

# Desarrollo de una estrategia de producción de resina fenólica alineada con las necesidades del mercado en Ecuador

## Development of a Phenolic Resin production strategy aligned with Market needs in Ecuador



Jonathan Javier Sayavedra-Delgado<sup>1</sup>  
Edwin Alexander Quiñonez Gómez<sup>1</sup>  
Angel Fabrizio Zevallos Cuzme<sup>1</sup>  
Britany Geomara Bastidas Molina<sup>1</sup>

✉ <https://orcid.org/0000-0002-1824-2855>  
✉ <https://orcid.org/0009-0001-2034-6063>  
✉ <https://orcid.org/0009-0008-7284-3062>  
✉ <https://orcid.org/0009-0000-2768-0171>

<sup>1</sup>Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE) | Latacunga – Ecuador | CP 050105

✉ [jjsayavedra@espe.edu.ec](mailto:jjsayavedra@espe.edu.ec)

<http://doi.org/10.26423/rctu.v11i1.757>  
Páginas: 27- 41

### Resumen

El objetivo de este estudio fue el desarrollo de una estrategia para el diseño de una planta de producción de resina fenólica (espuma floral) que permita satisfacer la demanda existente en el país, mediante el uso del software de simulación PRO II. Para ello, se identificaron las necesidades de diseño a través de diagramas de bloques (BDF) y de flujo (PFD), teniendo en cuenta las operaciones unitarias involucradas. De igual forma, se presentó un reactor discontinuo diseñado para lograr una alta conversión en la producción de espuma floral, de acuerdo con la reacción para la obtención de espuma floral tipo resol. Para esto, se tomó en cuenta el valor del volumen, además de considerar las condiciones óptimas de operación, incluyendo la presión y la temperatura, a través de un análisis de sensibilidad. Los resultados se verificaron mediante el cálculo de balances de masa y energía, utilizando la demanda de espuma floral, que fue de aproximadamente 143 toneladas anuales, obtenida de la página web del Servicio Nacional de Aduana del Ecuador (Importaciones). Este valor fue empleado para el cálculo de producción diario, y ayudó a evidenciar la validez de la simulación, el valor simulado de 63 4552 kg/día, contra el valor de producción de resina fenólica calculado que fue de 63 3547 kg/día. De esta manera se evidencia en la pertinencia del estudio para incentivar la generación de estudios que beneficien la creación y desarrollo de la industria petroquímica..

**Palabras clave:** diseño de proceso, resina fenólica, simulación.

### Abstract

The objective of this study was to develop a strategy for designing a phenolic resin (floral foam) production plant to meet the existing demand in the country, using the PRO II simulation software. For this purpose, the design needs were identified through block diagrams (BDF) and process flow diagrams (PFD), considering the involved unit operations. Additionally, a batch reactor was presented, designed to achieve high conversion in the production of floral foam, according to the reaction for obtaining resol-type floral foam. For this, the volume value was considered, as well as the optimal operating conditions, including pressure and temperature, through a sensitivity analysis. The results were verified by calculating mass and energy balances, using the demand for floral foam, which was approximately 143 tons annually, obtained from the National Customs Service of Ecuador (Importations) website. This value was used for the calculation of daily production and helped to demonstrate the validity of the simulation. The simulated value was 63 4552 kg/day, compared to the calculated phenolic resin production value of 63 3547 kg/day. This shows the relevance of the study and encourages the generation of research that benefits the creation and development of the petrochemical industry.

**Keywords:** process design, phenolic resin, simulation.

Recepción: 14/01/2024 | Aprobación: 12/05/2024 | Publicación: 28/06/2024

## 1. Introducción

A partir de la aparición de las primeras resinas termoestables, surgieron las resinas fenólicas, conocidas como los primeros polímeros sintéticos producidos a nivel industrial. [1] Sus aplicaciones supusieron un boom en la industria debido a sus propiedades adhesivas que las hacen altamente resistentes a los disolventes orgánicos, así como a su resistencia al calor y estabilidad dimensional, características que las posicionan como las mejores resinas del mercado actual.[2]

Las resinas fenólicas forman parte de la gran familia de polímeros, los oligómeros, que se obtienen por reacciones de fenoles con aldehídos. Este tipo de producto tiene una clasificación como “Novolac” y “Resol”, donde se utilizan catalizadores ácidos y básicos para obtener un producto de tipo líquido con alta viscosidad.[3] Dentro de la clasificación antes mencionada, el producto que se implementa en este proceso de elaboración de espumas son las resinas tipo *Resol* que se obtienen en condiciones básicas, con un exceso de formaldehído [4]. Son resinas oligoméricas termorreactivas que pueden ser catalizadas por condiciones ácidas, básicas o ésteres especiales. Estos tipos de resinas se utilizan sobre todo para compuestos reforzados con fibras. [4, 5]

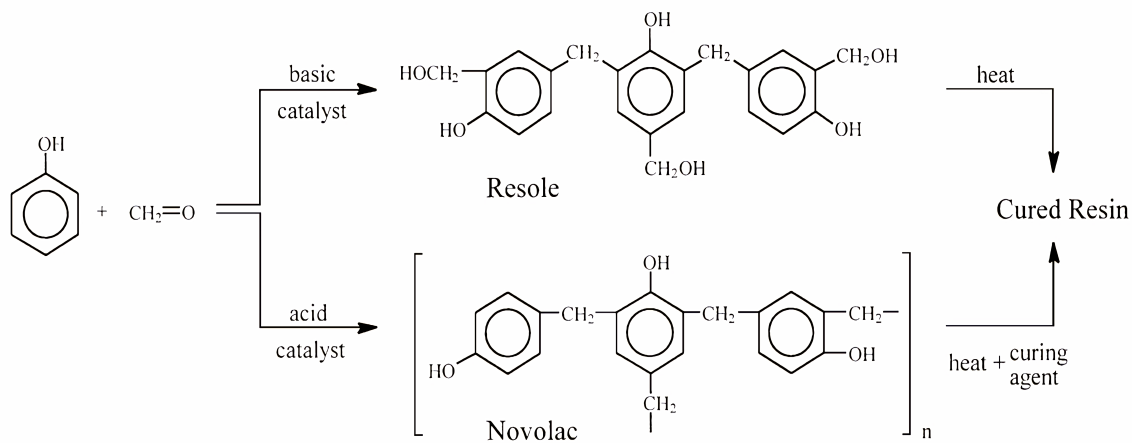
La resina fenólica tiene una amplia gama de aplicaciones en constante expansión, y según *Grand View Research* en 2018, el mercado global de estas resinas tuvo un valor de 11.17 billones de dólares y se proyecta un crecimiento anual del 5.3% entre 2019 y 2025. En la actualidad, los principales productores a nivel mundial son Estados Unidos, Alemania, China y Corea del Sur. Dentro de algunas mejoras se busca el reemplazo de tecnologías basadas en derivados de crudo de petróleo por lo que se han iniciado estudios basados en biomasa para obtener la misma resina

fenólica enfocándose en la economía circular.[6]

Las resinas fenólicas se caracterizan principalmente por su bajo costo de producción, debido a sus materias primas que son de fácil disponibilidad, convirtiéndose en una elección atractiva para las diferentes aplicaciones industriales (ver Figura 1). Su proceso de síntesis es fácil y rentable, en conjunto con la accesibilidad que contribuye a la amplia comercialización en una variedad de sectores desde la producción de materiales compuestos hasta la fabricación de productos laminados, finalmente los costos de producción son los más competitivos en el mercado.

Los resoles, una variante de las resinas fenólicas, se originan al combinar fenol y un exceso de formaldehído en presencia de un catalizador alcalino, como hidróxido de sodio o amoníaco. La proporción típica de fenol a formaldehído oscila entre 1:1 y 1:1.3 en esta síntesis.[7] Los resoles son resinas con una moderada ramificación y un peso molecular relativamente bajo, lo que los hace solubles en agua. Tienen una vida útil limitada, generalmente de varios meses, y se consideran resinas fenólicas de “una etapa” y que no requieren agentes de curado adicionales. El proceso de curado se realiza mediante polimerización térmica a temperaturas que oscilan entre 130-200 °C, liberando agua como subproducto.[8]

Las resinas novolac pertenecen a una variedad de resinas fenólicas que por lo general resulta de una reacción con poco formaldehído donde la proporción es mínima en el rango 0.75-0.85 moles por cada mol de fenol. Dicho producto cuenta con propiedades termoplásticas en su estado inicial donde se debe adicionar un endurecedor como HMTA (*Hexametilentetramina*), para que los derivados resultantes sean resistentes al calor, además de ser insolubles e infusibles. Su aplicación más importante es en la industria forestal.[9]



**Figura 1.** Obtención de resinas *Resol* – *Novolac*. Fuente: *Thermosets: Phenolics, Novolacs, and Benzoxazine*. [10].

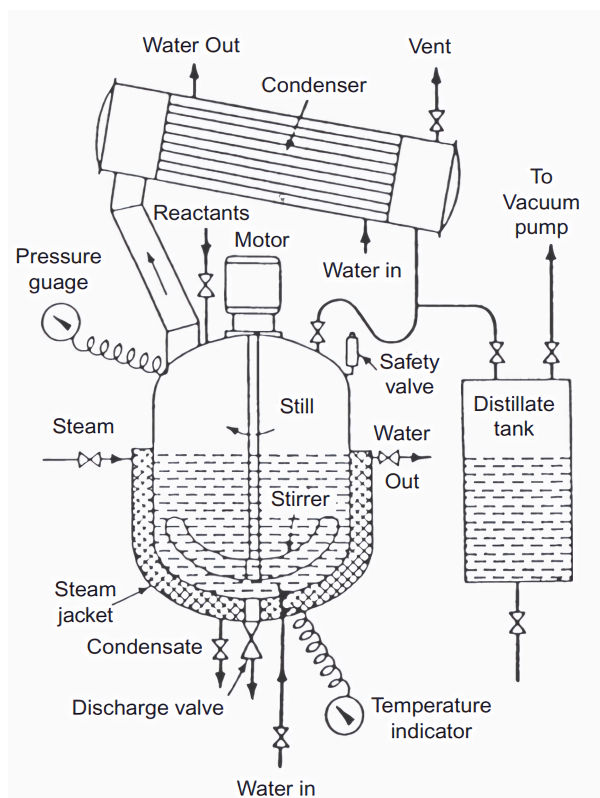
Los materiales termoestables suelen ser quebradizos, lo que dificulta la realización de pruebas mecánicas convencionales como las de resistencia, flexión o tracción. Un ejemplo de termoestable, el fenólico, muestra valores bajos de resistencia al impacto, alrededor de 12 J m<sup>-1</sup>. Otros termoestables basados en resinas como las de *lignina-formaldehído*, *lignina-fenol*- y *tanino-fenol-formaldehído* también exhiben fragilidad similar a la del fenólico. Sin embargo, cuando se refuerzan con fibras naturales o sintéticas, los termoestables fenólicos experimentan mejoras en su resistencia al impacto, y la magnitud de esta mejora depende del tipo de fibra utilizada. [11, 12].

Entre los procesos de obtención de resinas se encuentra la reacción de condensación entre un fenol y el formaldehído, produciendo agua residual. Aunque estos reactivos empleados, a futuro podrían tener escasos debido a la disminución y alto consumo del crudo de petróleo en los últimos tiempos, a esto se puede generar alternativas sostenibles como el uso de lignina o policarbonato reciclado como sustituyente parcial del fenol. El producto final es una espuma floral que tras pasar por la fase de espumación sirve como soporte de flores, además de tener la propiedad de absorber agua y actuar como medio de crecimiento para la propagación de parterres de plantas, ya que tiene un pH adecuado libre de bacterias y hongos.[13] Así, se pretende realizar un estudio técnico para analizar

la sustentabilidad considerando un estudio previo del proceso de producción de la resina, basado en procesos que ya han sido implementados en otros lugares.

En el proceso de polimerización de resinas *fenol-formaldehído*, se emplea un reactor de tipo "bulk" (Figura 2). Este reactor está equipado con un revestimiento de vapor que mantiene la temperatura necesaria para que ocurra la reacción entre el fenol y la formalina, generando la polimerización deseada. Además, se incorpora un condensador que facilita la condensación y eliminación del vapor de agua que se forma como subproducto de la reacción entre el fenol y la formalina. La eliminación eficiente del agua del sistema contribuye a mejorar la reacción entre estas sustancias y fomenta la formación de mayores cantidades de resina fenol-formaldehído.[14]

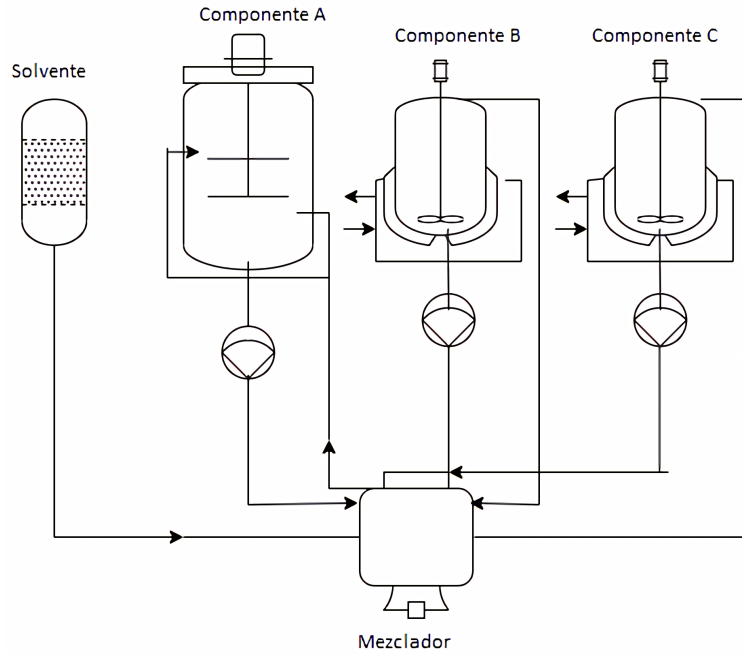
El proceso de producción se lleva a cabo en dos etapas. En la primera fase, se genera una resina fenol-formaldehído denominada "resol". En la segunda fase, esta resina se combina con *hexametilentetramina* (HEXA) para formar un compuesto moldeable. La mezcla de la resina fenol-formaldehído con HEXA se somete a calentamiento en un molde, lo que resulta en la descomposición del HEXA y en la liberación del formaldehído necesario para lograr la etapa final de curado. Esta combinación de resinas se conoce como resinas "novolac" o resinas "de dos pasos". [15]



**Figura 2.** Esquema de un reactor típico para la polimerización en masa de fenol-formaldehído-resinas. Fuente: *Phenol-Formaldehydes*. [16].

Las espumas florales se pueden elaborar en base a diferentes procesos a nivel laboratorio donde se implementan técnicas de mezclado a mano, por otro lado a nivel industrial se utilizan técnicas y maquinarias específicas, como se muestra en la Figura 3 se tiene

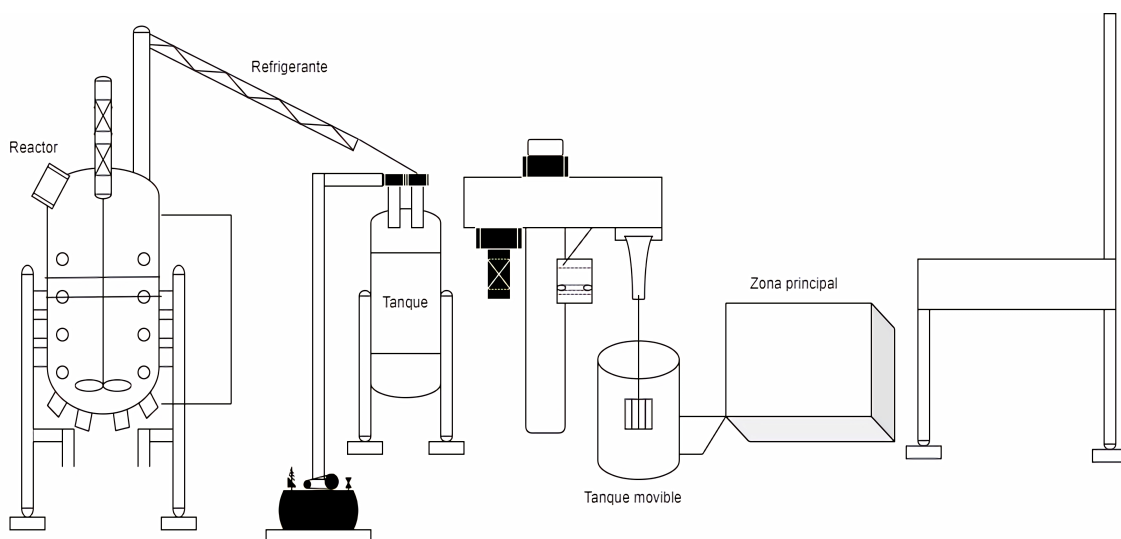
una máquina para procesar espumas fenólicas, donde se carga el componente A como es el resol, surfactante, agente de celda abierta y el colorante, por otro lado el componente B en este caso es el R-113, finalmente se agrega un catalizador ácido. [1, 17]



**Figura 3.** Máquina tipo estándar para espumas fenólicas de flujo.

Otra alternativa para la producción de resinas es la tecnología *Laizhou Yuandan* (Figura 4), que se utiliza para obtener como producto final la espuma floral para flores frescas, de tipo automático con mezcla uniforme, entre la configuración que muestran este tipo

de equipos tenemos un reactor, máquina de dispersión, máquina de corte, caja de espuma con capacidad de 300 - 4 800 cartones/día, 20 piezas, el tamaño es de 80\*110\*230 mm y con absorción de agua de 1,5 kg por ladrillo.



**Figura 4.** Tecnología de producción adaptado de *Laizhou Yuandan*. Fuente: *Laizhou Yuandan Chemical Industry Machinery Factory*. [18].

Existen varias etapas para la producción de espuma floral, comenzando por la obtención de la resina fenólica, que es un proceso discontinuo en el que se requiere un reactor discontinuo y una torre de destilación, cuando no se dispone de estos equipos, se puede utilizar un reactor de neutralización para realizar la destilación. La segunda etapa es el espumado de la resina fenólica, que consiste en la inyección de resina fenólica con reactivos como surfactantes, humectantes, agentes espumantes, urea y colorante a través de una válvula de aguja sellada, se agrega un molde de espuma para darle la forma deseada al producto para su posterior corte y con el cual se puede reducir el tiempo de secado de la resina con su sistema de calor. Por último, tenemos el corte de la espuma, donde se utilizan dos máquinas, una vertical y otra horizontal para obtener el tamaño estándar requerido de la espuma, que es de aproximadamente 22,5x10,5x7,5 cm.[19]

En Ecuador, la demanda de este tipo de resinas para la producción de espumas fenólicas es muy amplia y no existen empresas que suministren este tipo de productos. Por lo que este proyecto busca el diseño de una planta de producción de resinas fenólicas (espuma floral), que permitan en primera instancia establecer los principales equipos para el proceso, así como las variables y materia prima necesaria para llevar a cabo la producción, utilizando el software de simulación PRO II, para obtener datos de cantidades de materias primas que permita satisfacer la demanda encontrada en el

país. Con el fin de generar una iniciativa empresarial dentro del sector de la fabricación petroquímica.

## 2. Materiales y Métodos

Este estudio se basó en dos metodologías, la primera es la etapa de búsqueda y revisión de la demanda, características y especificaciones de la resina fenólica, la segunda etapa es la de diseño y modelamiento del proceso para lo cual se realizó la simulación y cálculos manuales para llevar a cabo el proceso.

Para estimar los balances de masa del proceso a ser diseñado, fue necesario determinar la demanda interna anual con información del periodo de 2015 a 2020, no se consideran los años donde se desarrolló la pandemia de COVID-19, en este periodo se estimó un valor promedio de 143 360,37 kilogramos.[20] En base a esta demanda se realiza la especificación del reactor para la producción de la resina fenólica, que dependen de los reactivos como fenol, formaldehído e hidróxido de sodio.

### Materias primas

Se requiere de reactivos algunos de los cuales se pueden encontrar en la base de datos del simulador, otros un ingreso manual a través de grupos funcionales, que permiten la introducción de compuestos nuevos y estimando sus propiedades, logrando tenerlas y se mencionan en la Tabla 1.

**Tabla 1:** Propiedades físicas de los reactivos.

Propiedad	Valor Fenol	Valor formaldehído	Unidades
Masa molar	94.4	30.03	g/mol
Punto de fusión	40.9	-19.2	°C
Punto de ebullición	181.8	118	°C
Densidad relativa	1.071		—
Calor específico	1.394		KJ/Kg · K
Presión de vapor	0.02		KPa
Contante de disociación		$3.3 \cdot 10^{-13}$	—
Límite inferior y superior de explosividad		7 – 173	% vol.
Punto de inflamación		60	°C

Fuente: *Phenolic resin* [21].

### Diseño del proceso

#### Reacción de policondensación

Para el proceso de obtención de espuma floral, es necesario conocer los reactivos que intervienen y la reacción necesaria. En la Figura 5 se muestran los reactivos, se emplea principalmente fenol con formaldehído, en presencia de un catalizador básico (hidróxido de sodio), como productos esperados, son la resina fenólica (tipo resol). Para la obtención de resina fenólica, se preparó una solución de formaldehído al

37% p/p y se mezcló con fenol de forma que se cumpliera la relación molar de P:F<1. Se alimentó un reactor discontinuo con la mezcla de fenol y formaldehído en presencia de un catalizador básico (hidróxido sódico).[22]

La cinética de la reacción de policondensación se calculó en base a estudios realizados, donde los experimentos fueron desarrollados a temperaturas que oscilan los 60 a 200 °C, en base a regresión lineal, con valores de 0,99, se determinó que es una reacción de

orden 1 y 1,5, con un valor de constante de reacción de 0,14 y 0,089, respectivamente a una temperatura de 170 °C. En la Figura 5, se 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.

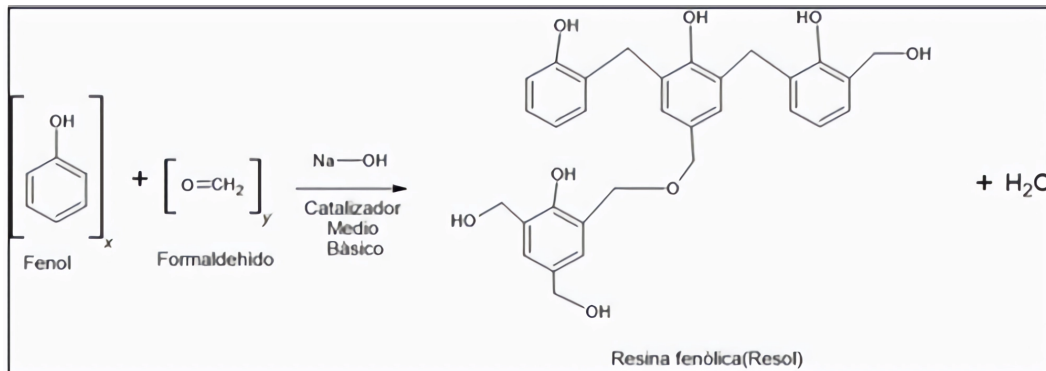


Figura 5. Reacción química para la producción de resina fenólica. Fuente: *Handbook of Plastic Foams*. [23].

### Diseño del reactor

Para la determinación del volumen del reactor (Ecuación 1), se estableció según el flujo volumétrico

obtenido a la salida del reactor, esto multiplicado por el tiempo de residencia, y finalmente se aumenta un 20% de factor de seguridad en el volumen (Ecuación 2).

$$V_{\text{reactor,operacion}} = v * t \tag{1}$$

$$V_{\text{reactor}} = V_{\text{reactor,operacion}} + 0,20 * V_{\text{reactor,operacion}} \tag{2}$$

Según Fogler, se establece que el reactor intermitente debe tener periodos establecidos de tiempo para la reacción, que en este caso es entre el fenol y el

formaldehído, las variaciones de moles de fenol van a estar en función del tiempo y el volumen del reactor (Ecuación 3)(Ecuación 4).[24]

$$\frac{dN_{\text{fenol}}}{dt} = r_{\text{fenol}} \cdot V \tag{3}$$

$$X_{\text{fenol}} = N_{\text{fenol},0} \frac{-N_{\text{fenol}}}{N_{\text{fenol},0}} \tag{4}$$

El tiempo de residencia se calcula según la Ecuación 5, que ayuda a determinar el tiempo necesario para

reducir el número de moles de fenoles iniciales a N número de moles de fenoles. [25]

$$t = N_{\text{fenol},0} \int_0^{\infty} \frac{dX}{-rN_{\text{fenol},0} \cdot V} \tag{5}$$

Los reactores discontinuos, emplean accesorios que ayuden alcanzar una conversión alta, el empleo de agitadores ayuda a poner en contacto los reactivos en todos los espacios del reactor, minimizando los puntos muertos dentro del reactor, asimismo mejora la transferencia de calor en la reacción. [26, 27]

manteniendo una agitación uniforme a 2 500 rpm. El producto obtenido en el reactor se condensa hasta alcanzar los parámetros deseados, eliminando el exceso de agua. Finalmente, el producto obtenido se descarga en bandejas y la espuma floral se deja a temperatura ambiente durante dos días. [8, 28]

### Obtención de resina fenólica del tipo resol

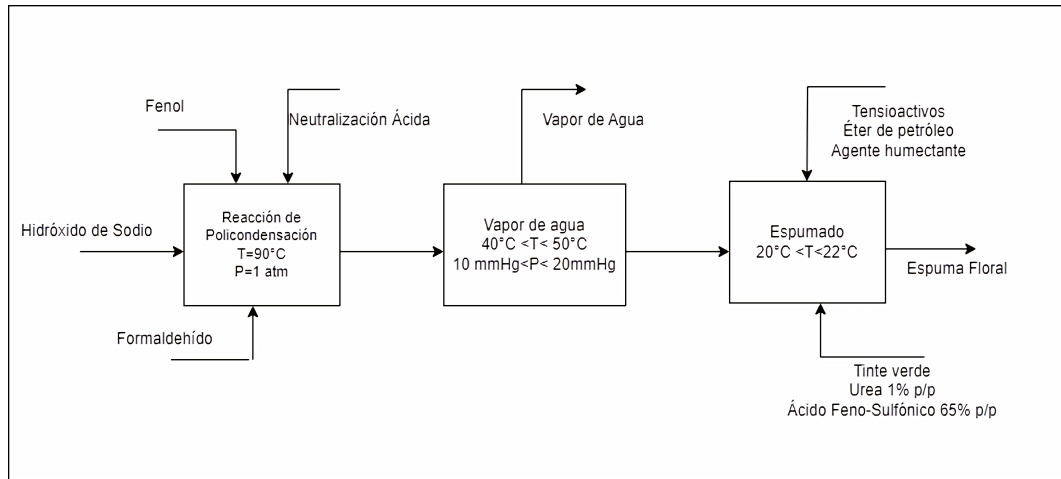
Se debe alimentar el reactor con las materias primas mencionadas, junto con un catalizador en medio básico. Se procede a elevar la temperatura del reactor hasta alcanzar la condensación de la alimentación,

### Diagramas del proceso

En la Figura 6, se muestra el proceso simplificado y las principales operaciones para la obtención de espuma floral mediante un BFD y PFD. En el BFD, se muestran las 3 operaciones principales que son

la reacción, destilación y espumación, las corrientes principales de entrada y salida y las condiciones para cada proceso. Dentro del proceso de reacción esta es una de policondensación de fenol con formaldehído en presencia de un catalizado básico, una vez finalizado el proceso de reacción se realiza un proceso de neutralización con ayuda de un ácido (ácido clorhídrico) con el objetivo de llevar los reactivos a

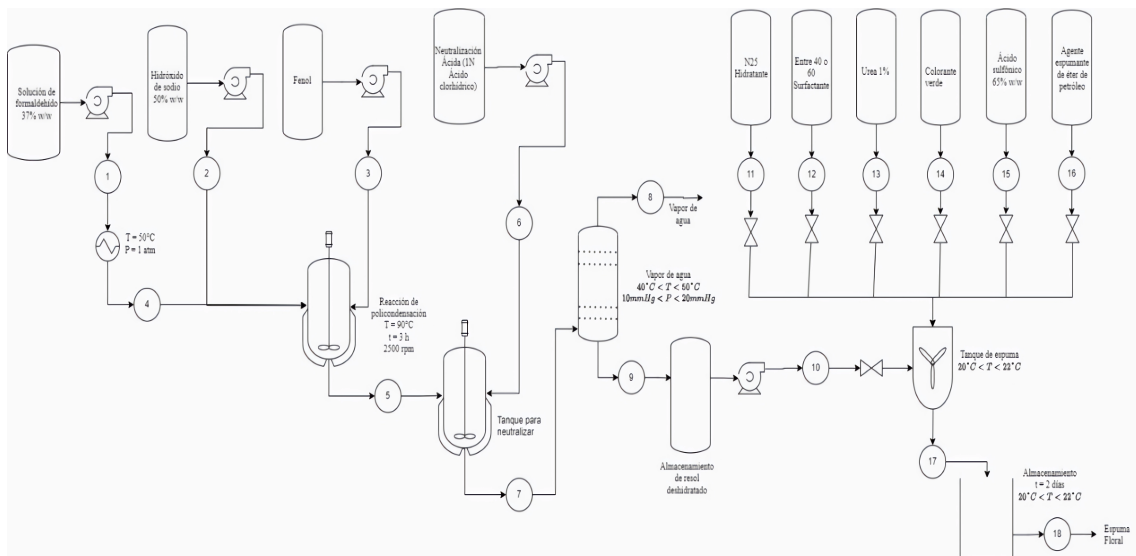
un pH neutro, una vez neutralizado se procede a la eliminación del agua producto de la reacción, esta destilación se lleva a cabo a temperaturas bajas (40 a 50 °C) que van a depender de la presión (10 a 20 mmHg) a la cual opere el destilador. El proceso de espumado es donde se realiza el proceso de adición de surfactantes y aditivos que otorgarán las características principales de la espuma floral.



**Figura 6.** Diagrama de flujo de bloques (BFD).

El PFD (ver Figura 7), al ser un diagrama más detallado, se incluyen las operaciones auxiliares como bombas o mezclador que se importan para tener un proceso exitoso, en la primera corriente de bombeo de la solución de formaldehído se puede ver que se añade un intercambiador de calor a fin de tener una corriente que ingrese al reactor a una temperatura superior, y

adicionalmente para evitar que se forme ácido fórmico a temperatura ambiente, adicional a lo mencionado en el diagrama BFD se tienen tanques de almacenamiento de los aditivos que se emplean en el proceso de espumado, los cuales son: hidratante, surfactante, urea al 1%, colorante verde, ácido sulfónico y agente espumante. [29]



**Figura 7.** Diagrama de Flujo de Proceso (PFD).

**Simulación**

La simulación se desarrolló dentro del entorno de PROII, como punto de partida se da el empleo del paquete termodinámico, este permite simular el estado de los reactivos y productos a emplear, en este caso al tratarse polímeros se elige el POLYNRTL, requiere menos datos de atributos y estima los datos faltantes. Al no contar con los componentes dentro de la base de datos del simulador, se ingresa mediante la creación de estructuras de UNIFAC, que facilitan la estimación de propiedades del compuesto deseado.[30]

El empleo de un reactor intermitente es necesario, se especifican las corrientes de entrada por lote, se establece el tiempo de reacción por lote, de 3 horas, los respectivos parámetros cinéticos y la relación estequiométrica de fenol/formaldehído de 4/7.

Mediante el proceso de simulación se ejecutaron alrededor de 5 simulaciones que permitieron obtener las condiciones de temperatura y presión que se muestran en resultados, lo que admite que se obtengan valores altos de conversión en tiempos menores.

**3. Resultados y Discusión**

Mediante simulación de prueba y error, se determinó la cantidad óptima de reactivos que deben entrar en el reactor para obtener la resina fenólica necesaria para cubrir la demanda de espuma floral especificada en el balance de masas. Con base a la información revisada se determinó que, el proceso de producción por lotes es el más adecuado para cubrir la demanda interna de espuma floral. [31]

Para el diseño de la planta de producción de espuma floral se realizó un balance de masa empleando ingeniería inversa, para a partir de la demanda establecer el valor del requerimiento de materias

primas, mismas que luego pasarán por los diferentes equipos, en el caso del tanque espumador se obtuvo la siguiente composición:

Para los flujos másicos por componentes del reactor se implementó los datos en la Tabla 2, mismos que fueron estimados a kilogramos por día para satisfacer la demanda calculada de aproximadamente 144 toneladas anuales de resina fenólica.

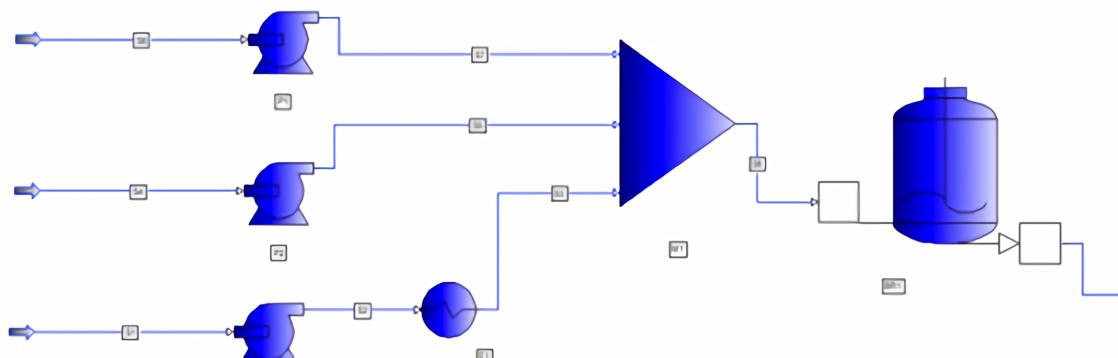
**Tabla 2:** Composición espuma floral.

Composición espuma floral	
Compuesto	%
Resina Fenol-Formaldehído	80,5
Surfactante Tween 40 o 60	4
Agente de humectación N25	4
Agente de soplado	5
Urea	1
Catalizador ácido fenol sulfónico	5
Color	0,5

En un inicio se implementó un reactor discontinuo en el que se introdujeron los valores de flujo en las corrientes de alimentación de fenol, formaldehído e hidróxido sódico, como se divisa en la Figura 8, se empleó bombas para ayuda al movimiento de fluido de los reactivos (Tabla 3), que se mezclan en un mixer, para finalmente ingresar al reactor, donde se estableció el tiempo y se introdujo la reacción química (Figura 5) con sus respectivos parámetros cinéticos, como se muestra en la Tabla 4.

**Tabla 3:** Flujos másicos.

Datos iniciales	Flujo másico (kg/día)	Resina fenólica (kg/día)
Fenol	448 500	
Formaldehído	250 459	
Hidróxido de sodio	0,4754	
Agua	676 916	
		634 552



**Figura 8.** Simulación del reactor.



**Tabla 4:** Datos ingresados al reactor batch.

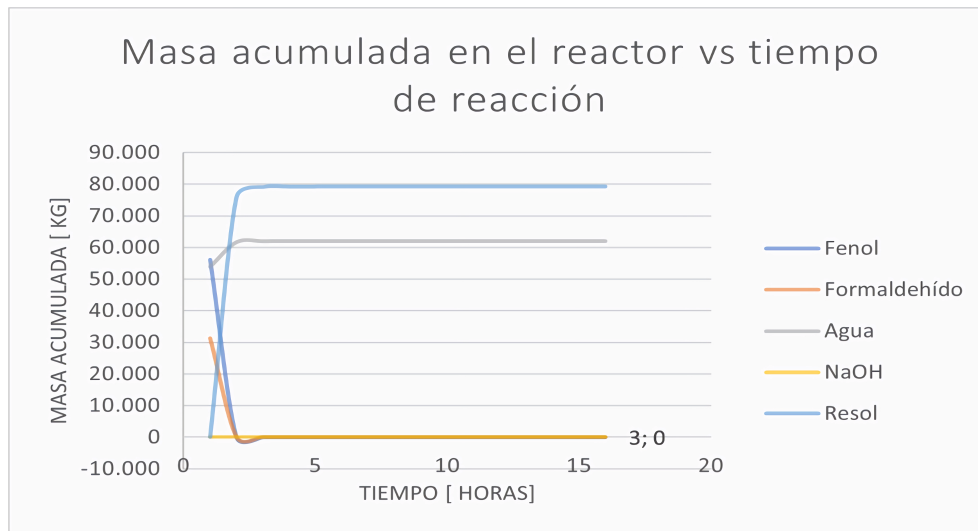
Corriente	Flujo (kg/día)	másico	Presión (atm)	Temperatura (°C)
Fenol	23 7553		1	20
Formaldehido	13 2659		1	20
Hidróxido de sodio	0,2518		1	20
<b>Cinética de la reacción</b>				
n	1		1.5	
k	0.14		0,089	
R	0,99		0,99	

Para obtener las composiciones en el reactor en función del tiempo, se obtuvo la masa en kilogramos de cada componente en el reactor discontinuo en función de la duración de la reacción que para este caso se estimó mediante un diagrama de concentración versus tiempo (Figura 9). Los resultados de la simulación indican que en un periodo de 0,8 a 3 horas la cantidad de resina producida es menor en comparación con la obtenida en el periodo de 0 a 0,8 horas, lo que sugiere que la reacción debe producirse a 70 °C en un tiempo de reacción que debe ser aproximadamente de 1 hora.[32]

De la Figura 9 es evidente que a partir de 0.8 horas todo el fenol se ha consumido por completo. En estudios recientes se 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.[22, 1] Sin embargo, los resultados de la simulación evidencian que en el periodo 0,8 - 3 horas la cantidad de resina producida es insignificante en comparación con la producida en el periodo 0-0,8 horas.

El volumen operacional del reactor se obtuvo por la ecuación 1, en un tiempo de reacción de 3 horas es de 13 7933 litros, el volumen del reactor se calculó por la ecuación 2, por lo tanto, se obtuvo 63 4552 kg/día de resina fenólica tipo Resol, necesaria para obtener espuma floral y así cubrir la demanda interna de este producto.



**Figura 9.** Masa acumulada en el reactor vs el tiempo de reacción.

La energía utilizada en los diferentes procesos de obtención de resina fenólica del tipo resol, se resume en la Tabla 5, la energía total del proceso es de 15 879,8567 kJ/h, debido a que la planta de producción de resina fenólica trabajará durante un periodo de 24 horas laborables debido a que solo se estima la producción de 6 lotes/día, la energía total para llevar a cabo este proceso es de 381 116,5608 kJ/día laborable.

**Tabla 5:** Energía requerida para los procesos.

Equipo	Cantidad	Energía (kJ/h)
Calentador	1	316,5338
Enfriador	1	646,9152
Condensador	1	6 118,3741
Separador	2	5 740,8026
Reactor	1	2 816,5643
Bombas	6	3,0589
Compresores	1	237,6078
Tanques de mezcla	2	-
Tanques de almacenamiento	1	-
<b>Total</b>		<b>15 879,8567</b>

**Estimación de la presión y temperatura de separación al vacío**

Los procesos de deshidratación de resinas fenólicas tipo resol operan en un rango de 10 mmHg a 20 mmHg para la presión y de 40 °C a 50 °C para la temperatura, con el fin de conocer las condiciones del equipo implementado en el proceso para eliminar una mayor cantidad de agua, se realizó un análisis de sensibilidad entre la presión del separador y el flujo másico de agua que se eliminaba en forma de vapor.

Para la propuesta de diseño de recuperación de agua, se implementó un proceso de separación en el que se eliminó el 95,2595% de agua de la corriente de vapor. Con el fin de reutilizar el agua eliminada en otros procesos químicos de lavado, se recuperó el vapor de agua mediante la separación del ácido clorhídrico de la corriente de vapor producida en un separador flash. Las composiciones de las corrientes de vapor (Tabla 6) y líquido (Tabla 7) muestran los valores a la salida del reactor, mostrando el consumo total del fenol, formaldehído y ácido clorhídrico.

**Tabla 6:** Composición de la corriente de vapor.

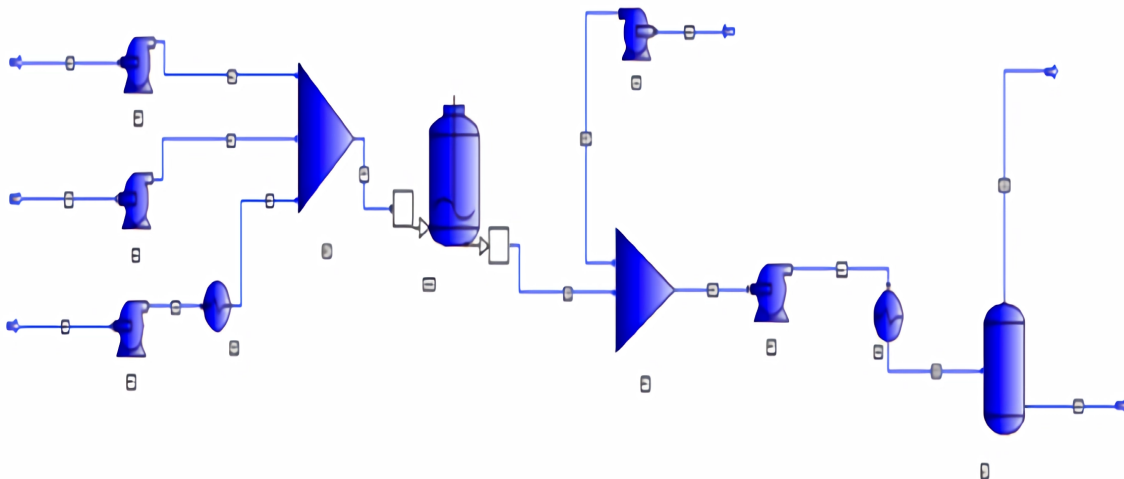
Componentes	Fración másica
Fenol	0
Formaldehído	8,8026E-05
Agua	0,9907
Hidróxido de sodio	6,3235E-17
Resol	1,022E-21
Ácido clorhídrico	0,0091

**Tabla 7:** Composición de la corriente del líquido.

Componentes	Fración másica
Fenol	0
Formaldehído	3,8438E-08
Agua	0,0410
Hidróxido de sodio	0,0071
Resol	0,9517
Ácido clorhídrico	6,9070E-07

La Figura 10 muestra la configuración diseñada en Pro II, donde se observa generalmente la producción de resina fenólica (espuma floral) en cinco pasos. [33] 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 que se elimina el exceso de agua del polímero. En el cuarto paso, el producto obtenido en la corriente S17 se transporta a un tanque de agitación, donde se añaden los aditivos necesarios para la formación de espuma.

En este paso la urea ayuda al proceso de curado y a eliminar el olor generado por los químicos empleados en la reacción de policondensación. [34] Finalmente, la espuma floral se coloca en moldes de 0,8 m•0,8m•0,8 m para que se seque a temperatura ambiente.[35]



**Figura 10.** Proceso de obtención de resina fenólica.

Todos los flujos del proceso simulado se presentan en la Tabla 8, donde se muestran los flujos másicos óptimos de cada componente a la entrada y salida de cada unidad, al inicio de la simulación del

proceso se tenía problemas con la alimentación de formaldehído debido a la generación de ácido fórmico, dentro del reactor, problema que fue resuelto con la implementación de un intercambiador de calor a 50 °C.

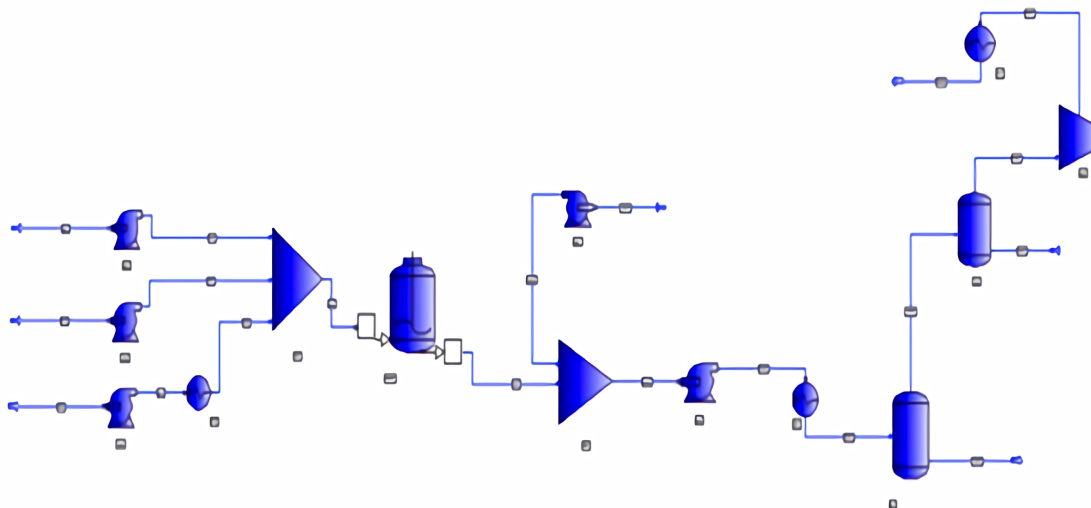
**Tabla 8:** Balance de masa.

Corriente Componente	Flujo másico (kg/día)					
	$CH_2O$	$C_6H_6O$	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		0,4754
S10				8,2041	0,5105	
S11				8,2041	0,5105	
S12	0,0049		63,4522	57,7644	0,5105	0,4754
S13	0,0049		63,4522	57,7644	0,5105	0,4754
S14	0,0049		63,4522	57,7644	0,5105	0,4754
S15	2,5625E-06		63,4522	1,5058	4,6046E-05	0,4754
S16	0,0049		0	56,2586	0,5105	0
S17	1,8163E-06		63,4522	1,5058	3,7787E-05	0,4754
S18					0,5105	
S19	0,0049			56,2586		
S20	0,0049			56,2586		
S21	0,0049			56,2586		

**Análisis de sensibilidad**

Se realizó un análisis de sensibilidad para determinar el valor de la presión requerida para condensar la corriente de vapor generada en la separación, en

la Tabla 8, se tabula cómo varía la presión en el condensador en función de la fracción de líquido. Cuando se determinó la fracción líquida, la presión introducida fue de 18,70 mmHg, para recuperar el agua eliminada en el proceso (Figura 11).



**Figura 11.** Propuesta de diseño para la recuperación de agua.

### Obtención de la espuma floral

Para la obtención del producto final, el flujo másico de resina fenólica tipo resol obtenido en la simulación es de 63,4552 kg/día, junto con el resto de los flujos másicos calculados mediante balance de masas, en un tanque de espumación. Los caudales másicos se han obtenido en la Tabla 9 siguiente, que a diferencia de la Tabla 1, donde obteníamos las composiciones.

**Tabla 9:** Flujos másicos obtenidos del proceso.

Componentes	Flujo másico (kg/día)
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
Ácido fenol Sulfónico 65 % p/p	3,9350
Tintura de color verde	0,3935

Finalmente, los datos obtenidos son 787015 kg/día de espuma floral, por lo tanto, se producirán 10,5758 kg de espuma floral en las 4 horas que dura el proceso, por lo tanto, el diseño propuesto satisface la demanda estimada de espuma floral en Ecuador para satisfacer la demanda requerida en el país.

### Propiedades de la resina obtenida en la simulación

Una de las características principales es la densidad, que se encuentra en un rango de 1,28 – 1,32 g/cm<sup>3</sup>, la resina obtenida en la simulación presenta una densidad de 1,09 g/cm<sup>3</sup>. Covarrubias en 2016, menciona que la reacción de policondensación de fenoles con exceso de formaldehído en medio básico produce resinas fenólicas de peso molecular de 300 – 700 g/mol, la obtenida tiene un peso molecular de 532,59 g/mol.[1]

### 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.

### Propuesta de un reactor con mayor volumen

Mediante balances de masa y simulaciones, se determinó que, para cubrir la demanda interna de espuma floral, se necesita un reactor con un volumen aproximado de 17 litros para procesar 63,4522 kg/día de resina; sin embargo, debido a los altos costos de operación y limpieza, un reactor con un volumen menor a 17 litros es poco rentable; por lo que se propuso aumentar la capacidad del reactor a 100 litros para

obtener una mayor cantidad de resina fenólica. La Tabla 10 muestra los caudales másicos del nuevo reactor.[27]

**Tabla 10:** Flujos másicos del nuevo reactor.

Datos iniciales	Flujo másico (kg/día)	Resina fenólica (kg/día)
Fenol	322	
Formaldehído	3,4142	
Hidróxido de sodio	0,4754	
Ácido clorhídrico	3,6489	
		455,553

## 4. Conclusiones

A través de la simulación del diseño propuesto, se determina que para cubrir la demanda de resina fenólica (espuma floral) en Ecuador, es necesario un reactor batch de aproximadamente 17 litros. Adicionalmente, se propuso aumentar la capacidad del reactor a 100 litros para producir una mayor cantidad de resina fenólica, la cual puede ser utilizada en diferentes aplicaciones.

Se determina que el tiempo de reacción para obtener resina fenólica, a partir de fenol y formaldehído en medio de un catalizador básico es de 0.8 h, considerando que en este periodo el fenol se consumió completamente, al triplicar el valor de la alimentación se fija el tiempo de reacción en 3 horas, se identificó como óptimo para obtener la cantidad deseada de resina.

La demanda de resina fenólica presenta un panorama significativo ya que, al no existir oferta en el país, la demanda aumenta debido a la presencia de una gran variedad de industrias florícolas; del 2016 al 2020 existe la demanda de alrededor de 143 toneladas anuales, que pueden ser cubiertas con este diseño, y a través de los cálculos del nuevo reactor demuestra una mentalidad proactiva hacia la mejora continua y la optimización de procesos, que promoverían no solo la demanda local, si no su exportación a los países de la región.

Se propuso un proceso de separación para recuperar el agua eliminada; esta medida no solo reduce el desperdicio de recursos, sino que también contribuye a la sostenibilidad ambiental de la operación.

### Financiamiento

Los autores expresan que no ha sido necesario financiamiento para realizar esta obra de investigación.

## Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

## Roles de autores

Javier Sayavedra Delgado: Conceptualización, Análisis formal, Administración del proyecto, Supervisión, Redacción – revisión y edición, Ángel Zevallos Cuzme: Curación de datos, Investigación, Software. Edwin Quiñonez Gómez: Metodología, Recursos, Validación. Britany Bastidas Molina: Visualización, Redacción – borrador original, redacción – revisión y edición.

## 5. Referencias

- COVARRUBIAS, H.E.; SÁENZ, Aidé; y CASTAÑEDA, Adali O. Resinas Termoestables De Fenol-Formaldehído. *Rev. Iberoam. Polímeros* [online]. 2016, vol. 17, n.º 6, págs. 266-276. Disponible en: <https://eviberpol.org/wp-content/uploads/2019/07/2016-covarrubias.pdf>.
- ASIM, Mohammad; SABA, Naheed.; JAWAID, Mohammad; NASIR, Mohammed; PERVAIZ, Mohammed y ALOTHMAN, Othlam. A Review on Phenolic Resin and its Composites. *Curr Anal Chem* [online]. 2018, vol. 14, n.º 3, págs. 185-197. Disponible en: <https://doi.org/10.2174/1573411013666171003154410>.
- LEE, Seung-Hang; TERAMOTO, Yoshikuni y SHIRAISHI, Nobuo. Resol-type phenolic resin from liquefied phenolated wood and its application to phenolic foam. *J Appl Polym Sci* [online]. 2002, vol. 84, n.º 3, págs. 468-472. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/app.10018>.
- VENEGAS, Silvia; DOMÍNGUEZ, Martha y VARGAS, Joel. Elaboración y caracterización de una espuma para el desarrollo e implementación de un procesos sustentable. *Universidad Autónoma del Estado de Morelos* [online]. 2019. Disponible en: <http://riaa.uaem.mx/handle/20.500.12055/3138>.
- TANG, Kaihong; ZHANG, Ailing; GE, Tiejun; LIU, Xiaofeng; TANG, Xiaojun y LI, Yongjiang. Research progress on modification of phenolic resin. *Mater Today Commun* [online]. 2021, vol. 26, n.º 1, pág. 101879. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/polym15173543>.
- GONG, X.; MENG, Y.; LU, J.; TAO, Y.; CHENG, Y. y WANG, H. A Review on Lignin-Based Phenolic Resin Adhesive. *Macromol Chem Phys* [online]. 2022, vol. 223, n.º 4. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/macp.202100434>.
- SALTHAMMER, Tunga; MENTESE, Sibel y MARUTZKY, Rainer. Formaldehyde in the Indoor Environment. *Chem Rev.* [Online]. 2010, vol. 110, n.º 4, págs. 2536-2572. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/cr800399g>.
- ALLEN, D.J. e ISHIDA, H. Thermosets. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, Elsevier. *Chem Rev.* [Online]. 2001, págs. 9226-9229. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/01662-4>.
- BERDNIKOVA, Polina; ZHIZHINA, E.G. y PAI, Z.P. Phenol-Formaldehyde Resins: Properties, Fields of Application, and Methods of Synthesis. *Catal Ind.* [online]. 2021, vol. 13, n.º 2, págs. 119-124. Disponible en: <https://doi.org/10.1134/S2070050421020033>.
- ALLEN, D.J. e ISHIDA, H. Thermosets: Phenolics, Novolacs, and Benzoxazine. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, [online]. 2001, págs. 9226-9229. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/01662-4>.
- FROLLINI, E.; SILVA, C.G. y RAMIRES, E.C. Phenolic resins as a matrix material in advanced fiber-reinforced polymer (FRP) composites. *Advanced Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Structural Applications*, [online]. 2013, págs. 7-43. Disponible en: <https://doi.org/10.1533/9780857098641.1.7>.
- LI, Bing; YUAN, Zhongshun; SCHMIDT, John y XU, Chunbao (Charles). New foaming formulations for production of bio-phenol formaldehyde foams using raw kraft lignin. *Eur Polym J.* [online]. 2019, vol. 111, págs. 1-10. Disponible en: <https://doi.org/10.1533/9780857098641.1.7>.
- AHMAD, Iftikhar; DOLE John M. CLARK, Erin M. R. y BLAZICH, Frank A. Floral foam and/or conventional or organic preservatives affect the vase-life and quality of cut rose ( *Rosa × hybrida* L.) . *J Horti Sci Biotechnol.* [online]. 2014, vol. 89, n.º 1, págs. 41-46. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/14620316.2014.11513046>.
- XU, Jie; BRODU, Nicolas; DEVOUGUE BOYER, Christine; YOUSSEF, Boulos y TAOUK, Bechara. Biobased novolac resins cured with DGEBA using water-insoluble fraction of pyrolysis bio-oil: Synthesis and characterization. *J Taiwan Inst Chem.* [online]. 2022, vol. 138, n.º 1, pág. 104464. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2022.104464>.

15. HIRAI, Takayuki; YAGI, Kenichi; OKAMOTO, Kazuo; ONOCHI, Yusaku y KAWADA, Jumpei. In Situ Reactive Compatibilization of Polyamide 6 and Polycarbonate Blend by the Catalytic Effect of Phenol Novolac. *Ind Eng Chem*, [online]. 2020, vol. 59, n.º 5, págs. 1855-1861. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b05970>.
16. PIZZI, A. e IBEH., C. C. Phenol-Formaldehydes. *Handbook of Thermoset Plastics*, [online]. 2014, págs. 13-44. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-3107-7.00002-6>.
17. ATIEMO ▯ OBENG, Victor A. y CALABRESE, Richard V. Rotor-Stator Mixing Devices. *Handbook of Industrial Mixing*, [online]. 2003, págs. 479-505. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/0471451452.ch8>.
18. YUANDAN., L. Wet Floral Foam Making Machine Flower Mud Production Line Complete Floral Foam Making Production Line. *alibaba*, [online]. [s.f.]. Disponible en: [https://www.alibaba.com/product-detail/Wet-Floral-Foam-Making-Machine-Flower\\_1601117148148.html?module=company](https://www.alibaba.com/product-detail/Wet-Floral-Foam-Making-Machine-Flower_1601117148148.html?module=company).
19. YU, Yuxiang; WANG, Yufie; XU, Pingping y CHANG, Jianmin. Preparation and Characterization of Phenolic Foam Modified with Bio-Oil. *Materials*, [online]. 2018, vol. 11, n.º 11, pág. 2228. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/ma11112228>.
20. ADUANA DEL ECUADOR., Servicio Nacional de [online]. [s.f.]. Disponible en: <https://www.aduana.gob.ec/importaciones/>.
21. GARDZIELLA, Arno; PILATO, Louis A. y KNOP, Andre. Phenolic Resins: Chemistry, Reactions, Mechanism. *Phenolic Resins*. Springer, Berlin, Heidelberg, [online]. 1985. Disponible en: [https://doi.org/10.1007/978-3-662-04101-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-662-04101-7_2).
22. BERDNIKOVA, P.V.; ZHIZHINA, E.G. y PAI, Z.P. Phenol-Formaldehyde Resins: Properties, Fields of Application, and Methods of Synthesis. *Catal Ind*, [online]. 2021, vol. 13, n.º 2, págs. 119-124. Disponible en: <https://doi.org/10.1134/S2070050421020033>.
23. LANDROCK, A. H. *Handbook of plastic foams*. Elsevier Science, [online]. 1995, vol. 1. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/book/9780815513575/handbook-of-plastic-foams#book-description>.
24. YANG, Chane-Yuan; TSAI, Ding-Chi y CHIEN, Yu-Shu. The strategy developed for high conversion and the multiplicity problems of biochemical reaction in a real CSTR with Cholette's model. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, [online]. 1995, vol. 19, n.º 12, págs. 1245-1270. Disponible en: <https://doi.org/10.1515/ijcre-2021-0016>.
25. CREMER ▯ BUJARA, Esther; BIESSEY, Philip y GRÜNEWALD, Marcus. Simulation of Polymer Reactors Using the Compartment Modeling Approach. *Macromol React Eng*, [online]. 2020, vol. 14, n.º 1. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/mren.201900034>.
26. DAGDE, Kekpugile Kenneth; AKPA, Gunorubon Jackson; OSAROWORLU, Obarijimah y ADELOYE, Olalekan Michael. Simulation of continuous stirred tank reactor (CSTR) for polypropylene production. *Global Journal of Engineering and Technology Advances*, [online]. 2020, vol. 5, n.º 2, págs. 014-023. Disponible en: <https://doi.org/10.30574/gjeta.2020.5.2.0095>.
27. LI, Shaofan. Computational and Experimental Simulations in Engineering. *Mechanisms and Machine Science*, Springer International Publishing, [online]. 2024, vol. 143. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-42515-8>.
28. GRANADO, Lérays; TAVERNIER, Romain; FOYER, Gabriel; DAVID, Ghislain y CAILLOL, Sylvain. Comparative curing kinetics study of high char yield formaldehyde- and terephthalaldehyde-phenolic thermosets. *Thermochim Acta*, [online]. 2018, vol. 667, págs. 42-49. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2018.06.013>.
29. PIZZI, A e IBEH, C.C. Phenol-formaldehyde resins. *Handbook of Thermoset Plastics*, Elsevier, [online]. 2022, págs. 13-40. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821632-3.00013-0>.
30. DURÁN GARCÍA, Martín y RUIZ NAVAS, Ricardo. Simulador de propiedades termodinámicas en la conversión de la biomasa forestal de aserrín de pino. *Maderas. Ciencia y tecnología*, [online]. 2020. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2020005000309>.
31. GIL CHAVES, Iván Darío; GUEVARA LÓPEZ, Javier Ricardo; GARCÍA ZAPATA, José Luis; LEGUIZAMÓN ROBAYO, Alexander y RODRÍGUEZ NIÑO, Gerardo. Process Analysis and Simulation in Chemical Engineering. *Springer International Publishing*, 2016., [online]. 2016. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-28111-1>.

- [//link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-14812-0](https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-14812-0).
32. MONNI, Janne; ALVILA, Leila; RAINIO, Jouni y PAKKANEN, Tuula T. Novel two-stage phenol-formaldehyde resin synthesis. *J Appl Polym Sci*. [Online]. 2007, vol. 103, n.º 1, págs. 371-379. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/app.24615>.
  33. LIANG, Bingchuan; LI, Xiangyu; HU, Lihong; BO, Caiying; ZHOU, Jing y ZHOU, Yonghong. Foaming resin modified with polyhydroxylated cardanol and its application to phenolic foams. *Ind Crops Prod*. [Online]. 2016, vol. 80, n.º 1, págs. 371-379. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.11.087>.
  34. PERMINOVA, Daria A.; MALKOV, Viktor S.; GUSCHIN, Viktor y EISENREICH, Norbert. Influence of glyoxal on curing of urea-formaldehyde resins. *Int J Adhes Adhes*. [Online]. 2019, vol. 92, n.º 1, págs. 1-6. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2019.04.001>.
  35. TANG, Kaihong; ZHANG, Ailing; GE, Tiejun; LIU, Xiaofeng; TANG, Xiaojun y LI, Yonjiang. Research progress on modification of phenolic resin. *Mater Today Commun*. [Online]. 2021, vol. 26, n.º 1, pág. 101879. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101879>.



Artículo de **libre acceso** bajo los términos de una **Licencia Creative Commons Reconocimiento – NoComercial – CompartirIgual 4.0 Internacional**. Se permite que otros remezclem, adapten y construyan a partir de su obra sin fines comerciales, siempre y cuando se otorgue la oportuna autoría y además licencien sus nuevas creaciones bajo los mismos términos.