</i> .....	91

## Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> <i>Máquina para espumas fenólicas flujo tipo Estándar.</i> .....	31
<b>Figura 2.</b> <i>Tecnología de producción Laizhou Yuanda Chemical Industrial.</i> .....	32
<b>Figura 3.</b> <i>Estructura del diseño de procesos</i> .....	34
<b>Figura 4.</b> <i>Modelo de cebolla del diseño de procesos.</i> .....	36
<b>Figura 5.</b> <i>Diagrama de flujo de bloque.</i> .....	39
<b>Figura 6.</b> <i>Diagrama de flujo del proceso.</i> .....	40
<b>Figura 7.</b> <i>Reactor por lotes.</i> .....	42
<b>Figura 8.</b> <i>Agitador de hélice.</i> .....	44
<b>Figura 9.</b> <i>Agitador de paleta.</i> .....	45
<b>Figura 10.</b> <i>Agitador de Turbina.</i> .....	46
<b>Figura 11.</b> <i>Anatomía de un proceso químico.</i> .....	47
<b>Figura 12.</b> <i>Destilación instantánea.</i> .....	50
<b>Figura 13.</b> <i>Destilación por lotes</i> .....	52
<b>Figura 14.</b> <i>Esquema de producción de resina.</i> .....	59
<b>Figura 15.</b> <i>Diagrama de bloques del proceso.</i> .....	60
<b>Figura 16.</b> <i>Diagrama de flujo del proceso.</i> .....	61
<b>Figura 17.</b> <i>Reacción de producción de resina fenólica(resol).</i> .....	63
<b>Figura 18.</b> <i>Ventana de selección del componente.</i> .....	67
<b>Figura 19.</b> <i>Ventana User – defined(definir nombre del componente).</i> .....	67
<b>Figura 20.</b> <i>Ventana UNIFAC structures.</i> .....	68
<b>Figura 21.</b> <i>Ingreso de grupos funcionales representativos de la molécula.</i> .....	68
<b>Figura 22.</b> <i>Ingreso de la estructura UNIFAC al nombre del compuesto.</i> .....	69
<b>Figura 23.</b> <i>Propiedades termo - físicas del Resol.</i> .....	69

<b>Figura 24.</b> <i>Simulación del reactor</i> .....	70
<b>Figura 25.</b> <i>Neutralización de la resina</i> .....	72
<b>Figura 26.</b> <i>Eliminación de agua</i> .....	73
<b>Figura 27.</b> <i>Criterio adicional para la selección de bombas en instalaciones</i> .....	76
<b>Figura 28.</b> <i>Proceso de obtención de resina fenólica</i> .....	78
<b>Figura 29.</b> <i>Masa acumulada en el reactor vs tiempo de reacción</i> .....	81
<b>Figura 30.</b> <i>Propuesta de diseño para recuperación de agua</i> .....	84
<b>Figura 31.</b> <i>Curva de sensibilidad presión vs fracción másica</i> .....	87
<b>Figura 32.</b> <i>Curva de sensibilidad temperatura vs fracción másica</i> .....	87
<b>Figura 33.</b> <i>Molde de secado</i> .....	90

### Índice de ecuaciones

<b>Ecuación 1.</b> <i>Volumen de operación del reactor.</i> .....	64
<b>Ecuación 2.</b> <i>Volumen del reactor Batch.</i> .....	64
<b>Ecuación 3.</b> <i>Ecuación de diseño reactor batch.</i> .....	65
<b>Ecuación 4.</b> <i>Ecuación de la conversión del fenol.</i> .....	65
<b>Ecuación 5.</b> <i>Forma integral del balance de moles batch.</i> .....	65



## Resumen

En esta investigación se realizó el diseño de una planta de producción de resina fenólica (espuma floral), mediante el software de simulación PRO II, tomando como base para el desarrollo de la misma, procesos que ya se encuentran registrados en diferentes fuentes bibliográficas. Se describió el proceso de producción de resina fenólica. Para lo cual se estableció las operaciones unitarias adecuadas esquematizándolas en diagramas de bloques y flujo (BDF y PFD). De la misma forma, se diseñó el reactor, con el tiempo de necesario para consumir totalmente los reactivos involucrados dentro del proceso de manufactura, esto permitió la obtención de espuma floral en función de una alta conversión de los reactivos utilizados en la corriente de alimentación del proceso. Asimismo, se realizó un análisis de sensibilidad en el reactor, en la unidad de deshidratación, y finalmente en el condensador para recuperar el agua producto de la unidad de deshidratación, esto con el fin de seleccionar las condiciones óptimas de presión y temperatura. Por otra parte, se calcularon los balances de masa y energía a lo largo del todo el proceso diseñado. Se determinaron todos flujos másicos de entrada y salida, de cada componente en todas las operaciones unitarias esquematizadas en los diagramas de flujo y bloques, en base a la demanda de espuma floral obtenido del sitio web Servicio Nacional de Aduana del Ecuador (Importaciones).

Palabras clave:

- **RESINA FENÓLICA**
- **ESPUMA FLORAL**
- **RESOL**
- **PRO II**

## **Abstract**

In this research, design of a plant for the production of phenolic resin (floral foam) was carried out, using the PRO II simulation software, taking as a basis for the development, processes that are already registered in different bibliographic sources. The phenolic resin production process was described. For which the appropriate unit operations were established by schematizing them in block and flow diagrams (BDF and PFD). In the same way, the reactor was designed, with the time necessary to fully consume the reagents involved in the manufacturing process; this allowed the obtaining of floral foam based on a high conversion of the reagents used in the feed stream of the process. Likewise, a sensitivity analysis was carried out in the reactor, in the dehydration unit, and finally in the condenser to recover the water product of the dehydration unit, this in order to select the optimal conditions of pressure and temperature. On the other hand, the mass and energy balances were calculated throughout the entire designed process. All inlet and outlet mass flows were determined for each component in all unit operations outlined in the flow and block diagrams, based on the demand for floral foam obtained from the website of the National Customs Service of Ecuador (Imports).

Key words:

- **PHENOLIC RESIN**
- **FLORAL FOAM**
- **RESOL**
- **PRO II**

## Capítulo I

### 1. Introducción

#### 1.1. Antecedentes

Las primeras resinas termoestables que se sintetizaron fueron las resinas fenólicas, en 1907. (Manfredia et al., 1999). Por esta razón se denominaron como uno de los primeros polímeros sintéticos y empezaron a producirse a nivel industrial desde 1911. Luego de más de 100 años de su industrialización estas alcanzan una producción promedio mayor a los 6 millones de toneladas al año y prácticamente se han convertido en un material ubicuo. (Foyer et al., 2016)

Es así como, las resinas fenólicas empezaron a comercializarse por más tiempo que cualquier otro polímero sintético, con excepción del nitrato de celulosa. Sus aplicaciones en la industria se basan en las propiedades adhesivas que presentan las mismas, dándole una alta resistencia a disolventes orgánicos, resistencia mecánica superior, resistencia al calor, estabilidad dimensional, alta resistencia contra ácidos y agua, en función de estas características se han consideradas cómo las mejores resinas dentro del mercado actualmente. (Covarrubias et al., 2016; John & Reghunadhan Nair, 2014)

Asimismo, se destinan a aplicaciones como: el aislamiento térmico de edificios y tuberías en plantas químicas, moldes de impresión, y para la obtención de espuma floral. En esta última se utilizan como estructuras, en las cuales se insertan las flores lo que permite que las condiciones de humedad se mantengan. Sin embargo, las aplicaciones de las resinas fenólicas se encuentran altamente restringidas por su elevada fragilidad y tendencia a pulverizarse. (Granado et al., 2018; Landrock, 1995)

Actualmente se realiza una gran cantidad de esfuerzos en investigación de resinas fenólicas y espumas fenólicas, que se han centrado en superar la fragilidad, y su alta tendencia a pulverizarse a través de la modificación química, técnica que consiste en la adición de cadenas largas y flexibles en la espuma fenólica mediante una reacción química. A lo largo del tiempo se han utilizado compuestos químicos como el poliuretano, el poliéter, o el polietilenglicol para endurecer las espumas fenólicas pero el alto costo que tienen los mismos no permiten la viabilidad a gran escala en el proceso de obtención y modificación. Compuestos naturales renovables o productos reciclables, como la lignina, el tanino, el policarbonato, y el cardanol han sido un foco de investigación durante los últimos años. (Yu et al., 2018)

Liang et al. (2016), destacó que las resinas fenólicas(resol) se prepara utilizando como materia prima el fenol y formaldehído en presencia de un catalizador básico. En la actualidad, se puede observar una disminución en la producción de petróleo lo que a futuro intensificará la crisis mundial en la obtención de materias primas en la industria de producción de resinas fenólicas. Esto ha generado un problema urgente para los investigadores los cuales buscan materias primas sostenibles que puedan reemplazar al petróleo.

García (2017), en su investigación desarrolló un caso base para obtener resinas fenólicas utilizando como reactivo la lignina del bagazo de caña de azúcar en forma de sustituyente parcial del fenol en una reacción de policondensación. Realizó el diagrama de flujo del proceso mediante el software Aspen Hysys. En su diseño existen seis 13 reactores por lotes con agitación y con chaquetas de enfriamiento.

P. Espinoza (2008), realizó una simulación dinámica del control de temperatura en la síntesis de resinas alquídicas y fenólicas, ya que el perfil de temperatura en el reactor es una de las variables de operación más importantes dentro del proceso. El

control se aplicó para dos reactores batch, en los cuales se identifican las variables y se utiliza la configuración de control feedback. Además, se determinó las materias primas y parámetros de operación requeridos. El reactor batch para resinas fenólicas y resinas alquídicas posee una unidad de calentamiento, una chaqueta de enfriamiento y un sistema de agitación. Dentro del reactor ocurre una reacción exotérmica la cual se cataliza por la condensación del fenol y un aldehído, se utilizó formaldehído en exceso y un catalizador básico para obtener una resina tipo resol. Cabe recalcar, que el sistema de control facilita mantener las variables del proceso dentro de los parámetros deseados, lo que provoca una mayor producción, permite ahorrar energía, como resultado existe una disminución en los costos de operación

## **1.2. Planteamiento del problema**

El mercado de resinas fenólicas y espumas florales tiene una larga historia y se encuentra muy bien distribuido en determinados mercados como: América del Norte, Europa Central y en partes de Asia. Debido a la versatilidad y a que las aplicaciones de este producto son muy extendidas dentro del mercado de las flores, espumas de aislamiento, espumas para su uso en minería, es difícil definir la existencia de un solo proceso de obtención y una aplicación concreta. (Pilato, 2010)

La tendencia de producción de resina fenólica (espuma floral) se encuentra en crecimiento, sin embargo, la demanda actual se encuentra insatisfecha. En el transcurso de los últimos años la producción nacional se encuentra por debajo de los niveles de importaciones. En este sentido, se ha expuesto que las resinas fenólicas tienen una amplia variedad de aplicaciones. Lo que provoca que el mercado se torne llamativo para la producción interna de este producto. (Rodríguez et al., 2009)

En Ecuador, debido a que las fuentes de información para la obtención de espuma floral son escasas, no se han desarrollado estudios, ni se han establecido procesos concretos para la elaboración de espuma floral. Por lo que no existe oferta que satisfaga la demanda del mercado interno. Situación que se vuelve evidente con la creación de la Carrera de Petroquímica en el país, dado que uno de los objetivos de esta carrera es solucionar los problemas dentro del sector industrial. En este sentido, la producción de resina fenólica como principal materia prima para la elaboración de espuma floral. Se convierte en un tema de interés dentro del área petroquímica y específicamente en el sector polimérico.

La espuma floral como producto final se tiene que importar de grandes empresas como: Oasis la cual se encuentra ubicada en Colombia y Floralife ubicada en Estados Unidos. Las importaciones de espuma floral de ECUAFLOREAL S.A, que es una empresa ecuatoriana que se dedica al comercio de flores y arreglos florales; en los últimos 5 años presentan un total de 4 registros con un costo de \$17557 y un total de 0 exportaciones, sin registro. (Veritrade, 2018)

### **1.3. Justificación e importancia.**

Camacho et al. (2017), menciona que en Ecuador existe un total de 69 empresas las cuales obtiene productos petroquímicos intermedios y terminados. En su mayoría son plásticos y en pequeña cantidad productos obtenidos de la manufactura de textiles sintéticos. No obstante, en los últimos años Ecuador ha visto la necesidad de cambiar su matriz económica debido a que este se encuentra en una posición extractiva al ser un país productor de crudo, y la industria petroquímica puede ser ese impulso que genere tal cambio, a través de la creación de industrias que puedan procesar productos petroquímicos básicos y a su vez pueda proveer de materia prima a quienes utilicen derivados de petróleo en sus procesos.

Los productos espumados obtenidos de la resina fenólica, pueden ser usados como soporte vegetal. Ecuador presenta una alta demanda de espuma floral dentro del sector florícola, dentro del cual se da mayor uso a una de las aplicaciones de este producto. Ya que el material tiende a absorber y retener agua para que las flores se mantengan frescas durante la vida útil ya sea de un arreglo, transporte y almacenamiento. Asimismo, estas pueden ser usadas para el crecimiento de plantas a través del cultivo hidropónico proporcionando la humedad adecuada para el crecimiento de cualquier planta. (D. Espinoza, 2010)

Rodríguez et al. (2009), menciona que en Venezuela las resinas fenólicas ostentan un amplio mercado de aplicación como materia prima, pero no existe la oferta requerida. Por tanto, pretende incluir una línea de producción de resoles, mediante la fabricación de resinas en el laboratorio y el diseño de la planta piloto la cual incluye la materia prima, selección de las condiciones de operación, y el dimensionamiento de los equipos para disponer de resol como producto final.

En apartados anteriores se mencionó que en Ecuador no existe una planta de producción de espuma floral. De tal manera que para dar solución a este inconveniente se propone el desarrollo del presente proyecto, el cual genera una alternativa que brinde impulso a la manufactura petroquímica, a través de la investigación y el desarrollo de una planta de producción de resina fenólica (espuma floral), mediante el software de simulación PRO II. Proyecto en el que se incluye esquematizar todas las operaciones unitarias en diagramas de flujo, bloques y adicionalmente dimensionar el reactor requerido para el proceso, en base a la demanda interna de espuma floral existente en el país. Con la finalidad de generar una iniciativa de emprendimiento dentro del sector de la manufactura petroquímica.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo general**

Diseñar una planta de producción de resina fenólica (espuma floral), mediante el software de simulación PRO II.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

Describir los posibles procesos de producción acorde a la demanda establecida, mediante un diagrama de bloques.

Diseñar el reactor para llevar a cabo la reacción química y obtener el producto deseado (Espuma Floral).

Realizar los cálculos de balance de masa y energía, a lo largo del proceso diseñado.

## **1.5. Hipótesis**

¿Será posible satisfacer la demanda de espuma floral en Ecuador a través del diseño propuesto?

## **1.6. Variables de investigación**

### **1.6.1. Variable dependiente**

Relación de alimentación fenol/formaldehído.

Tiempo de operación del reactor.

Dimensiones del reactor.

Presión y temperatura en la unidad de deshidratación del resol.



### 1.6.2. *Variable independiente*

Demanda de Espuma Floral en Ecuador.

## Capítulo II

### 2. Marco teórico.

#### 2.1. Resina fenólica

Las resinas fenólicas forman parte de una gran familia de polímeros y oligómeros, los cuales se obtienen por reacción de fenoles con aldehídos. Ambos compuestos, se consideran como los componentes más importantes en la producción comercial de resinas fenólicas. (Kirk & Othmer, 1998; Pilato et al., 2013)

Este tipo de resinas presentan aplicaciones dentro de la industria moderna. Por lo general las resinas de naturaleza termoendurecible, se han desarrollado dentro de las áreas de síntesis, caracterización, producción, desarrollo de productos y control de calidad. (Rodríguez et al., 2009)

##### 2.1.1. *Composición de las resinas fenólicas*

a) **Fenol.** El fenol ( $C_6H_5OH$ ), es un monómero el cual pertenece a la familia de compuestos aromáticos, el grupo hidroxilo se une directamente al núcleo aromático. Es la materia prima que se emplea en mayor cantidad para fabricar resinas fenólicas. Este compuesto es producido en su mayoría a partir del cumeno, proceso desarrollado y autorizado por los Estados Unidos. (Kirk & Othmer, 1998; Pilato et al., 2013)

El fenol es altamente tóxico y los límites de exposición deben controlarse estrictamente. A diferencia de los alcoholes, el fenol se comporta como ácido débil y se disuelve fácilmente en hidróxido de sodio acuoso. Además, es insoluble en carbonato de sodio acuoso. El fenol puro presenta su punto de fusión a  $40,9^\circ\text{C}$ . A esta temperatura se reduce considerablemente con trazas de agua, compuesto con el cual el fenol forma mezclas azeotrópicas. Por encima de  $68,4^\circ\text{C}$  el fenol es completamente

miscible con el agua. En estado sólido, el fenol es incoloro. Cuando es expuesto al aire se vuelve rosa si contiene impurezas, presentando un color hierro o cobre. (Pilato et al., 2013)

**b) Formaldehído.** El formaldehído es un gas incoloro, inflamable y altamente reactivo a temperatura ambiente. Se caracteriza por ser soluble en agua, etanol, éter dietílico y acetona. Tiene una estructura de resonancia dipolar, lo que hace que la molécula sea un electrófilo típico. Se obtiene por oxidación de metano o metanol en presencia de un catalizador mediante procesos a gran escala. De forma comercial es conocida como formalina, que es una solución al 37% en agua, con metanol. (Salthammer et al., 2010)

Es una materia prima química utilizada en múltiples procesos industriales. Se considera que más del 65% del formaldehído total se usa en la síntesis de resinas. Además, se utiliza como conservante, desinfectante y biocida. Otra aplicación considerable, es su utilización como componente de adhesivos termoendurecibles. (Salthammer et al., 2010)

### **2.1.2. Tipos de resinas fenólicas**

Las resinas fenólicas se clasifican en dos grupos: las resinas de tipo novolaca y las resinas de tipo resol. Por un lado, las resinas de tipo novolaca empleando un catalizador ácido. mientras, que en las resinas de tipo resol, se emplean catalizadores básicos, obteniéndose un resol de tipo líquido con alta viscosidad. (D. Espinoza, 2010)

**c) Resina tipo resol.** Las resinas tipo resol se obtienen en condiciones básicas, con un exceso de formaldehído. Pueden ser líquidas, sólidas o en solución. Son resinas oligoméricas reactivas al calor que pueden ser catalizadas por condiciones ácidas, básicas, térmicas o de ésteres especiales. Este tipo de resinas son mayormente utilizadas para compuestos reforzados con fibra. (Pilato et al., 2013)

Por lo general, la relación molar que se debe utilizar para el fenol y formaldehído en la obtención de resinas resol es de 1/1.5 a 1/2. En medio básico, se pueden usar como catalizadores: hidróxidos de bario, potasio, sodio y amonio, carbonatos de sodio y potasio, alquilaminas. En una cantidad preferente de 0.01 a 0.05 mol por cada mol de fenol. En la reacción se obtiene una solución acuosa a temperaturas bajo los 100 °C, posteriormente se neutraliza con un ácido apropiado y luego se deshidrata para obtener un resol tipo líquido. (Landrock, 1995)

**d) Resina tipo novolaca.** Se obtienen por la reacción de policondensación entre el formaldehído y el fenol en medio ácido, con exceso de fenol. La reacción se da en dos etapas simultáneas. En la primera etapa se protona el metilenglicol. En la segunda etapa, se adiciona un agente de curado para que el pre-polímero policondense y forme una resina termorrígida. (J. Martínez et al., 2009)

La obtención de resina tipo novolaca, es una reacción exotérmica con desprendimiento de calor. La reacción tiene lugar en una temperatura entre 80 y 100 °C. es importante que para la elección del ácido se tenga en cuenta que sea fácil la separación de la resina obtenida. Por ejemplo, el ácido clorhídrico, oxálico o una mezcla de ambos. (Covarrubias et al., 2016)

## **2.2. Espumas fenólicas**

Las espumas fenólicas son espumas poliméricas orgánicas. En general, se emplean como espumas florales, en aislamiento térmico, entre otros espacios en cuanto a espumas. Una espuma polimérica, contiene dos fases, la una es la fase gas y una fase sólida, en este caso la resina sería la matriz sólida de la espuma. A diferencia de otras espumas orgánicas posee una estructura celular completamente abierta, la cual les permite obtener una saturación de agua total, es decir, una estructura celular cerrada. (Herrera, 2016)

Las espumas fenólicas se obtienen por la mezcla de una resina tipo resol, un agente de espumado, surfactante y aditivos opcionales. Las resinas tipo resol resultan de la reacción entre fenol y formaldehído en medio básico. La densidad de una espuma fenólica, se encuentra entre 0,02407 a 0,08026 g/cm<sup>3</sup>, cabe recalcar que dependiendo de la aplicación se deben ajustar los parámetros del proceso de espumado. (D. Espinoza, 2010; Herrera, 2016)

### **2.2.1. Espuma floral**

Según D. Espinoza (2010), la espuma floral es una espuma fenólica que se obtiene de una resina tipo resol, las propiedades físicas de la resina tipo resol que se utiliza para la obtención de espuma floral, se muestra en la Tabla 1. La espuma floral tiene una estructura abierta, que permite la absorción de agua y la aireación. Se define a una espuma floral como un soporte de resina fenólica y aditivos específicos que es empleado en la industria de la floristería como soporte de las flores y plantas, ya que conserva las condiciones de humedad requeridas.

**Tabla 1.**

*Propiedades físicas de la resina tipo resol.*

<b>Propiedades</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Sólidos secos	77.5 – 79.0	%
Viscosidad, 20°C	2300 – 3000	MPas s
Densidad específica, 20°C	1.28 – 1.32	g/cm <sup>3</sup>
Reactividad, T <sub>máx.</sub>	104 – 107	°C
Contenido de fenol libre	5.4 – 6.0	%
Contenido de formaldehído libre	0.5 – 1	%

Nota. Esta tabla fue tomada de *Resinas fenólicas: química, aplicaciones, estandarización, seguridad y ecología* (p.164) por Pilato et al., 2013, Springer Science & Business.

Una espuma floral debe poseer ciertas características que son necesarias para su aplicación, tales como rápida absorción, excelente retención de agua, textura arenosa, facilidad de penetración floral, buen soporte y retención de los tallos en la espuma. Otra importante característica es la friabilidad crujiente de la espuma húmeda, la cual permite una fácil penetración de los tallos en la espuma, incluso flores de tallo suave como tulipanes, anémonas y otras flores de primavera frágiles. También se puede emplear la espuma floral como medio de cultivo, para la propagación de plantas de cama tales como flores de pascua, crisantemos y otras plantas de invernadero, mediante la modificación de la composición de la espuma. (D. Espinoza, 2010; Pilato et al., 2013)

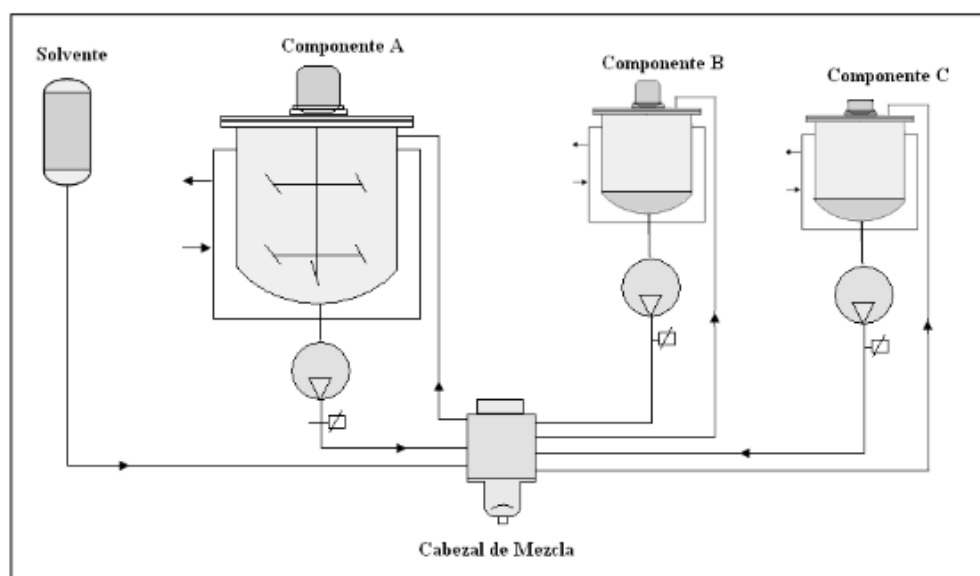
### **2.3. Descripción de tecnología y producción de espuma floral**

Según Landrock (1995), las espumas florales se elaboran en base a distintos procesos, a nivel de laboratorio se utiliza la técnica hand-mixing. A nivel industrial se emplean técnicas y maquinaria específica. En la Figura 1, se esquematiza una máquina para procesar espumas fenólicas flujo tipo Standard. En donde, se carga como

componente A el resol, surfactante, agente células abiertas y el colorante. Como componente B el R-113. Y como componente C un catalizador ácido.

### Figura 1.

*Máquina para espumas fenólicas flujo tipo Estándar.*



*Nota.* Tomado de *Elaboración de espumas florales fenólicas que incorporan nutrientes, sustancias inhibidoras de etileno, preservantes y bactericidas para la conservación prolongada de plantas obtenidas in vitro en el laboratorio de cultivo de tejidos.*, por Espinoza, 2010.

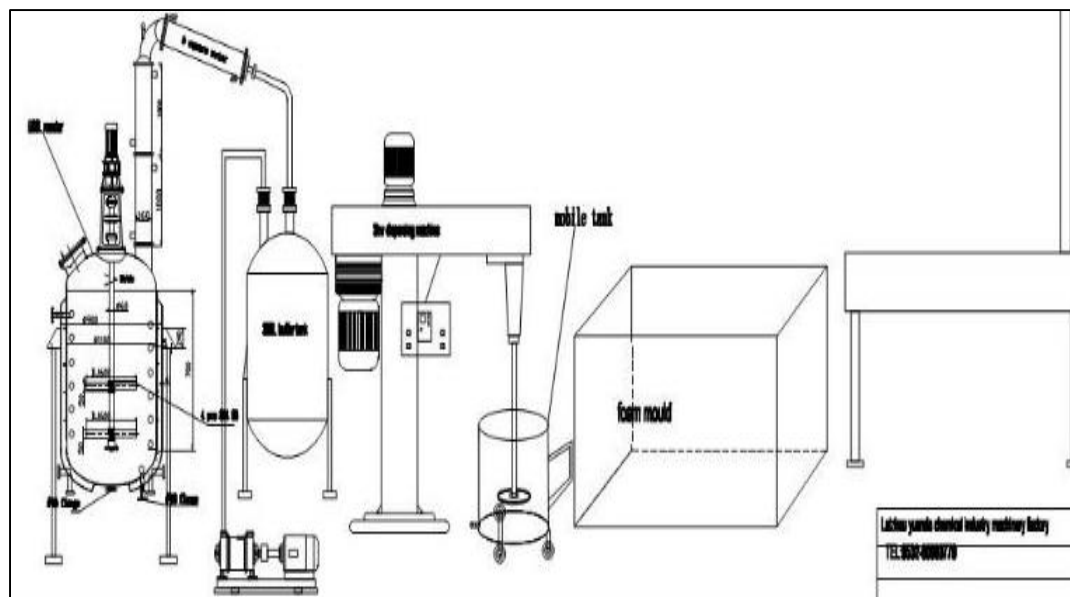
#### **2.3.1. Tecnología de producción de espuma floral**

En la Figura 2, se muestra la configuración de un equipo que se utiliza principalmente en la producción de espuma floral para flores frescas, tipo automático, con una mezcla uniforme. En esta configuración se muestra un reactor, máquina de dispersión, máquina de corte, caja de espuma. Con una capacidad de 300-4800 cartones/día, 20 piezas, el tamaño es 80\*110\*230mm y con absorción de agua de: 1,5

kg por ladrillo (el tamaño del ladrillo es de 23 cm \* 11 cm \* 8 cm). (Laizhou Yuanda Chemical Industrial, n.d.)

## Figura 2.

*Tecnología de producción Laizhou Yuanda Chemical Industrial.*



*Nota.* Tomado de *Espuma floral húmeda y seca espuma floral línea de producción y tecnología*, por Laizhou Yuanda Chemical Industrial, nd, Alibaba (<https://spanish.alibaba.com/product-detail/wet-floral-foam-and-dry-floral-foam-production-line-and-technology-floral-foam-for-dried-flowers-ang-artificial-flowers-1761198957.html>).

### **2.3.2. Tecnología de deshidratación de la resina fenólica**

Dynea Erkner GmbH es una empresa que produce resinas fenólicas. Presenta su tecnología con reactores de diferentes tamaños donde se lleva a cabo las reacciones químicas necesarias para obtener 150 diferentes tipos de resinas. Estos reactores se diseñan con un volumen entre 4 a 32 metros cúbicos y diferentes condiciones de temperatura y relaciones de presión. El tiempo de operación del reactor se encuentra



entre 8 y 60 horas, de forma exotérmica obteniéndose agua como subproducto. Esta tecnología permite que el suministro de vacío elimine el agua subproducto de la reacción a temperaturas que se encuentran entre 40 °C a 60 °C. (Redacción Interempresas, 2014)

## **2.4. Diseño de proceso**

### **2.4.1. Introducción al diseño**

El diseño del proceso inicia por una necesidad que se ha percibido. Por lo tanto, el objetivo de un diseño de proceso químico es la necesidad pública del producto. Lo que produce una oportunidad comercial y la apertura en el mercado. De forma general, el paso más importante del diseño de procesos consiste en traducir la necesidad del cliente en una base del diseño. Que se traduce como un comunicado más preciso del problema que se ha de resolver. En efecto, la base del diseño incluye el caudal de producción y las especificaciones de pureza de la mayoría de los productos. (Sinnot & Towler, 2019)

### **2.4.2. Etapas del diseño de proceso**

Según V. Martínez et al (2000), el diseño de procesos como una estrategia de ingeniería de procesos se puede considerar en 3 pasos:

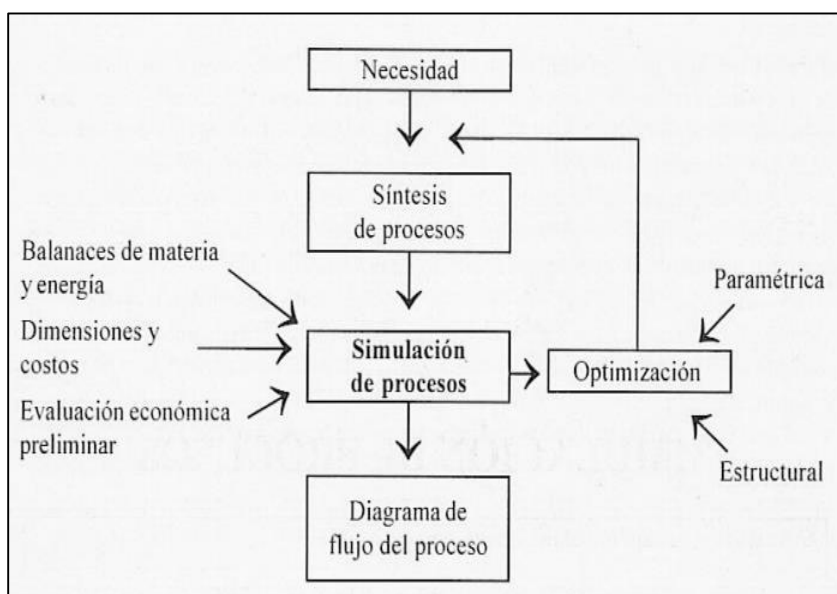
- El primer paso corresponde la síntesis del proceso. Aquí se seleccionan los equipos con sus respectivas conexiones, se establecen las condiciones iniciales de operación.
- El segundo paso corresponde a la simulación de procesos. En esta etapa se busca dar solución a los balances de materia y energía para el proceso. Se requiere dimensionar los equipos y evaluar los costos de forma preliminar.

- El tercer paso corresponde a la optimización. Puede ser de dos tipos: paramétrica o estructural. La paramétrica es cuando se modifican parámetros como la presión y la temperatura. En cambio, la estructural es cuando se realizan modificaciones al diagrama de flujo.

En la Figura 3, se esquematiza el diseño de procesos constituido por las 3 etapas mencionadas en el párrafo anterior.

### Figura 3.

*Estructura del diseño de procesos*



Nota. Tomado de *Simulación de Procesos en Ingeniería Química* (p. 34), por V.

Martínez et al., 2000, Plaza y Valdés Editores.

**e) Síntesis del proceso.** En la síntesis del proceso, a medida que se seleccionan los elementos del equipo, se toman decisiones clave con respecto a si operan en modo continuo, por lotes o semicontinuo. En función del rendimiento y flexibilidad. De esta manera, cuando se tiene un rendimiento pequeño a escala de laboratorio es más simple y rentable completar un lote en horas, días o semanas. En consecuencia, se puede concluir que un proceso por lotes ofrece la facilidad de cambiar de la producción de un producto a otro; es decir, flexibilidad, la cual es complicada de conseguir en funcionamiento continuo. (Seider et al., 2009)

Para la operación por lotes para un elemento de equipo, se debe seleccionar el tiempo o el tamaño del lote, por consiguiente, el otro elemento del equipo se determina en función de la especificación de rendimiento. Además, es conveniente convertir un diagrama de flujo de proceso en un diagrama de flujo de simulación. (Seider et al., 2009)

Según Smith (2005), la jerarquía del diseño e integración de procesos químicos consta de del siguiente orden:

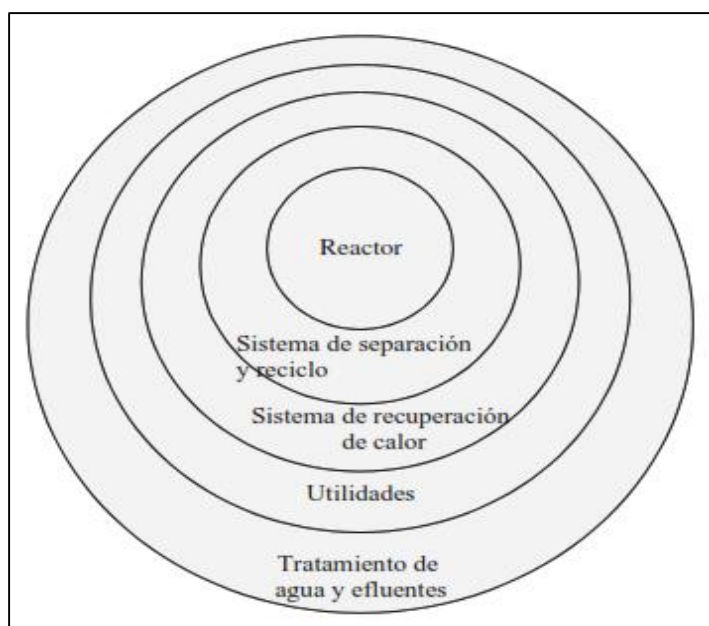
1. Identificar todas las estructuras posibles. Se considera que todas las opciones estructurales se pueden encontrar mediante inspección.
2. Optimizar cada estructura para una comparación válida. Se deben simular y optimizar las condiciones de funcionamiento para una multitud de opciones estructurales.
3. Diseñar la red de intercambiadores de energía.
4. La selección y el diseño de los servicios públicos tiene como objetivo la recuperación de calor.

5. Por último, realizar el diseño del sistema de tratamiento de aguas y efluentes acuosos.

En la Figura 4, se representa la jerarquía del diseño e integración de procesos químicos mediante el conocido “diagrama de cebolla”.

**Figura 4.**

*Modelo de cebolla del diseño de procesos.*



Nota. Adaptado de *Chemical Process Design and Integration* (p. 9), por Smith, 2005, John Wiley & Sons, Ltd.

**f) Simulación de procesos.** La simulación de procesos permite evaluar de forma rápida y sencilla un proceso industrial en base a un diagrama el cual nos indica las variables del proceso, esto a través de modelos matemáticos. Cuya solución se la realiza en programas de computadora y permite tener un mejor entendimiento del comportamiento de dicho proceso. El uso de simuladores de procesos como una herramienta moderna tiene como objetivo la solución adecuada de los problemas de proceso. Ya que permite efectuar el análisis de plantas industriales en con el fin de obtener resultados y optimizarlos. (V. Martínez et al., 2000)

**g) Simuladores de procesos químicos.** Un simulador de procesos químicos se define como un software, el cual se utiliza para modelar el comportamiento de un sistema o proceso en estado estacionario, esto mediante el cálculo de presión, temperatura y flujo. Por otra parte, una simulación de un proceso de manufactura completo, se representa a través de diferentes iconos los cuales indican una operación unitaria diferente y flechas las cuales indican los flujos de masa y de energía que ingresan o se retiran de cada operación unitaria. (Gil Chaves et al., 2016)

**h) Software de simulación de procesos PRO/II.** El software de simulación PRO/II, se desarrolló con el fin de evolucionar al primer simulador comercial el cual salió a la venta en 1966. El mismo fue creado con el fin de diseñar y analizar procesos químicos a nivel industrial de forma unidireccional y en estado estacionario. Adicionalmente este simulador cuenta con una extensa variedad de modelos termodinámicos, resuelve balances de masa y energía, además realiza análisis de sensibilidad para calcular condiciones óptimas de operación de los equipos en un proceso químico, todo esto lo realiza basándose en las ecuaciones de estado, y métodos termodinámicos rigurosos los cuales se aplican hoy en día a nivel industrial. (Baquero, 2019)

## 2.5. Diagramas de Flujo

Los diagramas de flujo son documentos clave para realizar un diseño de procesos, esta muestra la disposición de equipos, operaciones unitarias, caudales, composición de las corrientes y las condiciones de operación de cada equipo, esto con el fin de llevar a cabo un proceso industrial de manera eficiente. Si bien es cierto que a los diagramas de flujo se los puede llevar a cabo utilizando softwares de simulación para generar un balance de materia y energía, pero estos no son una representación exacta del diagrama de flujo de procesos. (Sinnot & Towler, 2019)

Seider et al (2017), menciona que al diseñar un proceso para la obtención de un producto determinado y/o específico, se debe siempre preparar tres tipos de diagramas de flujo para describir el diseño del caso base.

- Diagrama de flujo de bloques (BFD).
- Diagrama de flujo de proceso (PFD).
- Diagrama de tuberías e instrumentación(P&D).

Este último es muy importante debido a que incluye válvulas y controladores de proceso, los cuales nos ayudan a diseñar el sistema de control y análisis de riesgos de seguridad (HAZOP).

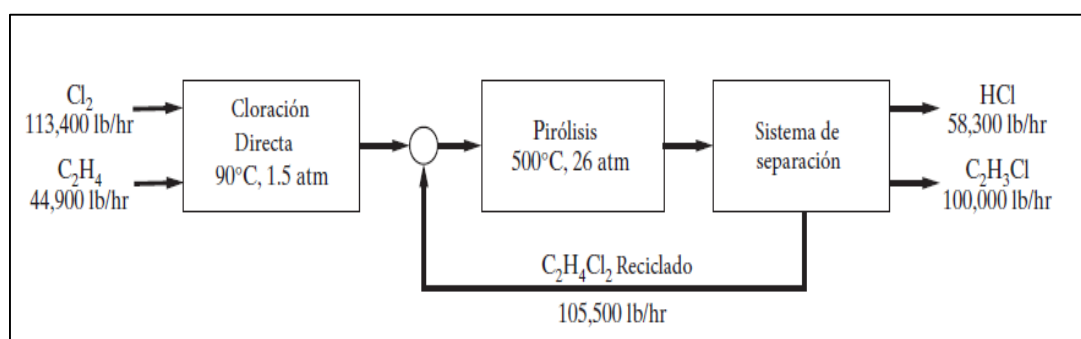
### 2.5.1. Diagrama de flujo de bloques (BDF)

Un diagrama de flujo de bloques es la manera más sencilla de presentar un proceso, debido a que en el mismo se resumen las principales secciones de procesos complejos. El nivel de detalle básico que presentan estos diagramas es útil debido a que en las primeras etapas del diseño se pueden presentar procesos alternativos los cuales suelen estar bajo consideración por parte de los ingenieros en diseño. (Seider et al., 2017)

El un diagrama de flujo de bloques se presentan sólo las secciones principales del proceso, esto en término de bloques funcionales los cuales contiene información limitada o comprimida del proceso tal como se observa en la Figura 5, debido a ello solo se utilizan en las primeras etapas de diseño del proceso. Lo cual es de gran ayuda debido a que durante el diseño a escala piloto de un proceso se presentan varias vías para obtener un producto. (Sinnot & Towler, 2019)

### Figura 5.

*Diagrama de flujo de bloque.*



*Nota.* La figura nos indica la obtención de cloruro de vinilo y las condiciones de operación del proceso resumido en tres etapas: mezcla, reacción y separación. Tomado de *Product and process design principles: synthesis, analysis and evaluation* (p.42) por Seider et al, 2017, John Wiley & Sons Inc.

#### 2.5.2. Diagrama de flujo de procesos (PFD)

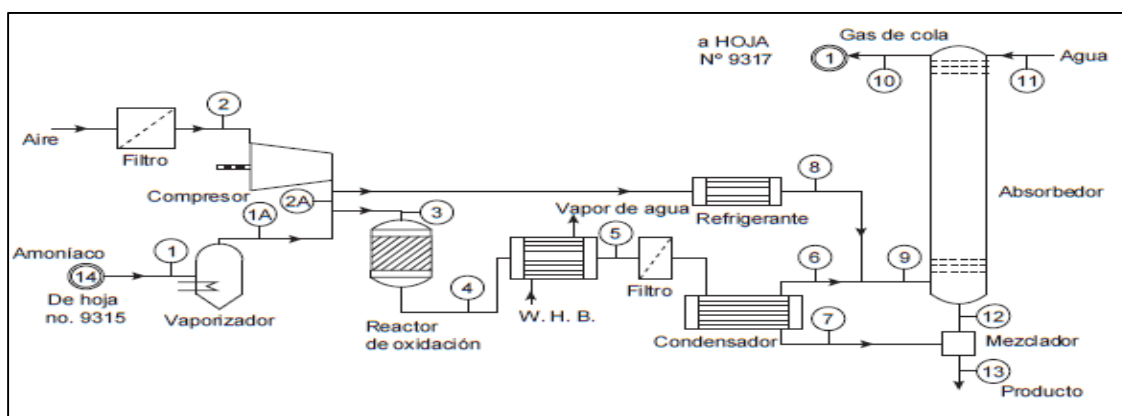
Los diagramas de flujo de procesos generalmente muestran todas las unidades de proceso (compresores, bombas, columnas de destilación, reactores, separadores, etc.), y procesos principales que se van a llevar a cabo en el diseño de una planta, es decir los mismos proporcionan una vista más detallada del proceso a diseñarse. Generalmente para la construcción de diagramas PFD más detallados, se utilizan softwares en diseño como VISIO o AUTOCAD, esto permite a los operadores de planta

conocer el proceso más detalladamente en la manufactura de un producto determinado. (Seider et al., 2017)

Asimismo, el desarrollo de un PFD para el diseño completo de una planta de producción de un producto específico, suele comenzar con diagramas sencillos en los cuales no se incluyen redes de intercambiadores de calor, trenes de separación de productos, integración de masa o de calor. Por lo cual se procede a realizar cálculos de los parámetros antes mencionados, esto con el objetivo de que el esquema pueda mejorarse a través de la inclusión de corrientes de reciclaje de materia y de energía, intercambiadores de calor y procesos de separación y purificación del producto como se observa en la Figura 6. A fin de aumentar el rendimiento en la obtención de un producto específico y aprovechar al máximo la energía proporcionada por el proceso disminuyendo así costos de producción. (Haydary, 2019)

**Figura 6.**

*Diagrama de flujo del proceso.*



*Nota.* En la figura se muestra un diagrama de proceso para la obtención de ácido nítrico. Tomado de *Diseño en ingeniería química* (p.157) por Sinnot & Towler, 2019, Editorial Reverté, S.A



## 2.6. Reactores tipo Batch

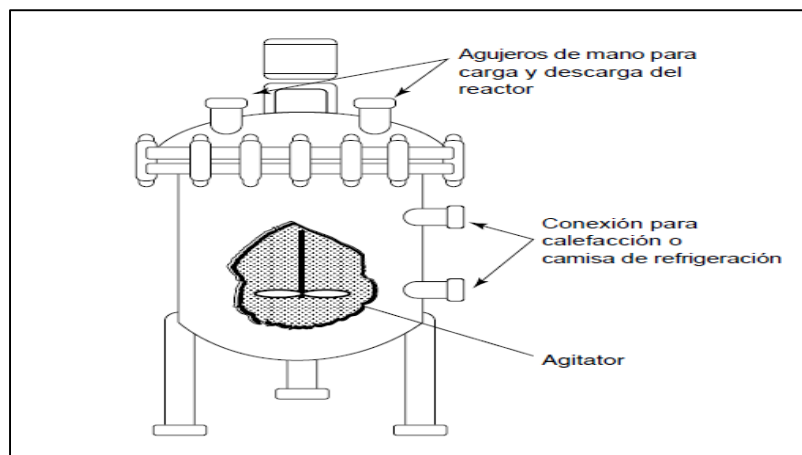
Los reactores tipo batch o discontinuos, se caracterizan por carecer de flujo de entrada de reactivos, y flujo de salida de productos, mientras se lleva la a cabo una reacción química. Inicialmente se cargan los reactivos dentro del reactor de manera simultánea y la reacción continua hasta completarse en un tiempo determinado.(P. B. Diaz, 2018)

Castro et al. (2020), menciona en los reactores del tipo batch la concentración de los reactivos y productos varían en función del tiempo, siendo la misma la variable independiente tal como se muestra en la

Figura 7, generalmente se usan en industrias con un índice de producción bajo o cuando su producción es diversificada (Un día se producen ciertos productos y al siguiente producto con diferente composición a la del primer día). Asimismo, su elevado costo de operación principalmente se da por la mano de obra al momento de carga, descarga y limpieza lo cual permite que los reactores de tipo batch no se utilicen en operaciones a gran escala. Por otra parte, el tipo de reacciones que se desarrollan en su gran mayoría son del tipo líquidas, y en mínimas ocasiones se los utiliza para desarrollar reacciones del gas – sólido.

**Figura 7.**

*Reactor por lotes.*



*Nota.* La figura nos muestra los componentes principales de los reactores tipo batch.

Tomado de *Elements of chemical reaction engineering* (p.144) por Fogler, 2016,

Pearson Education.

**2.6.1. Tiempo de reacción**

El tiempo necesario para lograr una conversión específica del reactivo se denomina tiempo de reacción, y este depende de la constante de velocidad y de la concentración de los reactivos químicos utilizados en el reactor. En consecuencia, mientras más tiempo permanece un reactivo dentro del reactor, se obtendrá una conversión más alta hasta llegar a un tiempo ideal, en el cual ya no exista reacción química y se obtengan los productos. (Fogler, 2016)

**2.6.2. Agitación**

La mayoría de reactores deben poseer un sistema de agitación, mismo tiene por objetivo generar un movimiento constante, uniforme, pero sobre todo este sistema tener

la capacidad de homogenizar los reactivos a fin de obtener mejores resultados al aumentar la conversión de reactivos a productos. (Cornejo & Machado, 2017)

Los sistemas de agitación como operación unitaria presentan un objetivo el cual es incrementar el transporte de masa y energía dentro del sistema. Este equipo consiste en agitador mecánico el cual se posiciona sobre un eje y es accionado por un motor eléctrico. El diseño del cilindro varía en función de los reactivos que se utilizaran en el reactor y en base a la naturaleza del problema de agitación. Adicionalmente el fondo del tanque donde se posiciona el eje debe ser redondeado con el objetivo de suprimir bordes rectos y eliminar la posibilidad de formación de espuma en la reacción. (Nuñez & Udeos, 2015)

### **2.6.3. Objetivos de la Agitación.**

Nuñez & Udeos (2015), indican que el sistema de agitación crea un cierto tipo de flujo dentro del reactor, dando lugar a que la carga de reactivos circule por todo el recipiente. El sistema de agitación puede ser utilizado conseguir varios objetivos los cuales son:

- Mejorar la transferencia de calor y de masa.
- Mezcla de líquidos miscibles.
- Homogeneización de los reactivos.
- Dispersión de finas partículas dentro de un líquido, etc.

### **2.6.4. Tipos de agitadores.**

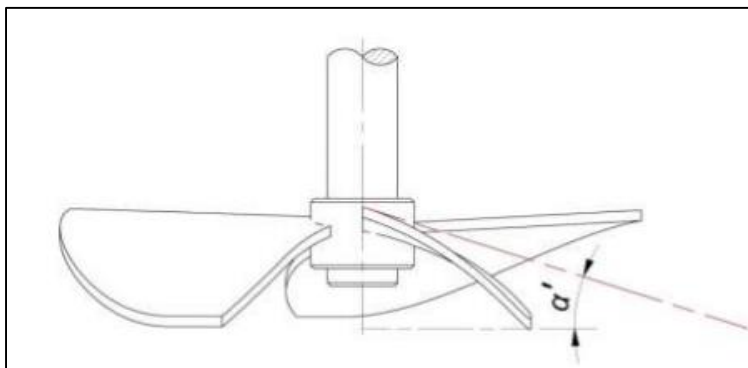
P. Martínez (2020), menciona que el comportamiento del flujo dentro de un tanque de agitación depende de las características del fluido, el tipo de rotor o impulsor, diseño del depósito, y el tipo de agitador. Existen varios tipos de agitadores y los

mismos se diseñan en función del fluido y la calidad de los reactivos a mezclarse a fin de obtener un producto determinado.

**i) Agitadores de hélice.** Son agitadores de flujo axial que operan a velocidades elevadas, y se emplean en líquidos con viscosidad baja tal como se muestra en la Figura 8. El diámetro del agitador de un agitador de este tipo rara vez supera los 45 cm independientemente del diseño del tanque de agitación. Cuando se diseñan tanques o cilindros de gran altura, se pueden utilizar dos o más hélices sobre el mismo eje para mejorar la transferencia de materia y energía dentro del sistema. (P. Martínez, 2020)

### Figura 8.

*Agitador de hélice.*



Nota. Adaptado de “*Estudio del comportamiento fluido-dinámico de un agitador a escala reducida mediante simulación numérica*” por Chambergo et al. 2017, *Información Tecnológica*, 28 (3).

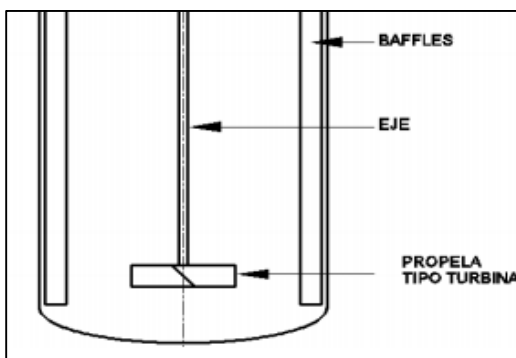
Nuñez & Udeos, (2015), mencionan que las corrientes de flujo que parte desde el agitador, se mueven a través del líquido en una sola dirección determinada hasta que estas son desviadas por las paredes del tanque o por el fondo cilíndrico. La velocidad

de giro que pueden alcanzar los agitadores pequeños es de 800 rpm y en agitadores grandes se puede alcanzar valor máximo de 1750 rpm.

**j) Agitadores de paleta.** Los agitadores de paleta normalmente son usados en mezclas sencillas (para homogeneizar mezclas), están conformados por una paleta plana la cual gira sobre un eje vertical a velocidades bajas, como se observa en la Figura 9 las corrientes dentro del tanque son impulsadas en forma radial y tangencial sin que se presente movimiento vertical respecto al agitador. Se evitan altas velocidades de agitación para evitar formar remolinos dentro del tanque ya que una consecuencia muy notable es el poco efecto de mezcla, deficiente transferencia de materia y calor. Con el fin de evitar este efecto remolido al realizar la agitación a velocidades elevadas se deben usar placas deflectoras las cuales actúen como cortacorrientes y permitan un efecto de mezcla estable. (P. Martínez, 2020)

### Figura 9.

*Agitador de paleta.*

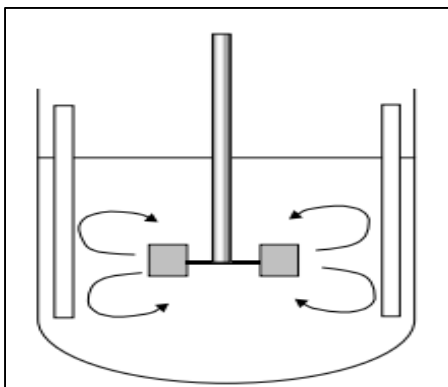


*Nota.* Componentes principales de un tanque con agitación de tipo paleta. Tomado de *Handbook Of Industrial Mixing Science And Practice* (p.348) por Paul et al. 2004, John Wiley & Sons, Inc.

**k) Agitadores de turbina.** Se considera el sistema de agitación más eficaz debido a que opera en un amplio rango de viscosidades, en su diseño la mayoría de impulsores poseen múltiples paletas cortas, y estas pueden ser rectas, inclinadas o de hélice como se observa en la Figura 10, esto con el propósito de eliminar el efecto remolino dentro del sistema de agitación, lo cual genera un buen efecto de mezclado. En líquidos de baja viscosidad los agitadores de tipo turbina generan corrientes intensas las cuales se extienden por todo el tanque de agitación y destruyen restos de masa estancadas en el líquido, es decir genera buena homogeneización y mezcla en sistema. (Nuñez & Udeos, 2015)

### Figura 10.

*Agitador de Turbina.*



*Nota.* Patrón de flujo general para una turbina de disco radial en un tanque de agitación. Tomado de *Handbook Of Industrial Mixing Science And Practice* (p.772) por Paul et al. 2004, John Wiley & Sons, Inc.

## 2.7. Procesos de separación

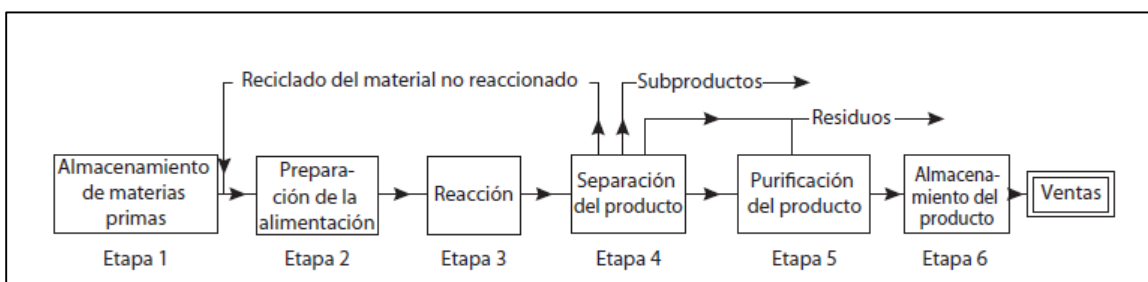
La industria química opera en forma continua, semicontinua o discontinua. Las operaciones que se lleven a cabo en la planta son claves de la ingeniería química y sus derivaciones, debido a que dentro de una planta de procesos existen cambios de

composición química, temperatura, pérdidas de presión, etc. La mayoría de procesos son diseñados por ingenieros mecánicos sin tomar en cuenta factores como los mencionados anteriormente lo cual no garantiza la obtención de un producto deseado dentro de la industria. (Seader et al., 2016)

Después de un reactor o serie de reactores, los productos y subproductos obtenidos se deben separar de cualquier material que no haya reaccionado (impurezas). Una vez separadas las impurezas pueden ser recirculadas a las etapas de reacción o a la etapa de alimentación. Los subproductos obtenidos en la primera etapa de reacción pueden ser procesados a través de química fina lo que indica una serie de reactores y posteriormente a la etapa de separación con el fin de obtener productos de interés. (Sinnot & Towler, 2019)

### Figura 11.

*Anatomía de un proceso químico.*



*Nota.* La figura indica cómo se establece un proceso químico a nivel industrial con el fin de obtener productos de calidad. Tomado de *Diseño en ingeniería química* (p.9) por Sinnot & Towler, 2019, Editorial Reverté, S.A.

Haydary (2019), menciona que en la parte de equipos utilizados en la industria son utilizados para la separación de los productos químicos, obtenidos en procesos

anteriores los cuales involucran reacciones químicas. A través de los procesos de separación se busca obtener el soluto de interés de una mezcla.

- Mezcla heterogénea, el producto obtenido en el reactor se somete a una separación de la fase sólida a través de equipos como: centrifugadores, ciclones, filtros, etc.
- Mezcla Homogénea, el producto obtenido en el reactor se somete a una separación al crear una nueva fase a través de operaciones unitarias como: extracción, destilación, cristalización, etc.

La industria química opera en forma continua, semicontinua o discontinua. Las operaciones que se lleven a cabo en la planta son claves de la ingeniería química y sus derivaciones, debido a que dentro de una planta de procesos existen cambios de composición química, temperatura, pérdidas de presión, etc. La mayoría de procesos industriales son diseñados por ingenieros mecánicos, estos no toman en cuenta factores como los antes mencionados, por lo cual no garantizan la obtención de un producto deseado dentro de la industria, tampoco garantizan la pureza de un producto obtenido. (Seader et al., 2016)

### **2.7.1. Destilación**

El proceso de destilación puede llevarse a cabo por dos métodos. En el primer método se debe llevar una mezcla a punto de ebullición esto con el fin de que los componentes más volátiles pasen a fase de vapor. Luego estos vapores se condensan sin permitir el retorno de líquido a la columna de destilación, es decir no existe reflujo, este proceso es conocido como destilación batch. En el segundo método existe el retorno de una parte de los vapores condensados (fase líquida), el líquido que retorna se pone en contacto con los vapores que ascienden dentro del equipo de destilación



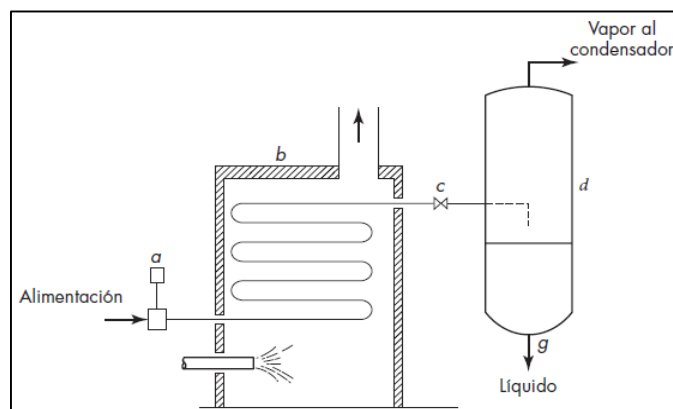
creando una fase de equilibrio vapor – líquido, este proceso es conocido como destilación continua. (McCabe et al., 2007)

La destilación generalmente, se utiliza para separar los componentes volátiles de una solución líquida. El requisito indispensable para poder realizar la separación de estos componentes consiste en que la composición del líquido sea diferente a la composición de vapor, misma que se encuentran en equilibrio con el punto de ebullición de la mezcla. (Geankoplis et al., 2018)

### **2.7.2. Destilación flash**

McCabe et al. (2007), indica que para que exista un proceso de destilación flash se debe vaporizar una fracción de líquido presente en la mezcla, esto con el fin de generar una condición de equilibrio entre vapor formado y la fracción de líquido residual, separando el vapor de la fase líquida y condensando el vapor formado.

La destilación flash es un proceso por el cual una mezcla de líquidos se vaporiza parcialmente en una sola etapa. En el proceso se debe verificar que la fracción de vapor llegue al equilibrio con la fracción de líquido, para luego separar la fase de vapor y la fase líquida. Se puede llevar a cabo una destilación instantánea de manera continua o por lotes. (Geankoplis et al., 2018)

**Figura 12.***Destilación instantánea.*

*Nota.* En la figura se muestran los componentes principales de una destilación instantánea a) bomba, b) calentador, c) válvula, d) separador. Tomado de *Operaciones unitarias en ingeniería química* (p.696) por McCabe et al., 2007, McGrawHill.

**2.7.3. Destilación Binaria**

Conocida como destilación simple debido a que la alimentación está compuesta por una mezcla de dos compuestos, en 1920 se desarrollaron métodos gráficos para determinar los requerimientos mínimos como: el número de etapas y reflujo, mismos que se deben cumplir para realizar la separación de cada componente involucrado en la mezcla. Sin embargo, se debe aclarar que los métodos gráficos para destilaciones binarias no se utilizan en la práctica esto debido a que existen muy pocos problemas de destilación binaria a nivel industrial. Al mismo tiempo estos métodos gráficos son la base para poder entender los diferentes fenómenos que se pueden presentar en separaciones multietapa. (Sinnot & Towler, 2019)

#### **2.7.4. Destilación al vacío**

Varias sustancias químicas no pueden ser calentadas a temperaturas cercanas a su punto de ebullición debido a que tienden a descomponerse químicamente.

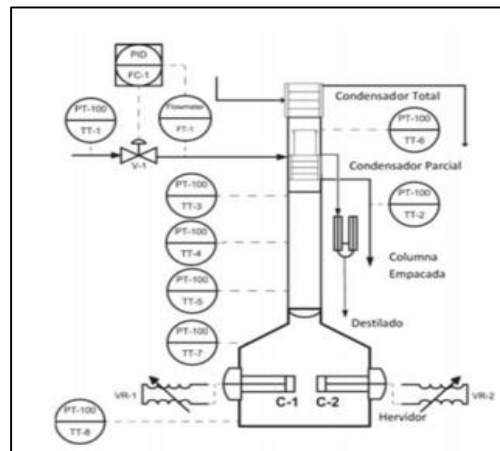
Asimismo, sustancias que presentan elevado punto de ebullición requieren de gran cantidad de energía para poder volatilizarse, un líquido empieza a ebullición cuando la presión de vapor del mismo se iguala a la presión de operación. Entonces para estos casos se debe generar presiones al vacío para disminuir la temperatura de ebullición con el fin de evitar la descomposición térmica. (Orozco, 2018)

#### **2.7.5. Destilación Batch**

La destilación es un proceso de separación de mezclas líquidas con diferentes puntos de ebullición. En sistemas por lotes la mezcla es cargada en un hervidor el cual se encuentra ubicado en la parte inferior de la columna, lo cual permite destilar solo la carga inicial debido a que no existe flujo de entrada en el sistema como se muestra en la Figura 13. Las columnas empacadas o columnas con bandejas son empleadas para aumentar el porcentaje en el proceso de separación de los componentes involucrados en la mezcla o carga inicial. (S. Diaz et al., 2018)

**Figura 13.**

*Destilación por lotes.*



Nota. Tomado de “*Automatic control on batch and continuous distillation columns*” por S. Diaz et al., 2018, *IEEE Latin America Transactions*, 16 (9).

Seader et al. (2016), menciona que las operaciones por lotes se deben emplear cuando:

- La capacidad de producción es demasiado pequeña para permitir un funcionamiento práctico.
- Para evaluar compradores potenciales en el caso de existir varios productos con una sola destilación.
- Cuando las composiciones de la materia prima varían con el tiempo o de un lote a otro.
- Cuando al realizar la carga inicial tiende a formar sólidos, alquitranes o resinas que puedan ensuciar y/o obstruir una columna de destilación continua.

## **2.8. Selección de bombas**

La bomba se utiliza para impulsar y elevar la presión de líquidos, a través de un sistema de tuberías. Estas deben transmitir el caudal de fluido requerido y al mismo tiempo transmitir la energía cinética requerida para superar la carga dinámica total requerida. La energía cinética es igual a la suma de la carga causada por el cambio de altura y la suma de la carga causada por la diferencia. Presión, velocidad de carga y finalmente todas las pérdidas de energía que se producen en el sistema. (Mott, 2006)

### **2.8.1. Factores involucrados en el criterio de selección de bombas**

Según Mott (2006) los factores que intervienen al seleccionar una bomba específica para una aplicación particular son:

- La naturaleza del líquido que se bombea.
- Capacidad requerida (caudal volumétrico).
- Condiciones de entrada a la bomba.
- Condiciones de descarga de la bomba.
- La carga total de la bomba.
- El tipo de sistema al que la bomba suministra fluido.
- Tipo de fuente de alimentación.
- Condiciones ambientales, regulaciones y estándares gubernamentales.
- El costo de compra e instalación de la bomba.
- El costo operativo de la bomba y el costo total del ciclo de vida del sistema de bombeo.
- Las propiedades del fluido.

### Capítulo III

#### 3. Metodología

##### 3.1. Demanda de espuma floral en Ecuador

Para realizar los balances de masa del proceso diseñado, primero se determinó la demanda interna anual de resina fenólica (espuma floral) durante el periodo 2015-2019, la cual corresponde a las importaciones de resina fenólica provenientes de Colombia, estos valores se muestran en la Tabla 2, luego se procederá a realizar los cálculos en cada unidad de proceso a fin de obtener la alimentación necesaria para cumplir la demanda estimada, los cálculos respectivos se adjuntan en el Anexo I.

**Tabla 2.**

*Importaciones de resina fenólica. Período 2015-2019.*

	2015	2016	2017	2018	2019	Total
<b>Enero</b>	0	0	5222,466	0	0	5222,466
<b>Febrero</b>	1300	1100	3936,7	0	6510	12846,7
<b>Marzo</b>	0	1320	1448,4	5580	918	9266,4
<b>Abril</b>	1320	4580	1429,4	642,76	5705,27	13677,43
<b>Mayo</b>	0	4300	1831,6	2790	0	8921,6
<b>Junio</b>	9564	0	13821,082	6.155,93	0	29541,012
<b>Julio</b>	0	0	2665,5	51,85	0	2717,35
<b>Agosto</b>	2	2200	11615,976	2790	7806,85	24414,826
<b>Septiembre</b>	0	0	0	0	1381,6	1381,6
<b>Octubre</b>	1540	4550	3630,958	6510	12633,8	28864,758
<b>Noviembre</b>	1100	0	810	0	1196,8	3106,8
<b>Diciembre</b>	0	2980,77	0	0	688,66	3669,43
<b>Total</b>	14826	21030,77	46412,082	24520,54	36840,98	<b>143630,372</b>

Nota. En la tabla se muestra el peso neto en kilogramos de importación de espuma floral (Ultrafoam) procedente de Colombia. Tomado de Servicio Nacional de Aduana del Ecuador, 2021.

## 3.2. Descripción general del proceso

### 3.2.1. Materias Primas

El fenol, el formaldehído y el hidróxido de sodio, son las principales materias primas que se utilizan en la elaboración de resinas fenólicas del tipo resol.

### 3.2.2. Propiedades de las materias primas

En la Tabla 3 se muestran las propiedades físicas del fenol, que se utiliza como materia prima en la alimentación al primer reactor. Cabe recalcar que las propiedades obtenidas se encuentran a 20 °C.

**Tabla 3.**

*Propiedades físicas del fenol.*

<b>Propiedades físicas del fenol</b>		
<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Masa molar	94.1	g/mol
Punto de fusión	40.9	°C
Punto de ebullición	181.8	°C
Densidad relativa	1.071	---
Calor específico	1.394	kJ/Kg K
Presión de vapor	0.02	kPa

Nota. Esta tabla fue tomada de Phenolic Resins: A Century of Progress (p.12) por Pilato, 2010, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

En la Tabla 4 se muestran las propiedades físicas del formaldehído, que se utiliza como materia prima en la alimentación al primer reactor.

**Tabla 4.***Propiedades físicas del formaldehído.*

<b>Propiedades físicas del formaldehído</b>		
<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Masa molar	30.03	g/mol
Punto de fusión	-19.2	°C
Punto de ebullición	118	°C
Constante de disociación, $H_2O$ a 50°C	$3.3 \times 10^{-13}$	---
Límite de explosión inferior	7	% vol.
Límite superior de explosividad	173	% vol.
Punto de inflamación	60	°C

Nota. Esta tabla fue tomada de Phenolic Resins: A Century of Progress (p.27) por Pilato, 2010, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

En la Tabla 5 se muestran las propiedades físicas/químicas y las propiedades térmicas del hidróxido de sodio, que se utiliza como catalizador en el primer reactor.



**Tabla 5.**

*Propiedades físicas y químicas del catalizador.*

<b>Propiedades físicas/químicas.</b>		
Forma	Sólido	Unidades
Masa molar	40	g/mol
Punto de fusión	322	°C
Punto de ebullición	1390	°C
Densidad	2130	Kg/m <sup>3</sup>
Propiedades térmicas.		
Capacidad Calorífica (S)	1,5	KJ/Kg K
Calor latente de fusión	8,4	KJ/mol
Entalpía de formación (sólido)	-426,19	KJ/mol

Nota. Esta tabla fue tomada de Phenolic Resins: A Century of Progress (p.12) por Pilato, 2010, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

### **3.2.3. Propiedades de los modificadores**

**I) Propiedades mecánicas del policarbonato.** En la Tabla 6 se muestran las propiedades mecánicas del policarbonato, que puede ser utilizado como alimentación en el tanque de mezclado con la resina fenólica a fin de mejorar las propiedades físicas y químicas del producto.

**Tabla 6.***Propiedades mecánicas de PC*

<b>Propiedades mecánicas de PC.</b>		
	Amorfo	Unidades
Grado de cristalinidad		
Módulo de elasticidad	2500	MPa
Resistencia a la tensión	65	MPa
Temperatura de transición al vidrio	150	°C
Elongación	110	%
Gravedad específica	1.2	---
Temperatura de fusión	230	°C

Nota. Esta tabla fue tomada de *Fundamentos de manufactura moderna* (p. 161), por Groover, 2007, Mc Graw Hill.

### **3.3. Obtención de Resina Fenólica**

Para la obtención de la principal materia prima utilizada en la elaboración de resina fenólica (espuma floral). Se debe preparar una solución al 37% p/p de formaldehído y mezclarlo con fenol de tal manera que se cumpla la relación molar de  $P:F < 1$ . Se alimenta un reactor batch con la mezcla fenol – formaldehído en presencia de un catalizador básico (hidróxido de sodio). (Pilato, 2010)

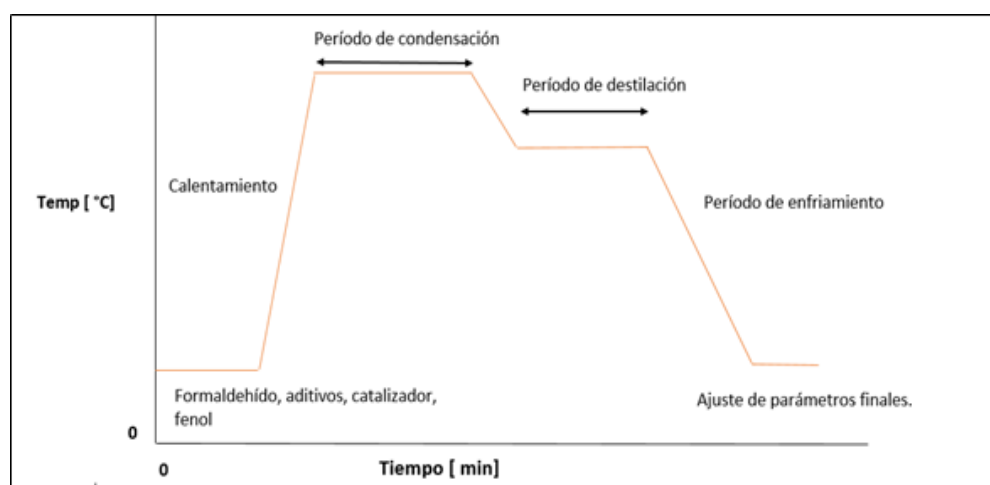
Pilato (2010), menciona el proceso para la obtención de resina fenólica del tipo resol como se muestra en la Figura 14.

- Alimentar las materias primas al reactor junto al catalizador en medio básico.

- Elevar la temperatura del reactor hasta alcanzar la condensación de la alimentación, y mantener una agitación uniforme de aproximadamente 2500 rpm.
- Condensar el producto obtenido en el reactor hasta alcanzar los parámetros deseados.
- Eliminar el excedente de agua presente en la resina tipo resol.
- Ajustar los parámetros finales (En el caso para la obtención de espuma floral agregar surfactantes, agentes de soplado, agentes neutralizantes, Urea, Tintura.)
- Descargar el producto obtenido en bandejas.
- Para disponer de espuma floral como producto final este se debe dejar a temperatura ambiente por 2 días.

**Figura 14.**

*Esquema de producción de resina.*



Nota. Adaptado de *Phenolic Resins: A Century of Progress* (p. 143), por Pilato, 2010, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

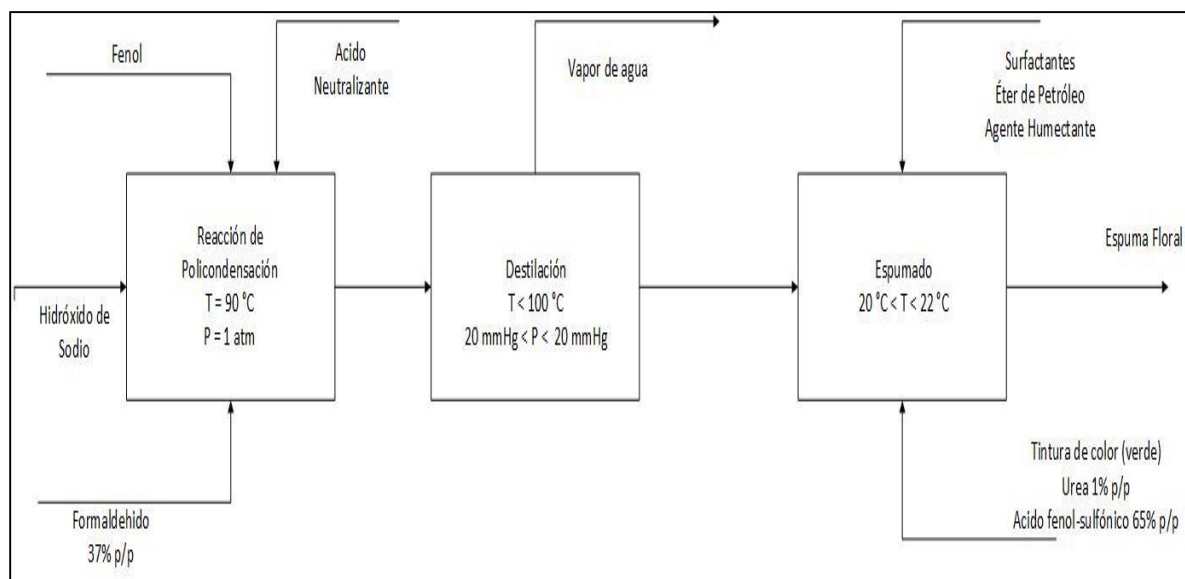
### 3.4. Diagramas de Proceso.

#### 3.4.1. Diagrama de flujo (BFD)

La Figura 15 muestra el proceso simplificado y las principales operaciones involucradas en la obtención de espuma floral mediante un diagrama de bloques.

#### Figura 15.

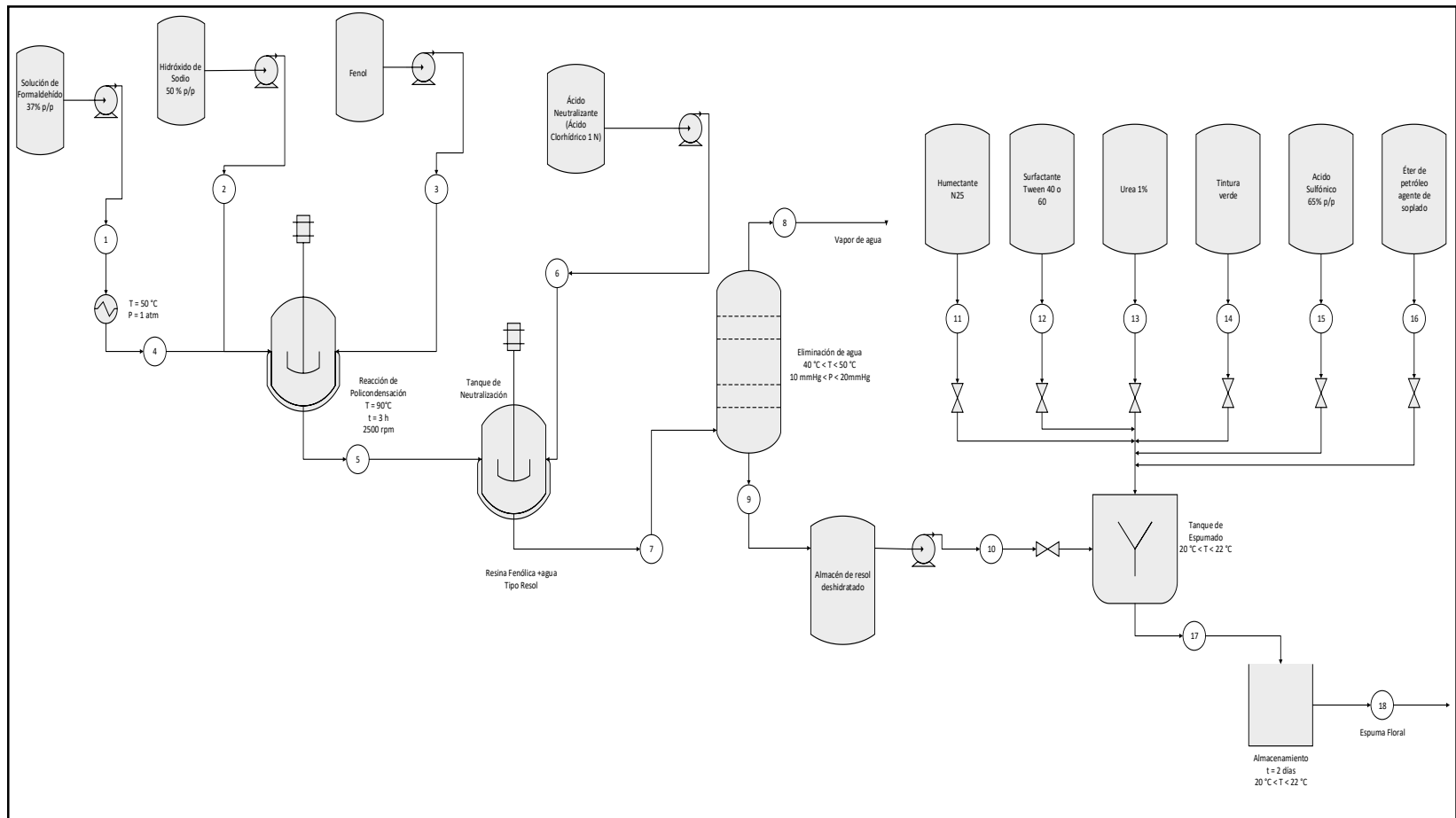
*Diagrama de bloques del proceso.*



### 3.4.2. Diagrama PFD

Figura 16.

Diagrama de flujo del proceso.



### 3.5. Cinética química de la reacción de policondensación

La reacción de curado de una resina fenólica comercial mediante espectroscopía IR, permite obtener el estudio cinético de dicha reacción. Se obtuvieron datos obtenidos de experimentos isotérmicos realizados a temperaturas que oscilan entre 60 y 200 ° C. Mediante procedimientos integrales sobre datos isotérmicos, se determina que los datos de la reacción de curado pueden describirse por encima de 140 ° C utilizando el modelo de reacción homogéneo de primer orden, es decir, se tiene un coeficiente de regresión alto y un valor de intercepción bajo, a temperaturas superiores a 140 ° C. Es importante mencionar, que los modelos cinéticos homogéneos de orden cero, segundo orden y orden superior no pueden usarse para describir los datos experimentales. La energía de activación para el modelo de reacción homogéneo de primer orden se ha obtenido mediante análisis de regresión lineal de datos, este dato es de 49.6 kJ/mol. En la Tabla 7 se muestran los valores de las constantes cinéticas (k) a 170 °C. (Carotenuto & Nicolais, 1999)

**Tabla 7.**

*Constantes de velocidad de la reacción.*

<b>Constantes de velocidad para el modelo de obtención del resol</b>		
n	k	R
1	0.14	0.99
1.5	0.089	0.99

Nota. En la tabla, k es la constante de velocidad; R es el coeficiente de regresión lineal; n es el parámetro del modelo. Tomada de *Kinetic Study of Phenolic Resin Cure by IR*

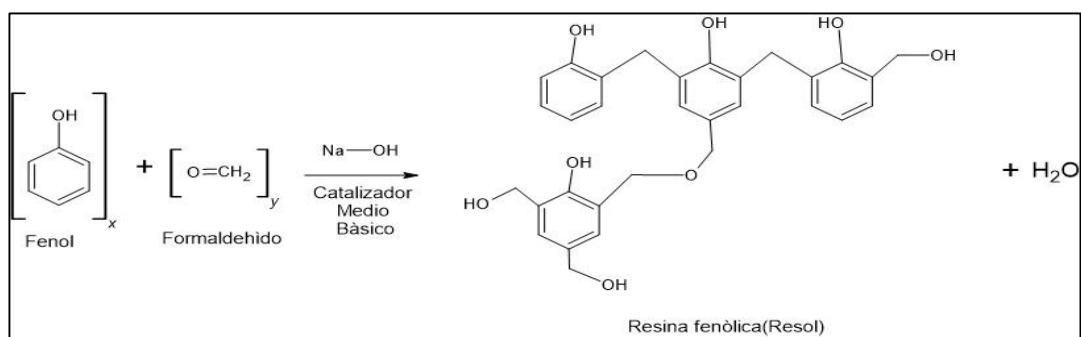
*Spectroscopy* (p.2711), por Carotenuto & Nicolais, 1999, *Journal of Applied Polymer Science*, 74(11).

### 3.5.1. Reacción Química

Landrock (1995), especifica los valores para los subíndices:  $x = 1\sim 3$ ,  $y = 0\sim 2$  en la reacción de producción de resina fenólica del tipo resol, tal como se muestra en la Figura 17.

**Figura 17.**

*Reacción de producción de resina fenólica(resol)*



## 3.6. Diseño del reactor

### 3.6.1. Volumen

Para la determinación del volumen de operación del reactor, se estableció utilizar el flujo volumétrico correspondiente a la corriente de salida del reactor y multiplicarlo por el tiempo de reacción, este cálculo se lo realiza mediante la ecuación 1. En tanto que, para el volumen del reactor se debe incrementar al volumen de operación un volumen extra de seguridad, conocido como factor de seguridad por nivel de llenado. Es decir, se debe aumentar un 20% al volumen de operación del reactor, ecuación 2. (Coronel, 2014)

**Ecuación 1.**

*Volumen de operación del reactor.*

$$V_{\text{reactor,operación}} = v \cdot t$$

**Ecuación 2.**

*Volumen del reactor Batch.*

$$V_{\text{reactor}} = V_{\text{reactor,operación}} + 0.20 * V_{\text{reactor,operación}}$$

**3.6.2. Agitadores.**

En los reactores discontinuos, la agitación es una operación unitaria muy importante, porque Los reactivos se ponen en contacto con agitación y se mejora la transferencia de calor en la reacción. La agitación intenta minimizar los puntos muertos dentro del recipiente, es decir, puntos donde algunas partes del fluido no entran en contacto con el resto. Las relaciones para el diseño estándar del sistema de agitación se muestran en el Anexo II. (Coronel, 2014)

**3.6.3. Ecuación de diseño**

Según Fogler (2008) un reactor intermitente presenta alta conversión, razón por la cual se deja reaccionar los reactivos por períodos establecidos de tiempo. Para la reacción de policondensación entre el fenol y formaldehído, las variaciones del número de moles del fenol en función del tiempo dependen de la velocidad de consumo del fenol por el volumen del reactor de acuerdo con la ecuación 3. La ecuación 4 se empleó para determinar la conversión del fenol, en función de los moles obtenidos en la simulación.



**Ecuación 3.**

*Ecuación de diseño reactor batch.*

$$\frac{dN_{fenol}}{dt} = r_{fenol} * V$$

**Ecuación 4.**

*Ecuación de la conversión del fenol.*

$$X_{fenol} = \frac{N_{fenol,0} - N_{fenol}}{N_{fenol,0}}$$

**3.6.4. Tiempo de residencia**

La ecuación 5, es la forma integral del balance de moles del reactor batch. Sirve para determinar el tiempo t necesario para reducir el número de moles de fenoles iniciales a “n” número de moles de fenol. La misma puede ser empleada para determinar las moles de B. (Fogler, 2008)

**Ecuación 5.**

*Forma integral del balance de moles batch.*

$$t = N_{fenol,0} \int_0^x \frac{dx}{-r_{fenol}V}$$

**3.7. Simulación****3.7.1. Selección del modelo termodinámico**

El paquete de software termodinámico elegido es "Polímeros", asegurando que las unidades utilizadas están en el mismo sistema de medida. Este paquete de software nos permite simular el estado estacionario en el reactor. Entre los métodos numéricos

disponibles, destaca POLYNRTL porque se requiere mínimo datos de atributos para estimar los datos faltantes. (Vasconcelos et al., 2019)

En la producción de resina fenólica tipo resol, se selecciona como método de parámetros POLYNRTL. Con la finalidad de calcular las propiedades termofísicas de la resina fenólica tipo resol, ya que esta no se encuentra dentro de la base datos del programa.

### ***3.7.2. Ingreso de componentes no disponibles en el databank de Process Engineering V10.2***

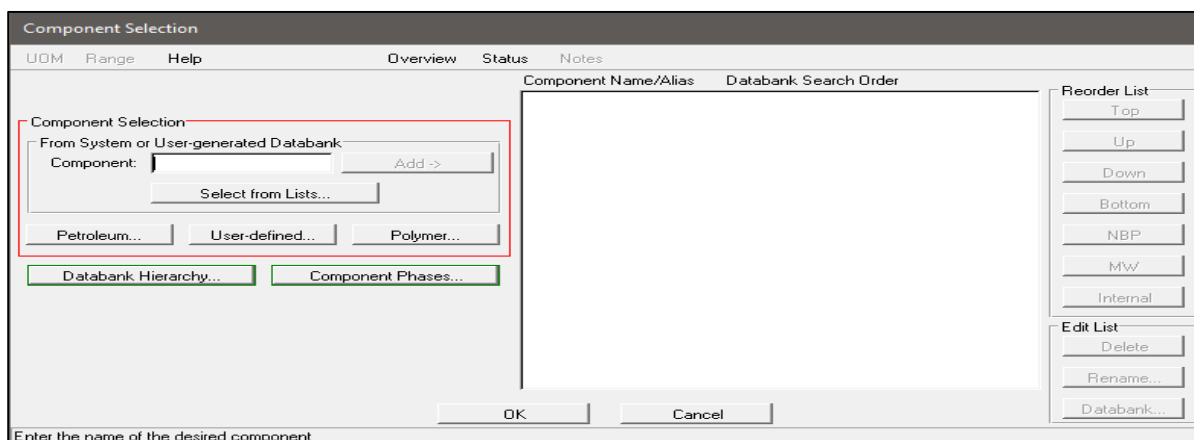
Generalmente los simuladores de procesos químicos presentan librerías que contienen una importante base de componentes puros, sin embargo, existen casos donde uno o varios componentes necesarios en la simulación no se encuentran disponibles.

En el caso de requerirse componentes que no se encuentran dentro de una librería se procede a crear estructuras Unifac las cuales nos ayudan a determinar las propiedades del compuesto deseado.

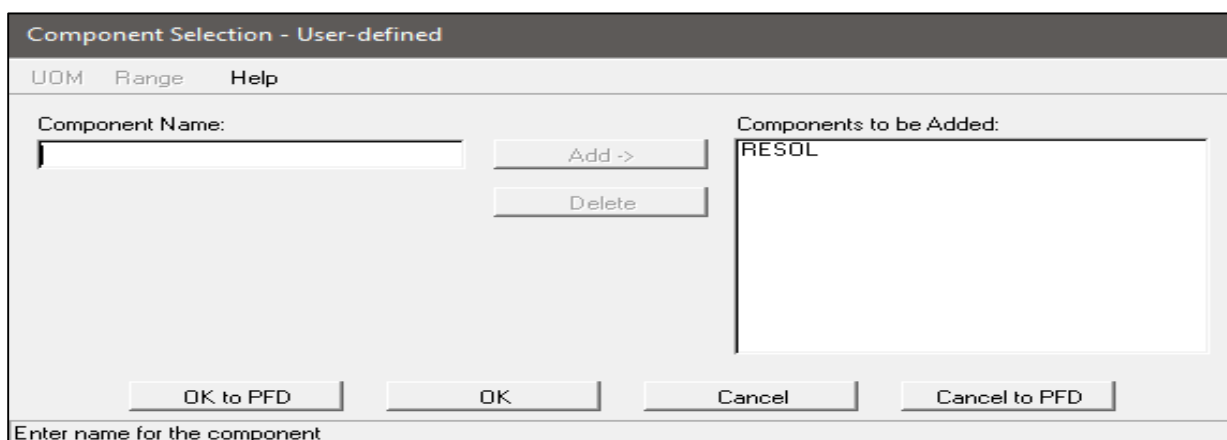
Para ello damos clic en el botón Component Selection y luego en User – defined para colocar el nombre del compuesto, finalmente dar clic en add y ok to PFD tal como se muestran en la Figura 18 y la Figura 19.

**Figura 18.**

*Ventana de selección del componente.*

**Figura 19.**

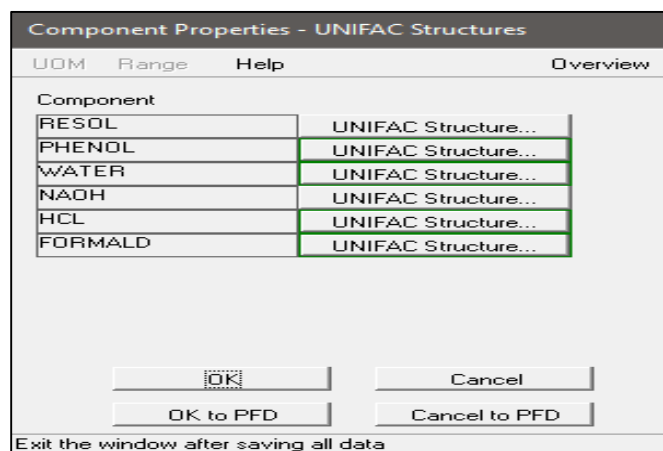
*Ventana User – defined (definir nombre del componente)*



Para que el simulador de procesos químicos calcule las propiedades del compuesto no existente en su librería, ingresamos a la opción component properties y seleccionamos UNIFAC structures y seleccionamos el nombre del compuesto no existente. La Figura 20 muestra la ventana de Unifac Structures con los componentes que se utilizaran en la simulación.

**Figura 20.**

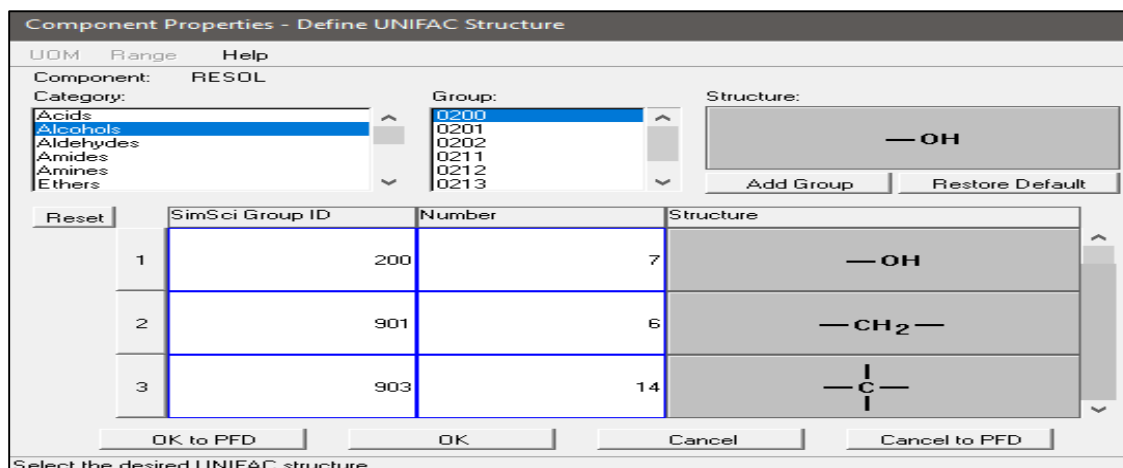
Ventana UNIFAC structures.



Para ingresar las estructuras Unifac, se debe verificar el compuesto del que se desea calcular las propiedades en nuestro caso el resol, cuya estructura se encuentra representada en la Figura 17. Una vez determinada la estructura se ingresan los grupos funcionales representativos y el número de veces que se repiten en la molécula tal como se observa en la Figura 21.

**Figura 21.**

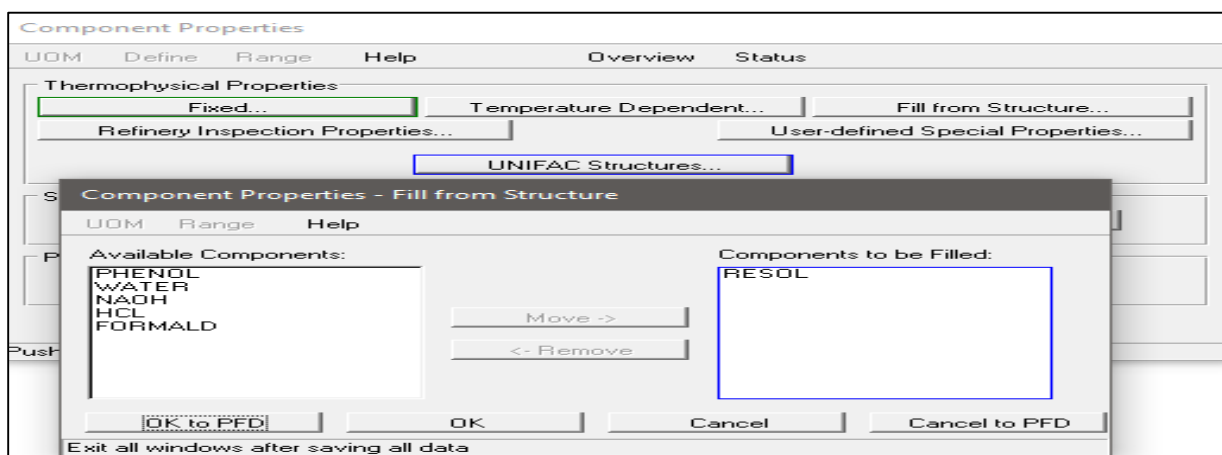
Ingreso de grupos funcionales representativos de la molécula.



Presionamos ok en la ventana anterior, luego fill from structure y seleccionamos el compuesto creado en nuestro caso resol presionar add y ok. Para conocer las propiedades del compuesto damos clic en el botón de fixed y nos aparecerá las propiedades del compuesto creado. La Figura 22 y Figura 23 muestran los pasos para completar el ingreso de componentes que no se encuentran en la base de datos del simulador.

### Figura 22.

Ingreso de la estructura UNIFAC al nombre del compuesto.



### Figura 23.

Propiedades termo - físicas del Resol.

Component Properties - Fixed Properties									
UOM Range Help									
		CAS Number	Molecular Weight	Standard Liquid Density	Normal Boiling Point	Critical Temperature	Critical Pressure	Critical Volume	Critical Compressibility Factor
Copy									
Paste	RESOL		532.46	-66.393 API	959.18 F	1779.60 F	478.50 psia	22.498 ft <sup>3</sup> /lb-mol	0.448018
Reset	PHENDL	108-95-2	94.113	-0.61600 API	359.31 F	789.98 F	889.08 psia	3.6682 ft <sup>3</sup> /lb-mol	0.243
	WATER	7732-18-5	18.0153	10.000 API	212.00 F	705.16 F	3198.8 psia	0.89620 ft <sup>3</sup> /lb-mol	0.229
	NAOH	1310-73-2	39.9971	-57.842 API	2834.33 F	4616.33 F	3625.9 psia	3.2037 ft <sup>3</sup> /lb-mol	0.213
	HCL	7647-01-0	36.4606	35.475 API	-121.00 F	124.70 F	1205.3 psia	1.2975 ft <sup>3</sup> /lb-mol	0.249
	FORMALD	50-00-0	30.0263	56.715 API	-2.38 F	274.73 F	955.80 psia	1.8421 ft <sup>3</sup> /lb-mol	0.223

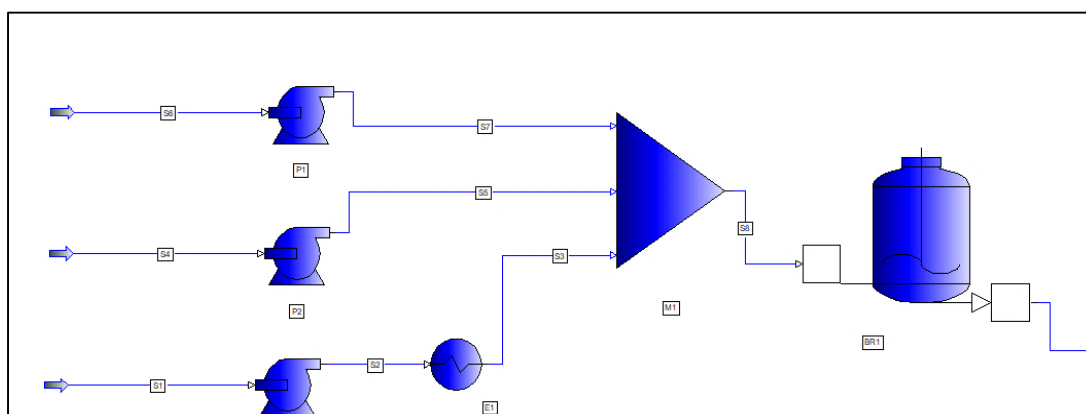
### 3.7.3. Simulación del reactor

En el proceso por lotes los reactivos químicos se alimentan primero y los productos se retiran después de que se produce la reacción. Es decir, al finalizar la reacción, los productos son retirados del reactor a un cierto tiempo, para utilizarlos en otros procesos químicos. En la polimerización de resinas, se instalan grandes reactores discontinuos, a menudo para evitar llevar a cabo estas reacciones altamente exotérmicas se utilizan reactores continuos de tanque agitado. (Seider et al., 2009)

Se utilizará un reactor batch en la simulación para el proceso por lotes, y se ingresará los valores de flujo por lote. En el reactor se especifica las corrientes de alimentación de fenol, formaldehído e hidróxido de sodio. Se establece el tiempo del lote y se ingresa la reacción química de la figura 16 con sus respectivos parámetros cinéticos (tabla 8), teniendo en cuenta que la relación estequiometria de fenol/formaldehido es de 4/7. Además, la corriente de formaldehído es calentada a 50 °C para evitar la formación de ácido fórmico. Todas estas especificaciones se muestran en la Tabla 8 junto con las corrientes que se evidencian en la Figura 24.

**Figura 24.**

*Simulación del reactor.*



**Tabla 8.***Datos ingresados al reactor batch.*

<b>Corriente</b>	<b>Flujo másico [kg/día]</b>	<b>Presión [atm]</b>	<b>Temperatura [°C]</b>
Fenol	23.7553	1	20
Formaldehido	13.2659	1	20
Hidróxido de sodio	0.2518	1	20
<b>Equipo</b>	<b>Tiempo de residencia [horas]</b>	<b>Presión [atm]</b>	<b>Temperatura [°C]</b>
Reactor batch	3	1	90
Heater	-----	1	50

**3.7.4. Neutralización del resol**

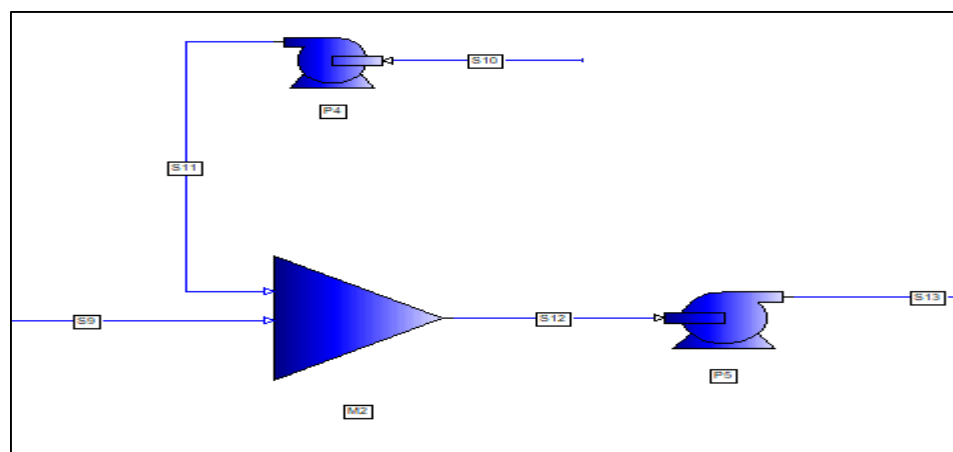
Después de que las materias primas para la obtención de resol reaccionen en medio acuoso y a una temperatura que no debe superar los 100 °C, el producto obtenido de la reacción se debe neutralizar con un ácido apropiado para mantener un valor de pH entre 6.1 y 7. Las condiciones de fabricación, las propiedades físico químicas del resol son los factores más importantes para la producción de espuma floral, por ello cada fabricante desarrolla procedimientos para obtener resol de calidad esto depende de las condiciones de fabricación (relación molar fenol – formaldehido, cantidad de catalizador, ácido neutralizante, tiempo y condiciones de operación). (Landrock, 1995)

Herrera (2016), menciona que para neutralizar la resina tipo resol obtenida producto de la reacción entre fenol y formaldehido, la resina debe ser transportada a un tanque en donde se lleva a cabo la neutralización de la base presente con un ácido fuerte (Ácido clorhídrico) de concentración 1N.

Todas las especificaciones que se ingresan al tanque de neutralización de resol se muestran en la Tabla 9 junto con las corrientes se esquematizan en la Figura 25.

**Figura 25.**

*Neutralización de la resina.*



**Tabla 9.**

*Datos ingresados al tanque de neutralización.*

Corriente	Flujo volumétrico [L/día]	Presión [atm]	Temperatura [°C]
HCl	4.75106	1	20
Equipo	Presión [atm]	Temperatura [°C]	
Mixer	1	50	

### 3.7.5. Eliminación de agua

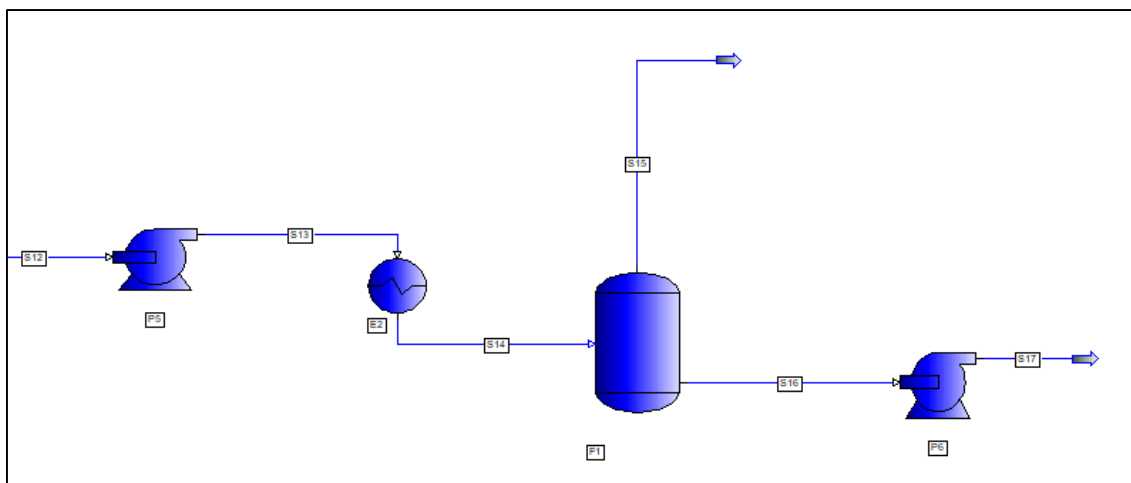
Una vez culminado el proceso de neutralización de la resina tipo resol para la eliminación de agua se requiere un control exacto de las variables de presión y temperatura. Para eliminar el exceso de agua existente se requiere de una presión entre 10 mmHg - 30 mmHg y temperatura máxima de 60 °C. (Pilato et al., 2013)



En este sentido, para eliminar el excedente de agua en la corriente proveniente del tanque de neutralización se utiliza un separador flash, con temperatura de 40 °C y 10 mmHg de presión. Este diagrama se muestra en la Figura 26.

**Figura 26.**

*Eliminación de agua.*



### 3.7.6. Tanque de espumado

Una vez eliminado el exceso de agua se procede a realizar el proceso de espumado de la resina fenólica en este proceso se agregan varios compuestos químicos entre ellos: humectantes, surfactantes, agentes de soplado, urea, tintura, y ácidos orgánicos, mismos que nos ayudaran a tener a disposición final la espuma floral las cantidades agregadas en el proceso se muestran en el Anexo II.

Se puede usar varios surfactantes o tensoactivos para formar espumas fenólicas entre los cuales se encuentra el Tween 40 o 60 o el aceite de silicona que es utilizado para formar espumas de poliuretano. Los agentes de soplado de tipo volátil (Éter de petróleo), este se evapora por que la reacción de espumado es exotérmica formando un gas de soplado lo cual ayuda a dar textura a la espuma floral. (Landrock, 1995)

Se utiliza la urea en un porcentaje de 1% esto para eliminar el olor a formaldehído procedente de la reacción de espumado. El ácido sulfónico al 65% se utiliza como catalizador en la reacción de espumado y adicional un agente humectante para facilitar la absorción de agua de la espuma floral. La tintura de color puede agregar al proceso a fin de dar un color llamativo a las espumas florales. Todos los datos requeridos para la reacción de espumado se encuentran detallados en la Tabla 10.

**Tabla 10.**

*Datos ingresados al tanque de espumado.*

<b>Corriente</b>	<b>Flujo másico [kg/día]</b>
Surfactante Tween 40 o 60	3.1480
Humectante N25	3.1480
Éter de petróleo	3.9350
Urea	0.7870
Ácido fenol sulfónico	3.9350
colorante	0.3935

### **3.7.7. Almacenamiento**

Para los moldes de almacenamiento lo ideal es diseñar moldes cuadrados o rectangulares de un tamaño mayor al volumen de espuma floral obtenida. Para disponer del producto terminado se necesita tiempo de reposo de 2 días a temperatura ambiente. (D. Espinoza, 2010)

### **3.8. Criterio de selección de bombas para fluidos de alta viscosidad**

Chicuriel & Garza (1998), indican que para una correcta selección del equipo de bombeo es necesario determinar los requerimientos específicos del sistema y se debe

tomar en cuenta las siguientes consideraciones a fin de obtener el mayor rendimiento a un costo muy bajo. Estos criterios son:

- Tipo de fluido a transportar.
- Viscosidad y densidad del fluido
- Caudal y presión del fluido que se desea suministrar a cierto punto.
- Distancia existente entre bomba y punto de transporte

Dependiendo del fluido que se va a transportar se pueden clasificar hasta en 4 grupos según la viscosidad del fluido que se desea transportar: el grupo número uno está comprendido por fluidos que presentan baja viscosidad (el agua y el alcohol). Para el transporte de este tipo de fluidos no presentan muchas limitaciones al momento de seleccionar el equipo de bombeo. El segundo grupo lo comprenden productos alimenticios (Nata, mantequilla, yogurt, etc) cuya viscosidad aumenta debido a la agitación de los procesos, para lo cual no se recomienda el uso de bombas centrífugas estándar. El tercer grupo está conformado por fluidos que presentan punto de fluidez. Mientras que el último grupo son fluidos que tienen una viscosidad elevada, pero disminuyen con la agitación aplicada se recomienda utilizar bombas de membrana o bombas de engranaje si la presión es elevada. (Sanchez & Sanchez, 1993)

La Figura 27 muestra un criterio adicional para la selección de bombas la misma toma en cuenta el proyecto completo como la instalación, combinación de accesorios, presión de trabajo distancias de transporte del fluido.

**Figura 27.**

*Criterio adicional para la selección de bombas en instalaciones.*

<b>TIPO DE FLUIDO A UTILIZAR</b>	<b>TIPO DE UTILIZACION DEL FLUIDO</b>	<b>SERIE de BOMBA adecuadas para el fluido elegido</b>
<b>Fluidos de baja viscosidad como:</b> aceites varios de baja viscosidad ( <b>SAE 15/20</b> ), aceite hidráulico, anticongelante, gasóleo y afines, etc.	Transvase fluido <b>max 23 l/min</b> para breves distancias (5/10 m), a baja presión (max 8 bar)	<b>SERIE BOMBA 1:1/23</b> Relación 1:1 capacidad relativa 23 l/min ver pag. 64
<b>Fluidos de baja viscosidad como:</b> aceites varios de baja viscosidad ( <b>SAE 15/20</b> ), aceite hidráulico, anticongelante, gasóleo y afines, etc.	Suministro fluidos <b>max 40 l/min</b> para breves y medias distancias (15/20 m), a baja presión (max 8/10 bar)	<b>SERIE BOMBA 1:1/40</b> Relación 1:1 capacidad relativa 40 l/min ver pag. 65
<b>Fluidos de baja y media viscosidad como:</b> aceites varios de baja viscosidad ( <b>SAE 15/50</b> ), aceite hidráulico, anticongelante, gasóleo y afines, etc.	Suministro fluidos <b>max 14 l/min</b> breves y medias distancias (40/50 m), a media presión (max 25 bar)	<b>SERIE BOMBA 3:1/14</b> Relación 3:1 capacidad relativa 14 l/min ver pag. 74
<b>Fluidos de media y alta viscosidad como:</b> aceite motor, aceite cambio ( <b>SAE 15/140</b> ) aceite hidráulico, anticongelante, gasóleo y afines, etc.	Suministro fluidos <b>max 18 l/min</b> para medias y largas distancias, (150/200 m) a media presión (max 40 bar) idónea para estudio de instalaciones	<b>SERIE BOMBA 5:1/18</b> Relación 5:1 capacidad relativa 18 l/min ver pag. 75
<b>Grasas a media y alta viscosidad</b>	Engrasado para breves y largas distancias a alta presión (max 400 bar)	<b>SERIE BOMBA 50:1</b> Relación 50:1 capacidad relativa 1500 g/min ver pag. 166
<b>Grasas a media y alta viscosidad</b>	Engrasado para largas distancias a alta presión (max 500 bar) idónea para estudio de instalaciones	<b>SERIE BOMBA 60:1</b> Relación 60:1 capacidad relativa 1900 g/min ver pag. 167

Nota. La Figura 27 muestra un nuevo criterio para la selección de bombas, en base al proyecto de instalación y la distancia transporte de fluido. Tomado de *Como seleccionar la bomba adecuada*, Serretectno, 2015, (<https://serretectno.com.mx/index.php/como-seleccionar-la-bomba-adecuada/>)

## Capítulo IV

### 4. Resultados y discusiones

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del diseño de la planta de producción de resina fenólica (espuma floral), con respecto a la simulación del proceso en el software PRO II.

#### 4.1. Alimentación del proceso

Mediante ensayo y error de la simulación se determinó la cantidad óptima de reactivos que deben ingresar al reactor, para obtener la resina fenólica necesaria para cubrir la demanda de espuma floral especificada en el balance de masa (Anexo I). Se tomó como valores iniciales los datos de la Tabla 8, y luego de realizar las iteraciones se encontró los valores de alimentación para el reactor, los cuales se especifican en la Tabla 11.

**Tabla 11.**

*Flujos másicos por componente en el reactor.*

Datos iniciales	Flujo másico [kg/día]	Resina fenólica [kg/día]
Fenol	44.8500	
Formaldehido	25.0459	
Hidróxido de sodio	0.4754	63.4552
Agua	67.6916	

Según P. Espinoza (2008) la velocidad de reacción de policondensación del resol, es directamente proporcional a la concentración del catalizador, formaldehído y fenol. En la Tabla 8 se observa que las cantidades de fenol y resina iniciales son inferiores, a las cantidades de fenol y resina estimadas producto de las iteraciones realizadas mismas que se encuentran en la Tabla 11. En consecuencia, se puede

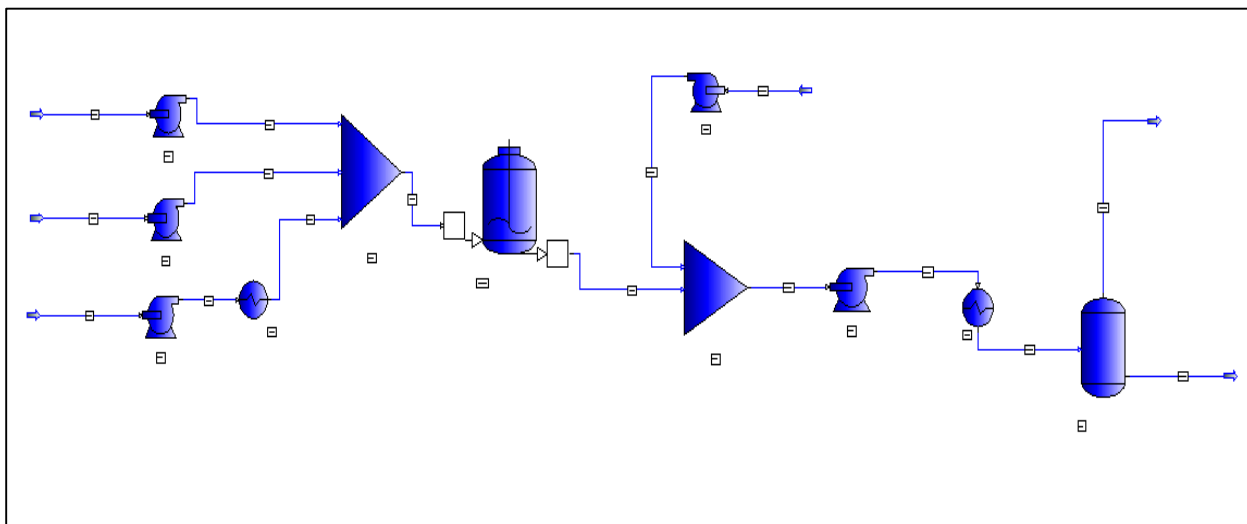
establecer que a mayor flujo másico de fenol se obtiene una mayor cantidad de resina fenólica(resol).

#### 4.2. Obtención de resina tipo resol

Con base en la información revisada, se determinó que el proceso de producción por lotes es el más adecuado para cubrir la demanda interna de espuma floral. La Figura 28 muestra la configuración diseñada en Pro II. Donde se observa de forma general la producción de resina fenólica (espuma floral) en cinco pasos. El primer paso es la reacción de policondensación del polímero en el reactor discontinuo. El segundo paso es la neutralización de la resina. El tercer paso es la deshidratación, en la cual se elimina el exceso de agua del polímero. En el cuarto paso, el producto obtenido en la corriente S17 se trasporta a un tanque de agitación en donde se agregan los aditivos necesarios para el espumado. Y finalmente se procede a colocar la espuma floral en moldes de 0.8m\*0.8m\*0.8m para secarla a temperatura ambiente. (Rodríguez et al., 2009)

**Figura 28.**

*Proceso de obtención de resina fenólica.*



### 4.3. Balance de masa del proceso

Todas las corrientes del proceso simulado se presentan en la Tabla 12, en donde se observan los flujos másicos de cada componente a la entrada y salida de cada equipo.

**Tabla 12.**

*Balance de masa.*

Corriente	Flujo másico [ kg / día]						
	Componente	$CH_2O$	$C_6H_6O$	Resina	$H_2O$	HCl	NaOH
S1	25.0460			42.6458			
S2	25.0460			42.6458			
S3	25.0460			42.6458			
S4		44.85					
S5		44.85					
S6				0.4754			0.4754
S7				0.4754			0.4754
S8	25.0460	44.85		43.1213			0.4754
S9	0.0049		63.4522	49.5903			0.4254
S10				8.2041	0.5105		
S11				8.2041	0.5105		
S12	0.0049		63.4522	57.7644	0.5105		0.4254
S13	0.0049		63.4522	57.7644	0.5105		0.4254
S14	0.0049		63.4522	57.7644	0.5105		0.4254
S15	2.5625E-06		63.4522	1.5058	4.6046E-05		0.4254
S16	0.0049		~ 0	56.2586	0.5105		~ 0
S17	1.8163E-06		63.4522	1.5058	3.7787E-05		0.4254
S18					0.5105		
S19	0.0049			56.2586			
S20	0.0049			56.2586			
S21	0.0049			56.2586			

#### 4.4. Composiciones en el reactor en función del tiempo

La masa en kg de cada componente en el reactor batch en función del tiempo de reacción, se encuentran tabulados en la Tabla 13.

**Tabla 13.**

*Composiciones másicas vs tiempo.*

Tiempo [ h ]	Fenol	Formaldehído	Agua	NaOH	Resol
0	5.6062	3.1307	5.3901	0.0594	0
0.2	0.2380	0.1335	6.1608	0.0594	7.5947
0.4	0.0099	0.0061	6.1936	0.0594	7.9174
0.6	0.0005	0.0009	6.1949	0.0594	7.9306
0.8	0	0.0004	6.1950	0.0594	7.9319
1	0	0.0004	6.1950	0.0594	7.9319
1.2	0	0.0004	6.1950	0.0594	7.9319
1.4	0	0.0004	6.1950	0.0594	7.9320
1.6	0	0.0004	6.1950	0.0594	7.9320
1.8	0	0.0004	6.1950	0.0594	7.9320
2	0	0.0003	6.1950	0.0594	7.9320
2.2	0	0.0004	6.1950	0.0594	7.9320
2.4	0	0.0004	6.1950	0.0594	7.9320
2.6	0	0.0004	6.1950	0.0594	7.9319
2.8	0	0.0004	6.1950	0.0594	7.9319
3	0	0.0004	6.1950	0.0594	7.9319

De la tabla anterior es evidente que a partir de 0.8 horas todo el fenol se ha consumido por completo. Landrock (1995) indica que el tiempo de reacción para la producción de resina fenólica tipo resol es de 3 horas y según Covarrubias et al (2016) el tiempo varía entre 2-5 horas. Sin embargo, los resultados de la simulación evidencian que en el período 0.8 - 3 horas la cantidad de resina producida es insignificante en comparación con la producida en el periodo 0-0.8 horas. P. Espinoza (2008) sugiere

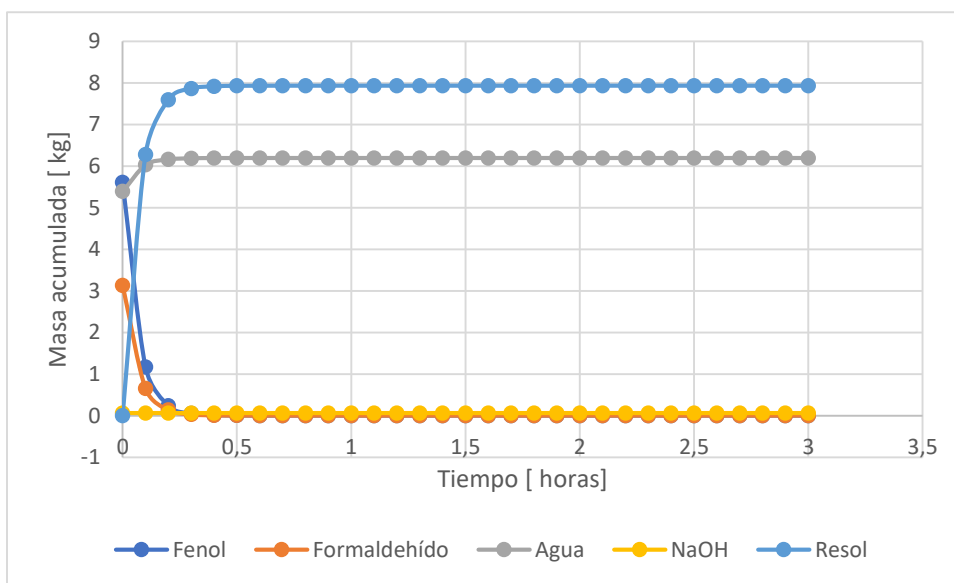


que la reacción debe ocurrir a 70 °C y el tiempo de reacción debe ser aproximadamente 1 hora.

Los resultados en el reactor batch en función del tiempo de reacción se presentan en la Figura 29

**Figura 29.**

*Masa acumulada en el reactor vs tiempo de reacción*



#### 4.5. Energía utilizada en el proceso

En el diseño del proceso se utilizaron varios equipos para la obtención de resina fenólica del tipo resol, la energía requerida por cada equipo se muestra en la tabla siguiente.

**Tabla 14.**

*Energía requerida para el proceso de obtención de resol.*

<b>Equipo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Energía [kJ/h]</b>
Calentador	1	316.5338
Enfriador	1	646.9152
Condensador	1	6118.3741
Separador	2	5740.8026
Reactor	1	2816.5643
Bombas	6	3.0589
Compresores	1	237.6078
Tanques de mezcla	2	-----
Tanques de almacenamiento	1	-----
<b>Total</b>		<b>15879.8567</b>

La energía total del proceso es de 15879.8567 kJ/h, ya que la planta de producción de resina fenólica (espuma floral) trabajara por un periodo de 24 horas laborables debido a que solo se estima la producción de 6 lotes – día, la energía total necesaria para cumplir este proceso es de 381116.5608 kJ/día laborable.

#### **4.6. Reactor**

##### **4.6.1. Volumen estimado del reactor.**

El flujo volumétrico de la corriente de salida del reactor es de 4.83856 L/h. El volumen operacional del reactor para un tiempo de reacción de 3 horas obtenido mediante la Ecuación 1 es de 13.7933 litros. El volumen del reactor se calculó mediante de la Ecuación 2 (ver Anexo II). Por lo tanto, que para obtener 63.4552 kg/día (7.9319 kg) de resina fenólica tipo resol necesaria para producir espuma floral y cubrir la

demanda interna de este producto, se requirió de un reactor batch con un volumen de 16.5519  $\approx$  17 litros. Según P. Espinoza (2008) para producir 8.3 kg de resina fenólica se necesita un reactor batch de 7.2362 litros.

#### **4.6.2. Sistema de agitación del reactor**

Considerando que la turbina es eficaz para diversas viscosidades, el diseño del sistema de mezcla consiste en un agitador de turbina centrado en el estanque. En este diseño, solo se usa un impulsor en el eje del agitador y la velocidad es de 2500 rpm dado que la altura del líquido está cerca de la altura del tanque, no se usa deflector. El agitador consta de 6 palas y tiene forma recta. (P. Espinoza, 2008)

El diámetro del impulsor es de 2.45 cm, ubicado a una altura de 2.45 cm. El ancho de las paletas impulsoras es de 0.49 cm y la longitud de las palas de 0.61 cm. Todos estos cálculos correspondientes al diseño de agitación, se encuentran detallados en el Anexo III.

#### **4.7. Recuperación de agua del proceso**

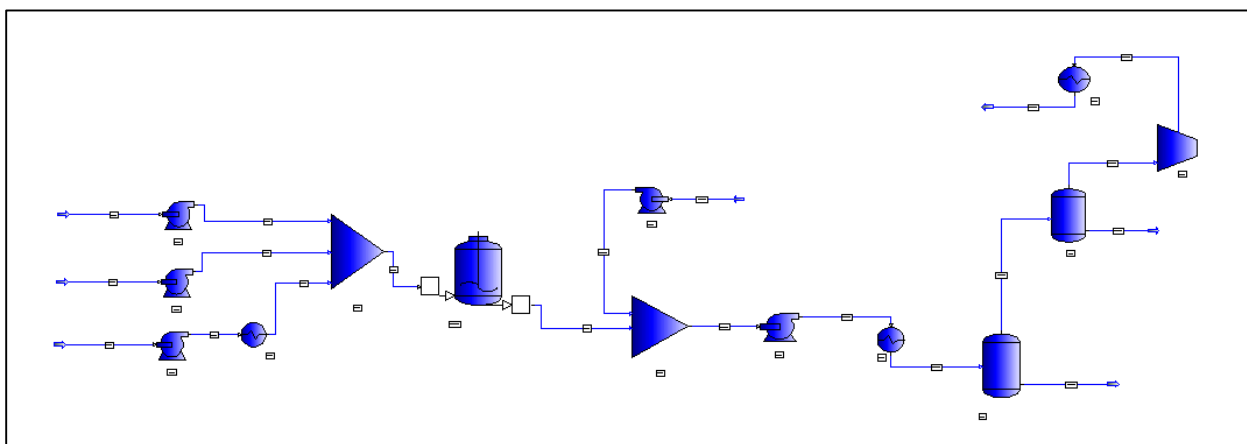
Una vez transcurrido el tiempo de reacción en el proceso de obtención de resina del tipo Resol, se empleó un proceso de separación flash a una presión de 10 mmHg y una temperatura de 40°C para eliminar el exceso de agua de la corriente de S14 tal como se muestra en la Figura 30, la composición de la corriente de vapor y líquido producto de la separación se puede observar en la Tabla 15 y en la Tabla 16.

A través del proceso de separación se logró eliminar el 95.2595% de agua por la corriente de vapor. Con el fin de reutilizar el agua eliminada en otros procesos de lavado de materiales (moldes de secado) o procesos químicos, se procedió a realizar un diseño para la recuperación del vapor de agua a través de la separación de ácido clorhídrico de la corriente de vapor producida en el separador flash seguidamente se

procedió a condensar el vapor para obtener una fracción líquida en la corriente S21. Los resultados obtenidos para la corriente S21 luego de realizar el diseño se pueden observar en la Tabla 17.

**Figura 30.**

*Propuesta de diseño para recuperación de agua.*



**Tabla 15.**

*Composición de la corriente de vapor S16.*

Componentes	Fracción másica
Fenol	0
Formaldehido	8.8026E-05
Agua	0.9907
Hidróxido de sodio	6.3235E-17
Resol	1.0227E-21
Ácido clorhídrico	0.0091

**Tabla 16.***Composición de la corriente de líquido S15.*

<b>Componentes</b>	<b>Fracción másica</b>
Fenol	0
Formaldehido	3.8438E-08
Agua	0.0410
Hidróxido de sodio	0.0071
Resol	0.9517
Ácido clorhídrico	6.9070E-07

**Tabla 17.***Resultados obtenidos en la corriente S21.*

<b>Componentes</b>	<b>Flujo másico [kg/día]</b>	<b>Temperatura [°C]</b>	<b>Presión [mmHg]</b>	<b>Fracción Líquida</b>
Fenol	0			
Formaldehido	0.0047988			
Agua	56.2586	20	18.7500	1
Hidróxido de sodio	0			
Resol	0			
Ácido clorhídrico	0			

**4.8. Análisis de sensibilidad**

Se realizó un análisis de sensibilidad en el bloque B15, para determinar el valor de la presión necesaria para condensar la corriente de vapor generada en la separación. En la siguiente tabla se muestra como varía la presión en el condensador, en función de la fracción del líquido.

**Tabla 18.**

*Resultados del análisis de sensibilidad presión del condensador.*

<b>Presión [atm]</b>	<b>Fracción líquida</b>
0.0131	0
0.0148	0
0.0164	0
0.0180	0
0.0197	0
0.0213	0
0.0230	0
0.0246	1
0.0263	1

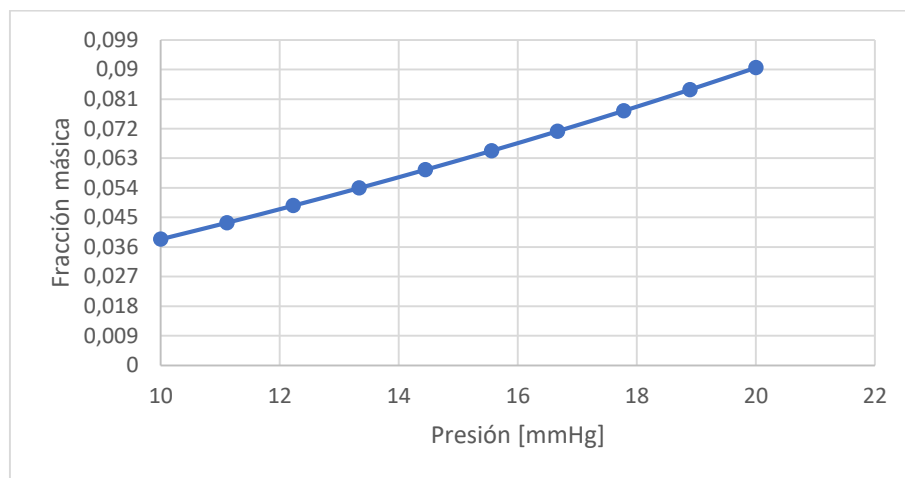
Se determinó que para obtener una fracción de líquido en la corriente S21 la presión ingresada en el bloque B15 debe ser de 0.0246 atm, esto con el fin de recuperar el agua eliminada del proceso.

#### **4.9. Estimación de la presión y temperatura de la separación al vacío**

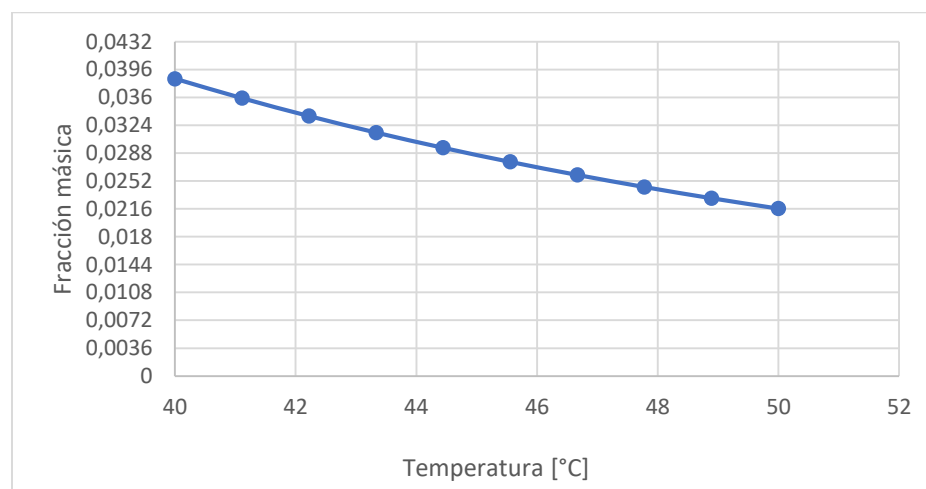
Landrock (1995), menciona que en el proceso de deshidratación de la resina fenólica tipo resol las condiciones de operación del equipo de separación deben encontrarse en un rango de 10 mmHg a 20 mmHg para la presión y 40 °C a 50 °C para la temperatura. Para conocer las condiciones del equipo a la cual se pueda eliminar una mayor cantidad de agua por la corriente S14, se realizó un análisis de sensibilidad entre la presión de operación del separador y el flujo másico de agua que se elimina por la corriente S16 en forma de vapor. El valor inicial fue de 10 mmHg para la presión, y seguidamente se realizó un análisis de sensibilidad entre la temperatura de operación del separador y el flujo másico eliminado por la corriente S16 comenzando con un valor de 40 °C.

**Figura 31.**

*Curva de sensibilidad presión vs fracción másica.*

**Figura 32.**

*Curva de sensibilidad temperatura vs fracción másica.*



Una vez realizado el análisis de sensibilidad se obtuvieron los valores óptimos de presión y temperatura en el separador flash, el mismo debe trabajar a una temperatura de 50 °C y una presión de 10 mmHg para poder obtener una fracción másica de agua con un valor de 0.0230 en la corriente de líquido S14. A estas

condiciones se logra eliminar el 97.6775% de agua la resina fenólica productos de la reacción.

#### **4.10. Bombas**

En la simulación para la obtención de resina fenólica del tipo resol se utilizaron 6 bombas para el transporte de fluido tanto como para la corriente de alimentación al reactor, así como las corrientes de producto. La resina obtenida en el reactor y después del proceso de separación presenta una viscosidad de 5.5807E06 por lo cual se considera un fluido muy viscoso. Direct Industry (2020), recomienda utilizar bombas de doble membrana para cuando se necesite transportar líquidos muy viscosos con altas densidades o a su vez utilizar bombas de engranajes si el fluido tiene una alta viscosidad y temperatura sin partículas sólidas. Adicionalmente se puede ver que se cumple el criterio de selección de la Figura 27, esto debido a que el resultado obtenido de 0.3 L/min para el caudal de la bomba es menor al caudal máximo proporcionado para líquidos de alta viscosidad. Para la alimentación del reactor, se puede utilizar bombas centrífugas esto debido a que presentan una baja y puede presentar partículas sólidas por lo cual este tipo de bombas es la mejor elección.

#### **4.11. Propiedades de la resina obtenida en la simulación**

En la Tabla 1, se mencionan varias propiedades físicas de la resina tipo resol que se utiliza para la obtención de espuma floral. Una de ella es la densidad, que se encuentra en un rango de 1.28-1.32 g/cm<sup>3</sup>. Por su parte, la resina fenólica tipo resol que se obtuvo en la simulación presenta una densidad de 1.09 g/cm<sup>3</sup>. Covarrubias et al (2016) menciona la condensación de fenoles con exceso de formaldehído en medio básico produce resinas fenólicas con un peso molecular de 300–700. La resina obtenida en la simulación tiene un peso molecular de 532.59. Mediante la comparación de estas



propiedades, se puede establecer que la resina alcanzada en la simulación posee las propiedades requeridas para su aplicación como espuma floral.

#### 4.12. Tiempo de operación de la planta

Para la obtención de resina fenólica tipo resol, la planta de producción opera por 24 horas diarias. Ya que la producción es por lotes, se estimó obtener 6 lotes de espuma floral con un periodo de duración de 4 horas por lote

#### 4.13. Obtención de espuma floral

Para obtener la espuma floral como producto final, se ingresa el flujo másico de resina fenólica tipo resol obtenido en la simulación (63.4552 kg/día) junto con los demás flujos másicos calculados en el Anexo I, en un tanque de espumado. Los correspondientes flujos másicos se muestran en la Tabla 19.

**Tabla 19.**

*Flujos másicos que ingresan al tanque de espumado.*

<b>Componente</b>	<b>Flujo másico [ kg/día]</b>
Resina fenólica	63.4552
Surfactante Tween 40 o 60	3.1480
Agente de humectación N25	3.1480
Agente de soplado (Éter de petróleo).	3.9350
Urea 1%	0.7870
Acido fenol Sulfónico 65% p/p	3.9350
Tintura de color verde	0.3935

De los datos de la tabla anterior, se obtienen 78.7015 kg/día de espuma floral. Es decir, que se producirán en las 4 horas que dura el proceso 10.5758 kg de espuma floral. Por lo tanto, el diseño propuesto satisface la demanda estimada de espuma floral en el Ecuador y se acepta la hipótesis del presente proyecto de investigación.

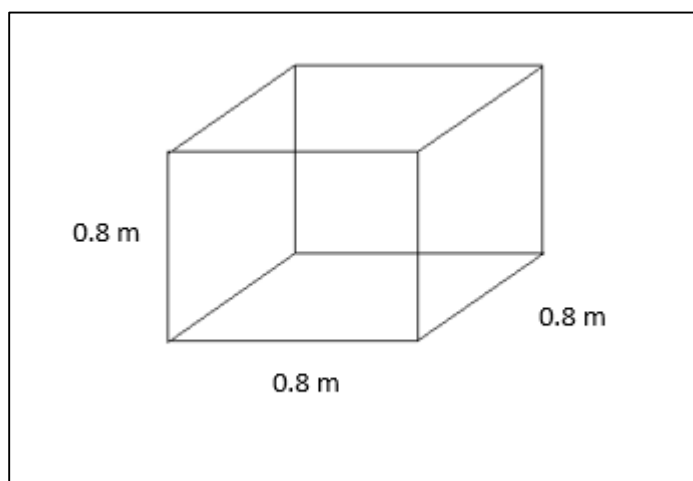
#### 4.14. Molde y área de secado

La espuma floral resultante del tanque de espumado se descarga en un molde de  $\approx 0.5\text{m}^3$ . Para su posterior secado, a temperatura ambiente y con tiempo de secado igual 2 días.

El cálculo del volumen del molde se muestra en el Anexo IV. El molde de secado con sus respectivas medidas se presenta en la Figura 33.

#### Figura 33.

*Molde de secado.*



Cabe recalcar, que en este proceso se obtienen 6 lotes por día en un período de 24 horas. Y cada lote necesita de 2 días secado. Por lo tanto, se necesita un volumen de secado de aproximadamente  $5\text{ m}^3$ . (Revisar cálculo en el Anexo IV).

#### 4.15. Propuesta de reactor con mayor volumen

Mediante los balances de masa y la simulación realizada, se determinó que para cubrir con la demanda interna de espuma floral es necesario un reactor con volumen aproximado de 17 litros para procesar 63.4522 kg/día de resina, sin embargo, debido a los costos elevados de operación y limpieza del mismo no es rentable operar con un

reactor de un volumen pequeño. Por lo tanto, se propuso aumentar la capacidad del reactor a 100 L esto con fin de obtener una mayor cantidad de resina fenólica.

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos para la alimentación y la cantidad obtenida de resina fenólica (Resol).

**Tabla 20.**

*Flujos másicos de la propuesta de reactor.*

<b>Datos iniciales</b>	<b>Flujo másico [kg/día]</b>	<b>Resina fenólica [kg/día]</b>
Fenol	322	
Formaldehido	180.1981	
Hidróxido de sodio	3.4142	455.553
Ácido clorhídrico	3.6489	

## Capítulo V

### 5. Conclusiones y recomendaciones

#### 5.1. Conclusiones

Para el proceso de producción de espuma floral, se logró establecer los diagramas de bloque y de flujo (BFD y PFD) con las condiciones de operación adecuadas al diseño.

Mediante la simulación del diseño propuesto se determinó que para cubrir la demanda de resina fenólica (espuma floral) en el Ecuador, es necesario un reactor batch de aproximadamente 17 L. Adicionalmente, se propuso aumentar la capacidad del reactor a 100 L para producir mayor cantidad de resina fenólica, a la que puede darse distintas aplicaciones.

Se determinó que el tiempo de reacción para obtener resina fenólica(resol), a partir de fenol y formaldehído en medio de un catalizador básico es de 0.8 h, considerando que en este periodo de tiempo el fenol se consumió por completo.

Se realizó la simulación en PRO/II, en la que se obtuvieron los balances de masa y energía de todo el proceso diseñado, para obtener 63.4522 kg/día de resina fenólica.

La temperatura y la presión tienen efectos determinantes en el proceso de deshidratación de la resina fenólica. A medida que la temperatura aumenta y la presión disminuye dentro de los rangos establecidos, se logró retirar una mayor fracción másica de agua por la corriente de vapor(S16) del destilador flash.

#### 5.2. Recomendaciones

Utilizar un simulador comercial como Aspen One, ya que el software cuenta con paquetes de simulación específico para polímeros y herramientas como el diseño de especificaciones, calculadora, optimización, entre otros complementos. De tal manera

que aumente la confiabilidad de los resultados y adicionalmente permita optimizar el proceso.

Realizar la producción de resina fenólica y espuma floral en el laboratorio para poder obtener las propiedades del producto y compararlas con las propiedades reportadas en la bibliografía.

Realizar un estudio en el laboratorio el cual permita observar a que propiedades de la espuma floral afecta el uso de modificadores físicos y químicos, que mejoran la estructura del producto requerido.

Debido a que se generó un proceso de recuperación de agua la cual se presenta como producto de la destilación flash, se recomienda realizar un estudio de la corriente S21 para verificar si la misma puede ser reinyectada al reactor o reutilizada en otros procesos.

## 6. Bibliografía

- Baquero, D. (2019). *Estudio comparativo de resultado de los simuladores UNISIM y PRO/II mediate la simulación de una planta desbutanizadora* [Universidad de la Laguna]. <https://riull.ull.es/xmlui/handle/915/14739>
- Camacho, J., Chalcualan, J., & Masaquiza, G. (2017). *Escenarios para el cambio estructural de la economía a través de la industria petroquímica* [Universidad de las Fuerzas Armadas]. <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/12509/1/T-ESPE-053613.pdf>
- Carotenuto, G., & Nicolais, L. (1999). Kinetic study of phenolic resin cure by IR spectroscopy. *Journal of Applied Polymer Science*, 74(11), 2703–2715. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19991209\)74:11<2703::AID-APP18>3.0.CO;2-M](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19991209)74:11<2703::AID-APP18>3.0.CO;2-M)
- Castro, A., de Miguel, S., Garetto, T., & Sad, M. (2020). *Reactores Químicos*. Ediciones UNL. [www.unl.edu.ar/editorialhdl.handle.net/11185/5528](http://www.unl.edu.ar/editorialhdl.handle.net/11185/5528)
- Chambergó, J. C., Valverde, Q., Pachas, A. A., & Yépez, H. (2017). Estudio del Comportamiento Fluido-Dinámico de un Agitador a Escala Reducida Mediante Simulación Numérica. *Información Tecnológica*, 28(3), 37–46. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642017000300005>
- Chicuriel, R., & Garza, J. L. (1998). *Selección y aplicación de equipos de bombeo para fluidos diversos*.
- Cornejo, C., & Machado, M. (2017). *Diseño y construcción de un Reactor Batch prototipo para la obtención de Compost con Residuos Orgánicos generados en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo* [Escuela Politécnica Superior de Chimborazo]. <http://dspace.espe.edu.ec/bitstream/123456789/6341/1/85T00415.pdf>

- Coronel, J. (2014). Diseño y construcción de un reactor tipo batch para el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK [Universidad Internacional SEK]. In *McKinsey Quarterly* (Vol. 2, Issue 1). <https://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/1006>
- Covarrubias, H. E., Sáenz, A., & Castañeda, A. O. (2016). Resinas termoestables de fenol-formaldehído. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 17(6).
- Díaz, P. B. (2018). *Introducción Al Diseño De Reactores Químicos Homogéneos* [Universidad Nacional de Callao]. <http://209.45.55.171/handle/UNAC/4034>
- Díaz, S., Pérez-Correa, J. R., & Fernández-Fernández, M. A. (2018). Automatic control on batch and continuous distillation columns. *IEEE Latin America Transactions*, 16(9), 2418–2426. <https://doi.org/10.1109/TLA.2018.8789563>
- Direct Industry. (2020). *¿Cómo elegir una bomba?*  
<http://guide.directindustry.com/es/que-bomba-elegir/>
- Espinoza, D. (2010). *Elaboración de espumas florales fenólicas que incorporan nutrientes, sustancias inhibidoras de etileno, preservantes y bactericidas para la conservación prolongada de plantas obtenidas in vitro en el laboratorio de cultivo de tejidos*. [Escuela Politécnica del Ejército].  
<http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/648>
- Espinoza, P. (2008). *Diseño, simulación y control automático de temperatura para reactores batch en producción de resinas* [Universidad Católica de Valparaíso].  
[http://opac.pucv.cl/pucv\\_txt/txt-9500/UCI9954\\_01.pdf](http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-9500/UCI9954_01.pdf)
- Fogler, H. S. (2008). *Elementos de ingeniería de las reacciones químicas* (4th ed.). Pearson Education.

- Fogler, H. S. (2016). *Elements of chemical reaction engineering* (5th ed.). Pearson Education.
- Foyer, G., Chanfi, B. H., Virieux, D., David, G., & Caillol, S. (2016). Aromatic dialdehyde precursors from lignin derivatives for the synthesis of formaldehyde-free and high char yield phenolic resins. *European Polymer Journal*, *77*, 65–74.  
<https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2016.02.018>
- García, Y. (2017). *Propuesta tecnológica de una planta para la producción de resinas fenólicas a partir de la lignina del bagazo de caña de azúcar*. Universidad de Matanzas.
- Geankoplis, C. J., Hersel, A. A., & Lepek, D. H. (2018). *Transport Processes And Separation Process Principles* (5th ed.). Pearson Education.
- Gil Chaves, I. D., López, J. R. G., García Zapata, J. L., Leguizamón Robayo, A., & Rodríguez Niño, G. (2016). *Process Analysis and Simulation in Chemical Engineering*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14812-0>
- Granado, L., Tavernier, R., Foyer, G., Ghislain, D., & Sylvain, C. (2018). Comparative curing kinetics study of high char yield formaldehyde- and terephthalaldehyde-phenolic thermosets. *Thermochimica Acta*, *667*(April), 42–49.  
<https://doi.org/10.1016/j.tca.2018.06.013>
- Groover, M. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna* (3th ed.). Mc Graw Hill.
- Haydary, J. (2019). *Chemical Process Design and Aspen Plus and Aspen HYSYS Applications*. John Wiley & Sons, Inc.
- Herrera, C. (2016). *Diseño del proceso para la obtención de espuma floral utilizando*



*resina fenólica tipo resol y policarbonato reciclado* [Escuela Politécnica Nacional].

<https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/15145?mode=full>

John, B., & Reghunadhan Nair, C. P. (2014). Syntactic Foams. In *Handbook of*

*Thermoset Plastics* (pp. 511–554). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-3107-7.00013-0>

Kirk, & Othmer. (1998). Phenolic resins. In *Encyclopedia of Chemical Technology*. John Wiley & Sons, Inc.

Laizhou Yuanda Chemical Industrial. (n.d.). *Espuma floral húmeda y seca. Espuma floral línea de producción y tecnología*. Spanish Alibaba.

Landrock, A. (Ed.). (1995). *Handbook of plastic foams*. Noyes publication.

Liang, B., Li, X., Hu, L., Bo, C., Zhou, J., & Zhou, Y. (2016). Foaming resol resin modified with polyhydroxylated cardanol and its application to phenolic foams.

*Industrial Crops and Products*, 80, 194–196.

<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.11.087>

Manfredia, L., De la osa, O., Galego, N., & Vázquez, A. (1999). Structure – properties relationship for resols with different formaldehyde / phenol molar ratio. *Polymer*, 40, 3867–3875.

Martínez, J., Gómez, C., Restrepo, D., & Gañán, P. (2009). Evaluación del curado de resinas fenólicas tipo novolaca modificadas con lignina por espectroscopia infrarroja por transformada de fourier. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales* 2009;, 1(3), 1173–1179.

<http://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/1870237>

Martínez, P. (2020). *Diseño de un tanque mezclador con sistema de calentamiento para*

*la producción de protectores solares* [Universidad Jaume I].

<http://repositori.uji.es/xmlui/handle/10234/187003>

Martínez, V., Alonso, P., López, J., Salado, M., & Rocha, J. A. (2000). *Simulación de Procesos en Ingeniería Química* (1th ed.). Plaza y Valdés Editores.

McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriott, P. (2007). *Operaciones unitarias en ingeniería química* (7th ed.). McGrawHill.

Mott, R. (2006). *Mecánica de Fluidos* (6th ed.). Pearson Education.

Núñez, J. L., & Udeos, T. de J. (2015). *Diseño, Construcción y Operación de un Reactor Batch para Saponificar Acetato de Etilo* [Escuela Superior Politécnica del Litoral].

<https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/38218>

Orozco, A. F. (2018). *DESARROLLO DE UNA PROPUESTA DE MEJORA PARA LA VELOCIDAD DE DESTILACIÓN AL VACÍO DE GLICEROL FORMAL UTILIZANDO UNA COLUMNA EMPACADA* [Fundación Universidad de América].

<https://hdl.handle.net/20.500.11839/6953>

Paul, E. L., Atiemo-Obeng, V., & Susane, K. (Eds.). (2004). *Handbook Of Industrial Mixing Science And Practice*. John Wiley & Sons, Inc.

<https://doi.org/10.1002/0471451452.ch8>

Pilato, L. (Ed.). (2010). *Phenolic Resins: A Century of Progress*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-04714-5\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-642-04714-5_5)

Pilato, L., Gardziella, A., & Knop, A. (2013). *Resinas fenólicas: química, aplicaciones, estandarización, seguridad y ecología*. (2nd ed.). Springer Science & Business.

Redacción Interempresas. (2014). *Tecnología de vacío en seco para la producción de resina fenólica - Química*. Interempresas.Net.

- Rodríguez, M., Mujica, V., Martínez, A., & Sulma, S. (2009). Factibilidad técnico-económica de una planta de producción de resinas fenólicas (Tipo Resol). *Revista INGENIERÍA UC*, 16(3), 7–13.
- Salthammer, T., Mentese, S., & Marutzky, R. (2010). Formaldehyde in the Indoor Environment. *Chemical Reviews*, 110, 2536–2572.  
<https://doi.org/10.1021/cr800399g>
- Sanchez, F. S., & Sanchez, E. (1993). *Manual de selección y diseño de bombas*. Universidad Autónoma del Occidente.
- Seader, J. D., Henley, E. J., & Roper, K. D. (2016). *Separation Process Principles* (4th ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Seider, W. D., Lewin, D. R., Seader, J. D., Widagdo, S., Gani, R., & Ng, K. M. (2017). *Product and process design principles : synthesis, analysis and evaluation* (4th ed.). John Wiley & Sons Inc.
- Seider, W. D., Seader, J. D., Lewin, D. R., & Widagdo, S. (2009). *Product and process design principles. Synthesis, analysis and evaluation* (3th ed.). John Wiley & Sons Inc.
- Serretecno. (2015). *Como seleccionar la bomba adecuada*.  
<https://serretecno.com/como-seleccionar-la-bomba-adecuada/>
- Servicio Nacional de Aduana del Ecuador. (2021). *Importaciones*.  
<https://www.aduana.gob.ec/importaciones/>
- Sinnot, R., & Towler, G. (2019). *Diseño en ingeniería química* (5th ed.). Editorial Reverté, S.A.
- Smith, R. (2005). *Chemical Process Design and Integration* (2th ed.). John Wiley &

Sons, Ltd.

Vasconcelos, M., Castanho, C., & Brandão, A. (2019). Synthesis simulation of 1,4-polybutadiene using Aspen. *Brazilian Polymer Conference, December*.

<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36064.02564>

Veritrade. (2018). *Comercio exterior importaciones y exportaciones de ECUATORIANA DE ESPUMA FLORAL ECUAFLORAL S.A.*

<https://www.veritradecorp.com/es/ecuador/importaciones-y-exportaciones-ecuatoriana-de-espuma-floral-ecuafloral-sa/ruc-1792418739001>

Yu, Y., Wang, Y., Xu, P., & Chang, J. (2018). Preparation and characterization of phenolic foam modified with bio-oil. *Materials*, 11(11), 12–14.

<https://doi.org/10.3390/ma11112228>