

Ingeniería conceptual de una planta de producción de ácido sulfónico

Conceptual engineering of a sulfonic acid plant

Paul Ernesto Nava Rondón

Universidad Rafael Urdaneta, Facultad de Ingeniería. Maracaibo, Venezuela.

Correo electrónico: paulnava2001@gmail.com

Humberto José Vásquez Pérez

Universidad Rafael Urdaneta, Facultad de Ingeniería. Maracaibo, Venezuela.

Correo electrónico: humbertojosevasquezperez@gmail.com

María Emilia Da Costa Romero

Universidad Rafael Urdaneta, Facultad de Ingeniería. Maracaibo, Venezuela.

Correo electrónico: maria.da.8060@uru.edu.ve

Recibido: 17-01-2022

Aceptado: 11-04-2022

Resumen

Con objeto de promover la fabricación de detergentes, herramienta principal en la prevalencia de las condiciones higiénicas, el estudio de enfoque proyectivo propuso una planta de producción de ácido sulfónico, componente principal del producto mencionado, utilizando simuladores como instrumento central de la experimentación realizada; así como el uso de modelos de estimación económica para los posibles costos relacionados. Del primer objetivo se obtuvo una compilación de normativas y criterios, de origen venezolano y estadounidense, para el diseño conceptual productivo y los equipos involucrados. Consecuente a esto, se describió el proceso de producción del ácido como un sistema de 12 pasos y 20 bloques, con la capacidad de producir 11,4 toneladas de producto diarias. La planta ocupa 929,93 m² y tiene la posibilidad de producir 1,1 millones de dólares al día; permitiendo una recuperación del capital en 9 años.

Palabras clave: Ácido sulfónico, simulador aspen, estimación económica, diseño de Equipos

Abstract

In order to promote the manufacture of detergents, the main tool in the prevalence of hygienic conditions, the projective approach study proposed a sulfonic acid plant, the main component of the aforementioned product, using simulators as the central instrument of the experimentation carried out; as well as the use of economic estimation models for possible related costs. From the first objective, a compilation of regulations and criteria, of Venezuelan and American origin, was obtained for the productive conceptual design and the teams involved. Consequently, the acid production process was described as a 12-step, 20-block system, with the capacity to produce 11.4 tons of product per day. The plant occupies 929.93 m² and has the potential to produce 1.1 million dollars per day; allowing for a capital return in 9 years.

Key Words: Sulfonic acid, aspen simulator, estimation of expenses, equipment design.

Introducción

Actualmente, la industria de la sulfonación ha visto una expansión económica considerable con respecto a los últimos años. El ácido sulfónico, a mediados del año 2021, tuvo un precio de venta de 1320\$ por tonelada según Chemanalyst [1]. Este mismo artículo comenta acerca de cómo el mercado ha prosperado en las regiones tanto asiáticas, como europeas y americanas. Chemanalyst [1], indica que las ventas de ácido sulfónico tienen

la capacidad de permanecer estables tanto a mediano como largo plazo en estas regiones, debido al aumento en producción y consumo que demostraron a mediados del año de publicación del artículo.

La estabilidad económica es una de las razones que generan el interés de realizar un diseño para una planta capaz de llevar a cabo el proceso de sulfonación a gran escala. El ácido sulfónico está descrito por Wong & Poli [2] como un compuesto orgánico de azufre que contiene el grupo funcional hidróxido de sulfonilo, el cual se puede expresar de manera lineal: $S(=O)_2-OH$. Además, Block & Britannica [3] representan al ácido sulfónico como el compuesto RSO_3H , siendo R un grupo de combinación orgánico.

Con el fin de obtener este producto se lleva a cabo el proceso de sulfonación. Este mismo queda definido por Gómez [4, p.6] como el “proceso en el cual una molécula de SO_3 (trióxido de azufre) se une químicamente a una cadena orgánica para formar un sulfonato”. Esta definición, es la base bajo la cual se guía el estudio del proceso productivo. A su vez, este autor define la sulfonación como un grupo de 4 reacciones que ocurren durante la obtención del ácido. La reacción principal, definida por Gómez [4], consta de la unión de un mol de SO_3 con un mol de LAB (alquilbenceno lineal) para la obtención de un mol del producto. Según Economic and Social Commission for Western Asia [5], el LAB es una familia de compuestos orgánicos de fórmula $C_6H_5C_nH_{2n+1}$, donde n se encuentra entre 10 y 16. El componente orgánico de interés para el estudio es el dodecibenceno ($C_{18}H_{30}$), ya que este es el mismo bajo el cual el antecedente de esta investigación, Gómez [4], enfoca su trabajo.

Por otro lado, para poder cumplir el objetivo principal, el estudio desarrolla el proceso de producción a través de la óptica de la ingeniería conceptual. Esta misma es definida por Ortega & el Instituto Mexicano del Petróleo [6], como la primera etapa de un proyecto de ingeniería, en la cual puede identificarse si un proyecto es factible o no y, a su vez, reconocer cuales son los requerimientos del proceso y los equipos necesarios para generar el producto. Esto por lo tanto involucra el dimensionamiento de todos los equipos, el análisis de consumo de materia prima y de capacidad de producción, y la estimación de los costos asociados al proceso; se realiza lo previamente mencionado con el fin de generar los documentos pertinentes para el completo entendimiento de la planta por parte del ente que desee fabricarla.

A partir del acercamiento al proceso, realizado a través de una ingeniería conceptual, se recolectan las normas y criterios para el diseño de la planta y el análisis del proceso productivo, así como del comportamiento del grupo de reacciones, dimensionamiento de las tuberías y equipos involucrados, generación de planos y flujogramas relacionados a los equipos y el proceso en un espacio determinado, y que culmina en la estimación de costos asociados al aparato productivo. El estudio entonces se enfoca en desarrollar un proceso y validarlo en base a las normas y criterios mencionados.

Debido a todo lo anteriormente planteado, se propone desarrollar la ingeniería conceptual de una planta de producción de ácido sulfónico. Este artículo se basa en la información generada a través de simuladores durante un periodo de 6 meses en la ciudad de Maracaibo, estado Zulia, para el Trabajo Especial de Grado titulado: “Ingeniería Conceptual de una Planta de Producción de Ácido Sulfónico para la Empresa Procura General de Materiales C.A.” de Nava et al. [7], donde puede encontrarse una versión más profundidad de la información de este artículo.

Material y Métodos

La investigación fue llevada a cabo desde un punto de vista experimental, esto implicó la interacción con variables relacionadas al proceso de producción para obtener algún tipo de efecto o resultado de dichas modificaciones. Esta experimentación fue realizada a través de los simuladores, en estos se modificaron parámetros como temperaturas, presiones y composiciones para obtener las características y dimensiones de los equipos pertenecientes a un proceso de sulfonación completo; así como la obtención de los costos estimados que se relacionan al mismo.

Los objetivos completados en esta investigación requerían de la recolección de información tanto de forma documental como experimental, esto conllevó a que los métodos de obtención de datos fueran dos. En primera instancia, la información necesaria para poder llevar a cabo el estudio tuvo que ser compilada a

través de una observación documental, lo cual implicó una revisión bibliográfica de documentos relevantes al proceso. Por otro lado, el estudio también utilizó la observación directa para recolectar la información relacionada a la experimentación realizada en los simuladores.

Una vez obtenidos todos los datos, el enfoque se convirtió en realizar el debido procesamiento y compilación de los mismos. Debido a la naturaleza del estudio y de los resultados recolectados, el propósito de la compilación de los datos fue el de organizar la data por grupos de manera que todas sus características fueran fácilmente observables y entendibles. Esta información se refiere a las dimensiones de los equipos, características de las corrientes y los detalles del proceso en general, su ordenada y coherente visualización fue clave para asegurar el entendimiento de los datos obtenidos. Es por todo lo anteriormente mencionado que la información fue organizada en tablas, listas y datashets realizadas a través de la computadora; siendo esta la herramienta principal de recolección de datos.

Los objetivos de esta investigación fueron realizados en fases que lograron que las variables del estudio fuesen debidamente dimensionadas y que sus indicadores fueran analizados. El procedimiento seguido en cada fase fue específico para cada objetivo, lo cual a su vez determinó la extensión de las actividades realizadas, ya que se poseía objetivos que requirieron de un procedimiento más extenso que otros.

Establecimiento de las bases y criterios de diseño para una planta de producción de ácido sulfónico

Se compilaron las normas necesarias a través de una investigación exhaustiva delimitada dentro de la literatura de institutos venezolanos y estadounidenses, que se relacionan con el diseño tanto del proceso como de los equipos del mismo. A su vez, bajo las mismas condiciones de búsqueda, se investigaron diferentes criterios de diseño para los equipos que están relacionados al proceso. Finalmente, las normas y criterios hallados fueron tabulados en tablas que los caracterizaban según su propósito, instituto emisor de la norma y su fecha de expedición; cabe destacar que se generaron varias tablas para este objetivo separando normas y criterios y su propósito dentro del estudio, siendo estas dirigidas hacia el proceso en general o hacia el diseño de equipos. A su vez, fue generada una lista de los criterios generales aplicados al proceso.

Descripción del proceso de producción de ácido sulfónico

Antes de poder experimentar, diseñar o caracterizar el proceso de sulfonación, se tuvo que plantear como este ocurría y a través de qué tipo de equipos. Para ello se realizó una investigación relacionada a diferentes plantas de producción de ácido sulfónico con el fin de identificar los bloques principales de estas y el proceso que sigue la materia prima para ser convertida en el producto deseado.

La primera actividad llevada a cabo para esta fase fue la de listar todos los equipos que eran necesarios para el proceso. Esto último incluye la mención de todas las bombas y compresores, intercambiadores de calor y operaciones de intercambio de masa y materia que se encuentran en el sistema. La selección de las operaciones unitarias se realizó a través de la comparación de diferentes plantas investigadas, siendo el enfoque las similitudes y diferencias que hay entre ellas. Una vez obtenida una primera lista de equipos preliminar, esta fue modificada aún más con el fin de reemplazar o eliminar equipos según decisión de los autores.

Seguido a esto, se procedió a redactar el proceso de sulfonación completo en pasos que describen lo que ocurre en una o más de las operaciones unitarias llevadas a cabo. Esta lista representa el orden lógico de las operaciones presente en el sistema, añadiendo al mismo un diagrama de bloques con el fin de poder visualizar mejor el proceso redactado. Por otro lado, el propósito de esta actividad dentro de la fase es describir todos los elementos del mismo, es decir, no solo el de la transformación de la materia prima, sino que también se redactaron los aspectos del sistema de recirculación y de enfriamiento de los equipos que así lo necesitaban.

Como aspecto final para la descripción del proceso, se calcularon los flujos de materia prima necesarios para cumplir con una cantidad de producción diaria específica. Para este cálculo tuvieron que ser identificadas las reacciones de la sulfonación, así como la información proveniente de los antecedentes para poder calcular en qué proporción salen los productos y subproductos de la reacción. Además de esto, se obtuvo la cantidad

de aire que, por criterio del reactor, tiene que ser mezclado con el SO₃ gaseoso. Por último, se investigaron las condiciones de temperatura y presión de la ubicación en la cual se proyecta la planta y que a su vez son las mismas de los flujos que entran al proceso; esto incluye la cantidad de humedad que entra con el aire mezclado.

Dimensionamiento de los equipos de la planta de producción de ácido sulfónico

A través del uso de simuladores, y de investigaciones análogas a ésta, se experimentó sobre las condiciones del proceso para obtener las características principales de los equipos que lo conforman. Debido a la naturaleza y complejidad de algunos de las operaciones, el sistema tuvo que ser dividido en 4 etapas para ser simulado. Todo se debe a que el reactor de película descendente no es simulable a través de los programas Aspen y a que el desnebulizador requiere de un simulador diferente.

En primer lugar, se simuló, a través del programa Aspen Adsorption, el desnebulizador que separa el agua del aire que entra al sistema; con el fin de identificar las partes simuladas del sistema, esta tomó el nombre del equipo principal de la misma, o sea “Desnebulizador”. Para esto se tuvieron que añadir los componentes relacionados a esta parte de la simulación, a las condiciones que entran. A su vez, este programa se encarga de simular el primer compresor que es el que permite la entrada de aire al sistema desde la atmósfera. Se seleccionó el método termodinámico adecuado para la operación y se corrió la simulación hasta que esta no demostrara errores severos en el sistema, tomando en cuenta que el fin del desnebulizador es el de eliminar toda la humedad del aire. En este punto, todos los datos de las corrientes y de los equipos fueron debidamente tabulados y compilados.

La siguiente parte del proceso fue llamada, como también lo fue su simulación, “Pre-reactor” y fue simulada utilizando el programa Aspen Plus. En esta se utilizaron los datos de entrada de la sección “desnebulizador”, así como los de las corrientes del componente orgánico y SO₃ calculados con anterioridad. Esta simulación fue realizada con el fin de obtener las características de las corrientes y equipos que vienen antes del reactor, esto incluye bombas, un precalentador, entre otras. Se añadieron los componentes químicos involucrados y se seleccionó el método termodinámico adecuado, haciendo uso de un sistema de comprobación, incluido en el programa, para determinar cuál sería el ideal. Se ingresaron los datos de las corrientes y los datos de operación de los equipos, para así correr la simulación, haciendo los cambios necesarios en la misma, hasta que ésta no diera errores severos. Consecuente a esto, se diseñaron los equipos usando herramientas del programa Aspen y finalmente se recolectó toda la información requerida de la simulación para seguir cumpliendo con el objetivo.

Los datos de salida de la etapa del “Pre-reactor” fueron utilizados para calcular el comportamiento del reactor de película descendente; las características de este equipo fueron calculadas a mano. Las condiciones de operación del reactor fueron adoptadas del trabajo de Gutiérrez [8] y la cinética obtenida fue utilizada para calcular el tiempo de residencia de la reacción y consecuentemente, con los flujos de entrada, el volumen total del tanque. Adicionalmente, la información del trabajo de Gómez [4] fue utilizada para determinar la relación de dimensiones que debe tener el reactor y así calcular su diámetro y altura. El flujo de salida del reactor fue caracterizado asimilando su comportamiento al del estudio de Gutiérrez [8], así obteniendo la composición porcentual de la corriente de salida.

Finalmente, se simuló la parte del proceso denominada “Post-reactor”. La corriente de salida del reactor se convirtió en la principal entrada de esta etapa. Esta simulación, fue realizada en Aspen Plus y siguió el mismo proceso de introducción de los datos que se siguió para el apartado de “Pre-reactor”. Para esta simulación se realizaron muchas consideraciones relacionadas al separador, principalmente debido a los químicos que estaban involucrados. Como en casos anteriores se corrió el programa hasta eliminar todos los errores severos que se presentaron para luego registrar las características de las tuberías y equipos simulados.

Determinación de la ubicación física de los equipos de la planta de producción de ácido sulfónico en planos de ingeniería.

Con todas las dimensiones de los equipos obtenidos, se procedió a diagramar la localización física de los equipos en un área determinada para entender ver su arreglo en un espacio dimensionado. Primero, se generó

el Layout de la planta de producción de ácido sulfónico. Después, se calculó el área que la maquinaria ocupa de manera que se multiplicó la totalidad de su largo por su ancho, como un rectángulo.

Realización de un estimado de costos para una planta de producción de ácido sulfónico

Como parte final del estudio, se calcularon los aspectos económicos del proceso. Esto último incluyó, en primera instancia, el cálculo de los costos para cada equipo de la planta, de mano de obra, de materia prima, de utilidades y de mantenimiento. Por otro lado, se estimaron además las posibles ventas anuales del producto, así como el tiempo en el cual se espera recuperar la inversión inicial de los equipos. Todo lo anteriormente mencionado fue realizado a través de los métodos de estimación económica de Couper et al [9].

Resultados y discusión

La ingeniería conceptual es la base inicial para el diseño de un proyecto, es el principio de la idea de llevar a cabo un proceso. El dimensionamiento de los equipos, los planos, el entendimiento de los procesos de transferencias de calor y masa son el enfoque principal de la misma. El Trabajo Especial de Grado del que se deriva este estudio contiene toda la información relacionada al proceso de sulfonación y esta comienza por las normas y criterios compilados.

Establecimiento de las bases y criterios de diseño para una planta de producción de ácido sulfónico

La investigación relacionada a las normas tuvo dos enfoques principales, primero aquellas que tratan con la conceptualización de la planta y, segundo, las normativas a seguir para el diseño de los equipos del proceso. Ambos aspectos de las normas fueron necesarias para la conceptualización de la planta, tanto desde un punto de vista de nomenclatura, como de requerimientos que debe tener la ingeniería conceptual para ser correcta.

Tabla 1. Normas a Seguir para la Conceptualización de la Planta de Ácido Sulfónico[7]

Norma	Año	Propósito
Covenin 1074-81	1981	Nomenclatura nominal de las dimensiones de las tuberías
ANSI 5.1	2009	Representación e identificación de los instrumentos, equipos o dispositivos para planos y documentos
Covenin 3294-97	1997	Requerimientos mínimos de información para la ingeniería básica de un proyecto industrial

En la Tabla 1, se tabularon las normas que se relacionan con los aspectos más generales del proceso, entre estas se tiene la Covenin 1074-81[10] que indica la nomenclatura nominal utilizada en Venezuela para las tuberías de diferentes materiales. A su vez, se tiene la norma ANSI 5.1[11] que se enfoca en la representación de equipos e instrumentos en planos y documentos, información cuya utilidad se demuestra en la documentación generada del proceso. Por último, se tiene la norma Covenin 3294 [12], esta sirvió de guía para la correcta ejecución de la ingeniería conceptual de la planta, tanto en requisitos como manera de hacer las debidas actividades.

Tabla 2. Normas a Seguir para la Conceptualización de los Equipos Involucrados [7]

Norma	Año	Propósito
ISO 5199	2022	Normativa para el correcto diseño de bombas centrifugas usadas en procesos químicos
ISO 16345	2014	Verificación y evaluación de torres de enfriamiento atmosféricas
ASME BPVC -VIII -1	2021	Requisitos aplicables al diseño, fabricación, inspección, prueba y certificación de recipientes que operan a presiones mayores de 15 psig
TEMA 7ma edición	1988	Fabricación y diseño de intercambiadores de calor de tipo tubular
ASME B 19.1	1995	Estándar de seguridad para sistemas de compresores de aire

La Tabla 2 contiene las normativas relacionadas al diseño de los equipos del proceso. Estas normas son, en su mayoría, de origen estadounidense. Algunas de estas funcionan como guía, otras como manual y otras

como requisitos de diseño para las máquinas de la planta. De la misma manera se destaca que estas normas no son para todos los equipos relacionados al proceso, esto se debe a que no fueron encontradas dentro de los límites bibliográficos planteados en el estudio.

Por otro lado, los criterios relacionados al proceso provienen de las Bases Teóricas vistas en el Trabajo Especial de Grado del cual deriva este artículo; estos también fueron obtenidos de la empresa PGM. Los criterios sirven de recomendaciones que se deben cumplir para diseñar la planta. A su vez, la empresa planteó requerimientos para el proceso productivo. La siguiente lista exhibe todos los criterios relacionados a los aspectos generales relacionados a la producción:

- La capacidad mínima de producción es de 11 toneladas al día
- La planta tendrá un ciclo de trabajo de 10 horas al día, 5 días a la semana
- Los subproductos generados se almacenarán y serán conservados por la empresa
- La concentración de ácido sulfúrico en el producto final no debe exceder el 0.5% en peso
- La temperatura de salida del producto debe estar entre 45 y 55 °C
- Se asume un estado estacionario para todo el proceso
- El producto debe ser estabilizado con una concentración menor o igual a 0,6% w/w de agua.
- Según Mulyandasari y Kolmetz [13] los equipos deben tener un espaciamiento mínimo de 0.6m en forma de pasillos. Los intercambiadores de calor deben tener un estacionamiento de otros equipos de 7,5 m.

Se observó en esta lista que se poseen requerimientos de cantidad de producto a fabricar por la planta, esto a su vez viene acompañado de la cantidad de horas que se planifica operar a la misma por día. Por otro lado, se tienen criterios que se relacionan con las salidas del proceso, siendo uno de los parámetros de calidad del producto la cantidad máxima de ácido sulfúrico que puede haber dentro del componente sulfónico, así como su temperatura de salida. Por último, el proceso fue estudiado desde un punto de vista estacionario, con el fin de hacer más sencillo los cálculos relacionados al mismo.

Tabla 3. Criterios Relacionados a los Equipos Involucrados[7]

Equipo	Criterio
Reactor	La presión es relativamente constante a través de todo el reactor
	No hay difusión del gas en el líquido
	La reacción es instantánea, debido a que la velocidad de reacción es mayor a la de condensación del SO ₃ ; por ende reacciona en su totalidad
	La reacción solo ocurre en la interfase gas - líquido
	Se asume un espesor de película constante (promedio) en todo el reactor
	La entrada de trióxido de azufre tiene que estar mezclada antes de entrar al reactor con una concentración del 5% v/v del mismo en aire
	Las velocidades ideales de entrada para el SO ₃ , y para el componente orgánico son entre 25 y 30 m/s, y entre 0.5 y 1 m/s respectivamente
	La película formada por el componente orgánico tiene alrededor de 0.2 mm de espesor
	El agua de enfriamiento a utilizar entra a 30°C
Separador	Se considera que es separación de dos fases (líquida-gaseosa)
	El separador es de tipo vertical
	La relación entre el diámetro y la altura es 3:1
Motor de mezcla	Las aspas deben ser de 1/3 del diámetro del tanque, siendo más grandes dependiendo de lo pesado o viscoso que sea el líquido
	El número de aspas en el mezclador es directamente proporcional al volumen mezclado por minuto
	Las revoluciones por minuto del mezclador son directamente proporcionales al volumen mezclado por minuto

Los criterios observables en la Tabla 3 influyen en el diseño de los equipos del proceso de sulfonación. Estos tienen que ver con relaciones de tamaño de los equipos y las velocidades de flujo que mejoran las

condiciones a las cuales se dan algunos procesos. Por otro lado, como en el caso del reactor, se ven criterios acerca de lo que ocurre dentro del equipo con el fin de tener un mejor entendimiento de la operación que se lleva a cabo.

Descripción del proceso de producción de ácido sulfónico

Este objetivo tiene como resultado inicial la lista de los equipos que conforman el diseño de planta conceptualizado. Los equipos son identificados con un número "TAG" que no solo indica el tipo de equipo, sino también la numeración de los que sean similares. La enumeración de los equipos fue realizada en el orden de aparición dentro de los mismos en el proceso, desde la materia prima hasta el producto.

Tabla 4. Equipos utilizados para el proceso de sulfonación [7]

Equipo	Identificador
Tanque de almacenamiento N°1	TK-101
Bomba N°1	P-101
Tanque de almacenamiento N°2	TK-102
Bomba N°2	P-102
Calentador	E-101
Compresor N°1	C-101
Separador N°1(Desnebulizador)	V-101
Reactor	R-101
Separador N°2	V-102
Separador N°3	V-103
Enfriador	E-103
Tanque de envejecimiento	V-104
Tanque de estabilización	V-105
Bomba N°3	P-103
Tanque de almacenamiento N°3	TK-103
Tanque de almacenamiento N°4	TK-104
Bomba N°4	P-104
Enfriador por aire	E-102
Bomba N°5	P-105
Bomba N°6	P-106

La Tabla 4 presenta todos los equipos pertenecientes al diseño de la planta de producción de ácido sulfónico. El sistema requiere de 20 componentes que, en conjunto, permiten realizar los debidos desplazamientos, transformaciones y transferencias tanto de energía como de masa. La Tabla 4 contiene una variedad de equipos, siendo el más complejo de la lista el reactor de película descendente y, en contraparte, el más simple siendo los tanques en los cuales la materia prima y los productos serán almacenados. Por otro lado, estos equipos, que forman parte del sistema, actúan bajo un orden lógico de operaciones que debe seguirse con el fin de obtener el producto deseado. La lista de los pasos del proceso se muestra a continuación:

- Se comienza por el aire, este es alimentado al proceso mediante un compresor, C-101 y pasa directamente al primer separador (V-101), el cual actúa como un desnebulizador que remueve la humedad del mismo.
- El SO₃ que se va a mezclar con el aire antes de entrar al reactor es extraído del tanque TK-101 para ser precalentado a través del uso del E-101, este utiliza energía eléctrica para subir su temperatura de 30 °C en reposo a 100 °C, y de esta manera dejar la corriente totalmente vaporizada.
- Las corrientes de aire y SO₃ son mezcladas, a través de una conexión T, antes de entrar al reactor, por una tubería en la parte superior del mismo.
- Mientras los pasos anteriores ocurren, del TK-102 es extraído el componente orgánico dodecibenceno, mediante una bomba, e impulsado a una temperatura de 30 °C hacia el reactor.

- Estas dos corrientes entran por la parte superior del reactor de película descendente R-101. Adicionalmente entra agua en la chaqueta de enfriamiento del reactor perteneciente al sistema de refrigeración debido a que la reacción es muy exotérmica.

- Al ocurrir la reacción, salen del R-101 el producto LABSA junto con dos subproductos de características anhidras, aunque en menor cantidad, así como ácido sulfúrico. En este paso, cabe destacar, también sale reactante, pero en cantidades muy pequeñas debido al grado de conversión del reactor, aproximadamente 90%.

- Debido a que la reacción es exotérmica, el reactor es enfriado a través de su chaqueta de enfriamiento, cuya agua recircula alrededor del reactor y hacia un intercambiador del tipo enfriado por aire denominado E-102.

- Toda la mezcla saliente del R-101 se dirige al separador V-102, del cual sale un flujo de tope gaseoso compuesto por el aire saliente y una variedad de componentes que son acarreados por el mismo, esto incluye la mayoría del ácido sulfúrico producido. Por otro lado, en la corriente de fondo, se obtiene el producto principal, el remanente del componente orgánico y un porcentaje pequeño de ácido sulfúrico que debe estar por debajo de las especificaciones de calidad, 0.5% w/w.

- El flujo de tope pasa hacia un separador similar al anterior (denominado como V-103) que separa las partículas remanentes y contaminantes que quedaron en la corriente gaseosa. En este punto se producen las dos primeras salidas, siendo una la corriente gaseosa, en la cual se debe realizar una separación del SO₃ y el aire a través de un filtro, y la otra conformada por el producto residual separado de la corriente gaseosa compuesto por los componentes anhidridos y la mayoría del ácido sulfúrico producido que van hacia el tanque TK-103, esto incluye cualquier remanente de reactivo que haya quedado.

- La corriente principal, es decir, la corriente de fondo del separador V-102 va hacia un intercambiador de calor para disminuir su temperatura a las condiciones apropiadas de calidad del proceso (55°C).

- El resultado de este tratamiento térmico se dirige hacia el tanque de envejecimiento con un motor de mezclado, V-104, y luego a un tanque de estabilización V-105 (a este tanque también entra agua pura para generar una solución acuosa).

- El flujo que sale de la V-105 es separado en dos corrientes de composiciones idénticas, una se dirige de regreso hacia el separador V-102 y la otra hacia el tanque de almacenamiento de ácido sulfónico TK-103.

A esta lista se le añade el hecho de que el reactor necesita de una refrigeración constante y, por lo tanto, debe incluirse un sistema de refrigeración. En este, el agua pasa alrededor del reactor a 30°C para enfriarlo y después de ser utilizada pasa por una torre de enfriamiento (E-101) de aire forzado que la devuelve a la temperatura inicial. Por otro lado, para ayudar al proceso de destilación, la corriente final que sale hacia el TK-104 es desviada parcialmente hacia el destilador haciendo uso de un splitter.

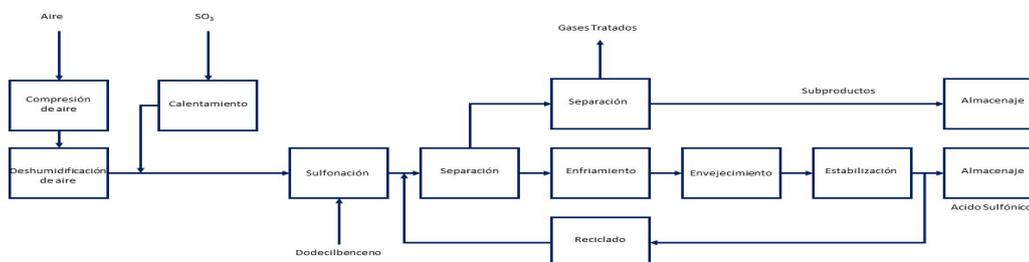


Figura 1. Diagrama de bloque del proceso [7]

Los pasos del proceso pueden ser representados gráficamente como se observa en la Figura 1. El sistema está compuesto por 12 bloques que se dividen en 10 relacionados al camino principal del producto, 1 procesos para el manejo de desechos y 1 que representa la recirculación. Las entradas del proceso son 3, el aire y el SO₃ que son mezclados antes de entrar al reactor y el dodecibenceno. Por otro lado, el proceso cuenta con 3 salidas, el gas que debe ser tratado antes de ser liberado, los subproductos de la reacción que son almacenados y el ácido sulfónico que es el producto deseado del proceso.

Tabla 5. Corrientes de proceso de entrada y sus condiciones [7]

Compuesto	Flujo molar (kmol/h)	Temperatura (°C)	Presión (kPa)
Aire	87,5387	30	101,325
SO ₃	4,6073	30	101,325
Dodecibenceno	4,6073	30	101,325

La Tabla 5 contiene los valores de los flujos de entrada del proceso. Estos fueron calculados tomando en cuenta que el proceso no siempre correrá a un 100% de operación dejando un 5% de holgura en el caso de que no se opere a capacidad total. Se destaca además que los componentes entran al proceso con una temperatura de 30 °C, condiciones normales para la ciudad de Maracaibo según Climasyviajes (2020) [14].

Dimensionamiento de los equipos y tuberías de la planta de producción de ácido sulfónico

Como su nombre lo indica, el rasgo principal de la data obtenida por parte de la investigación para este objetivo está constituido por la información física y operacional de los equipos relacionados a la planta. Estos datos son el aspecto más esencial al momento de proponer el diseño de un conjunto de equipos ya que para instalarlos, y operarlos, se necesita de toda la información disponible sobre ellos. Otro aspecto analizado por el objetivo fue el de la caracterización de los flujos de entrada y salida del proceso.

Tabla 6. Corrientes de Entrada y Salida del Proceso [7]

Corriente	Flujo molar (kmol/h)	Composición porcentual	Temperatura (°C)	Presión (kPa)
1	90,9735	96,22 % Aire	30	101,325
		3,78 % H ₂ O		
2	4,6073	100% DDB	30	101,29
3	4,6073	100% SO ₃	30	101,323
14	87,6139	99,91% Aire	95	101.325
		0,09% SO ₃		
15	0,7833	0,08% Aire	95	101.26
		0,01% SO ₃		
		42,70% DDB		
		17,54% DDBS		
		39,66% Subproductos		
19A	3,5863	0,04% Aire	55,01	119,99
		1,50% DDB		
		97,80% DDBS		
		0,44% Subproductos		
		0,22% H ₂ O		

En la Tabla 6 se apreció los flujos molares tanto de entrada como de salida del proceso. Se nota como el agua entra como humedad, mas esta característica es corregida en los pasos relacionados al proceso productivo.

En el tema de correcciones, todo el So3 presente en las corrientes de producto es separado exitosamente, a su vez se puede observar que el proceso recibe un flujo de agua, este proviene del sistema de estabilización que tiene como propósito mantener el componente en condiciones acuosas con una concentración no mayor a 0.6% en peso.

De la información compilada en los simuladores acerca de las condiciones de operación agregadas, así como a través de modelos matemáticos intrínsecos dentro del simulador, se obtuvieron las dimensiones, características de la mayoría de los equipos necesarios para la planta. Aunque se tuvo el caso de varios equipos que tuvieron que ser dimensionados de manera documental o mano, debido a que el simulador no otorgaba información sobre ellos. Entre los equipos más importantes del proceso se tiene al reactor, este fue dimensionado a mano, utilizando el tiempo de residencia de la reacción como medida de la cantidad de volumen entrante.

Tabla 7. Dimensiones y Materiales del Reactor[7]

Identificador	Material	Diámetro (m)	Altura (m)	Diámetro de entrada gas (mm)	Diámetro de entrada líquido (mm)
R-101	304 SS	7	27,1	32	25

La Tabla 7 contiene las dimensiones más importantes del reactor. Entre ellas se tienen los diámetros de entrada de los componentes. Este ajuste es realizado para poder obtener las velocidades de flujo indicada en los criterios; estas dan condiciones que, según Gómez [4] resultan ideales para llevar a cabo la reacción. Por otro lado, se puede notar que es un equipo más alto que ancho, su longitud es más de 3 veces su diámetro. A su vez, utilizando herramientas de dimensionamiento del programa Aspen, especializadas en el intercambio de calor, se obtuvo el dimensionamiento de los E-101 y E-103.

Tabla 8. Dimensiones y Materiales del Reactor[7]

Identificador	Material	Número de tubos	Número de carcasas	Configuración TEMA	Longitud (m)	Diámetro (m)
E-101	304 SS	30	1	BEM	2,25	0,205
E-103	304 SS	46	1	BEM	1,2	0,205

Estos son equipos con una configuración de tuberías TEMA definida; BEM como se observa en la Tabla 8. De la mencionado se puede inferir que son intercambiadores horizontales. Además, se nota que entre ellos existe una diferencia en la longitud que abarcan, esto se debe a la cantidad de calor que, por el proceso, tienen que añadir o disipar. Aunque, se destaca como intercambiador 103 es el que, por configuración, presenta la mayor cantidad de tuberías.

Al dimensionar todos los equipos involucrados, el trabajo también se dio a la tarea de dimensionar las tuberías relacionadas al proceso. Estas dimensiones consistieron del diámetro nominal dado por la norma COVENIN 1074:81 [10] y su longitud que fue obtenida a través del arreglo y diseño de la planta en su totalidad. Como aspecto final y esencial para este objetivo, utilizando la información de Graco [15], se le asignó su material de fabricación a cada equipo y tubería de la planta, lo cual es un aspecto tanto económico como matemáticamente importante para el sistema.

Determinación de la ubicación física de los equipos de la planta de producción de ácido sulfónico en planos de ingeniería

Al tener todas las dimensiones lógicas del proceso, el siguiente paso tomado en el proyecto fue el de colocar, de manera lógica, todos los componentes sobre un plano a escala. Este plano, llamado Layout, contiene las dimensiones de cada equipo obtenidas en objetivos anteriores y a su vez muestra como estos se verán al ser instalados, siguiendo los debidos criterios de espaciamento. El plano puede ser observado a continuación:

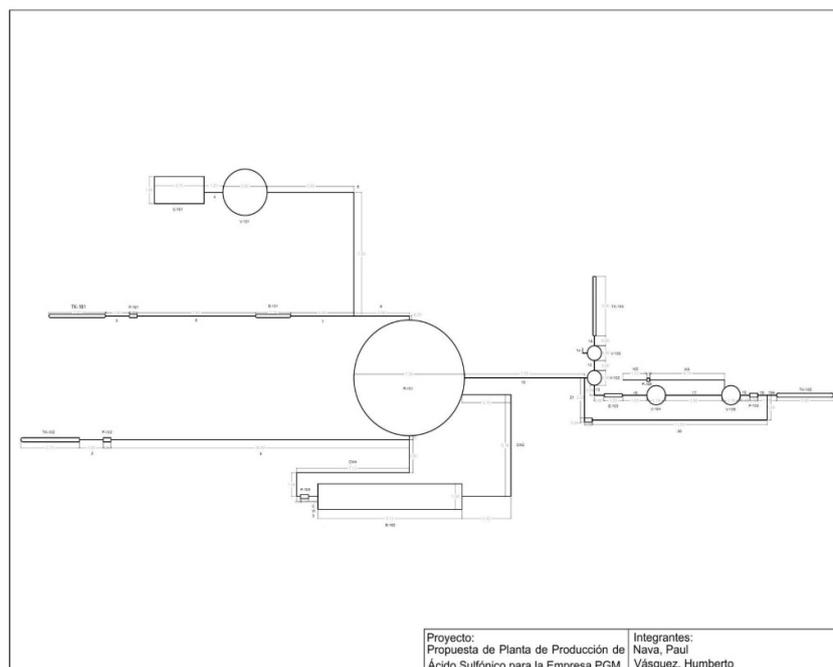


Figura 2. Layout de la Planta de Producción de Ácido Sulfónico [7]

La Figura 2 demuestra un arreglo ordenado de los 20 componentes que forman parte del sistema de producción. Los círculos mostrados son tanques verticales como bien se tienen el reactor, los separados, el desnebulizador y los tanques de procesamientos. Por otro lado, las figuras largas redondeadas presentes son representativas de los intercambiadores de calor presentes. Al medir la totalidad de sus magnitudes, horizontal y vertical, se tiene que la planta abarca un área rectangular de 929,93 m².

Realización de un estimado de costos para una planta de producción de ácido sulfónico

Toda la data compilada a través de la investigación culmina en la obtención de los datos económicos relacionados al proceso productivo. Esto abarca los que son de pago único, como el costo capital, y los que se encuentran en función del tiempo, como lo son el salario de los trabajadores, las utilidades y materiales consumidos y el mantenimiento de maquinaria. Las estimaciones económicas fueron realizadas a través de las ecuaciones de Turton (2012) [16], y Couper et al. [9]. Se tiene que, al sumar los costos de todos los equipos, estos amasan una cantidad de 10 634 860,4\$.

Tabla 9. Costos Operacionales [7]

Costo	Valor (\$/año)
Operadores	6 408
Electricidad	1 605,96
Agua	390
Materia prima	5 347 474,08
Mantenimiento	319 045,81
Total	5 674 923.85

Luego de obtener la cantidad de dinero que se debe tener para poder obtener todos los equipos necesarios, se calcularon los diferentes costos mensuales que pueden presentarse durante la operación; mostrados por años en la Tabla 9. Se nota como el mayor contribuyente a que el costo aumente tanto es la inversión en materia prima. El valor que le sigue a este es el del mantenimiento de los equipos, que fue calculado como una estimación anual en función al valor de la maquinaria en su totalidad. Seguido de los costos, se precisa tener el valor de las posibles ventas calculadas proyectando las ventas de la empresa CEPESA [17], obtenidos a través de los años.

Tabla 10. Ventas Estimadas [7]

Ingreso (\$/año)	Ganancias estimadas (\$/año)	Tiempo de Recuperación (años)
6 829 680	1 154 756,15	9,2

La Tabla 10 indica la información económica de los posibles beneficios que pueden ser ofrecidos por el proceso productivo a medida que las ventas sean favorables. Para obtener este valor se tuvo que calcular cuántos kg son producidos al año de ácido sulfónico, así como el precio de venta del mismo. En consecuencia, las ganancias son la diferencia entre el ingreso y los costos y es de este valor que se puede estimar el tiempo de recuperación de la inversión inicial que se realiza para la obtención de los equipos de la planta. El tiempo mencionado fue de 9,2 años.

Conclusiones

Las normas seleccionadas para el proceso resultaron ser suficientes para el cumplimiento del diseño de la planta de producción de ácido sulfónico; esto es tomando en cuenta los límites bibliográficos establecidos. Se puede decir lo mismo para los criterios relacionados tanto al diseño del proceso como de los equipos; esto aplica tanto para los criterios provenientes de la empresa, como los provenientes de la investigación documental.

Se requieren de 12 pasos y 20 equipos para poder llevar a cabo la transformación de la materia prima hasta el producto, ácido sulfónico. Esto último incluye consideraciones como procesos de enfriamiento y recirculación. La planta tiene la capacidad de producir 11,4 toneladas de producto al día cuando opera a su máxima capacidad.

La simulación permitió obtener toda la información de los equipos involucrados para poder llevar a cabo un proceso cuyo producto final cumple con los criterios de calidad como 0.6% de agua, menos de 0.5% de H₂SO₄ y una temperatura de 55°C de salida.

Todos los equipos involucrados fueron dimensionados a través de la utilización de simuladores de la línea Aspen, en excepción a aquellos que tuvieron que ser tomados de catálogos o calculados a mano como el reactor. El arreglo ordenado de estos equipos hace que la planta abarque un área de 923,93 m².

La capacidad productiva de la planta se traduce a 1 154 756\$ al año en ganancias. Este valor indica que la planta es sustentable a través del tiempo y que su inversión inicial es recuperada en 9 años de operación.

Referencias bibliográficas

- [1] Chemanalyst. *Tendencia y Pronóstico para los Precios del Ácido Sulfónico del Alquilbenzono Lineal*, (2021). <https://www.chemanalyst.com/Pricing-data/linear-alkylbenzene-sulfonic-acid-labsa-15>
- [2] Wong A. y Poli F. Estudios de RMN de 17O en Estado Sólido de Biomoléculas, (2014). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800183-7.00003-4>
- [3] Block, E. Ácido Sulfónico. Britannica, (2018). <https://www.britannica.com/science/sulfonic-acid>
- [4] Gómez, N. Modelamiento y Simulación de un Reactor Industrial de Película Descendente para la Producción de Surfactantes Aniónicos. (Tesis Magistral, Universidad Nacional de Colombia). Manizales, Colombia, (2013). <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/21077/4101005.2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [5] Economic and Social Commission for Western Asia. Alquilbenzono Lineal, (2022). <https://archive.unescwa.org/linear-alkyl-benzene>
- [6] Ortega, R. Ingeniería Conceptual. Instituto Mexicano del Petróleo, (2019). <https://www.gob.mx/imp/articulos/ingenieria-conceptual?idiom=es>
- [7] Nava, P., Vásquez, H., y Da Costa, M. Trabajo Especial de Grado titulado: “Ingeniería Conceptual

de una Planta de Producción de Ácido Sulfónico para la Empresa Procura General de Materiales C.A.”. Universidad Rafael Urdaneta. Maracaibo, Zulia, (2022).

[8] Gutiérrez, J. Simulación de una Columna de Paredes Mojadas como Reactor Sulfonación. (Tesis Doctoral, Universidad de Barcelona). Barcelona, España, (1989). <https://www.tesisenred.net/handle/10803/666138>

[9] Couper, J. Penney, W., Fair, J. & Walas, S. Equipos de Proceso Químico. Elsevier, (2012). https://books.google.co.ve/books?id=qG_TQwCsG-8C&pg=PA731&lpg=PA731&dq=10.1016/B978-0-12-396959-0.00021-5&source=bl&ots=gYQw18SgAm&sig=ACfU3U0o9EZ4ncEfb8UtOle7DO0nXLWr_Q&hl=en&sa=X&ved=2ahUKEwjXwPS6wpL2AhWNQjABHUeCBeIQ6AF6BA-gCEAM#v=onepage&q=10.1016%2FB978-0-12-396959-0.00021-5&f=false

[10] Comisión Venezolana de Normas Industriales. COVENIN 1074:1981 Designación del diámetro nominal y diámetro exterior en tubería, conexiones y accesorios para tuberías, en sistemas inglés y métrico. Comité técnico de normalización CT-07: Materiales Ferrosos, Subcomité Técnico SC-4: Tubos y accesorios para tuberías. Fecha 08-12-1981. Caracas, Venezuela, Fondonorma, (1981). Recuperado de: <http://sencamer.gob.ve/sencamer/normas1074-81.pdf>

[11] ANSI /ISA-5.1. Símbolos de instrumentación e identificación. Carolina del Norte, EE.UU, (2009). Recuperado de: <https://es.scribd.com/document/494797628/ANSI-ISA-5-1-2009>

[12] Comisión Venezolana de Normas Industriales. COVENIN 3294:1997. Guía para la preparación de la ingeniería básica de un proyecto industrial. Comité técnico de normalización CT-20: Mecánica Subcomité Técnico SC-6: Ingeniería Básica. En su reunión No. 146 de fecha 07-05-1997. Caracas, Venezuela. FONDONORMA, (1997). <http://www.es.scribd.com/document/367905602-3294-1997-ingenieria-Basica-GUIA#>

[13] Mulyandasari, V., y Kolmetz, K. KLM Technology Group Practical Engineering Guidelines for Processing Plant Solutions SEPARATOR VESSEL SELECTION AND SIZING (ENGINEERING DESIGN GUIDELINE), (2011). http://oilproduction.net/files/11%20-%20ENGINEERING_DESIGN_GUIDELINE__separator%20vessel_REV01.pdf

[14] Climas y viajes, Guía de climas en el mundo, (2020). <https://www.climasyviajes.com/clima/venezuela>

[15] Graco. Chemical compatibility guide, (2013). https://www.graco.com/content/dam/graco/ipd/literature/misc/chemical-compatibility-guide/Graco_ChemCompGuideEN-B.pdf

[16] Turton, R, Bailie, R.C., Whiting, W.B.,Shaeiwitz, J.A., Bhattacharyya. Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes. 4a. ed. Boston, Pearson Education,(2012).

<https://ptgmedia.pearsoncmg.com/images/9780132618120/samplepages/0132618125.pdf>

[17] CEPESA. Reporte anual y reporte de responsabilidad corporativa, (2011). <https://www.cepsa.com/stfls/corporativo/FICHEROS/IARC-2011-ENG.pdf>

Nota Especial

Artículo de investigación derivado del Trabajo Especial de Grado, titulado: Ingeniería Conceptual de una Planta de Producción de Ácido Sulfónico para la Empresa Procura General de Materiales C.A., presentado en la Universidad Rafael Urdaneta, Maracaibo, Venezuela.