



# Ingeniería conceptual para la producción de dodecilbenceno lineal

*Conceptual engineering for the production of linear dodecylbenzene*

**Christy Lee Lewis Quevedo**

Universidad Rafael Urdaneta, Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. Maracaibo, Venezuela  
Correo electrónico: [christy.27266620@uru.edu](mailto:christy.27266620@uru.edu)

**José Manuel Machado Rincón**

Universidad Rafael Urdaneta, Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. Maracaibo, Venezuela  
Correo electrónico: [jose.30064767@uru.edu](mailto:jose.30064767@uru.edu)

**María Emilia Da Costa Romero**

Universidad Rafael Urdaneta, Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. Maracaibo, Venezuela  
 <https://orcid.org/0009-0002-0364-949X> | Correo electrónico: [maria.da.8060@uru.edu](mailto:maria.da.8060@uru.edu)

Recibido: 17/01/2022

Aceptado: 07/03/2022

## Resumen

A fin de promover la fabricación de materia prima para la posterior producción de detergentes, mediante el uso de simuladores de la línea Aspen One, se modeló el proceso de alquilación para la obtención del dodecilbenceno lineal, así como el diseño de equipos. Como resultados se tiene que, la investigación cuenta con normas y criterios relacionados a los equipos diseñados y la especificación de tuberías de carácter nacional e internacional. Fue posible diseñar un proceso para la producción de dodecilbenceno a partir de kerosene, este se contempla en seis unidades. Se tiene un índice de producción de 16,56 toneladas de dodecilbenceno diarias. Con un área de 10747,9 m<sup>2</sup> y una inversión de equipos de 15,64 millones de dólares. Las ganancias son de 15,31 millones de dólares al año, indicando que el proceso es sustentable, también, se proyecta un tiempo de recuperación de capital de 12,24 meses.

**Palabras clave:** Ingeniería conceptual, dodecilbenceno lineal, simulador Aspen One, alquilbenceno lineal, alquilación.

## Abstract

*In order to promote the manufacture of raw material for the subsequent production of detergents, by using simulators from the Aspen One line, the alkylation process to obtain linear dodecylbenzene was modeled, as well as the equipment design. As results we have that, the investigation has norms and criteria related to the designed equipment and the specification of national and international pipes. It was possible to design a process for the production of dodecylbenzene from kerosene, this is contemplated in 6 units. There is a production index of 16.56 tons of dodecylbenzene per day. With an area of 10747.9 m<sup>2</sup> and an investment in equipment of 15.64 million dollars. The profits are 15.31 million dollars per year, indicating that the process is sustainable, also, a capital recovery time of 12.24 months is projected.*

**Keywords:** Concept engineering, linear dodecylbenzene, Aspen One simulator, linear alkylbenzene, alkylation.

## Introducción

El avance en la tecnología por la inhibición de medios nocivos para la salud, así como de vías de transmisión de patógenos ha tomado gran importancia. Por tal motivo, la información generada por esta investigación va dirigida principalmente a la producción de componentes químicos empleados en la fabricación de detergentes y desinfectantes bajo cualquier presentación [1]. Se dirigen los esfuerzos a la conceptualización de una línea de producción de dodecilbenceno lineal, componente clave empleado como materia prima en la industria de la limpieza.

Procura General de Materiales (PGM C.A.), empresa venezolana, ha mostrado interés en incursionar dentro de la industria anteriormente mencionada. La empresa pretende expandir sus conocimientos, así como su catálogo de productos mediante la adquisición de la documentación y estructura del proceso de síntesis y producción de dodecilbenceno lineal. Por lo tanto, se da la necesidad de una ingeniería enfocada en la conceptualización de instalaciones capaces de cumplir con las expectativas de producción impuestas por la empresa.

Se estudiaron diversos enfoques de diseño, iniciando con el establecimiento de las bases legales y normativas de diseño que rigen al proyecto, seguido de una descripción del proceso de alquilación, para el cual fue enfatizado su mecanismo. Entendido el proceso de producción, se procedió con el dimensionamiento y establecimiento de las condiciones óptimas del proceso, lo que permitió posteriormente la obtención de los datos necesarios para la generación de los documentos principales relacionados a la conceptualización de la línea de producción, así como la estimación económica del proyecto.

El propósito de la investigación fue producir un plan que cumpliera como solución a la necesidad planteada por la empresa PGM ante la necesidad de materia prima para su proyecto de una planta de sulfonación. Esta investigación se realizó de manera proyectiva a la necesidad planteada, empleando simuladores de la línea Aspen One, para desarrollar la totalidad de la ingeniería de la línea de producción. A su vez, la identificación de las reacciones implicadas en el proceso se realizó mediante la revisión documental de los trabajos de León [2] y Moitinho [3] con el fin de comprender aspectos relacionados a las fases de reacción implicadas en el proceso.

Cabe resaltar que no fueron considerados aspectos como la disposición final o tratamiento de efluentes, esto con el fin de demarcar un límite a la investigación. La investigación fue llevada a cabo en la ciudad de Maracaibo, estado Zulia, información de gran importancia debido al proceso de obtención de la materia prima empleada en este proceso. Esta investigación tiene como objetivo establecer la ingeniería conceptual de una línea de producción de dodecilbenceno lineal para la empresa Procura General de materiales C.A.

## Metodología

El trabajo atiende a una investigación de tipo proyectiva, según lo define Hurtado [4], ya que se enfoca en el desarrollo de una ingeniería conceptual para una planta de producción de dodecilbenceno lineal, diseñando una propuesta para solventar una determinada necesidad de la empresa Procura General de Materiales; de igual manera, dado el planteamiento de Arias [5], atiende a un nivel de investigación descriptivo, ya que, para el desarrollo de la ingeniería conceptual se describen las etapas de producción, equipos y, demás, elementos necesarios para lograr la conceptualización del proceso productivo.

En relación, al diseño de la investigación, este trabajo es una investigación no experimental, ya que no requiere la manipulación de variables para dar lugar a una situación; lo cual, consecuentemente daría lugar a un experimento [6]. También, se corresponde con un diseño de tipo transaccional, debido a que los datos son recolectados en un único momento del tiempo [4]; y, el diseño es documental, dado, a que, el planteamiento de Sabino [7], indica que la información recabada son datos recolectados de documentos de investigaciones pasadas.

La unidad de análisis de este trabajo se centró en el proceso de producción del dodecilbenceno lineal, teniendo en cuenta que la información a recabar para el desarrollo de la información, se enfoca en los datos que permitan la conceptualización de este proceso. En correspondencia a esto, las técnicas de recolección de datos fue la revisión documental [8] y la observación indirecta [9], por lo que este trabajo se enfocó en la obtención de datos registrados en documentos bibliográficos.

Para el desarrollo de la investigación, además, se aplicó el uso de simuladores de la línea Aspen One, los cuales permiten realizar las simulaciones del proceso con la herramienta Aspen Plus y el diseño de equipos, específicamente los intercambiadores de calor, con el programa *Aspen Exchanger Design and Rating*.

Para lograr el desarrollo de los objetivos de la investigación, se establecieron las fases necesarias para atender la resolución de los subproyectos de la investigación, de manera específica para cada uno.

### **Establecimiento de las bases y criterios de diseño para la línea de producción**

Para esto, se compilaron normativas legales que atienden a los regimientos venezolanos o internacionales para el diseño tanto del proceso como de los equipos involucrados. Adicional, se investigó criterios de diseño para los equipos y se tomaron en cuenta también los criterios de producción establecidos por la empresa PGM en relación a los tiempos de operación y requerimientos de producción. Una vez, compilada toda esta información, fue debidamente tabulada, separando normas y criterios de diseño de equipos y del proceso para facilitar la apreciación de la información.

### **Descripción del proceso de producción de dodecilbenceno**

Para la correcta descripción del proceso, se realizó una exhaustiva investigación que permitiera recabar información relacionada a las condiciones de operación proceso y los equipos involucrados, pudiéndose así plantear las reacciones de síntesis de productos y subproductos que se generan en el proceso, a partir de eso, se estableció que el proceso debía ser separado en unidades para facilitar la conceptualización del mismo e identificar los bloques principales de cada unidad.

Las unidades que se plantearon para las unidades del proceso son generalmente cinco. Pero, para esta investigación se agregó una sexta unidad, para permitir maximizar el rendimiento del proceso, y, se establecieron dado a la revisión documental que presenta los procesos reconocidos internacionalmente, además se identifican los equipos principales requeridos para el proceso.

En este punto, se calculó una estimación de la materia prima, kerosene, requerida para el proceso en la unidad 1 de acuerdo a lo establecido por León [2] donde establece que la composición del kerosene contiene un 21 % en peso de parafinas, por lo que, según esto, se identificó una estimación de materia prima para el requerimiento mínimo de producción diario de la planta.

En esta fase, se realizó la simulación base del proceso, en donde se pudo obtener la adecuada conceptualización, atendiendo a las operaciones unitarias involucradas en cada unidad y así describir el proceso detallando las condiciones de operación, reacciones y porcentajes de conversión para cada una de ellas.

### **Dimensionamiento de los equipos de la línea de producción**

Una vez, que se realizó la simulación base, se atendieron los detalles de la simulación para obtenerse unos resultados concretos referentes a los requerimientos de materia prima, los cuales variaron dado que, al realizarse las recirculaciones de componentes al proceso, se realizaron iteraciones en el simulador para así obtener resultados adecuados en los requerimientos de producción; esto fue realizado de dicha manera debido a las dificultades que presentan al utilizar el simulador *Aspen Plus* para establecer corrientes de recirculación. Una vez, se atendieron a detalle cada aspecto de la simulación, se obtienen los resultados finales en donde se determinaron las corrientes de materias primas, productos, equipos y condiciones del proceso, por lo que se procede al dimensionamiento de los equipos del proceso.

Para el dimensionamiento de equipos, se obtienen del simulador los datos operativos de los mismos, presentándose tabulados, los cuales permitirían estimar las dimensiones de los equipos mediante el diseño de los mismos. En relación a las bombas y turbinas, el dimensionamiento de estos se realiza considerando la información obtenida por los catálogos consultados de la empresa Kawamoto [10, 11] para bombas centrífugas y turbinas, por lo que fueron seleccionadas bombas que cumplieran con los requerimientos operativos de los bloques simulados y de estas fueron presentadas las dimensiones que se dan a conocer en el catálogo.

Para los intercambiadores de calor se extrae de la simulación los datos relacionados a las temperaturas de entrada y salida de las corrientes frías y calientes, los flujos másicos y todos los datos que son necesarios para el diseño de estos equipos en el programa *Aspen Exchanger Design and Rating*, obteniéndose la datasheet de cada equipo con lo cual se pudieron dimensionar los intercambiadores de calor.

En relación a las dimensiones de las columnas de destilación, esto se realizó considerando el número de etapas y el volumen de materiales a manejar por el equipo, lográndose así estimar las dimensiones de diámetro y altura. Para los reactores fueron obtenidas sus dimensiones de la misma manera, asumiendo el volumen del equipo en un tiempo de una (1) hora.

Todas las tuberías del proceso se dimensionaron considerando el diámetro nominal que deberían tener de acuerdo al flujo que maneja cada corriente, estableciéndose el Schedule, material y la longitud, siendo esto último conocido por las longitudes físicas que tendrían las tuberías en la planta.

Para todos los equipos y tuberías se estableció como material de construcción acero inoxidable 304.

### **Determinación de la ubicación física de los equipos de la línea de producción**

Con todas las dimensiones de equipos y tuberías establecidas, se procedió a realizar la diagramación de la línea de producción en planos de ingeniería, obteniéndose el layout de la planta con la ubicación de los equipos y el orden lógico del proceso en un contexto de espacio físico. Para ello se establece una distribución de espacios tomando en cuenta únicamente la distribución de las unidades del proceso, además de sitios de interés como las áreas de inspección, mantenimiento y disposición de tanques de almacenamiento. Se determina un área rectangular y se establece una distribución en forma de “C” para la ubicación de las unidades de tal manera que puedan conformar un proceso de orden lógico y fluido.

Finalmente se realizó el layout de la planta, haciendo uso del programa Autocad, con diseño de plano de ingeniería y correcta identificación de los equipos y dimensiones.

### **Estudio económico del proyecto de construcción de la línea de producción**

Como parte final, se realizó un estudio económico de Tipo V al proyecto para evaluar su factibilidad, donde se calcularon aspectos económicos referentes a costos de equipos que integran la inversión de capital; costos operativos, donde se incluyen los costos de mano de obra, materias primas, servicios eléctricos y de agua, además de costos por mantenimiento. Adicional, se estimaron los ingresos anuales por ventas de productos y subproducto, para así obtenerse una estimación de ganancias anuales que permitieron calcular el tiempo de retorno de capital de inversión. Todos estos cálculos se realizan considerando ecuaciones y correlaciones establecidas por los autores Turton *et al.*, [12] y Couper *et al.*, [13].

## **Resultados y Discusión**

### **Bases y criterios de diseño para una línea de producción de dodecibenceno lineal**

A fin de cumplir con el desarrollo de la ingeniería conceptual para la producción de dodecibenceno lineal se revisaron las normativas legales venezolanas y estadounidenses que serían aplicados para la conceptualización del proceso y diseño de equipos. Por lo que para la conceptualización de plantas de procesos químicos se presentan las normas COVENIN 1074-81 [14], COVENIN 3294-97 [15] y ANSI 5.1 [16] (Tabla 1).

**Tabla 1. Normas para la conceptualización de la línea de producción de dodecilbenceno lineal**

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

Las normativas de la Tabla 1, enmarcan los aspectos generales con respecto a la conceptualización del proceso, donde la norma ANSI 5.1 [16] indica cómo deberían identificarse los instrumentos, equipos o dispositivos en planos y documentos, la norma COVENIN 1074-81 [14] se refiere a la nomenclatura nominal de las tuberías de la planta aplicada en el marco de normativas venezolanas y finalmente la norma COVENIN 3294-97 [15] establece una delimitación en los requerimientos de información para el desarrollo de la conceptualización de la línea de producción y cómo debería de ejecutarse las actividades relacionadas a ello.

En relación a las normativas para el diseño de equipos, estas se enfocan en específico para los intercambiadores de calor y bombas, para los cuales fueron revisadas las normas ASME [17], ISO [18] y TEMA [19] (Tabla 2).

**Tabla 2. Normas para el diseño y conceptualización de los equipos involucrados en el proceso**

Norma	Año	Propósito
ASME BPVC -VIII -1	2021	Requisitos aplicables al diseño, fabricación, inspección, prueba y certificación de recipientes que operan a presiones mayores de 15 psig
ISO 5199	2022	Normativa para el correcto diseño de bombas centrífugas usadas en procesos químicos
TEMA 7ma edición	1988	Fabricación y diseño de intercambiadores de calor de tipo tubular

En la Tabla 2, se presentó las normas de diseño para los equipos de intercambio de calor de tipo tubo y carcasa y las bombas centrífugas, estas normas son de carácter internacional con validez en el territorio venezolano. Para los intercambiadores de calor se establecieron las normas ASME BPCV-VIII-1 [17] donde se establecen los requisitos de diseño para equipos que operan a presiones mayores a 15 psig, y la norma TEMA de 7<sup>ma</sup> edición [19] relacionada a la fabricación y diseño de intercambiadores de calor de tipo tubular. Para las bombas es aplicable la selección de la normativa ISO 5199[18] referente al correcto diseño de bombas centrífugas para procesos químicos.

Los criterios de producción, mayormente establecidos por la planta, y los criterios de diseño de la planta, estos se presentan listados:

- La capacidad mínima de producción es de 11,35 toneladas al día.
- La línea de producción tendrá un ciclo de trabajo de 10 horas al día, 5 días a la semana.
- Los subproductos generados en el proceso se almacenarán y serán conservados por la empresa.
- La concentración del producto final no debe ser menor al 98 %.
- Se asume un estado estacionario para todo el proceso.
- Los equipos deben tener un espaciamiento mínimo de 0,6 m, en forma de pasillos.
- Los intercambiadores de calor deben tener un distanciamiento mínimo de 7,5 m de otros equipos.

A partir de esto, es posible marcar como referencia que se espera obtener de la conceptualización del proceso. Además, se establecen criterios generales de diseño para equipos que no cuentan con normativas o criterios de diseño nacionales o internacionales los cuales se presentan en la Tabla 3.

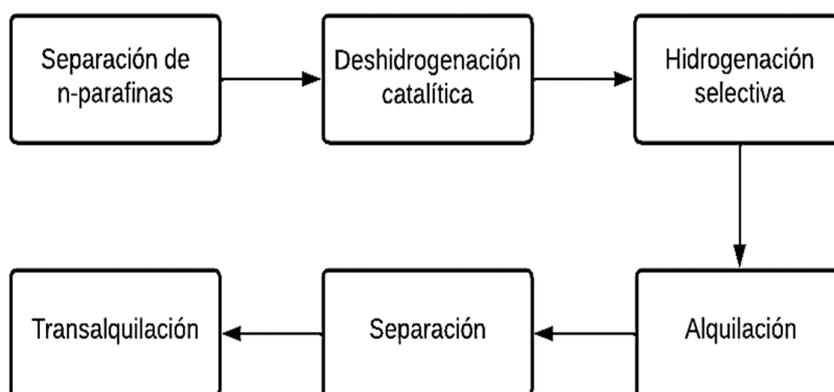
**Tabla 3. Criterios de diseño para los equipos del proceso**

Equipo	Criterio
Reactor	<p>Se mantiene una presión relativamente constante a través de todo el reactor. No existe difusión del gas en el líquido. Las reacciones están sujetas a parámetros de conversión.</p> <p>Las reacciones ocurren en la interfase gas-líquido, gas-gas o líquido-líquido.</p> <p>Las corrientes de alimentación deben estar debidamente acondicionadas antes de la entrada al reactor.</p> <p>No se requiere del uso de agua de enfriamiento</p>
Columnas de destilación	<p>La columna de separación de H<sub>2</sub> se diseña como columna <i>strippers</i> con la alimentación en el rehervidor.</p> <p>Se considera el diseño de condensadores totales y rehervidores parciales</p>
Adsorbedor	<p>El proceso se da en fase líquida.</p> <p>La operación se realiza a contracorriente. Se utiliza tamiz molecular de zeolita 5 Å.</p>

En la Tabla 3, se destacó los criterios establecidos para los reactores, los cuales son equipos fundamentales para el proceso por lo cual se establecen más criterios que permitan el correcto diseño de estos. También se presentan los criterios para las columnas, donde se especifica el diseño de columna *stripper* para la separación de hidrógeno, y para el adsorbedor se establece que el proceso es a contracorriente en fase líquida con agente adsorbente zeolita 5 Å.

**Descripción del proceso de producción de dodecibenceno lineal**

Para la descripción del proceso productivo se toma en cuenta que el contenido parafínico en la materia prima, kerosene, es del 21 % en peso de su composición [2]. El proceso productivo para la síntesis de dodecibenceno lineal se esquematiza dividiendo el proceso en seis unidades, para facilitar la conceptualización del mismo.



**Figura 1. Diagrama de bloques simplificado de las unidades del proceso**

En la Figura 1 se presenta el diagrama general de bloques del proceso donde se identifican las seis unidades del proceso que llevan a la síntesis del dodecilbenceno lineal. Donde en la prima unidad se lleva a cabo la separación de n-parafinas ( $C_{10}$ - $C_{13}$ ) del kerosene mediante un proceso de adsorción en lecho móvil con el uso de zeolita 5 Å, cuyo agente adsorbente presenta alta selectividad para los hidrocarburos parafínicos que se desean adsorber. Esto se lleva a cabo en una columna de adsorción/desorción en donde se pone en contacto el kerosene con el lecho adsorbente, a condiciones de operación de 174 °C y 20.59 bar. Para la etapa de desorción se produce la recuperación de las n-parafinas utilizando como agente desorbente n-pentano mezclado con iso-octano en proporciones de 60/40 %, para finalmente acondicionar la corriente de n-parafinas obtenidas y enviarse a la unidad 2.

En la segunda unidad, denominada deshidrogenación catalítica, se convierten las n-parafinas a n-olefinas. Para esto se mezclan las corrientes de n-parafinas proveniente de la unidad 1 y de la unidad 5 (reciclo), para posteriormente acondicionarse e introducirse al reactor donde se lleva a cabo la reacción de deshidrogenación a 450 °C y 2.6 bar en presencia de catalizador de paladio soportado en zeolitas. Aquí las n-parafinas  $C_{10}$ - $C_{13}$  son transformadas a mono-olefinas y di-olefinas, obteniéndose hidrógeno como subproducto, con una conversión total del 12 % de las parafinas. Los efluentes del reactor son acondicionados para reducir su temperatura y poderse enviar a la unidad 3.

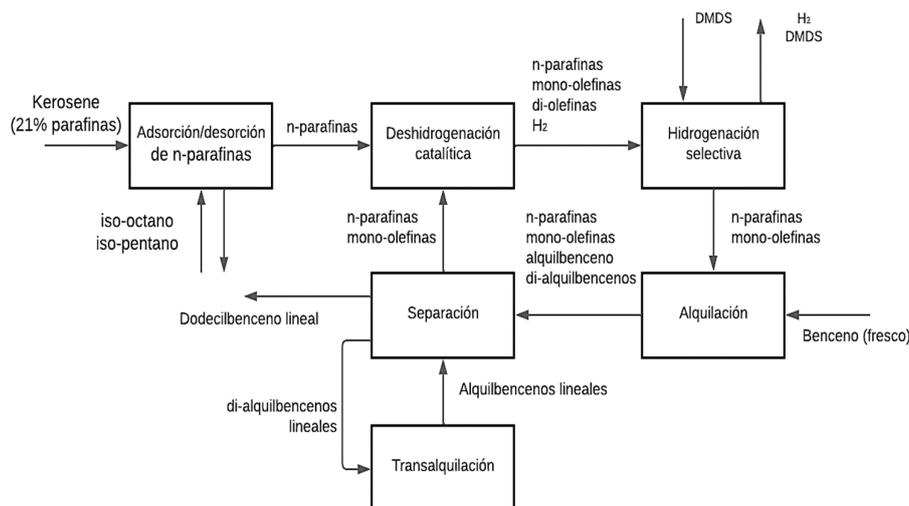
La tercera unidad es la de hidrogenación selectiva, donde se hidrogenan las di-olefinas a mono-olefinas, logrando maximizar el rendimiento de la reacción. Para esto es requerido adicionar al reactor el compuesto dimetil disulfuro (DMDS) que se encarga de inhibir la hidrogenación de las mono-olefinas a n-parafinas nuevamente. En esta operación se obtiene una conversión del 100% a 175 °C y 2 bar. Los efluentes del reactor son enviados a la columna stripper para separar el hidrógeno y DMDS del proceso.

A la tercera unidad se alimenta la corriente de fondo de la columna stripper conformada mayormente por n-parafinas y mono-olefinas, esta unidad se denomina alquilación y, dicho sea el caso, se lleva a cabo la reacción de alquilación, la cual es la principal reacción de este proceso. A esta unidad se alimenta también una corriente de benceno fresco que se acondiciona, igual que la corriente con n-parafinas y mono-olefinas, para llevarla a las condiciones de operación del reactor. Esta reacción se desarrolla en fase líquida a 58 °C y 4 bar, dando lugar a la conversión del 90 % de las mono-olefinas en alquilbencenos lineales y di-alquilbencenos lineales de cadena  $C_{10}$ - $C_{13}$  en lecho catalítico sólido ZDA-30 lo cual incrementa la economía del proceso y minimiza los factores corrosivos y contaminantes que implicaría el uso de catalizador homogéneo de ácido fluorhídrico.

La corriente de productos efluente del reactor de alquilación es alimentada a la unidad 5 donde se llevan a cabo las operaciones unitarias de separación de los compuestos del proceso. Esta unidad consta de columnas de destilación en donde se realiza la recuperación de benceno (C-502), recuperación de n-parafinas (C-503), separación de los di-alquilbencenos (C-504) para enviarse a la unidad de transalquilación, y finalmente la separación de los alquilbencenos (C-505 y C-506) obteniéndose tridecilbenceno por el fondo de la C-505, dodecilbenceno lineal por el fondo de la C-506 y por el tope de la misma columna se obtienen los alquilbencenos más ligeros.

En la unidad de transalquilación, los di-alquilbencenos formados en la reacción de alquilación se transforman a alquilbencenos lineales haciéndose reaccionar con benceno en exceso a 35 bar y 200 °C. Para acondicionar las corrientes se hace uso de intercambiadores de bombas e intercambiadores de calor que se encargan de elevar la temperatura y presión de las corrientes. A la salida del reactor, la corriente se hace pasar por una turbina para disminuir su presión y así ingresarse a la columna de destilación C-605, donde se obtiene la recuperación del exceso de benceno que se retroalimenta al proceso y los alquilbencenos por el tope de la columna que son enviados a la unidad 5 para la separación de productos.

Se presenta en la Figura 2 el diagrama de bloques del proceso completo donde se puede observar las corrientes de retroalimentación entre las unidades del proceso, las corrientes de alimentaciones y las de productos o subproductos.



**Figura 2. Diagrama de bloques del proceso de producción de dodecilbenceno lineal**

Se presentó, en la Tabla 4, las corrientes de alimentación principales que ingresan al proceso desde los tanques de almacenamiento, en donde es posible distinguir el requerimiento de kerosene que se estima en 142,857 kmol/h de este compuesto. Debido a las condiciones medioambientales en donde se encontraría localizada la planta, las corrientes ingresan a una temperatura de 28°C y presión atmosférica.

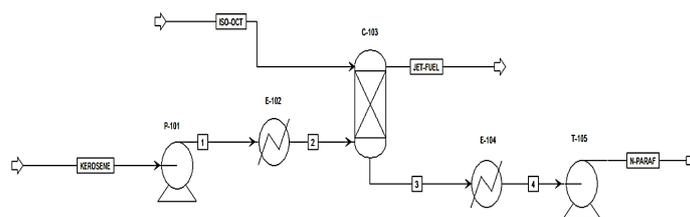
**Tabla 4. Corrientes de alimentación al proceso**

Compuesto	Flujo molar (kmol/h)	Temperatura (°C)	Presión (bar)
Kerosene (C <sub>10</sub> -C <sub>13</sub> )	142.857	28	1,01
Benceno	20,975	28	1,01
Dimetil disulfuro	1,08	28	1,01
Iso-octano/n-pentano	47,62	28	1,01

### Dimensionamiento de los equipos y tuberías de la línea de producción de dodecilbenceno lineal

En el desarrollo de este apartado se realizó la simulación del proceso, obteniéndose los resultados finales para esta, logrando identificar las corrientes que se involucran en el proceso, así como su composición porcentual y las condiciones de las mismas; además se identifican la totalidad de equipos que se requieren para llevar a cabo el proceso y se describen las vicisitudes encontradas al momento de realizar la simulación.

Como se mencionó, el proceso fue dividido en seis etapas, que permiten la correcta conceptualización del proceso, se destacó, que la unidad 1 de separación de n-parafinas no pudo ser simulada debido a que no se cuenta con la información necesaria sobre la especificación de la composición del kerosene que permitan realizar la simulación, debido a esto, se planteó de manera teórica, en donde se conoce que se requiere del uso de equipos como: una bomba, dos intercambiadores de calor, una torre de adsorción y desorción, además del uso de una turbina. Debido a que no fue simulada esta sección, el DFP de la unidad se presentó en la Figura 3, de manera separada al DFP obtenido mediante la simulación del resto del proceso.



**Figura 3. Diagrama de flujos de procesos para la unidad 1, separación de n-parafinas**

Para la unidad de deshidrogenación catalítica se realiza la simulación de este bloque sin dificultades, obteniéndose que se alimenta a la unidad 30 kmol/h de n-parafinas que deberían ser provenientes de la unidad 1 y se mezclan con la corriente de recuperación de n-parafinas cuyo flujo es de 82,27 kmol/h. En la salida del reactor en esta unidad, donde se consigue la formación de mono-olefinas, di-olefinas e hidrógeno gaseoso, se obtiene una corriente con un flujo de 127,08 kmol/h de compuestos donde se ha convertido el 12 % de las n-parafinas que ingresaron. En esta unidad se requiere de tres intercambiadores de calor (dos de ellos operando en paralelo), un horno y un reactor.

En la unidad de hidrogenación selectiva, se requiere del uso de una bomba, un intercambiador de calor, un reactor y una columna de destilación para llevar a cabo las operaciones implicadas en esta unidad. En el reactor R-303 se lleva a cabo la reacción de hidrogenación selectiva en presencia de DMDS como inhibidor de reacción de las mono-olefinas. En la columna de destilación C-304 se lleva a cabo la separación del hidrógeno, en este paso acaecen problemas para lograr la correcta separación. Dichos problemas se derivan de la dificultad de separar el hidrógeno de los demás componentes; esto deriva a que en el proceso de separación se extraiga además la mayoría del DMDS por el tope de la columna junto con el hidrógeno durante la simulación. Para esto se establece que debe ser enviada la corriente a un proceso especial de recuperación de estos compuestos donde se puedan separar y almacenar o, en el caso del DMDS, recircular al proceso.

Durante la simulación de la unidad de alquilación se describe el uso de dos bombas, tres intercambiadores de calor (dos de ellos operando en serie) y un reactor. Se alimenta una corriente de benceno fresco a esta unidad para llevar a cabo la reacción de alquilación en el reactor R-405. En esta unidad se destaca la conversión de las mono-olefinas en LAB y di-alquilbencenos lineales bajo las especificaciones establecidas en la descripción del proceso. La simulación de esta unidad se lleva a cabo sin inconveniente alguno.

La quinta unidad del proceso, donde se llevan a cabo las operaciones unitarias de separación, requiere de un intercambiador de calor y cinco columnas de destilación para lograr el acometido. Durante la simulación de la columna C-502 donde se da la separación y recuperación de benceno se presentan complejas dificultades para separar este compuesto y presenta elevados porcentajes de compuestos no deseados, por lo que se establece que debería ser enviada a un proceso especial en donde se trate la recuperación del benceno y pueda recircularse al proceso. En la C-503 se recuperan las n-parafinas, logrando obtener un elevado porcentaje de recuperación, lo cual hace que la corriente pueda ser recirculada sin inconvenientes. En la C-504 se separan los LAB de los di-alquilbencenos (estos últimos enviados a la unidad 6) y posteriormente la corriente de LAB es enviada a las columnas C-505 y C-506 de donde se obtiene la separación de dodecibenceno lineal con una concentración del 98.69 % y un flujo molar de 6,715 kmol/h, para una producción de 1655,698 kg/h.

Finalmente, en la unidad de transalquilación se lista un total de cuatro intercambiadores de calor, un reactor, tres bombas (dos de ellas operando en paralelo), una columna de destilación y una turbina. En el reactor de transalquilación se convierten los di-alquilbencenos en LAB a elevadas presiones y temperaturas en presencia de exceso de benceno, para después darse la separación de los compuestos con un elevado porcentaje de recuperación del benceno (99.99 %); por lo cual el benceno obtenido por el tope se recircula al proceso y los componentes pesados de alquilbencenos se recuperan por el fondo y se envían a las columnas en la unidad 5.

La totalidad de los equipos requeridos para el proceso suman una cantidad de 38 equipos, los cuales se listan en la Tabla 5.

**Tabla 5. Listado de equipos del proceso**

Equipo	Identificador	Cantidad
Bombas	P-101	8
	P-301	
	P-401	
	P-404	
	P-602 A/B	
	P-607	
	P-609	
Columna de adsorción/desorción	C-103	1
Columnas de separación	C-304	7
	C-502	
	C-503	
	C-504	
	C-505	
	C-506	
	C-605	
Horno	H-202	1
Intercambiadores de calor	E-102	15
	E-104	
	E-301	
	E-201	
	E-204 A/B	
	E-402	
	E-403 A/B	
	E-501	
	E-601 A/B	
	E-606	
	E-608	
	E-610	
Reactores	R-203	4
	R-303	
	R-405	
	R-603	
Turbina	T-105	2
	T-604	

Para, el dimensionamiento de los equipos se recolectarán los datos operativos de los equipos que permitan el diseño y, en el caso de las bombas y turbinas, la selección de estos. Para las bombas y turbinas se requiere de conocer el flujo volumétrico que manejan los equipos, las presiones, eficiencia y la energía para así, por medio de la selección de bombas y turbinas del catálogo de la empresa Kawamoto [10, 11] que cumplan los requerimientos, se realiza el dimensionamiento de estos equipos. Presentándose sus dimensiones en la Tabla 6.

**Tabla 6. Dimensiones y materiales de las bombas**

Identificador	Material	Diámetro de entrada (mm)	Diámetro de salida (mm)	Ancho (mm)	Longitud (mm)	Alto (mm)
P-301	304 SS	40	32	260	414	275
P-401	304 SS	40	32	260	414	275
P-404	304 SS	40	32	260	414	263
P-602 <sup>a</sup>	304 SS	40	32	260	414	275
P-602B	304 SS	40	32	260	414	275
P-608	304 SS	40	32	260	414	275
P-610	304 SS	50	40	260	457	287
T-604	304 SS	40	40	260	420	268

Los intercambiadores de calor se diseñaron con el programa *Aspen Exchanger Desing and Rating*, para lo cual se requieren los datos de temperatura y flujo másico de las corrientes y las caídas de presión en el equipo. Con esta información, se realizó, el diseño de cada intercambiador, obteniéndose las *datasheet* de lo mismo, y, así, también, se permitió conocer sus dimensiones.

**Tabla 7. Dimensiones y materiales de los intercambiadores de calor**

Identificador	Material	Número de tubos	Número de carcasas	Configuración TEMA	Longitud (m)	Diámetro externo (m)	Área efectiva (m <sup>2</sup> )
E-201	304 SS	219	1	BEM	3,657	0,438	46,6
E-204 <sup>a</sup>	304 SS	194	1	BEM	2,438	0,406	27,4
E-204B	304 SS	194	1	BEM	2,438	0,406	27,4
E-302	304 SS	18	1	BES	1,828	0,168	1,8
E-402	304 SS	282	1	BES	1,219	0,508	17
E-403A	304 SS	112	1	BEM	3,658	0,324	24
E-403B	304 SS	166	1	BEM	4,267	0,406	41,6
E-501	304 SS	100	1	BES	4,878	0,356	27,9
E-601A	304 SS	30	1	BEM	1,219	0,219	2,1
E-601B	304 SS	30	1	BEM	1,219	0,219	2,1
E-606	304 SS	26	1	BEM	1,219	0,168	1,8
E-608	304 SS	18	1	BES	1,829	0,168	1,8
E-610	304 SS	18	1	BES	1,219	0,168	1,1

El dimensionamiento de las columnas de destilación (Tabla 8) se realizó conociendo la cantidad de etapas de cada columna y estimando el volumen a manejar de acuerdo a los flujos, con lo cual se obtienen los diámetros y alturas de los equipos. De manera similar fueron dimensionados los reactores, asumiendo un tiempo de 1 hora para el cálculo del volumen y posterior obtención de los diámetros y alturas (Tabla 9).

**Tabla 8. Dimensiones y tuberías de las columnas de destilación**

Identificador	Material	Diámetro (m)	Altura (m)
C-304	304 SS	5,3	16,26
C-502	304 SS	2,2	6,63
C-503	304 SS	2,35	7,15
C-504	304 SS	1,32	4,08
C-505	304 SS	4,06	12,2
C-506	304 SS	4,23	12,69
C-605	304 SS	0,9	2,75

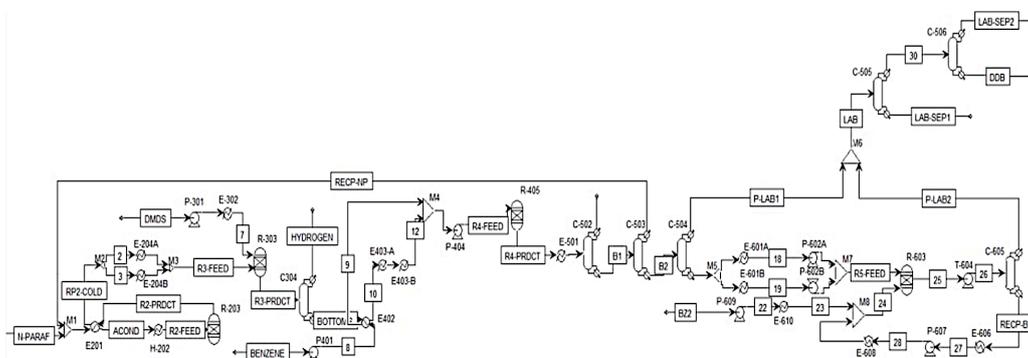
**Tabla 9. Dimensiones y materiales de las columnas de destilación**

Identificador	Material	Diámetro (m)	Altura (m)
R-203	304 SS	12	20,5
R-303	304 SS	7	10,5
R-405	304 SS	2,4	5,42
R-603	304 SS	1,1	1,85

En el dimensionamiento de las tuberías se obtienen los datos de diámetro nominal (mm), nominal pipe size (in), la longitud (m) y el Schedule para cada una de las corrientes del proceso, siendo dimensionadas 56 tuberías donde se descartan diámetros nominales que van desde 15 mm hasta 350 mm, así como longitudes que van desde 0.2 m hasta 141.35 m. Es destacable, además, que todas las tuberías fueron diseñadas bajo parámetros de diseño en función de la fase que manejan, tomando en cuenta el flujo máximo permitido por las mismas, además, se tomó el mismo material (SS 304) y Schedule (40) de confección.

**Determinación de la ubicación física de los equipos para la línea de producción**

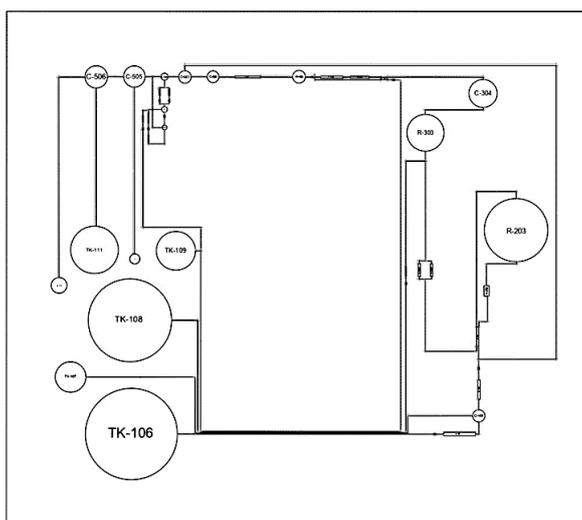
Ya realizados los procesos pertinentes al diseño de la línea de producción, y expuestos anteriormente los diagramas de bloques, los cuales sirven para visualizar de manera general el proceso, además de mostrar el orden lógico del mismo, se procede ahora con el siguiente paso respecto a la conceptualización, mostrando primeramente el DFP completo del proceso.



**Figura 4. Diagrama de flujo de procesos para la producción de dodecilbenceno lineal**

La Figura 4, se mostró, el diagrama de flujo de procesos descrito en los apartados anteriores y obtenido mediante la simulación, este se encarga de realizar un resumen del proceso de manera gráfica y detallada, donde, a su vez, se genera a fines prácticos la orientación de cada corriente, en conjunto con los equipos empleados en el proceso.

Una vez, obtenido el DFP del proceso, se procedió con la distribución de espacios en el área disponible para la instalación de la línea de producción. Dicha distribución, se realizó identificando las áreas de inspección y mantenimiento, además de la disposición de los tanques de almacenamiento, realizándose con una distribución en forma de “C”. Se tomó en cuenta, la norma ANSI 31, un área reservada para la caminería principal de la línea de producción destinada a la inspección, operación y mantenimiento. El *layout* de la planta se realizó con el uso de la herramienta Autocad y se generó la Figura 5.



**Figura 5. Layout de la línea de producción de dodecibenceno lineal**

La línea de producción cuenta con una expansión de 110.128 m en su eje horizontal y 97.595 m en su eje vertical, lo cual resulta en un área rectangular de 10747.9 m<sup>2</sup>, cabe destacar que, dicha área fue calculada teniendo en cuenta los límites de batería ajustados al proceso, que fueron de 10 m de exceso por cada superficie externa apreciable en el *layout*. Esto se debe, además, a las consideraciones tomadas al momento de establecer el espaciamiento entre equipos y tuberías, así como las longitudes necesarias para cada una de las tuberías de proceso.

### **Estudio económico del proyecto de construcción para la línea de producción de dodecibenceno lineal**

Para la realización del estudio económico se toma en cuenta que se llevará a cabo un estudio de Tipo V, donde las estimaciones realizadas se calculan mediante ecuaciones presentadas por Couper *et al.*, [13] para el cálculo de costos de equipos. Turton *et al.*, [12] presenta ecuaciones que sirven para realizar los cálculos referidos a la estimación de costos operativos y cálculo del tiempo de recuperación de la inversión (TRI).

En los costos operativos se incluyen los costos por mano de obra que sería lo referente a los operadores de la planta, la estimación del número de operadores se realiza mediante ecuaciones que plantean los autores Turton *et al.*, [12] obteniéndose un total de 6 operadores con un pago de 200 \$ al mes, requiriéndose 14400 \$ al año para cubrir estos costos.

También, se representan los costos por el servicio eléctrico anual para la operación de las bombas, obteniéndose un total de 38,65 \$/año; en el caso del servicio de agua, este viene dado por los requerimientos de agua de servicio para la operación de los intercambiadores de calor, siendo un total de 4014.15 \$/año. Con respecto a los costos por materia prima esto incluye los requerimientos de kerosene, DMDS, benceno, iso-octano/n-pentano y catalizadores, donde la estimación de costos de estos últimos se plantea según lo expuesto por Moitinho [3] y León [2]. Todos estos costos suman una estimación total de 36.988 millones de dólares al año.

Para calcular la estimación de ventas, correspondiente a la parte de ingresos, se hace énfasis en que la producción de dodecilbenceno lineal se realiza fundamentalmente para el abastecimiento de los requerimientos de materia prima de la empresa, siendo este la materia prima para la elaboración de LABSA y posterior fabricación de detergentes. Sin embargo, a fines de conocer una estimación del monto total para el valor del producto de esta línea de producción se presentan los cálculos como una estimación de ventas. Un destacable y particular ingreso que se produce de este proceso productivo, es con la venta del subproducto kerosene sin contenido parafínico o combustible para aviones de tipo kerosene. Este es uno de los subproductos de mayor volumen generados en el proceso, por lo que presentan la oportunidad de la venta del mismo. Dicha estimación de ingresos genera un total de 52,296 millones de dólares al año, de los cuales 12,398 millones corresponden al dodecilbenceno lineal y 39.898 millones a la venta del jet fuel.

El cálculo de las ganancias se estima tomando en cuenta los costos operativos anuales y los ingresos anuales que se generarían en este proyecto, obteniendo así la ganancia total anual. Esta estimación de ganancia permite conocer un tiempo de retorno de capital estimado, que brinde la información necesaria para considerar la factibilidad del proyecto. Toda la información antes mencionada se presenta en la Tabla 10.

**Tabla 10. Estudio económico del proyecto**

<b>Inversión de capital</b> <b>(\$)</b>	<b>Costos operativos anuales</b> <b>(\$/año)</b>	<b>Ingresos</b> <b>(\$/año)</b>	<b>Ganancias</b> <b>(\$/año)</b>	<b>Tiempo de retorno del capital</b> <b>(años)</b>
15643685,45	36987685,93	52296231,27	15308545,35	1,02

Es evidente el alto rendimiento del proyecto al aprovechar el producto y subproducto que se generan en el proceso, dando lugar a una estimación de recuperación de capital en 1,02 años o 12,24 meses. Esto es sin adicionar los costos de equipos y operativos para la unidad 1 del proceso, que a sabiendas que serán elevados, aun así, se obtendría un prometedor rendimiento económico. Se hace énfasis en el hecho de que este estudio económico brinda estimaciones de Tipo V asumiendo la venta y consumo total del producto dodecilbenceno lineal y subproducto gasolina de aviación.

### **Conclusiones**

Las normativas de diseño de equipos y procesos seleccionadas, junto con los criterios de producción y diseño de equipos, resultaron ser suficientes para cumplir a cabalidad el diseño de la ingeniería conceptual para la línea de producción de dodecilbenceno lineal, tomando en cuenta los límites bibliográficos existentes para la investigación.

La conceptualización del proceso se realizó subdividiendo el proceso en 5 unidades, para las cuales se requiere un total de 38 equipos, conformados por 8 bombas, 7 columnas de destilación, 1 columna de adsorción y desorción, 1 horno, 15 intercambiadores de calor, 4 reactores y 2 turbinas. Además, se toma en cuenta en la conceptualización del proceso las corrientes de retroalimentaciones y se describen los catalizadores y materias primas a utilizarse.

La simulación del proceso, efectuada con el programa Aspen Plus, permitió realizar el diseño de la línea de producción con una capacidad máxima de producción de 16,56 toneladas de dodecilbenceno lineal al día y con una pureza mayor al 98 %, cumpliendo con los requerimientos establecidos en los criterios del proceso.

Fueron dimensionados los equipos involucrados en el proceso, exceptuando aquellos pertenecientes a la primera unidad, y para ello se obtuvieron datos operativos y de diseño desde la simulación realizada, con lo cual fue posible la selección de los equipos mediante catálogos, el diseño mediante el programa *Aspen Exchanger Desing and Rating* y el diseño manual de algunos de los equipos.

El layout de la línea de producción se logró diseñar con el programa Autocad, atendiendo a una disposición en forma de “C” y tomando en cuenta los espacios para la inspección, operación y mantenimiento de equipos, asimismo ajustando los límites de baterías de la planta a 10 m, obteniéndose un área rectangular de 10747,9 m<sup>2</sup>.

La estimación económica del proyecto arroja que, para la capacidad productiva de la planta, se estiman ganancias anuales de 15,31 millones de dólares lo cual permitiría obtener el retorno de la inversión estimada, la cual es de 15,64 millones de dólares, en un período de 12,24 meses.

### Referencias bibliográficas

- [1] Shokri y Karimi (2021). **A Review in Linear Alkylbenzene (LAB) Production Processes in the Petrochemical Industry**. Revista: Russian Journal of Applied Chemistry. Doi: 10.1134/S1070427221110094.
- [2] León E. (2017). **Análisis técnico-económico para la producción de alquilbenceno lineal. Trabajo especial de grado**. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química y Ambiental. Universidad de Sevilla. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/11441/64033>
- [3] Moitinho L. (2018). **Producción de alquilbencenos lineales: Análisis económico y del impacto ambiental**. Tesis de Máster. Universidad Autónoma de Madrid, Facultad de Ciencias. Madrid, España.
- [4] Hurtado J., (2000). **Metodología de la investigación holística**. Tercera Edición. Fundación Sypal, Caracas, Venezuela.
- [5] Arias F. (2012). **El proyecto de investigación: Introducción a la metodología científica**. 6a Ed. Caracas, República Bolivariana de Venezuela, Editorial Episteme C.A.
- [6] Baptista P., Fernández C., Hernández R., (2014). **Metodología de la investigación**. Sexta Edición. McGraw-Hill Interamericana de México, S.A. México.
- [7] Sabino C., (1992). **El proceso de investigación**. Editorial Panapo, Caracas, Venezuela.
- [8] Ballestrini A. M. (2008). **Cómo se elabora el proyecto de investigación**. BL Consultores Asociados Servicio Editorial. Séptima Edición. Caracas-Venezuela.
- [9] Tamayo, M. (2003). **El Proceso de la Investigación Científica**. Cuarta Edición. Limusa Noriega Editores. Ciudad de México, México. ISBN: 968-18-5872-7.
- [10] Kawamoto. **Centrifugal pump series, catalog**. Recuperado de: [https://www.kawamoto-global.com/web/data/ecatalog\\_u\\_pdf/2.pdf](https://www.kawamoto-global.com/web/data/ecatalog_u_pdf/2.pdf)
- [11] Kawamoto. **Turbine pump series, catalog**. Recuperado de: [https://www.kawamoto-global.com/web/data/ecatalog\\_u\\_pdf/3.pdf](https://www.kawamoto-global.com/web/data/ecatalog_u_pdf/3.pdf)
- [12] Turton, R.; Whiting, J.; Shaeiwitz, D.; y Bailie, W. (2012). **Análisis, síntesis y diseño de procesos químicos** (4th ed.). Prentice Hall.
- [13] Couper, J. R., Penney, W. R., Fair, J. R., & Walas, S. M. (2012). **Costs of individual equipment. Chemical Process Equipment**, 731–741. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-396959-0.00021-5>
- [14] Norma Venezolana COVENIN 1074-81. **Fabricación de conos y anillos de concreto para boca de visita de un Sistema de alcantarillado**. 18 de abril de 1981.

[15] Norma Venezolana COVENIN 3294-1997. **Guía para la preparación de la ingeniería básica de un proyecto industrial.**

[16] Norma ISA/ANSI-S.1 (2009). **Identificación y símbolos de instrumentación.**

[17] ASME BPCV Section VIII-1 (2021). **Rules for construction of pressure vessels.**

[18] Norma ISO 5199 (2022). **Especificaciones técnicas para bombas centrífugas Clase II.**

[19] Norma TEMA (1988). **Fabricación y diseño de intercambiadores de calor de tipo tubular.** Séptima edición.

### **Nota especial**

Artículo de investigación derivado del Trabajo Especial de Grado, titulado: Ingeniería conceptual para una línea de producción de dodecilbenceno lineal para la empresa Procura General de Materiales C.A., presentado en la Universidad Rafael Urdaneta, Maracaibo, Venezuela.