

Planta de producción
de ciclohexano a
partir de la
hidrogenación del
benceno



30 DE JUNIO DE 2017
ROBLES IGLESIAS, RAÚL

Índice

Capítulo 1: INTRODUCCIÓN	3
1.1 Contextualización.....	3
1.1.1 – Industria Petroquímica.....	3
1.1.2 – Ciclohexano.....	4
1.1.3 – Nylon 6,6 y Nylon 6	5
Capítulo 2: MATERIAS PRIMAS Y PRODUCTOS. ESTUDIO DE MERCADO.....	7
2.1 Introducción.....	7
2.2 Objeto del proyecto	7
2.3 Materias primas	7
2.3.1 – Benceno	8
2.3.2 – Hidrógeno.....	9
2.3.3 – Metano.....	11
2.3.4 – Nitrógeno	12
2.3.5 – Catalizador	13
2.4 Productos.....	14
2.4.1 – Ciclohexano.....	14
2.5 Estudio de mercado	16
2.5.1 - Mercado exterior	16
2.5.2 – Mercado nacional	17
2.5.3 – Datos de producción y productividad de planta.....	20
Capítulo 3: LOCALIZACIÓN DE LA PLANTA	21
3.1 Ubicación de la línea de proceso	21
3.1.1 – Suministro de la materia prima.....	21
3.1.2 – Suministro de combustibles y energía.....	23
3.1.3 – Comunicaciones	23
3.1.4 – Condiciones climáticas	24
3.2 Ubicación exacta	26
Capítulo 4: ELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA.....	27
4.1 Métodos de obtención del ciclohexano.....	27
4.1.1 - Separación de las fracciones de nafta pesada	27
4.1.2 – Hidrogenación del Benceno	27
4.1.3 – Saturación de olefinas.....	33
4.2 Elección del proceso	34

4.2.1 – Fase de reacción.....	34
4.2.2 – Fase de purificación y acondicionamiento del producto	35
4.2.3 – Conclusión.....	35
Capítulo 5: SIMULACIÓN DE LA PLANTA DE CICLOHEXANO	36
5.1 Simulación del proceso	36
5.2 Evaluación económica.....	38
Capítulo 6: LEGISLACIÓN Y NORMATIVA	42
6.1 Legislación.....	42
6.2 Normativa	42
Capítulo 7: BIBLIOGRAFÍA	43
ANEXOS.....	44
ANEXO 1 – Evaluación económica de los equipos al detalle	44
1.1– Sección de almacenamiento	44
1.2 – Sección de reacción.....	44
1.3 – Sección de separación.....	48
1.4 – Costo total.....	51
ANEXO 2 – Evaluación económica y vida del proyecto.....	54
2.1 – Periodo de tiempo	54
2.2 – Programación	55
2.3 – Parámetros puesta en marcha.....	55
2.4 – Parámetros generales de inversión.....	55
2.5 – Resumen del capital del proyecto.....	56
2.6 – Resumen ingenieril.....	56
2.7 – Costos materias primas y venta de productos.....	57
2.8 – Costes de trabajo y mantenimiento.....	57
2.9 – Resumen de resultados del proyecto	58
2.10 – Resumen económico de la inversión	58

Capítulo 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Contextualización

La cadena de la industria química parte de un insumo base (extraído de la naturaleza) y consiste en una sucesión de etapas de transformación por medio de procesos químicos hasta la obtención de un producto final, con características fisicoquímicas determinadas. Algunos de estos procesos trascienden la industria química, es decir, comprenden eslabones de transformación posterior que no se corresponden a un proceso químico.

Dentro de la industria química se suelen distinguir dos grandes familias de productos en función del insumo base que da origen a sus respectivas cadenas productivas. De esta manera, aquellas cadenas que tienen origen en la transformación del petróleo o el gas natural dan lugar a la obtención de petroquímicos (en su gran mayoría corresponden a químicos orgánicos), mientras que el resto de las cadenas, cuyo origen son insumos minerales forman parte de la química propiamente dicha (no petroquímica) (Imagen 1).

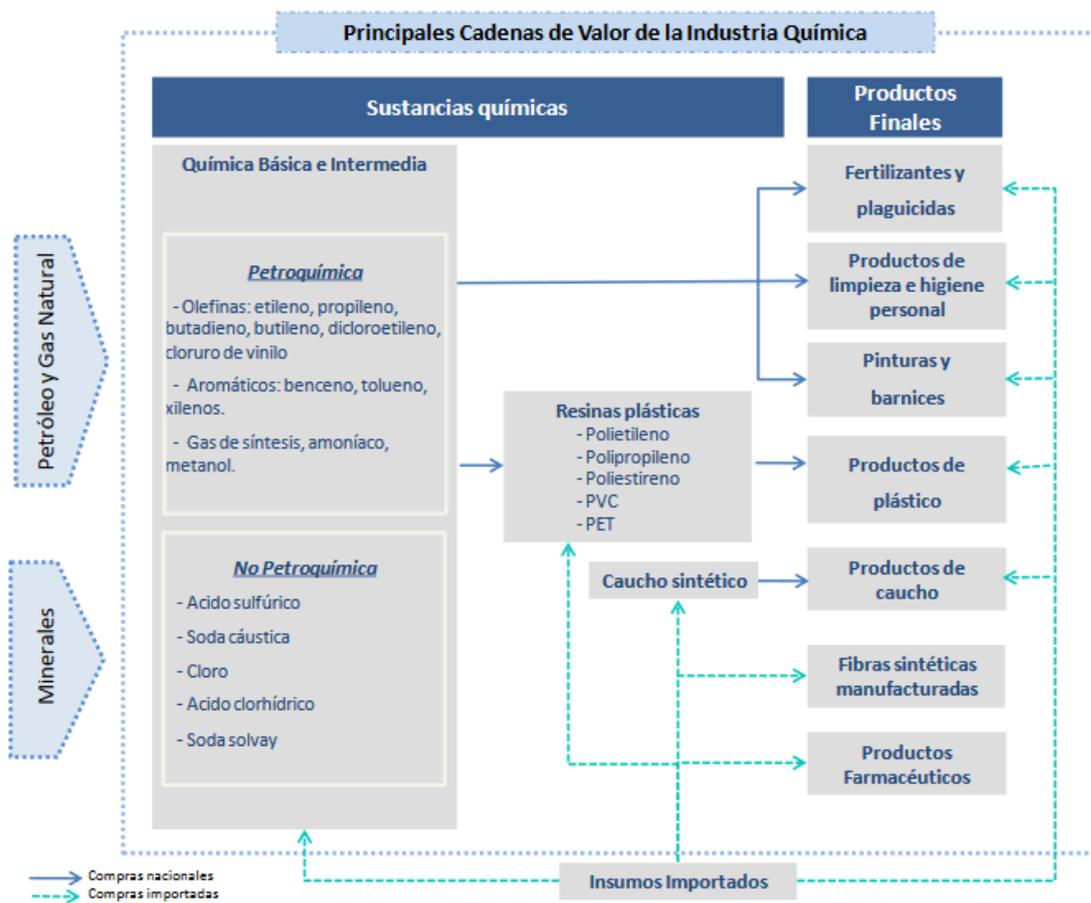


Imagen 1. Principales cadenas de valor de la industria química

1.1.1 – Industria Petroquímica

La función de la industria petroquímica es transformar el gas natural y algunos derivados del petróleo en materias primas, las cuales representan la base de diversas cadenas productivas. Esta industria es una plataforma fundamental para el crecimiento y desarrollo de importantes cadenas industriales como son la textil y del vestido; la automotriz y del transporte; la electrónica; la de

construcción; la de los plásticos; la de los alimentos; la de los fertilizantes; la farmacéutica y la química, entre otras.

Los petroquímicos, suelen clasificarse de acuerdo con la etapa productiva a la que pertenecen. La etapa inicial es la petroquímica básica (IPB), le sigue la intermedia (IPI) y, por último, la final (IPF).

La IPB es aquella que realiza la primera transformación del petróleo o gas natural y otros hidrocarburos líquidos, para la obtención de insumos para la IPI y/u otros productos finales. Los principales productos que fabrica son olefinas (etileno, propileno, butileno, etc.), aromáticos (benceno, tolueno, o-xileno, etc.), gas de síntesis, metanol, amoníaco, entre otros. Por su parte, la IPI transforma insumos generados por la IPB en productos finales y/o insumos de la IPF. Entre los productos elaborados por la IPI figuran: ciclohexano, estireno, etilenglicol, fenol, etc.

Por último, la IPF elabora a partir del procesamiento de productos básicos o intermedios una serie de productos entre los cuales se pueden distinguir, de acuerdo con su uso final los siguientes grupos: materias primas plásticas, caucho sintético, fibras sintéticas como el nylon, fertilizantes nitrogenados, artículos de limpieza y de cuidado personal, entre otros.

1.1.2 – Ciclohexano

La producción de ciclohexano en el mercado actual está íntimamente ligada con la demanda que presenta tal producto, así como con la importancia que posee la materia prima de la cual se obtiene, en concreto el benceno.

El benceno es y sigue siendo, por su importancia y multitud de usos, la tercera materia prima de la petroquímica mundial. Esta importancia está ligada a los descubrimientos realizados durante el siglo XX que permitieron disponer de moléculas tales como: estireno, bisfenol-A, caprolactama, nylon 6,6 o el LAB dando lugar a un “vertiginoso desarrollo” de las industrias de polímeros, fibras sintéticas, resinas fenólicas o detergentes biodegradables, industrias todas que encuentran en el benceno su materia prima básica.

1.1.2.1 – Antecedentes

En sus orígenes, el ciclohexano se obtenía directamente por destilación fraccionada de determinadas fracciones de bencina bruta, con el único inconveniente de que la pureza del proceso obtenido era, tan solo, del 85%. Los procesos posteriores de isomerización del metilciclopentano a ciclohexano permitieron desarrollar patentes en industrias tales como Humble Oil, Shell y Atlantic Richfield (Estados Unidos) mejorando la calidad del producto a casi el 98%. A causa de la fuertemente creciente demanda de ciclohexano como producto básico para la obtención de nylon 6 y nylon 6,6, el ciclohexano producido por estos métodos sólo cubría una pequeña parte de la demanda existente de ciclohexano. Por lo que, desde principios del siglo XX hasta la actualidad la mayor parte de este producto se obtiene por medio del proceso de hidrogenación de benceno, dando lugar a multitud de patentes que han desarrollado su propio método para la obtención de este producto tan necesario.

1.1.2.2 – Importancia

Así pues, aunque puede destinarse a otros usos, la importancia del ciclohexano reside en que se trata del principal precursor para la producción del nylon 6 y el nylon 6,6, unas de las fibras sintéticas más importantes del siglo XX.

1.1.2.3 - Principales aplicaciones

Los principales destinos del ciclohexano, según la revista 'ICIS Chemical Business, 2015', son:

- 52% destinado a la fabricación del ácido adípico para la producción del nylon 6,6.
- 38% destinado a la obtención de caprolactama para la producción del nylon 6.
- 10% destinado a la fabricación de disolventes, insecticidas y plastificados.

Los datos anteriores demuestran que las salidas más relevantes del ciclohexano en el mercado están enfocadas a la producción de dos tipos distintos de nylon.

1.1.3 – Nylon 6,6 y Nylon 6

Los nylons son las más resistentes y duras de todas las fibras y también son estables al calor, de modo que es posible hilarlas por fusión. Se trata de sustancias hidrofóbicas por lo que secan con rapidez después de someterlas a procesos de lavado.

Los números que se emplean para designar el nylon se refieren al número de átomos de carbono en el ácido diaminado y en el dibásico, en el orden citado: la presencia de un único número indica que el grupo amino y el grupo carboxilo se encuentran en la misma posición.

Gracias a la alta resistencia a la tensión, elasticidad y a la abrasión, constituyen productos ideales para la fabricación de: cables, cuerdas para neumáticos, prendas de vestir para usos rudos, pantimedias, medias y alfombras. Hoy en día, aproximadamente la mitad de la producción de este tipo de nylon se emplea para la fabricación de fibras de nylon para cuerdas de llantas y poseen también usos industriales en la fabricación de bandas transportadoras y telas para filtros.

El nylon 6,6 es el polímero resultado de la condensación del ácido adípico en presencia de etilendiamina (Imagen 2), mientras que el nylon 6 se obtiene como el producto de autocondensación de la caprolactama (Imagen 3).

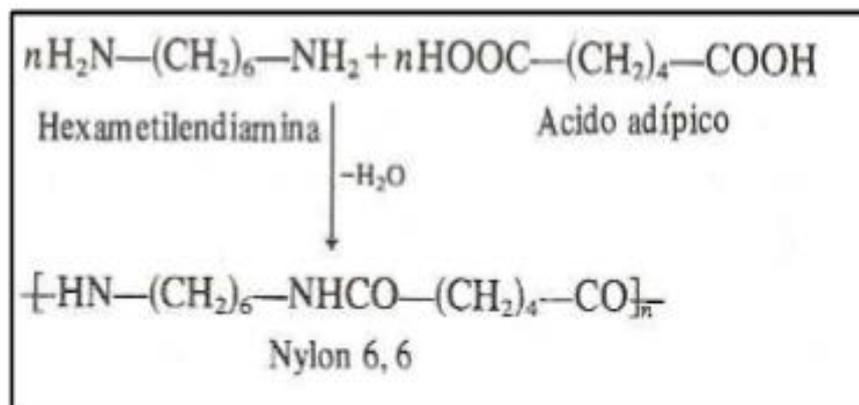


Imagen 2. Formación del nylon 6,6

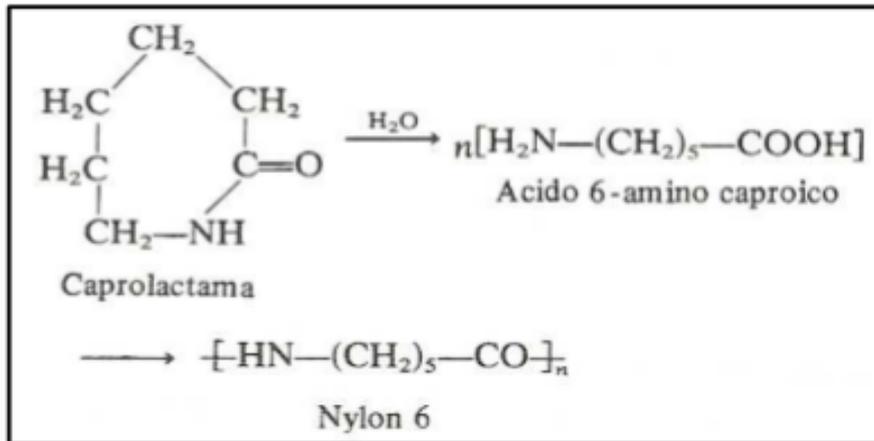


Imagen 3. Formación del nylon 6

La principal materia prima para la producción de estos dos tipos de nylon es el ciclohexano. Así pues, también puede recurrirse al empleo de fenol, butadieno, furfural y tolueno, constituyendo cada una de ellas un proceso con identidad propia para la obtención de nylon 6 y nylon 6,6.

Capítulo 2: MATERIAS PRIMAS Y PRODUCTOS. ESTUDIO DE MERCADO.

2.1 Introducción

El descubrimiento del petróleo a principios del siglo XX supuso uno de los más grandes cambios en la economía mundial gracias a la utilización de éste como materia prima para la producción de combustibles y base de la industria petroquímica. El benceno resulta de una de las principales materias primas del petróleo y es obtenido mediante distintos métodos de procesado. Resulta, también, uno de los productos base de mayor importancia de la actual industria petroquímica.

El ciclohexano a su vez, obtenido mediante el proceso de la hidrogenación del benceno, se ha convertido en el principal producto para la producción de las fibras sintéticas más relevantes dentro del campo de la petroquímica como son el nylon 6 y el nylon 6,6, mediante la oxidación de dos pasos del ciclohexano.

Estos dos compuestos de nylon anteriormente mencionados tienen aplicaciones importantes en la industria de la ingeniería mecánica. Aplicaciones bien establecidas son las siguientes: asientos de válvulas, engranajes en general, excéntricas, cojinetes, rodamientos, etc... Además de las propiedades ventajosas señaladas en líneas anteriores, las piezas de nylon pueden funcionar frecuentemente sin lubricación, son silenciosas, pudiendo en muchos casos moldearse en una sola pieza evitándose el ensamblado de las diferentes piezas metálicas o el uso de máquinas caras con la consiguiente pérdida de material. A su vez, se están empleando cada vez más en aplicaciones de embalaje para productos alimenticios y farmacéuticos. El valor del nylon para estas aplicaciones estriba en la posibilidad de hervir la bolsa de los alimentos dentro y en la baja transmisión del olor. Resultan productos que han facilitado enormemente la actividad humana y que son necesarios para el desarrollo de la misma.

2.2 Objeto del proyecto

El presente documento está enfocado al diseño de una planta de producción del ciclohexano a partir de la hidrogenación del benceno, poniendo en práctica los conceptos teóricos de Ingeniería química.

El ciclohexano es de gran importancia en una gran cantidad de procesos químicos industriales, tanto en el ámbito nacional como mundial. La producción de ciclohexano se lleva a cabo para satisfacer las necesidades de una serie de industrias que dependen de él, ya sea de manera directa o indirecta.

La línea de proceso proyecta será diseñada para producir 140.000 toneladas de ciclohexano anuales a través del proceso de hidrogenación de benceno.

2.3 Materias primas

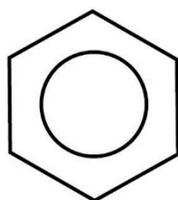
En este apartado se procederá a la caracterización de las materias primas de la línea de proceso de producción del ciclohexano, así como la del catalizador empleado en el reactor. Con respecto a las materias primas necesarias para la fabricación de ciclohexano en la línea de proceso diseñada, se determina que son el benceno e hidrógeno. Se requiere esta materia prima tan pura como sea

posible, sin embargo, el hidrógeno llega a la refinería con un pequeño porcentaje de metano y nitrógeno.

2.3.1 – Benceno

Fórmula Química: C_6H_6

Estructura química:



2.3.1.1 – Propiedades físicas y químicas

El benceno es un líquido incoloro e inflamable, de amplia utilización como disolvente y como reactivo en operaciones industriales. Es prácticamente insoluble en agua, pero completamente soluble en alcohol, éter y numerosos líquidos orgánicos.

A continuación, se presentan las principales propiedades del benceno. (Tabla 1)

Tabla 1. Propiedades del benceno

PROPIEDAD	VALOR
<i>Peso molecular</i>	78,1 g/mol
<i>Presión de vapor a 20 °C</i>	10000 Pa
<i>Presión crítica</i>	48,9 bar
<i>Densidad a 20 °C</i>	879,4 kg/m ³
<i>Solubilidad en agua a 25 °C</i>	0,18 g/ml
<i>Punto de ebullición</i>	80 °C
<i>Punto de fusión</i>	5,5 °C
<i>Temperatura crítica</i>	26,6 °C
<i>Calor de fusión</i>	9,95 kJ/mol
<i>Calor de vaporización</i>	30,72 kJ/mol
<i>Calor de combustión</i>	-3275,3 kJ/mol
<i>Calor de formación</i>	82,93 kJ/mol

El benceno es térmicamente estable y su formación está, cinética y termodinámicamente favorecida a temperaturas de 773 K o mayores. Requiere por lo tanto temperaturas elevadas para su descomposición térmica o para que se lleven a cabo reacciones de condensación o deshidrogenación.

2.3.1.2 – Usos

Durante muchos años, la principal salida para el benceno fue como combustible de motores de Este compuesto aromático es ampliamente utilizado como disolvente, si bien por sus

características carcinogénicas, el benceno está explícitamente prohibido en muchas formulaciones, existiendo algunos reparos en cuanto al tolueno y ciertas prevenciones respecto a los xilenos. De hecho, se está verificando una paulatina reducción de la demanda, más o menos acusada en los sectores de las pinturas, los adhesivos, los productos fitosanitarios, que hace unos años lo empleaban masivamente.

Se considera que la demanda del benceno tiene la siguiente estructura:

- Etilbenceno: destinado a la fabricación de estireno.
- Cumeno: producto intermedio obtenido por preparación del benceno con propileno, que mayoritariamente termina como fenol, materia prima de las resinas fenólicas, del bifenol y sus resinas derivadas (poliésteres, epoxi, policarbonatos y polisulfonas), además de la caprolactama (precursora del nylon 6) a través de la ciclohexanona y otros múltiples productos químicos orgánicos como, por ejemplo, los ‘alquilfenol etoxilados’, usados como agente emulgente y tensioactivos.
- Ciclohexano: obtenido por hidrogenación del benceno para dar ácido adípico y caprolactama, ambas materias primas de las poliamidas 6,6 y 6, respectivamente.
- Otros derivados minoritarios, entre los que destacan el nitrobenceno y su derivado la anilina, y el derivado de ésta el MDI (difenilmetanodiiisooctano), además de los dinitrobencenos, de los que derivan la iso- y la para-fenilamina.
- Los ácidos alquilbencenosulfónicos: base de los detergentes LAS (“linear alkylbenzenesulfonates”).

2.3.1.3 – Disponibilidad

El benceno es un componente natural del petróleo, sin embargo, no puede ser separado del crudo por una simple destilación, ya que forma azeótropo con otros hidrocarburos. La recuperación de benceno es más económica si la fracción de petróleo está sujeta a un proceso catalítico o térmico que incremente la concentración de dicho hidrocarburo.

El benceno que procede del petróleo es industrialmente producido por reformado y separación, y desalquilación térmica o catalítica de tolueno. La cantidad de benceno recuperado por reformado es normalmente mayor que el obtenido a través de las técnicas de extracción.

Otros procesos de obtención de benceno son el craqueo de nafta pesada o hidrocarburos ligeros como el propano o butano, con los que se consigue un producto rico en aromáticos, los cuales contienen un 65% de aromáticos, 50% del cual es benceno.

2.3.2 – Hidrógeno

Fórmula química: H₂

Estructura química: H – H

2.3.2.1 – Propiedades físicas y químicas

El hidrógeno es el elemento más abundante en el Universo, formando parte del gas interestelar y, sin embargo, en la Tierra rara vez se encuentra en estado libre, es necesario obtenerlo empleando algún tipo de energía primaria.

Se encuentra mayoritariamente en la naturaleza en forma molecular formando parte de gases, de la molécula de agua y de multitud de compuestos orgánicos. Este hecho se debe fundamentalmente, a su elevada reactividad prácticamente en cualquier entorno.

Se trata del elemento más ligero y su minúsculo tamaño le permite situarse dentro de cualquier átomo o tipo de enlace destacando dentro de este último su tendencia a formar puentes de hidrógeno.

Entre algunas de sus propiedades más relevantes, se destacan las siguientes (Tabla 2):

Tabla 2. *Propiedades del Hidrógeno*

<i>PROPIEDAD</i>	<i>VALOR</i>
<i>Peso molecular</i>	2,016 g/mol
<i>Presión de vapor a 23 K</i>	209 Pa
<i>Presión crítica</i>	1316900 Pa
<i>Densidad</i>	2,447 kg/m ³
<i>Solubilidad en agua a 25 °C</i>	1,7 mg/l
<i>Punto de ebullición</i>	20,268 K
<i>Punto de fusión</i>	14,025 K
<i>Temperatura crítica</i>	33,2 K
<i>Calor de fusión</i>	0,117 kJ/mol
<i>Calor de vaporización</i>	0,904 kJ/mol
<i>Calor de combustión</i>	-285,84 kJ/mol
<i>Calor de formación</i>	0 kJ/mol

2.3.2.2 – Usos

El hidrógeno puede emplearse dentro de dos vertientes bien diferenciadas:

- En los procesos de obtención de productos industriales tales como la síntesis de amoníaco y fundamentalmente en las instalaciones de una refinería. En esta última, además, hay que distinguir entre el consumo de hidrógeno en reacciones propiamente dichas y el de aportación a las unidades como materia prima de proceso.
- El papel del hidrógeno como fuente de energía alternativa y renovable, tanto por medio de una conversión directa de su energía química en electricidad a través de la pila combustible, como la combustión directa en motores alternativos o turbinas de gas. En este sentido, está previsto que se convierta en uno de los posibles sustitutos de los combustibles fósiles en el sector transporte.

2.3.2.3 – Disponibilidad

Dentro de los procesos para la síntesis del hidrógeno, también es preciso distinguir entre dos categorías en base a la naturaleza de la materia prima: procesos químicos de obtención basados en combustibles fósiles y aquellos que emplean como punto de partida alguna fuente de energía renovable.

En el primer grupo, se destacan los siguientes procesos:

- Reformado del metano, obteniéndose el llamado “gas de síntesis” (CO e H₂).
- Reformado con vapor de agua.
- Reformado autotérmico.

- Oxidación parcial catalítica del metano, siendo este método más rápido que el reformado simple.
- Gasificación del carbón mineral a altas temperaturas.
- Pirólisis.

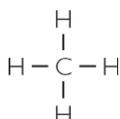
En un segundo grupo, se incluyen:

- Electrolisis de la molécula de agua.
- Gasificación a alta temperatura de la lignina contenido en la biomasa.
- Procesos de fermentación de diversa naturaleza: fermentaciones biológicas, bacterianas o procesos de descomposición por medio de la acción de algas.
- Métodos basados en la energía solar de alta temperatura que son sistemas centralizados y de gran capacidad de producción.
- Métodos basados en la energía nuclear, los cuales comparten sus procedimientos con los de la energía solar de alta temperatura.

2.3.3 – Metano

Fórmula química: CH₄

Estructura química:



2.3.3.1 – Propiedades físicas y químicas

El metano es el hidrocarburo más sencillo presente en la naturaleza. Éste se encuentra formando parte mayoritaria del gas natural y en el crudo de petróleo en distintas proporciones dependiendo de la naturaleza del mismo.

Desde el punto de vista estructural es una molécula cuyos enlaces C-H están dirigidos hacia los vértices de un tetraedro regular, y debido a la debilidad de estos enlaces este compuesto se presenta en fase gaseosa en condiciones ambientales.

Dentro de las propiedades físicas y químicas de este compuesto, cabe destacar aquellas que permiten definirlo dentro de un proceso (Tabla 3):

Tabla 3. Propiedades del metano

PROPIEDAD	VALOR
<i>Peso molecular</i>	16,04 g/mol
<i>Presión crítica</i>	1327030 Pa
<i>Densidad</i>	0,717 kg/m ³
<i>Solubilidad en agua a 25 °C</i>	3,3 mg/l
<i>Punto de ebullición</i>	111 K
<i>Punto de fusión</i>	90,5 K

<i>Temperatura crítica</i>	190,6 K
<i>Calor de fusión</i>	1,1 kJ/mol
<i>Calor de vaporización</i>	8,179 kJ/mol
<i>Calor de combustión</i>	890,36 kJ/mol
<i>Calor de formación</i>	74,85 kJ/mol

2.3.3.2 – Usos

La aplicación principal del metano como tal está destinada a la obtención de productos de gran interés en la industria petroquímica destacando los derivados halogenados, dentro de los cuales se enmarcan el cianuro de hidrógeno, metanos clorados, acetileno y gas de síntesis, compuesto este último por una mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono.

Si se considera el metano como constituyente mayoritario del gas natural se puede afirmar entonces que éste tendrá también las mismas aplicaciones a las que se destina este último, destacando su uso como combustible.

2.3.3.3 – Disponibilidad

Una buena parte del metano que se produce en la actualidad procede del gas natural, aunque también puede sintetizarse a través de los gases de refinería obtenidos por medio de un proceso de destilación del petróleo donde se separan las distintas fracciones contenidas en el crudo. Siendo así, la primera fracción y la más volátil está compuesta por el metano y homólogos superiores al mismo y se asemeja al gas natural.

2.3.4 – Nitrógeno

Fórmula química: N₂

Estructura química:



2.3.4.1 – Propiedades físicas y químicas

Es un gas relativamente inerte, incoloro, inodoro e insípido y de menor densidad que el aire que está constituido por moléculas diatómicas. Puede condensarse en un líquido incoloro, que puede a su vez comprimirse en un sólido cristalino incoloro.

El nitrógeno existe en dos formas isotópicas naturales, y artificialmente se han preparado cuatro isótopos radioactivos.

La solubilidad del nitrógeno aumenta con la presión lo que produce graves problemas en los submarinistas cuando al ascender hacia la superficie, con la consiguiente disminución de la presión, se libera en forma de burbujas en el flujo sanguíneo.

A continuación, se recogen las propiedades más relevantes de este compuesto químico (Tabla 4):

Tabla 4. *Propiedades del nitrógeno*

<i>PROPIEDAD</i>	<i>VALOR</i>
<i>Peso molecular</i>	28,013 g/mol
<i>Presión crítica</i>	34 bar
<i>Densidad</i>	1,185 kg/m ³
<i>Solubilidad en agua a 25 °C</i>	1,4 mg/l
<i>Punto de ebullición</i>	77,2 K
<i>Punto de fusión</i>	63 K
<i>Temperatura crítica</i>	126,19 K
<i>Calor de fusión</i>	0,36 kJ/mol

2.3.4.2 – Usos

Uno de los usos principales es la fabricación de fertilizantes, aunque también se utiliza para preparar explosivos, algunos colorantes y para la fabricación del amoníaco. Otro uso que se le da es la utilización de éste para la conservación de los alimentos envasados al detener la oxidación.

2.3.4.3 – Disponibilidad

A partir del aire: El nitrógeno puede obtenerse del aire por simple eliminación del oxígeno. En el laboratorio, haciendo pasar el aire arriba de cobre calentado, éste se apodera del oxígeno para formar óxido cúprico sólido, CuO. Si se quema fósforo en una campana invertida sobre agua se forma fósforo pentaoxidado sólido, que se disuelve en el agua y deja un residuo que en su mayor parte es nitrógeno. Otro método de obtención consiste en hacer burbujear aire en una solución alcalina de pirogalol, que absorbe al oxígeno.

A partir de sus compuestos: El nitrógeno puede prepararse por oxidación del amoníaco, por lo cual se hace pasar este gas sobre óxido de cobre calentado al rojo.

2.3.5 – Catalizador

La elección del catalizador más adecuado para el sistema de reacción descrito con anterioridad se basa tanto en consideraciones de índole técnica como económica. Desde el punto de vista técnico, se debe tener en cuenta que el comportamiento del sistema influye en las dimensiones de la partícula catalítica, por lo que se va a considerar aquellas que tienen un diámetro de 2-5 mm.

Desde el punto de vista económico, se descarta el uso de catalizadores compuestos por metales nobles, y se elige un sistema que emplea como metal activo el Níquel, hecho que presenta dos ventajas fundamentales: la principal es que permite alcanzar un alto índice de efectividad en un proceso que resultará más rentable, y la segunda de las razones atañe a las condiciones de operación, ya que los catalizadores de Níquel impiden la aparición de la reacción secundaria de isomerización de ciclohexano a metilciclopentano incluso trabajando a 250 °C.

Siguiendo con las consideraciones económicas, la superficie disponible para la reacción es un aspecto relevante a tener en cuenta, puesto que dicha reacción ocurrirá en los poros del sólido. Para el caso que se aplica, se opta por un catalizador de elevada superficie específica, compensando el coste del producto con un consumo menos del mismo para alcanzar el grado de conversión deseado. Además, un punto más a favor para elegir este tipo de superficie específica reside en un mayor beneficio operativo con respecto a superficies inferiores.

Considerando estas razones, el catalizador que se va a emplear será el llamado HTC-400, perteneciente a la familia de catalizadores denominados HTC, especialmente recomendados para las reacciones de hidrogenación a nivel industrial, debido principalmente a que:

- Han alcanzado un rotundo éxito en la conversión de benceno a ciclohexano.
- Son capaces de duplicar la vida útil del catalizador comparado con otros usados en la misma reacción.
- Pueden operar a temperaturas superiores, reduciendo la posibilidad de que aparezcan reacciones secundarias indeseadas, es decir, aumentan la selectividad del sistema de reacción.
- La velocidad espacial puede llegar a ser hasta 1,5 veces mayor con respecto a catalizadores convencionales.

El catalizador HTC-400 seleccionado presenta estructura de 3-lobe (imagen 4) y las siguientes especificaciones técnicas (Tabla 5):

Tabla 5. *Propiedades del catalizador*

<i>PROPIEDAD</i>	<i>VALOR</i>
<i>Composición (% en peso)</i>	16% Ni, 84% Al ₂ O ₃
<i>Densidad</i>	2702,7 kg/m ³
<i>Diámetro de partícula</i>	2,5 mm
<i>Superficie específica</i>	7000 m ² /kg
<i>Longitud partícula</i>	8 mm

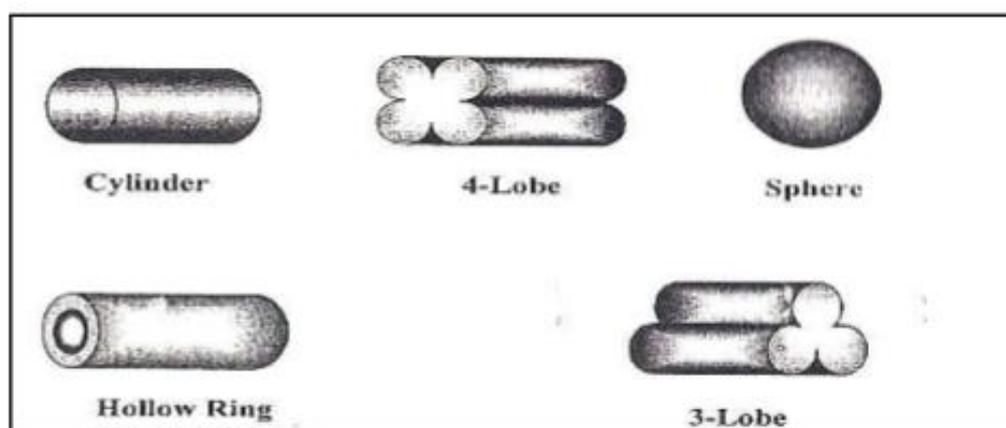


Imagen 4. *Formas disponibles del catalizador*

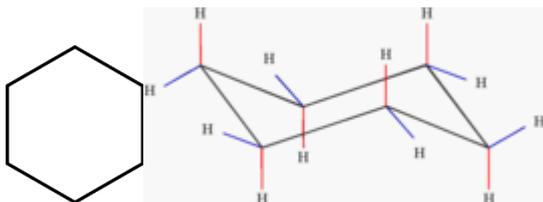
2.4 Productos

En este apartado se procederá a la caracterización del producto obtenido que es el ciclohexano. La utilización de un catalizador provisto de níquel provoca que no se formen reacciones secundarias, por lo que no tendremos productos secundarios.

2.4.1 – Ciclohexano

Fórmula Química: C₆H₁₂

Estructura Química:



2.4.1.1 – Propiedades físicas y químicas

El ciclohexano es un líquido incoloro y transparente. Es altamente inflamable, de olor penetrante similar al del petróleo.

A continuación, se destacan las propiedades más importantes del compuesto:

Tabla 6. Propiedades del ciclohexano

PROPIEDAD	VALOR
Peso molecular	84,18 g/mol
Presión crítica	40,73 bar
Densidad	0,778 kg/m ³
Solubilidad en agua a 25 °C	Insoluble
Punto de ebullición	80,7 °C
Punto de fusión	6,47 °C
Temperatura crítica	280 °C
Calor de fusión	2,662 kJ/mol
Calor de vaporización	778,4 kJ/mol
Calor de combustión	3922 kJ/mol
Calor de formación	-123 KJ/mol

El ciclohexano normalmente es estable aún bajo exposiciones al fuego. Se trata de un compuesto insoluble en agua.

2.4.1.2 – Usos

Alrededor del 98% del ciclohexano producido es empleado para la fabricación de intermedios de nylon: ácido adípico, caprolactama, y hexametildiamina, los dos primeros consumen alrededor del 95%. El primero de los intermedios se utiliza para la elaboración de nylon 6.6, mientras que el segundo de ellos es un monómero del nylon 6.

Además, suele emplearse para remover pinturas, como solvente para lacas y resinas y en la fabricación de materiales orgánicos.

Cantidades menores de ciclohexano son destinadas a su uso como disolvente y como agente químico intermedio.

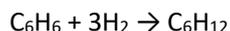
El ciclohexano se emplea para obtener, por oxidación catalítica con aire, ciclohexanol y ciclohexanona, que son materias primas para la obtención, además de Nylon, de resinas poliéster y poliuretanos.

El crecimiento del consumo de ciclohexano es estimado alrededor del 2-3% anual.

2.4.1.3 – Disponibilidad

El ciclohexano se obtiene mediante dos procesos principales: la hidrogenación del benceno y el reformado catalítico de la fracción de nafta del petróleo.

La hidrogenación del benceno se realiza mediante fase líquida o vapor con catalizador de níquel o platino a 210 °C y entre 300 y 500 psi de presión. La reacción que se produce es la siguiente:



No obstante, todos estos procesos se explicarán con detalle en los próximos capítulos (véase Capítulo 4: Elección de la tecnología).

2.5 Estudio de mercado

2.5.1 - Mercado exterior

El crecimiento global de la industria de ciclohexano es altamente dependiente del crecimiento total de varios de los mercados de países en desarrollo como China, India y Arabia Saudita, que son los países con mayor producción de petroquímicos a nivel mundial.

A pesar de la subida global del mercado de ciclohexano en el mundo, Europa ha visto un crecimiento de hasta el 2% año, pero se espera que el nivel de consumo para el material en Europa se mantenga estable en los próximos años, principalmente a nivel de la aplicación ciclohexano en Europa del Este. (Merchant Research & Consulting Ltd).

Nuevas inversiones en estos últimos años se centraron en Asia, particularmente en China y el medio oriente por Arabia Saudita (Petro Rabigh company) ya que necesitaron ciclohexano para la producción de caprolactama y nylon 6,6 en el proyecto de expansión de la segunda fase que se finalizó en 2014.

Se procederá a analizar los datos del APLA (Asociación Petroquímica Latinoamericana) sobre la producción latinoamericana de ciclohexano de la siguiente tabla 7 (datos del año 2012).

Tabla 7. Empresas latinas productoras de ciclohexano

País	Empresa productora	Capacidad (t/año)
Argentina	YPF	95000
Brasil	Braskem	104000
	Rhodia poliamida	300
Chile	NO HAY PRODUCCIÓN	
Colombia	Ecopetrol	38000
México	NO HAY PRODUCCIÓN	
Perú	NO HAY PRODUCCIÓN	
Venezuela	NO HAY PRODUCCIÓN	
TOTAL		237300

Se observa que la capacidad total de producción de ciclohexano en Latinoamérica es de 237.300 ton/año

2.5.2 – Mercado nacional

La industria petroquímica argentina se ha constituido en uno de los sectores más pujantes del país y pilar para el desenvolvimiento en los últimos 40 años.

Por sus características de inserción en otras cadenas productivas, los productos petroquímicos básicos, sus intermediarios y finales son claves en el desarrollo de la competitividad del resto de la economía, constituyéndose en un importante eslabón del sistema productivo industrial del país.

Desde el punto de vista económico, la industria petroquímica en Argentina en el año 2010 alcanzó un valor bruto de producción total de US\$ 5.782 millones. Dentro del sector químico general, este sector representa el 18,2% del Valor Bruto de Producción (VBP) de la industria química.

La producción alcanzó los 6,60 millones de toneladas de producción total (básicos, intermedios y finales) en el año 2012, exportando casi 1,1 millones de toneladas de productos petroquímicos. Las importaciones para ese mismo periodo alcanzaron los 3 millones de toneladas. Como resultado de esta relación productiva – consumo aparente, el sector presentó un déficit en su balanza comercial de US\$ 2.149 millones, siendo las exportaciones US\$ 1.269 millones y las importaciones US\$ 3.418 millones (incluye DAP y MAP).

El ciclohexano se considera un producto intermedio dentro de estas cadenas petroquímicas. En la actualidad, únicamente una empresa en el territorio argentino produce ciclohexano, cuya capacidad y evolución del producto se representa en la siguiente imagen (Imagen 5).

CICLOHEXANO						
NCM: 2902.11.00						
AÑO	PRODUCCION (t)	IMPORTACION (t)	EXPORTACION (t)	CONSUMO APARENTE (t)	VALOR COMERCIO EXTERIOR (US\$/M)	
					IMPORTACION (CIF)	EXPORTACION (FOB)
2006	63.908	1	64.195	(286)	—	1.007
2007	68.350	1	64.588	3.763	—	1.149
2008	38.747	1	34.862	3.885	—	1.228
2009	6.985	—	9.214	(2.229)	—	578
2010	14.548	3	16.716	(2.165)	—	1.061
2011	17.048	7	16.678	377	—	1.317
2012	3.720	6	3.879	(153)	—	1.419
2013	2.255	253	311	2.197	—	1.685
2014	16.004	11	11.633	4.382	—	1.378
2015	8.738	—	8.778	(40)	—	778

PRODUCTOR	LOCALIZACION	CAPACIDAD INSTALADA (t/a al 31/12/15)	PROCESO	MATERIAS PRIMAS
YPF S.A.	Ensenada (Bs. As.)	95.000	Hidrogenación de benceno (Arco-Engelhardt)	Benceno

ESTRUCTURA DEL MERCADO LOCAL EN 2015 (porcentual)	
Solventes	100

Imagen 5. Producción ciclohexano a nivel nacional

Según se puede observar en la imagen, la única empresa operativa actualmente en Argentina es “YPF S.A”, con una capacidad total de producción de 95.000 toneladas al año.

A fin de prever el comportamiento del mercado, el crecimiento y desafíos de esta industria petroquímica en territorio argentino, se ha elaborado un análisis FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades Y Amenazas).

En este análisis, tanto las Fortalezas como las Debilidades se consideran internas al sector, razón por la cual la propia industria puede actuar directamente sobre ellas, procurando potenciar a las primeras y reducir las segundas; en tanto que las Oportunidades y las Amenazas son externas a la industria y dependen del ambiente nacional e internacional del sector donde se realizan las actividades; por cuanto las posibilidades de la industria de modificarlas per se es mucho más reducida, cuando no imposible.

Las definiciones de cada término son las que siguen:

- Fortalezas: son las capacidades distintivas y especiales internas con que cuenta el sector, por los que logra una posición privilegiada frente a otros sectores industriales, tanto en Argentina, como frente a sectores de países terceros limítrofes.
- Oportunidades: son factores que resultan positivos, favorables, explotables para el sector; los mismos se encuentran en el entorno nacional, como también en el internacional en el que actúan las empresas de la industria y que permiten obtener ventajas competitivas.
- Debilidades: son aquellas propias de la industria que causan una posición desfavorable frente a la competencia; recursos de los que se carece, habilidades que no se poseen y/o actividades que no se realizan o que no desarrollan positivamente, entre otros temas.
- Amenazas: son situaciones que provienen del entorno externo de nuestra industria, tanto del ámbito nacional, como internacional, que pueden llegar a atentar contra las posibilidades de desarrollo, e incluso contra la permanencia de la industria.

Es importante destacar que dicho análisis toma como base el estudio realizado por la CIQYP en el año 2011 llamado “La Industria Química Argentina, Situación Actual y su potencial hacia el 2020”.

Tabla 8. Análisis FODA

	<i>Fortalezas</i>	<i>Oportunidades</i>
<i>Industria Química y Petroquímica Argentina</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Posición y experiencia de la industria argentina, existencia de recursos tecnológicos y humanos capacitados. 2. La industria creció y aprovechó las condiciones propicias que se presentaron. 3. Estricto cumplimiento a normativas regulatorias vigentes. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Existencia del Plan Estratégico Industrial 2020 que impulsa políticas a favor de una mayor industrialización. 2. Posibilidades de complementación con Brasil.
<i>Recursos humanos</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Adecuada disponibilidad de recursos humanos con buen valor técnico 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Políticas activas del MINCyT y el MTEySS que favorecen el desarrollo de RRHH adecuados para el sector.

		<ul style="list-style-type: none"> 2. Posibilidad de aprovechar estructura del IPA y/o CIQyP para capacitación gerencial. 3. Políticas activas del estado que fomenta la educación técnica y el desarrollo de ciencias duras.
<i>Mercado</i>	1. Mercado regional a escala (Mercosur)	<ul style="list-style-type: none"> 1. Espacio de crecimiento para el consumo per cápita de "derivados petroquímicos" en productos finales. 2. Perfeccionamiento y expansión del Mercosur. 3. Posible complementación industrial con Brasil.
<i>Inversiones, financiamiento y marco regulatorio</i>	<ul style="list-style-type: none"> 1. Cuando aparecen las oportunidades de crecimiento se aprovechan mediante reinversión de utilidades. 2. Cumplimiento estricto del marco regulatorio vigente 	<ul style="list-style-type: none"> 1. Acceso al mercado nacional e internacional de capitales. 2. Disponibilidad de programas de financiamiento promocional.
	Debilidades	Amenazas
<i>Industria Química y Petroquímica Argentina</i>	<ul style="list-style-type: none"> 1. Obsolescencia de algunas instalaciones productivas. 2. El retroceso de la participación de las empresas de capital nacional sitúa a los centros de decisión más importantes fuera del país y obliga a competir por la localización de las inversiones con otras alternativas. 3. La existencia de un programa promocional del sector. 	<ul style="list-style-type: none"> 1. Baja previsibilidad de la evolución en el ciclo económico nacional. 2. Marco jurídico. 3. Planificación territorial para la creación de polos industriales. 4. Baja asociatividad de las cadenas productivas.
<i>Recursos humanos</i>	<ul style="list-style-type: none"> 1. falta de equilibrio en la negociación con el sector sindical amenaza la competitividad y productividad. 2. Perspectivas de escasez de RRHH especializados ante la posibilidad de una demanda 'acelerada' de ellos. 3. Bajo nivel de productividad en comparación con economías de competencia internacional. 	<ul style="list-style-type: none"> 1. Conflictividad laboral elevada. 2. Continuo y acentuado crecimiento del costo laboral en dólares afecta a la competitividad de exportaciones.
<i>Mercado</i>	<ul style="list-style-type: none"> 1. Mercado interno reducido. No permite la instalación de plantas a escala internacional. 2. Distancia a los grandes mercados internacionales impone costos logísticos elevados. 	<ul style="list-style-type: none"> 1. Presiones OMC-plus de la OECD en materia de propiedad intelectual.
<i>Inversiones, financiamiento y marco regulatorio</i>	<ul style="list-style-type: none"> 1. Inexistencia de un programa promoción industrial del sector. 2. Escasa presencia de las empresas del sector en el mercado de capitales local. 	<ul style="list-style-type: none"> 1. Subsiste una calificación crediticia desfavorable (riesgo país). 2. Esquema tributario distorsivo (ej. Impuesto al débito y crédito y Ganancia Mínima Presunta entre

otras) que impactan en el capital de trabajo.

3. Alto impacto en costo de las regulaciones técnicas del sector (registros, autorizaciones, etc.).

4. Recargos a las exportaciones.

2.5.3 – Datos de producción y productividad de planta

El diseño de la nueva planta de ciclohexano que se presenta en el presente documento data con una capacidad productiva de 140.000 ton/año, con el fin de abastecer las necesidades nacionales en base a este producto y con expectativas de exportar a nivel latinoamericano, partiendo de la base de la escasa producción de ciclohexano de los países vecinos. Para cubrir las necesidades de ciclohexano anuales, se necesitarían 132.000 ton de benceno anuales y 13.500 ton/año de hidrógeno.

Se prevé que el proceso de producción de la planta trabaje de forma continua 24 horas al día los 365 días del año, a fin de evitar pérdidas de puesta en marcha del proceso. Por lo tanto, los turnos de trabajo de la planta de cada operario serán de 8 horas al día, completando así un ciclo de 3 turnos de trabajo por cada 24 horas de proceso transcurridas.

Capítulo 3: LOCALIZACIÓN DE LA PLANTA

3.1 Ubicación de la línea de proceso

Para la localización de la línea de proceso se ha tenido en cuenta una serie de condiciones que deberá cumplir la zona geográfica para suplir sus necesidades y asegurar el funcionamiento óptimo de la misma.

Entre estas condiciones se tendrán en cuenta:

- Suministro de la materia prima.
- Suministro de combustible.
- Suministro eléctrico.
- Comunicaciones.
- Clima.
- Residuos.
- Suelo.

3.1.1 – Suministro de la materia prima

Al ser las materias primas fundamentales para el presente proyecto, el benceno y el hidrógeno, la línea de proceso estará ubicada lo más próximo posible a una refinería. En la siguiente tabla se muestran las refinерías operativas actualmente en Argentina junto con su capacidad nominal.

Tabla 9. *Petroquímicas a nivel nacional*

<i>Nombre</i>	<i>Cap. Nominal</i>	<i>Ubicación</i>
<i>Refinería de Bahía Blanca</i>	32000 bbl/d*	Bahía Blanca, Prov. de BsAs
<i>Refinería Campana (ex ESSO)</i>	90000 bbl/d*	Campana, Prov. de BsAs
<i>Refinería de Campo Duran</i>	30000 bbl/d*	Campo Durán, Prov. de Salta
<i>Destilería Dock Sud -1</i>	1300 bbl/d*	Dock Sud, Prov. de BsAs
<i>Destilería Dock Sud -2</i>	100000 bbl/d*	Dock Sud, Prov. de BsAs
<i>Refinería de La Plata</i>	189000 bbl/d*	Ensenada, Prov. de BsAs
<i>Refinería de Luján de Cuyo</i>	126000 bbl/d*	Luján de Cuyo, Prov. de Mendoza
<i>Refinería de Plaza Huin cul 1</i>	26000 bbl/d*	Plaza Huin cul, Prov. de Neuquén
<i>Petrobras Argentinas S. A</i>	50000 bbl/d*	San Martin, Prov. de Santa Fe
<i>Renesa</i>	6250 bbl/d*	Plaza Huin cul, Prov. de Neuquén
<i>Refinería de Plaza Huin cul 2</i>	3437 bbl/d*	Plaza Huin cul, Prov. de Neuquén

*bbl/d = barriles por día

A continuación, se muestra un mapa de las mismas refinerías para facilitar la ubicación (Imagen 6).

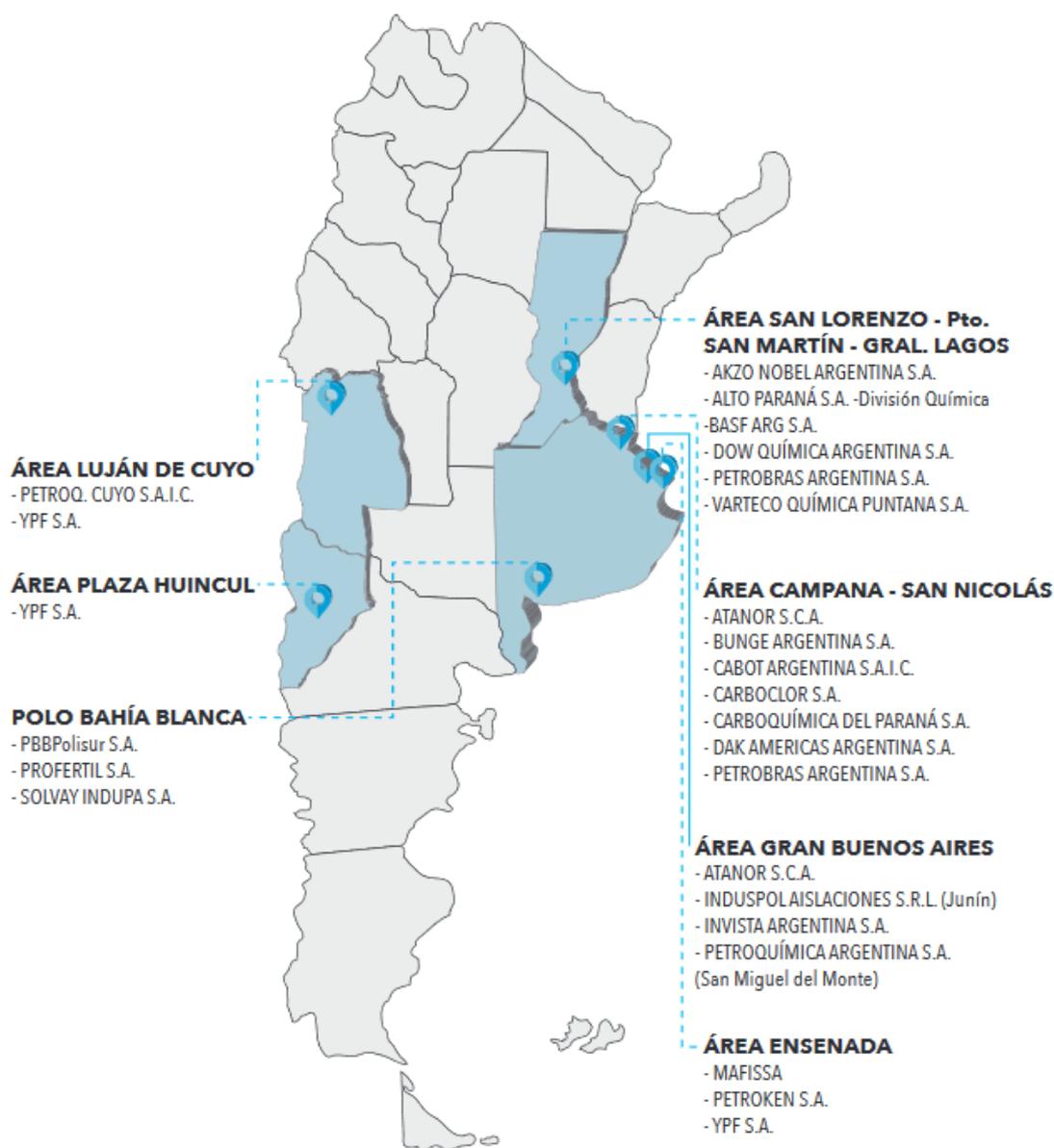


Imagen 6. Mapa con la ubicación de petroquímicas

Al realizar un estudio de las mismas se comprueba que no todas trabajan y/o producen benceno, que es la materia prima que se necesita para el proceso de producción del ciclohexano, por lo que habrá que descartar alguna de ellas para determinar la ubicación de la planta del proyecto.

El estudio realizado revela que sólo dos de las mencionadas producen benceno, como se indica en la siguiente tabla, con su correspondiente producción anual.

Tabla 10. Producción de benceno

Empresa	Ubicación	Producción benceno
Petrobras Argentina S. A	Pto. Gral. San Martín - Santa Fe	150000 (ton/año)
YPF S. A	Ensenada - Buenos Aires	120000 (ton/año)

3.1.2 – Suministro de combustibles y energía

Se procederá a analizar el mapa de los oleoductos de Argentina con el fin de determinar si la ubicación de la planta podrá tener acceso a ellos. Se muestra a continuación el mapa (imagen 7).

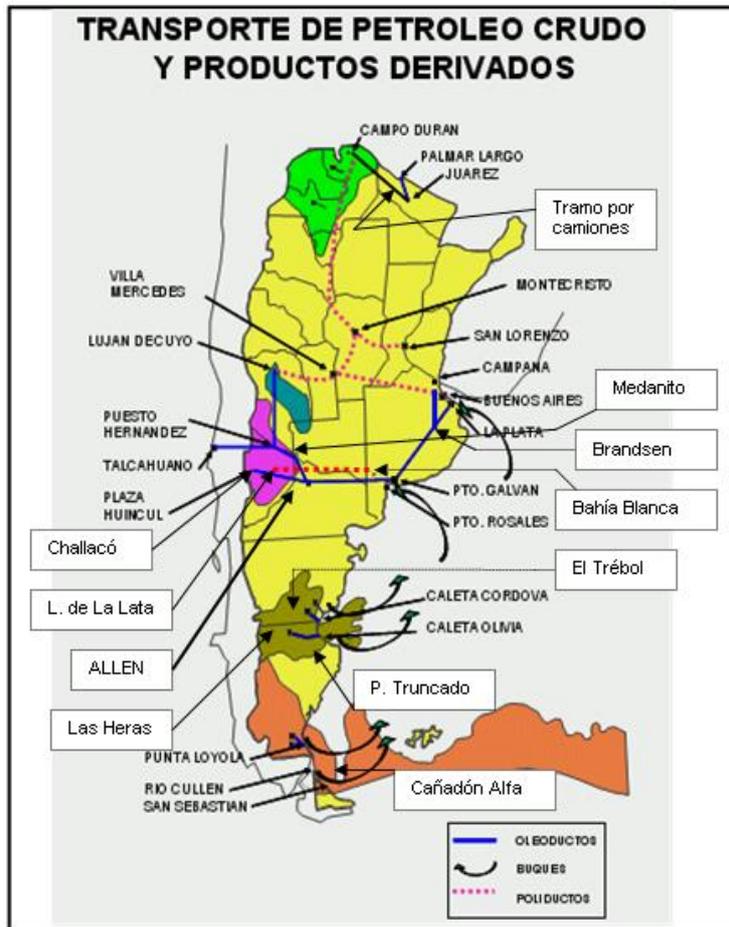


Imagen 7. Mapa oleoductos Argentina

Se puede determinar que tanto si la planta se coloca en tanto en Buenos Aires como en San Lorenzo la energía y el combustible van a estar disponibles.

3.1.3 – Comunicaciones

Tanto la ubicación de Buenos Aires como la de San Lorenzo están idóneamente comunicadas ya que tienen buen acceso a rutas terrestres como a rutas marinas.

3.1.4 – Condiciones climáticas

3.1.4.1 – Temperatura

En Buenos Aires, la temperatura media anual es de 16.8 °C, con un promedio de 23.6 °C, enero es el mes más cálido. Las temperaturas medias más bajas del año se producen en julio, cuando está alrededor de 10.6 °C. Se muestra a continuación un diagrama de las temperaturas medias cada mes del año (imagen 8).

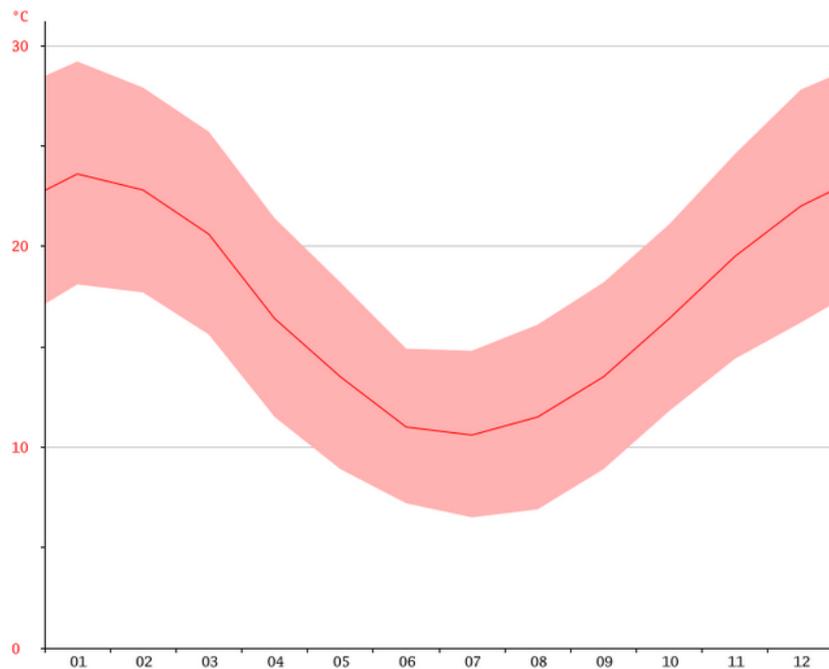


Imagen 8. Diagrama temperaturas anuales Buenos Aires

La temperatura media anual en Santa Fe se encuentra a 18.5 °C, a una temperatura media de 25.3 °C, enero es el mes más caluroso del año. julio es el mes más frío, con temperaturas promediando 12.2 °C. Se muestra a continuación un diagrama de las temperaturas medias cada mes del año (imagen 9).

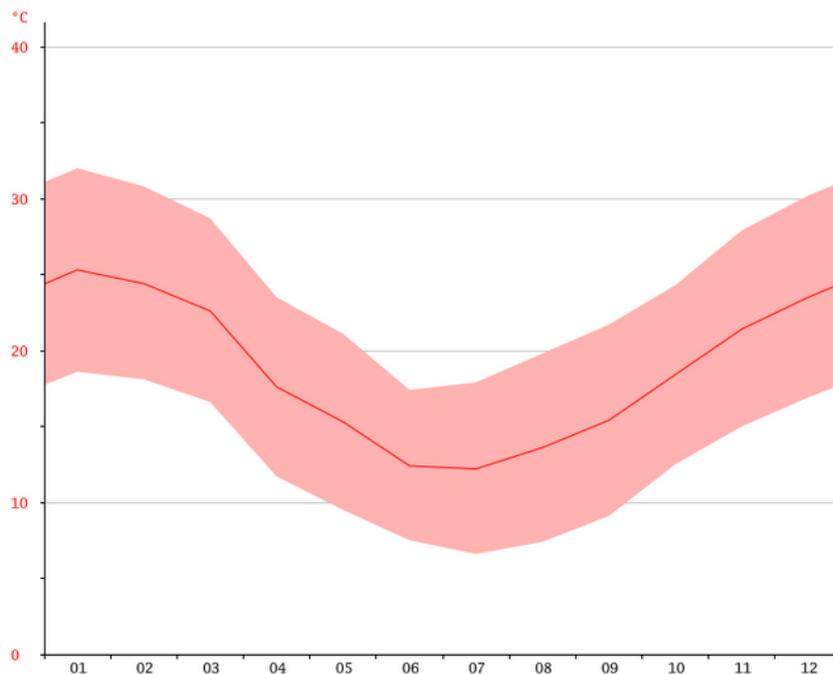


Imagen 9. Diagrama temperaturas anuales Santa Fe

3.1.4.2 – Precipitaciones

En Buenos Aires, las precipitaciones promedio anuales resultan 1040 mm. El mes más seco es julio habiendo 59 mm de precipitaciones. La mayor cantidad de precipitación ocurre en marzo, con un promedio de 115 mm. Se muestra a continuación un diagrama de las precipitaciones medias cada mes del año (imagen 10).

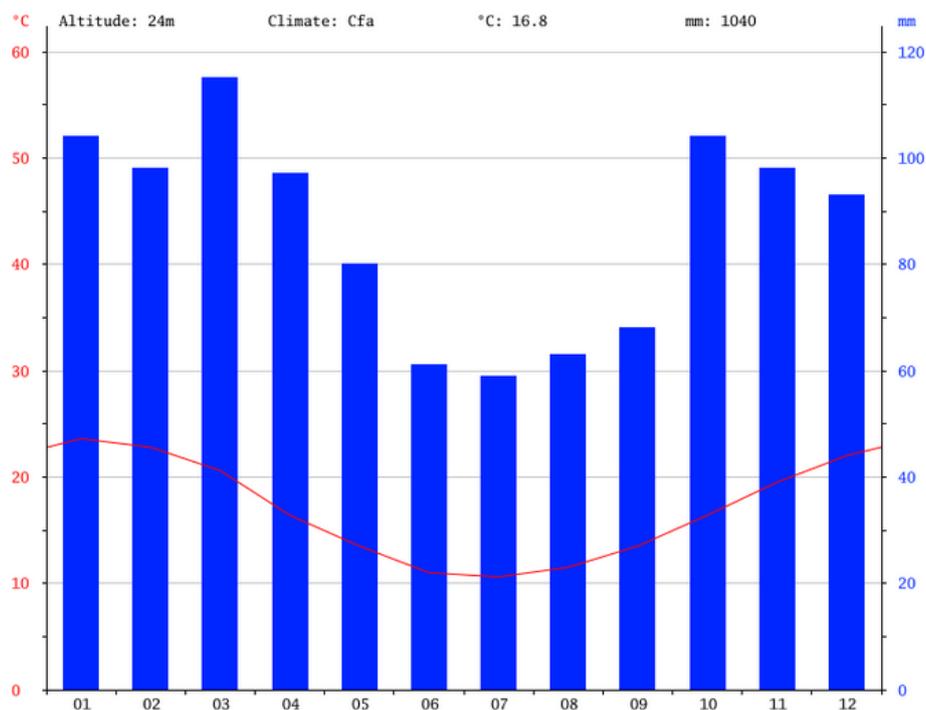


Imagen 10. Diagrama de las precipitaciones anuales Buenos Aires

En Santa Fe, la precipitación media es de 970 mm al año. La precipitación es la más baja se ubica en julio, con un promedio de 32 mm. La mayor parte de la precipitación aquí cae en marzo, promediando 141 mm. Se muestra a continuación un diagrama de las precipitaciones medias cada mes del año (imagen 11).

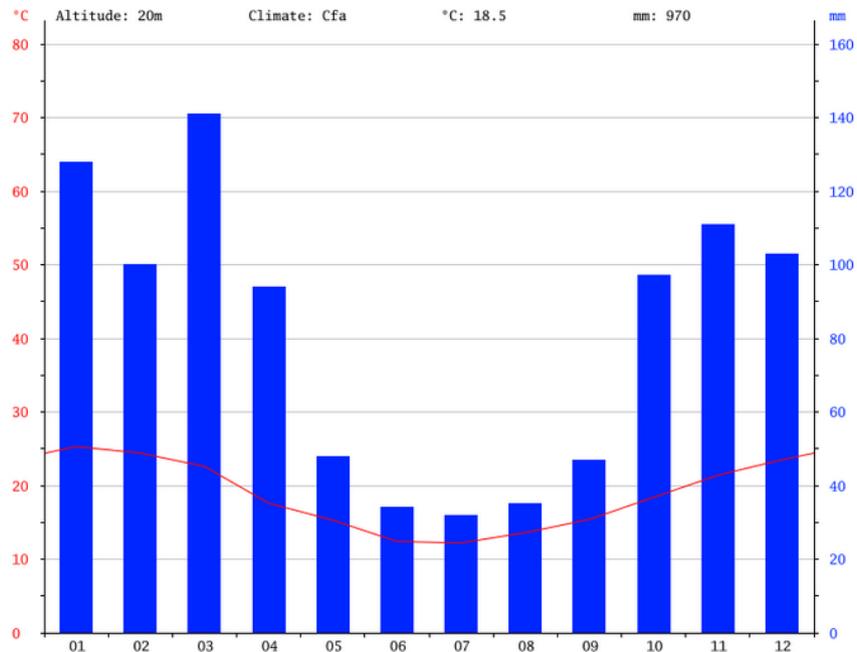


Imagen 11. Diagrama de las precipitaciones anuales Santa Fe

3.2 Ubicación exacta

La ubicación exacta finalmente será en San Lorenzo. Uno de los motivos principales es que Buenos Aires ya cuenta con una planta de ciclohexano por lo que la demanda sería menor si se coloca en esa zona. Otro motivo es la producción de benceno, en San Lorenzo se logra abastecer con facilidad la demanda que ofrece la presente planta del proyecto. Comprobamos también que las temperaturas y las precipitaciones en ambas opciones no son un impedimento para la realización del proyecto.

Capítulo 4: ELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA

4.1 Métodos de obtención del ciclohexano

Los procesos existentes para la obtención de ciclohexano comprenden todos aquellos desarrollados a nivel industrial para suplir las demandas del mercado. Estos procesos difieren principalmente en varios aspectos: naturaleza del catalizador, condiciones de operación, diseño del reactor, disipación del calor, agente extractante...

Así pues, a continuación, se destacan los siguientes procesos principales:

4.1.1 - Separación de las fracciones de nafta pesada

En la historia de la producción del ciclohexano, éste fue el método pionero para su obtención. Las primeras producciones proporcionaban el producto directamente por destilación simple de las fracciones de bencina bruta, presentando el inconveniente de una pureza inferior a la demanda por el mercado. Por ello, fue necesario desarrollar posteriores mejoras para alcanzar una mayor calidad de fabricación estando, actualmente, la destilación simple totalmente desaconsejada al no cumplir los requisitos del mercado. Estas mejoras pasaron a sustituir la destilación simple por una destilación extractiva con el fin de cumplir las especificaciones establecidas, exigiendo una pureza no inferior al 95%, muy por encima del 85% que corresponde a la destilación simple.

Hoy en día, la mayor parte de los procesos que forman parte de esta categoría, están basados en destilaciones extractivas de cortes apropiados de naftas que contienen entre un 5% y un 15% de peso en ciclohexano. Las diferencias entre unos y otros métodos son el tipo de agente extractante empleado y la composición de la alimentación. De acuerdo con este criterio, destacan los procesos recogidos a continuación:

- **Proceso “Phillips Petroleum Co”:** basado en la destilación extractiva de mezclas de n-heptano y ciclohexano al 15 y 85% respectivamente, por medio de disolventes compuestos por diferentes productos. En el proceso, se trabaja con una relación de reflujo interna de 10 alcanzándose una pureza del 99,5% para el producto deseado.
- **Proceso “Humble”:** está constituido por una columna de destilación extractiva basada en fenol en la cual se obtiene un producto con una pureza del 99%.
- **Proceso “UBKR”:** se compone de dos unidades fundamentales, una columna de destilación constituida por 180 platos y un reactor donde se hidrogena el metil ciclopentano obtenido en la unidad anterior a ciclohexano con una pureza del 99,9%. En este caso, el agente extractante es el fenoxietanol.
- **Union “Carbide Process”:** este proceso comprende una serie de extracciones basadas en el tetraetilenglicol. El refinado procedente de dicha operación, rico en parafinas, isoparafinas y cicloparafinas se somete a un proceso exhaustivo de separación basado en la cristalización de las distintas mezclas obtenidas: metilciclopentano y ciclohexano; metilciclopentano y n-hexano; y n-hexano y ciclohexano. El producto final posee una pureza del 99,9% en peso y es posible recuperar hasta un 40,3% del producto deseado.

4.1.2 – Hidrogenación del Benceno

Éste es, sin duda, el método más difundido para la producción de ciclohexano en las plantas petroquímicas a partir de derivados del crudo de petróleo. Estos métodos están basados en la reacción catalítica fuertemente exotérmica de hidrogenación del benceno y, aunque usualmente es

éste el compuesto que se emplea como materia prima de partida, es posible también servirse de tolueno, solo que la fabricación requiere un paso intermedio adicional. Independientemente de las características propias de cada proceso, todos y cada uno de ellos presentan dos pasos fundamentales, el primero consiste en la reacción de hidrogenación en sí, mientras que el segundo consiste en la purificación y acondicionamiento del producto final con el fin de cumplir con las estrictas exigencias de calidad que dicta el mercado.

Así, los métodos basados en la reacción de hidrogenación se clasifican atendiendo a criterios que influyen en la calidad del producto derivado:

- Condiciones de operación: permiten distinguir entre los procesos que se desarrollan en fase líquida, más obsoletos y con menos velocidad de reacción y, los que se llevan a cabo en fase gaseosa, más actuales, con mayor registro de temperaturas y catalizado por metales nobles.
- Tipos de catalizador: dependiendo del catalizador que se utilice cambiarán las especificaciones impuestas a la alimentación. Los más ampliamente utilizados son los de Níquel y Platino, aunque también se emplean el Paladio, Cobre, Rodio y sulfuros de Molibdeno, Wolframio y Níquel. Si la reacción está catalizada por metales nobles, como el Platino, el contenido en azufre de la alimentación debe ser menor de 1 p.p.m evitando así el envenenamiento del catalizador. Para el resto de los compuestos mencionados, las especificaciones son menos exigentes.
- Disipación de calor durante la reacción: constituye el aspecto más importante a la hora de controlar el correcto funcionamiento del sistema. Siendo así, las opciones pasan por el uso de una serie de reactores de lecho fijo adiabáticos provistos de intercambiadores de calor intermedios, reactor multitubular de lecho fijo y, por último, reactor de lecho móvil donde el contenido del interior de la unidad se emplea para disipar el calor generado durante la reacción.

Sea cual sea el proceso elegido, las condiciones para el desarrollo de la reacción han sido analizadas y determinadas de manera que sean las más apropiadas para el sistema:

- Temperaturas comprendidas entre los 212-428 °F; si el catalizador es de níquel pueden alcanzarse los 482 °F sin riesgo de que se formen productos secundarios.
- Presiones que van desde 145-435 psi, pudiendo ser incluso superiores a los 580 psi.
- Relación de alimentación hidrogeno-hidrocarburo superiores a 6.

Como se ha mencionado con anterioridad, la clasificación de los procesos existentes para la obtención del producto de interés puede realizarse atendiendo a diversos criterios. Existen multitud de procesos destinados a la producción de ciclohexano basados en patentes desarrollados principalmente por industrias petroquímicas sólidas. A continuación, se va a hacer una clasificación de los mismos en base al estado de agregación en el que se encuentra el sistema en el interior del reactor.

4.1.2.1 – Procesos en Fase Líquida

A) – Hydrar Process (HBU nibon)

Se conoce como el primer proceso a escala industrial para la producción de ciclohexano. El sistema se compone de un reactor de lecho fijo con catalizador de platino soportado sobre una base de sal de litio, catalizador capaz de tolerar contenidos de azufre en la alimentación superiores a 30

ppm. El hidrogeno requerido debe someterse a un proceso de pretratamiento con sosa cáustica para eliminar el H_2SO_4 y el CO_2 presente en la corriente, así como a un proceso de metanación para recuperar el CO. La alimentación líquida que entra al reactor compuesta de benceno fresco y ciclohexano reciclado se mezcla con una corriente de hidrógeno fresco y reciclado, se precalienta y comprime hasta la temperatura y presión requeridas respectivamente para ser introducida en una serie de dos o tres reactores de lecho fijo donde se trabaja entre los 200-300 °C a 30 bar de presión. Tras la salida del reactor, la corriente producto se somete a una destilación flash para separar el producto de interés de una corriente gaseosa, y purgar esta última para su consiguiente recirculación. El control de la temperatura en la unidad de reacción se consigue recirculando una parte de la corriente de producto ya enfriada en el interior del reactor. Operando del modo descrito se alcanza una conversión prácticamente completa.

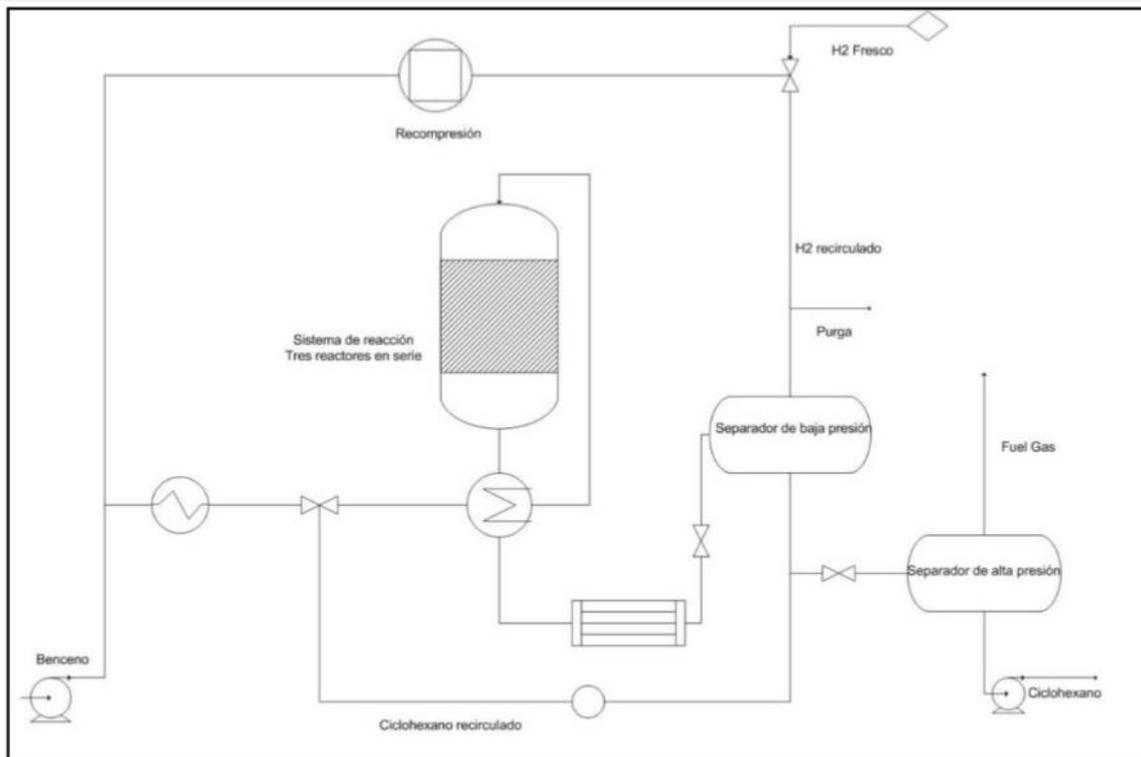


Imagen 12. Proceso Hydrar para la producción de ciclohexano (Chauvel A., Lefebvre, G., 1989)

B) – Proceso Sinclair/Engelhard (HA-84)

Está basado en un reactor de lecho fijo dotado de una camisa refrigerante donde se genera vapor de agua. El efluente procedente del reactor se introduce en un separador gas-líquido que permite recuperar la corriente gaseosa que no ha reaccionado y someter la de líquido a una segunda separación en el interior de una torre estabilizadora. Operando de este modo, se alcanza una pureza del 99,9% en peso de ciclohexano sin necesidad de recircular la corriente de producto que sale del

reactor. Si es necesario, sin embargo, trabajar con un gran exceso de hidrógeno.

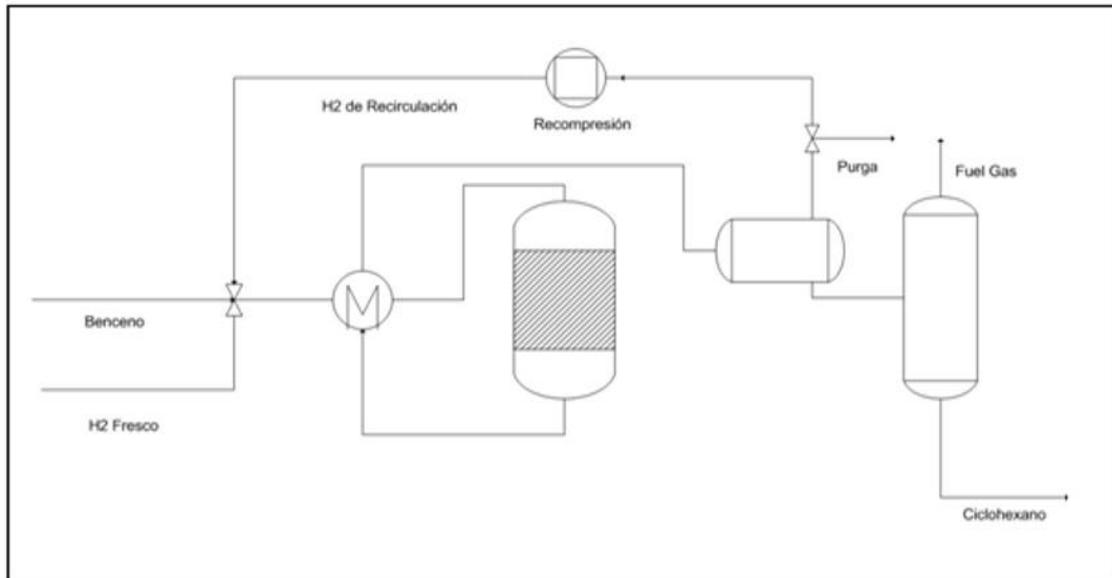


Imagen 13. Proceso HA-84 para la producción de Ciclohexano (*Hydrocarbon Processing*, 1981)

Estos dos procesos que se han descrito comparten en común el uso de catalizadores compuestos por metales nobles.

C) – Proceso IFP (Instituto Francés del Petróleo)

En este proceso el hidrógeno y el benceno se inyectan directamente sin precalentamiento al reactor, el cual contiene el catalizador en suspensión en ciclohexano líquido. El calor producido en la reacción se disipa por enfriamiento entre la suspensión del catalizador y el agua a presión. Esto se lleva a cabo pasando la suspensión de catalizador a altas velocidades a través de un intercambiador exterior por medio de una bomba de recirculación. Esta operación juega un papel muy importante al mantener el catalizador en suspensión. La expansión del agua de enfriamiento produce vapor de baja presión. La reacción de hidrogenación del benceno es completada en un segundo reactor donde se obtiene un producto con una pureza del 99,8%, siempre que el contenido de azufre en la alimentación sea bajo. A continuación, el efluente procedente de la unidad de reacción se dirige a un separador gas-líquido de alta presión y, por último, la corriente líquida se introduce en una torre estabilizadora para alcanzar la máxima pureza.

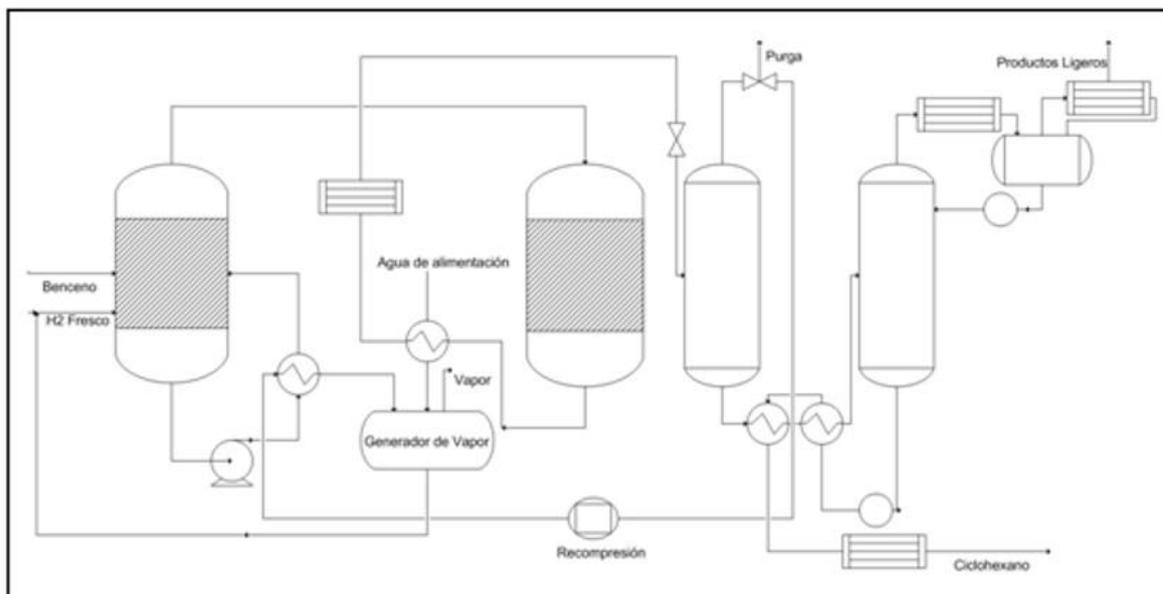


Imagen 14. Proceso IFP para la producción de Ciclohexano (Chauvel A., Lefebvre, G., 1989)

4.1.2.2 – Procesos en Fase Vapor

A) – Proceso Bexane

Se trata de un método desarrollado por la empresa Stamicarbon y basado en el empleo de dos reactores multitubulares que contienen catalizador de Platino y de Níquel respectivamente. La alimentación, precalentada previamente con el efluente proveniente del primer reactor, se introduce en el sistema a 30-35 bar de presión y 370 °C, y el efluente se dirige a su vez a la segunda unidad de reacción a una temperatura de 220 °C donde la reacción se completa. La pureza del producto final se sitúa en un 99,9% tras someterlo a las pertinentes operaciones de purificación y acondicionamiento.

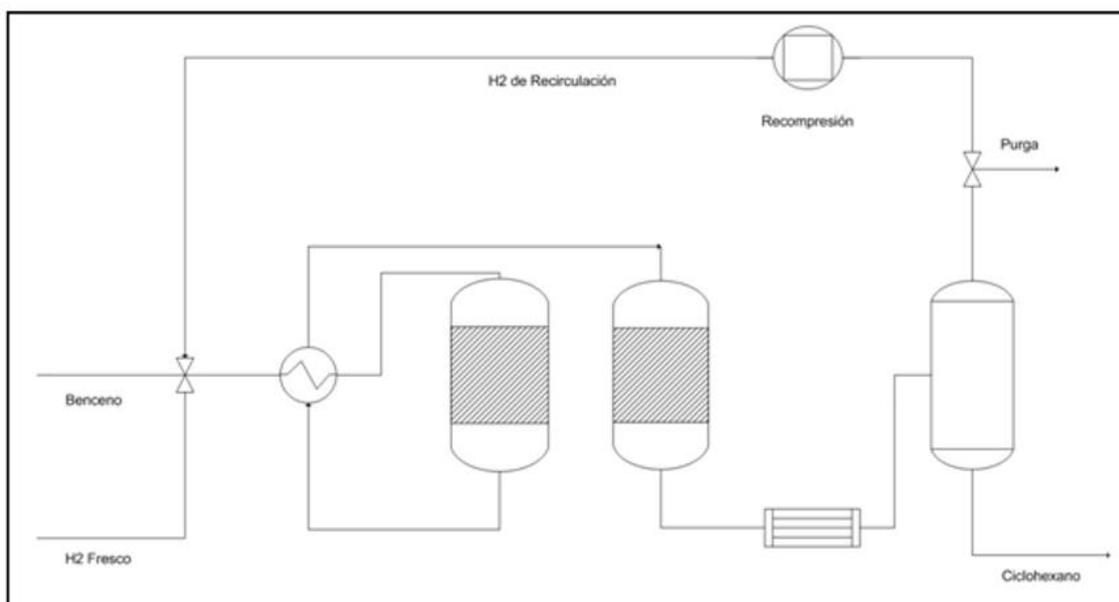


Imagen 15. Proceso Bexane para la producción de Ciclohexano (Hydrocarbon Processing, 1981)

B) – Proceso Hytoray

El sistema se compone de un reactor adiabático perfectamente diseñado para el correcto control de temperatura donde la conversión registrada es del 99,7%. El catalizador empleado, T-61, está basado en un metal noble. Hay que destacar que el consumo de hidrógeno para la reacción es bajo comparado con el resto de procesos. Tras la unidad de reacción, será necesario un acondicionamiento del producto separándolo de la fase gaseosa y, por último, someterlo a una purificación en columna estabilizadora.

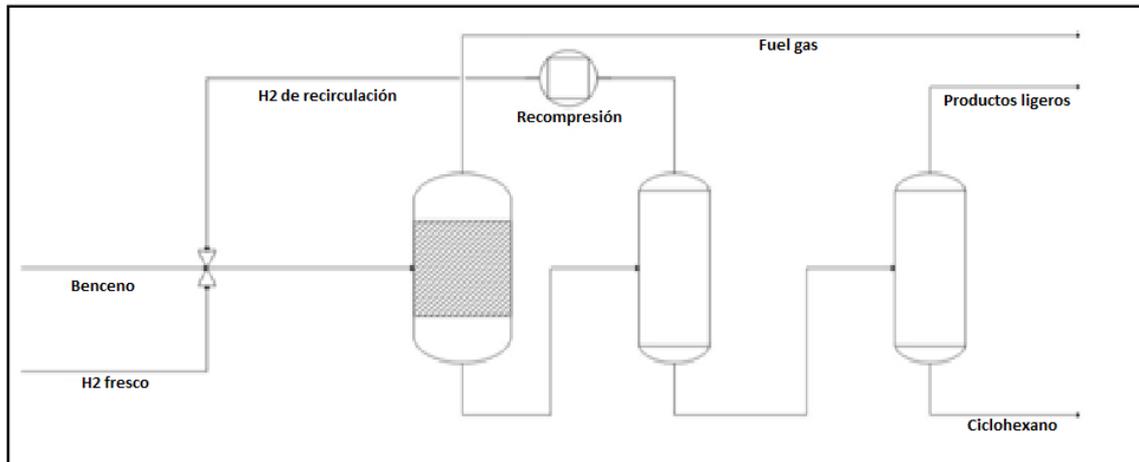


Imagen 16. Proceso Hytoray para la producción de Ciclohexano (Hydrocarbon Processing, 1981)

4.1.2.3 – Procesos en Fase Líquido-Vapor

A) – Proceso Arosat

Patentado por LUMMUS, se basa en una unidad de reacción que trabaja con una corriente líquida y otra gaseosa proveniente de la recirculación de la corriente de producto. El control del calor generado se produce por medio de un intercambio de calor entre el contenido del reactor y la alimentación fresca. Posteriormente, el efluente proveniente del reactor se somete a un proceso de separación y a una consiguiente purificación en torre estabilizadora.

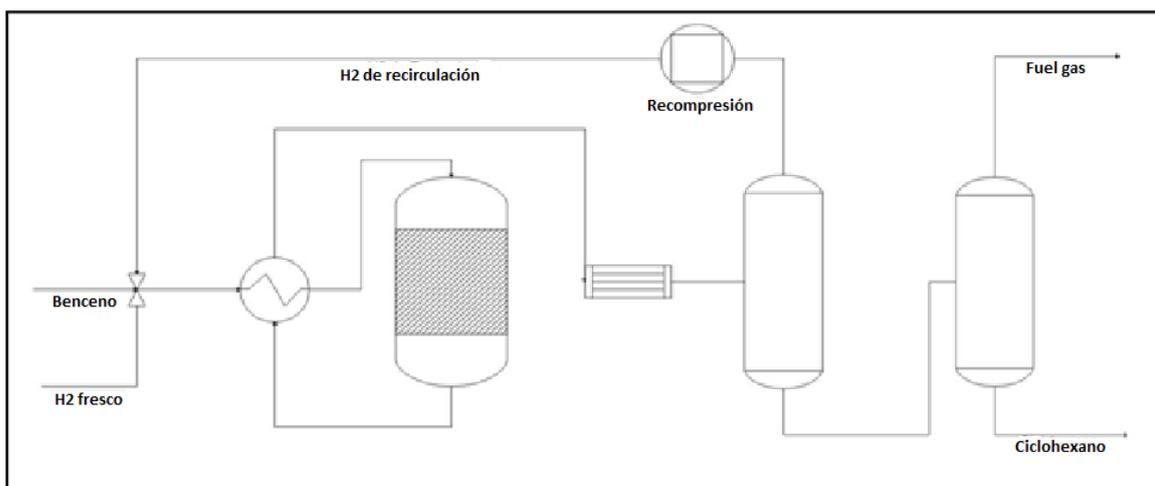


Imagen 17. Proceso Arosat para la producción de Ciclohexano (Hydrocarbon Processing, 1981)

B) – Proceso BP (British Petroleum)

Este sistema se compone de dos reactores de lecho fijo conectados en serie. En el primero de ellos, se alcanza una conversión del 95% y, en el segundo, gracias a la inyección de una nueva corriente de hidrógeno se completa la conversión prácticamente hasta el 100% y se controla el incremento de temperatura de la reacción exotérmica. Esta forma de operar en el sistema requiere trabajar con bajas presiones de hidrógeno obteniéndose una alta selectividad.

Los procesos que se han descrito están basados en técnicas desarrolladas durante la segunda mitad del Siglo XX. Con el fin de mejorar paulatinamente la calidad de los procesos de fabricación y del producto derivado de los mismos, estos métodos han evolucionado y sufrido modificaciones y, en la actualidad, el más difundido en las industrias petroquímicas para la producción de ciclohexano consta de dos reactores en serie provistos de catalizador de Níquel. En el primero de ellos, se trabaja a velocidades de reacción mayores alcanzándose una menor conversión. En el segundo, se completa la reacción casi al 100%, aunque sacrificando las velocidades de reacción. Tras la unidad de reacción, se lleva a cabo una purificación del producto en torre de separación con el fin de obtener la corriente líquida del producto de interés y la corriente gaseosa destinada a recirculación.

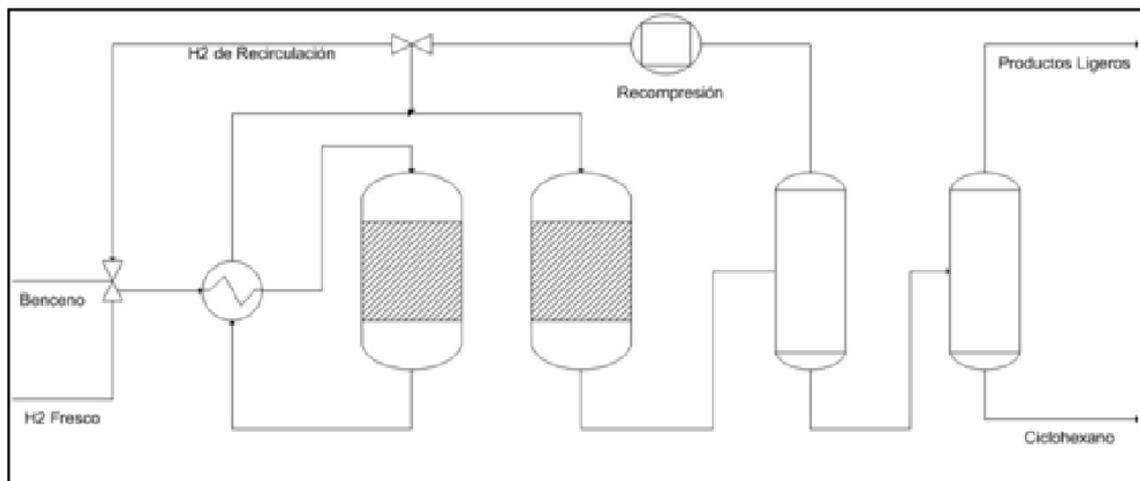


Imagen 18. Proceso BP para la producción de Ciclohexano (Hydrocarbon Processing, 1981)

4.1.3 – Saturación de olefinas

Los procesos basados en las reacciones de saturación de olefinas se caracterizan por ser reacciones sumamente rápidas y altamente exotérmicas. Así pues, mientras una reacción de desulfuración genera un calor de reacción de $1 \text{ Btu}\cdot\text{lb}^{-1}$ por cada 10 ft^3 de hidrógeno consumido, la saturación de olefinas genera esta misma cantidad de calor por cada 2 ft^3 de hidrógeno consumido. Este hecho, hace que sea realmente importante desarrollar un sistema adecuado de disipación del calor generado para poder controlar el régimen de temperatura alcanzado y evitar la formación de coque durante el proceso. Es por ello por lo que las diolefinas no deben hidrogenarse a temperaturas superiores a $200 \text{ }^\circ\text{C}$.

Se debe tener en cuenta, además, que las olefinas son compuestos no contenidos como tal en el crudo de petróleo por lo que será necesario obtenerlas en procesos térmicos y catalíticos posteriores.

4.2 Elección del proceso

A la hora de diseñar el proceso de producción más adecuado para la obtención del ciclohexano, lo primero que debe tenerse en cuenta es la materia prima de partida. Tal y como se ha descrito en el apartado anterior, son dos, las alternativas más importantes: obtener el ciclohexano a través de un proceso de separación de las fracciones de nafta pesada o por medio de la hidrogenación del benceno. La hidrogenación del benceno es, sin duda, el más difundido a nivel industrial, puesto que la separación de las naftas, actualmente, está orientada en su totalidad a los procesos de reformado de las gasolinas.

Por tanto, el método elegido para la producción de ciclohexano estará basado en la hidrogenación del benceno. Este proceso exige que la materia prima benceno posea una alta pureza. Hoy en día, la pureza de la materia prima no supone un impedimento para el desarrollo de la reacción puesto que se dispone de tecnologías suficientemente avanzadas que permiten obtener benceno de muy alta pureza.

Este proceso de hidrogenación del benceno comprenderá dos fases principales:

- Fase de reacción para la transformación de la materia prima en el proceso de interés.
- Proceso de purificación y acondicionamiento del producto final obtenido.

4.2.1 – Fase de reacción

Para seleccionar el sistema de reacción más adecuado deben contemplarse los siguientes aspectos:

- Estado de agregación de la mezcla reaccionante.
- Diseño del sistema de reacción.
- Comportamiento del lecho catalítico.
- Sistema de disipación de energía.

4.2.1.1 – Estado de agregación de la mezcla reaccionante

La hidrogenación del benceno puede llevarse a cabo en fase líquida o en fase vapor. Dependiendo de un estado de agregación u otro, cambiarán las condiciones del proceso. Los procesos desarrollados en fase vapor, más actuales, presentan las siguientes ventajas frente a los que se desarrollan en fase líquida:

- Favorecen la separación de sustrato y catalizador.
- Requieren menores tiempos de residencia para alcanzar una misma conversión. Estos tiempos menores permiten, que, pese a las altas temperaturas, se evite la isomerización del ciclohexano a metilciclopentano.

En base a estos argumentos, se opta por la elección de un proceso que permita desarrollar la reacción partiendo de una alimentación en fase gaseosa.

4.2.1.2 – Diseño del sistema de reacción

La complejidad de la reacción exige el empleo de un método de operación que, ante todo permita llegar a una situación óptima entre la conversión alcanzada en el equilibrio y la velocidad de reacción. Se recurre para ello la disposición de un reactor multitubular donde se trabajará a mayor temperatura y presión favoreciendo la velocidad de reacción a costa de alcanzar una conversión óptima.

4.2.1.3 – Comportamiento del lecho catalítico

El tipo de lecho a emplear se determinará en base al tamaño de las partículas de catalizador a emplear en el sistema, así como a la capacidad del mismo para paliar los problemas derivados de los perfiles de concentración y temperatura desarrollados en el seno del lecho.

Los lechos fijos presentan un perfil de temperaturas más acusado con respecto a los de lecho fluidizado, sin embargo, su funcionamiento es más sencillo. Basados en este hecho y, teniendo en cuenta que el tamaño de las partículas seleccionadas para la reacción (2,5-5 mm) se adecua a las especificaciones para las reacciones que se desarrollan en lechos fijos, se opta por el diseño de un reactor multitubular de lecho fijo.

4.2.1.4 – Sistema de disipación de energía

Es importante pensar en el diseño del sistema más adecuado para disipar la energía que se desprende durante el proceso. Para ello se dispondrá de un reactor multitubular de lecho fijo, que, para las mismas condiciones de operación, presentan una mayor área de transferencia para la disipación de la energía generada por la reacción exotérmica.

4.2.2 – Fase de purificación y acondicionamiento del producto

Desarrollado el proceso de reacción se obtiene una corriente de producto que es necesario purificar con el fin de obtener las especificaciones marcadas por el mercado para la comercialización del producto ciclohexano.

Esta purificación se acompañará de una primera etapa de separación gas-líquido en una columna flash, donde se eliminará la mayor parte de gases ligeros que no han reaccionado y que se encuentran contenidos en la corriente del producto. Parte de esta corriente líquida resultante de este proceso es la que se someterá a destilación en una columna de rectificación. El hecho de haber agotado casi en su totalidad la corriente de benceno permite purificar el producto final por medio de esta columna, donde al no existir benceno es posible llevar a cabo una destilación simple sin la aparición de azeótropos.

Por último, el producto obtenido tras la purificación se somete a un proceso de enfriamiento que permitirá acondicionarlo para su almacenamiento en depósitos.

4.2.3 – Conclusión

Dado a conocer el objeto del Proyecto, la situación actual del producto obtenido, así como la descripción de los métodos disponibles para llevar cabo el proceso, se está en condiciones de afirmar que el proyecto es viable técnicamente de acuerdo con el estado actual de las tecnologías empleadas para el diseño del mismo.

Capítulo 5: SIMULACIÓN DE LA PLANTA DE CICLOHEXANO

5.1 Simulación del proceso

Mediante el simulador de procesos Aspen Plus se ha llevado a cabo la simulación siguiendo el diagrama de flujo que se muestra a continuación. (Imagen 19)

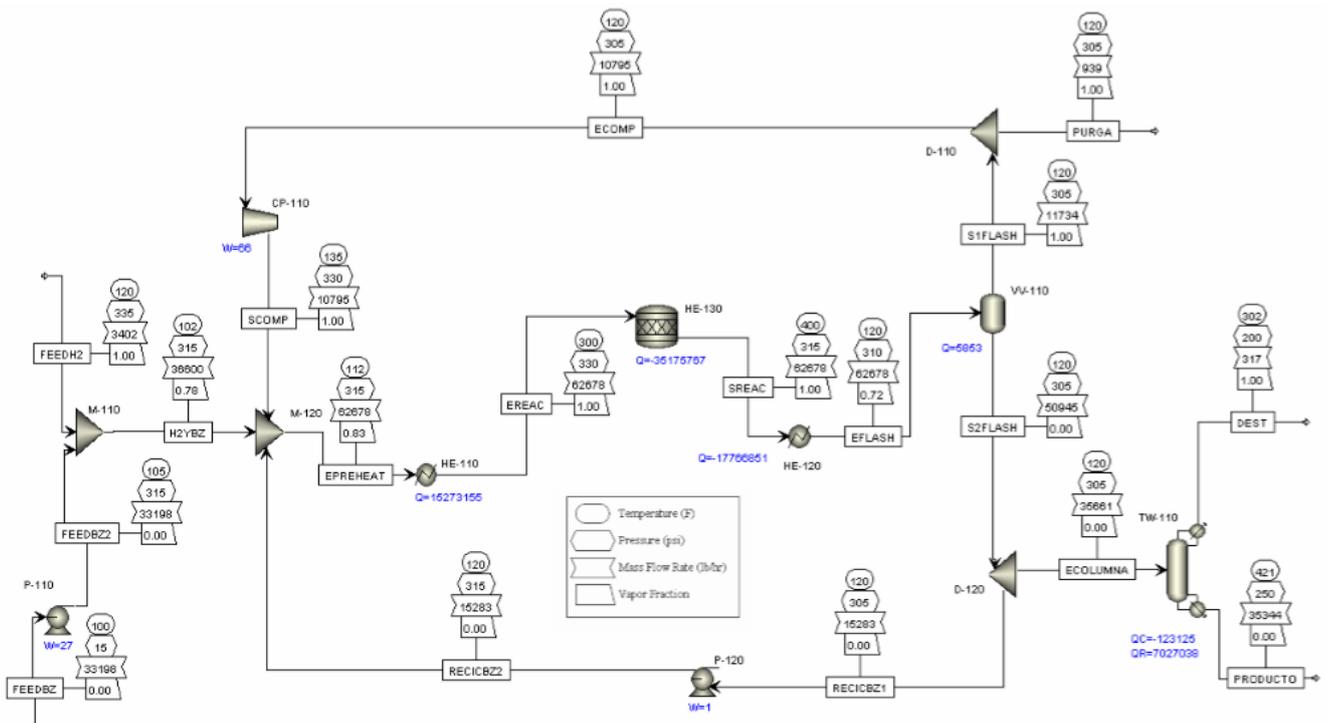


Imagen 19. Diagrama de flujo del proceso

Todas las condiciones del proceso vienen dictadas por la imagen mostrada a continuación (imagen 20), con la excepción de un error en las unidades de una de ellas que será corregido a la hora de simular el proceso, con el objeto de que los resultados del diagrama de flujo (temperatura, flujo másico, presión y fracción de vapor) sean los correctos.

Equipo	Especificaciones para el simulador	Equipo	Especificaciones para el simulador
D-110 D-120	Purga = 0.08 Fracción recirculada = 0.3	HE-140 HE-150 HV-110 P-130 P-140	
<u>Área de Reacción</u>		<u>Área de Almacenamiento</u>	
P-110	P en la descarga = 315 psi	T-110	
P-120	P en la descarga = 315 psi		
HE-110	P de operación = 330 psi T de salida = 300°F	Corrientes de entrada	Método = NRTL
HE-120	Caída de presión = -5 psi T de salida = 120°F	Alimentación de H ₂	Temperatura = 120 °F Presión = 335 psi Flujo = 1402 lbmol/hr Fracción mol de H ₂ = 0.975 Fracción mol de N ₂ = 0.005 Fracción mol de Metano = 0.02
HE-130	T de operación = 400 °F Caída de presión = -15 psi Conversión = 0.998 de C ₆ H ₆ -C ₆ H ₆ -3H ₂ --> C ₆ H ₁₂	Alimentación de C ₆ H ₆ (puro)	Temperatura = 100°F Presión = 15 psi Flujo = 425 lbmol/hr
VV-110	T de operación = 120 °F Caída de presión = -5 psi	Servicios auxiliares	
CP-110	P de salida = 330 psi Eficiencia politrópica = 0.8	Agua de enfriamiento	
<u>Área de Separación</u>		Vapor	
TW-110	Número de etapas = 15 Etapas de alimentación = 8 Condensador Parcial Presión etapa 1 = 200 psi Presión etapa 15 = 250 psi Reflujo = 1.2 Flujo en fondos = 420 lb/hr Eficiencia de plato = 0.5 (Murphree, etapa 2-15)	Energía eléctrica	

Imagen 20. Especificaciones

El error reside en la sección señalada de la imagen, las unidades deberían ser lbmol/hr si se desea llegar a los resultados mostrados en el diagrama de flujo. Una vez realizada la simulación se procederá a analizar los resultados de la corriente PRODUCTO del sistema, ya que es la corriente de ciclohexano. Los resultados se muestran en la siguiente tabla (tabla 11).

Tabla 11. Resultados producto

<i>Mole Flow lbmol/hr</i>	
<i>Hidrógeno</i>	5,18E-20
<i>Benceno</i>	0,5454548
<i>Metano</i>	4,09E-11
<i>Nitrógeno</i>	6,88E-14
<i>Ciclohexano</i>	419,4545
<i>Total Flow (lbmol/hr)</i>	420
<i>Total Flow (lb/hr)</i>	35344,44
<i>Total Flow (cuft/hr)</i>	1029,912
<i>Temperatura (F)</i>	421,3937
<i>Presión (psia)</i>	250
<i>Vapor Frac</i>	0
<i>Liquido Frac</i>	1
<i>Solido Frac</i>	0
<i>Entalpía (Btu/lbmol)</i>	-49099,61
<i>Entalpía (Btu/lb)</i>	-583,4534
<i>Entalpía (Btu/hr)</i>	-20622000

Se comprueba que los resultados coinciden con el diagrama de flujo. Al observar los flujos molares que contiene la corriente de producto se puede determinar que el ciclohexano producido contiene una pureza del 99.87%.

5.2 Evaluación económica

A continuación, se desea realizar una evaluación económica completa de la planta de producción de ciclohexano. Para ello se utilizará el programa de simulación y análisis económico "Aspen Process Economic Analyzer V8.0" con las siguientes especificaciones técnicas (imágenes 21 y 22). Como no se especificó la fecha estimada de la finalización de proyecto, se previó terminar la planta en 2 años desde la entrega del proyecto.

Equipo	Especificaciones para Aspen IPE	Equipo	Especificaciones para Aspen IPE
HE-140	$U = 100 \text{ Btu/hr ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F}$	D-110	
HE-150	$U = 100 \text{ Btu/hr ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F}$	D-120	
HV-110	Tiempo de retención = 18 min	<u>Área de Reacción</u>	
P-130	Equipos adicionales = 1	P-110	Equipos adicionales = 1
P-140	Equipos adicionales = 1	P-120	Equipos adicionales = 1
<u>Área de Almacenamiento</u>		HE-110	$U = 100 \text{ Btu/hr ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F}$
T-110	Tiempo de retención = 10 días Equipos adicionales = 1	HE-120	$U = 100 \text{ Btu/hr ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F}$
Corrientes de entrada		HE- 130	\$ = 5,000,000 dólares (1983) Mano de obra = 80,000 hrs
Alimentación de H_2		VV-110	Tiempo de retención = 3 min
Alimentación de C_6H_6 (puro)		CP-110	Equipos adicionales = 1
Servicios auxiliares		<u>Área de Separación</u>	
Agua de enfriamiento	Precio = 1.2×10^{-4} dolares/lb	TW-110	Tipo de plato = Sieve Espacio entre platos = 2 ft
Vapor	Precio = 0.0025 dolares/lb P = 400 psi		
Energía eléctrica	Precio = 0.08 dolares/kWhr		

Imagen 21. Especificaciones

Especificaciones para el Análisis Económico

Costo del capital (interés anual) = 15%
Salario de supervisor = 23 dólares/hr
Salario de operador = 17 dólares/hr
Contingencia del proceso = 30%
Tipo de proceso = Probado, típico y de control digital
Tipo de suelo = Arcilla blanda
Productividad = 50%
Vida económica de la planta = 15 años
Método de depreciación = Línea recta
Periodos para análisis = 16 años
Valor de rescate de la planta (Residual) = 20% del capital de inversión
Capital de trabajo = 25%
Gastos generales de la planta = 50%
Gastos generales y administrativos = 8%
Impuestos = 40%
Actualización de precios = 7% (excepto para el capital del proyecto, que es cero)
Tipo de planta = Procesamiento químico
Tipo de operación = Continua (24 horas/día)
Duración del periodo de arranque = 20 semanas
Fluidos de proceso = líquidos y gases
Precio del benceno = 0.18 dólares/lb
Precio del hidrogeno = 0.13 dólares/lb Precio del Ciclohexano = 0.3 dólares/lb
Agua de enfriamiento = 1.2×10^{-4} dólares/lb
Vapor (400 psi) = 0.0025 dólares/lb
Energía eléctrica = 0.08 dólares/kWh

Imagen 22. Especificaciones

El diagrama de flujo que ofrece este programa no incluye el tanque de almacenamiento por lo que habrá que agregarlo manualmente como se muestra a continuación (imagen 23).

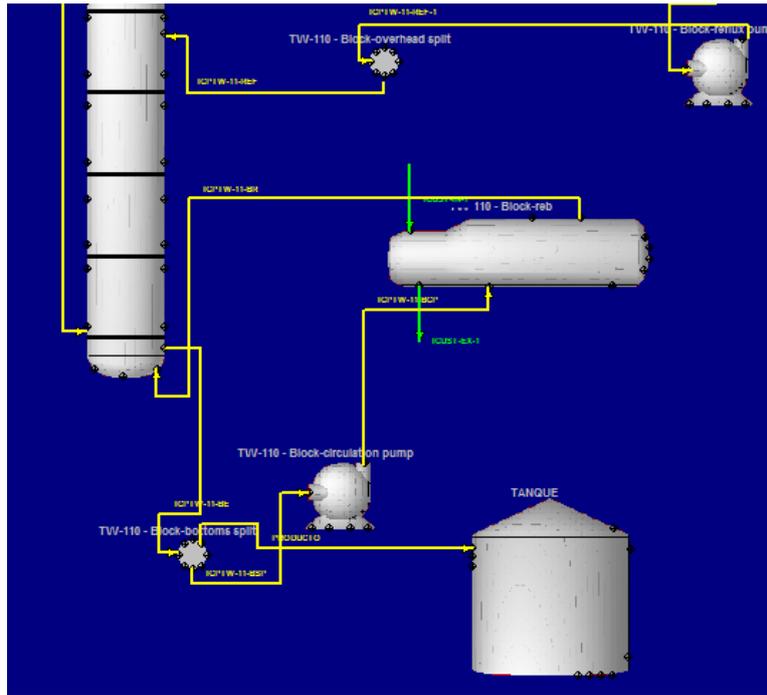


Imagen 23. Diagrama de flujo con tanque

En el momento que se pretende dimensionar uno de los intercambiadores de calor surge el problema (imagen 24).

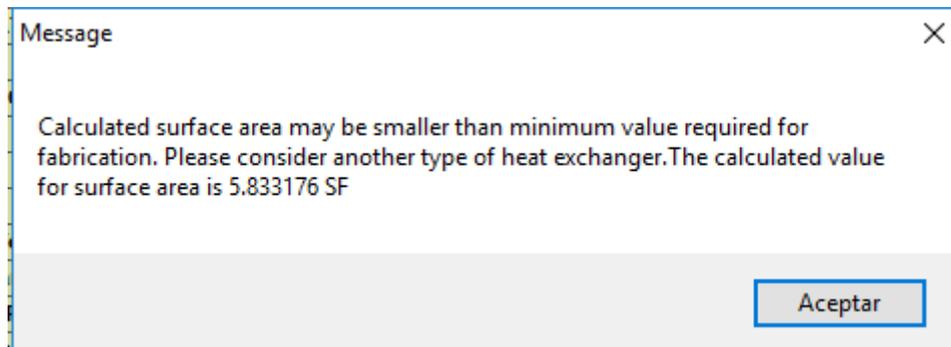


Imagen 24. Mensaje de error

Esto significa que el intercambiador es muy pequeño para el proceso por lo que habrá que elegir otro tipo. Después de haber elegido el equipo conveniente se procederá a instalar las corrientes de servicio auxiliares. Existe un problema al dimensionar el reactor, ya que en el simulador el reactor no puede dimensionarse si no hay líquido presente y las corrientes del mismo se encuentran en fase gas, por lo que será necesario agregar un nuevo reactor de precio mencionado anteriormente en las especificaciones técnicas. A la hora de simular la estimación de costes aparece un problema en la presión del tanque recientemente agregado. El diseño del tanque se basó en la presión de salida del ciclohexano, pero en la realidad se almacena a presión atmosférica por lo que habrá que reducir esa presión.

Una vez simulado de nuevo el proceso sin errores aparentes, se resumen y analizan los costos del mismo en los Anexos del documento del proyecto. El costo total del proyecto asciende a 32.649.500 dólares americanos.

Capítulo 6: LEGISLACIÓN Y NORMATIVA

6.1 Legislación

A continuación, se recoge la legislación aplicable en el presente proyecto:

- **Ley N° 24.557**, octubre 3 de 1995, sobre la prevención de riesgos laborales.
- **Resolución 231/96**, octubre 4 de 1996, sobre los aparatos sometidos a presión.
- **Ley N° 19.587**, febrero 5 de 1979, sobre la higiene y seguridad en el trabajo.
- **Decreto N° 351/79**, sobre seguridad y protección contra incendios y riesgo eléctrico.
- **Ley N° 25.675**, noviembre 26 de 2002, sobre la protección del medio ambiente.
- **Ley N° 26.011**, abril 25 de 2005, sobre contaminantes orgánicos persistentes.
- **Resolución 905/2015**, abril 23 de 2015, sobre superintendencia de riesgos del trabajo.
- **Resolución 3068/2014**, sobre riego en trabajos con alta tensión eléctrica.
- **Ley N° 24.065**, enero 16 de 1992, sobre el régimen de la energía eléctrica.
- **Resolución 85/2012**, enero 25 de 2012, sobre el ruido en un ambiente laboral.
- **Ley N° 11.544**, septiembre 12 de 1929, sobre la jornada de trabajo.
- **Ley N° 25.877**, marzo 18 de 2004, sobre el régimen laboral.
- **Ley N° 20.774**, mayo 13 de 1976, sobre el contrato de trabajo.

6.2 Normativa

En este apartado se lista la normativa que se aplicará al presente proyecto.

- Código ASME de diseño
- Norma API 650. Diseño y cálculo de tanques de almacenamiento a presión atmosférica. Catálogo de Normas UNE.
- Normas ANSI.
- Normas ISO.

Capítulo 7: BIBLIOGRAFÍA

<https://www.textoscientificos.com/polimeros/nylon/usos>

http://www.economia.gob.ar/peconomica/docs/SSPE_Cadenas%20de%20Valor_Petroquimica%20-%20Plastica.pdf

López Bahamonde, J.M., *Ingeniería Química*, 2000 MAY; Año XXXII (368); págs. 85-89

Primo Yúfera, Eduardo. *Química orgánica básica y aplicada*; 1994.

<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/656/Capitulo4.pdf>

Ruiz, CA, Jaksland, C & Gani, R, '*Energy efficiency in high purity cyclohexane production*'; 1998

Von H. A. Wittcoff und B. G. Reuben. John Wiley & Sons, *Industrial Organic Chemicals*, New York; 1996.

<http://www.lenntech.es/periodica/elementos/n.htm>

<http://herramientas.educa.madrid.org/tabla/6usos/n6.html>

<http://www.ciqyp.org.ar/Portals/0/noticias/2014/09%20sep/La%20Industria%20Petroqu%C3%ADmica%20Argentina%20.pdf>

<http://www.worldlistmania.com/list-of-major-oil-refineries-in-argentina/>

http://www.uba.ar/archivos_secyt/image/Monograf%C3%ADa%20IPB%2002.pdf

<https://es.climate-data.org/location/1207/>

<https://es.climate-data.org/location/1918/>

Aspen Process Economic Analyzer V8.0

Aspen Plus V8.0

ANEXOS

ANEXO 1 – Evaluación económica de los equipos al detalle

En el siguiente capítulo del anexo se realizará la evaluación de cada equipo individual de la planta. Se separarán los equipos en base a 3 zonas del proceso de producción de planta, las cuales son:

- Almacenamiento
- Reacción
- Separación

1.1– Sección de almacenamiento

Esta sección pertenecerá únicamente al tanque de almacenamiento donde, se almacenará todo el producto. Los datos económicos de éste se recogen en la siguiente tabla (tabla 12).

Tabla 12. Evaluación económica tanque

<i>Ítem</i>	<i>Material(USD)</i>	<i>Mano de obra(USD)</i>	<i>Horas</i>
Equipo y configuración	1605400.	0.	0
Tuberías	139829.	94147.	3202
Civil	0.	0.	0
Acero estructural	27419.	11708.	451
Instrumentación	12385.	11481.	381
Circuitos eléctricos	4433.	6206.	213
Aislamiento	324873.	490356.	21733
Pintura	27675.	159704.	6999
Subtotal	2142014	773602	32979

Total material y mano de obra= **2915600 USD**

1.2 – Sección de reacción

En la sección de reacción se incluirán los siguientes equipos y se procederá a la evaluación económica de cada uno de ellos:

- P-110 Bomba de Benceno
- P-120 Bomba de Hidrógeno
- HE-110 Intercambiador de calor 1
- HE-120 Intercambiador de calor 2
- HE-130 Reactor
- VV-110 Hervidor
- CP-110 Compresor
- D-110 Separador 1
- D-120 Separador 2
- M-110 Mezclador de las materias primas
- M-120 Mezclador reciclo

1.2.1 – P-110 Bomba de Benceno

Tabla 13. Evaluación económica P-110

Ítem	Material(USD)	Mano de obra(USD)	Horas
Equipo y configuración	86400.	10873.	355
Tuberías	19957.	21229.	711
Civil	0.	0.	0
Acero estructural	0.	0.	0
Instrumentación	15907.	9650.	319
Circuitos eléctricos	2476.	5846.	200
Aislamiento	3892.	8311.	368
Pintura	386.	2036.	91
Subtotal	129018	57945	2044

Total material y mano de obra= **187000 USD**

1.2.2 – P-120 Bomba de Hidrógeno

Tabla 14. Evaluación económica P-120

Ítem	Material(USD)	Mano de obra(USD)	Horas
Equipo y configuración	9000.	1227.	40
Tuberías	11859.	25403.	847
Civil	0.	0.	0
Acero estructural	0.	0.	0
Instrumentación	13625.	9650.	319
Circuitos eléctricos	2407.	5808.	198
Aislamiento	3688.	8017.	355
Pintura	385.	2229.	100
Subtotal	40964	52334	1859

Total material y mano de obra= **93300 USD**

1.2.3 – HE-110 Intercambiador de calor 1

Tabla 15. Análisis económico HE-110

Ítem	Material(USD)	Mano de obra(USD)	Horas
Equipo y configuración	27100.	2233.	77
Tuberías	31939.	27559.	925
Civil	0.	0.	0
Acero estructural	0.	0.	0
Instrumentación	11214.	7713.	256
Circuitos eléctricos	0.	0.	0
Aislamiento	8924.	11937.	528
Pintura	620.	3147.	140
Subtotal	79797	52589	1926

Total material y mano de obra= **132400 USD**

1.2.4 – HE-120 Intercambiador de calor 2

Tabla 16. Evaluación económica HE-120

Ítem	Material(USD)	Mano de obra(USD)	Horas
Equipo y configuración	46700.	2233.	77
Tuberías	42705.	31571.	1060
Civil	0.	0.	0
Acero estructural	0.	0.	0
Instrumentación	11579.	7713.	256
Circuitos eléctricos	0.	0.	0
Aislamiento	4689.	6996.	310
Pintura	1419.	5815.	261
Subtotal	107092	54328	1964

Total material y mano de obra= **161400 USD**

1.2.5 – HE-130 Reactor

En este caso el costo fue proporcionado por el usuario, por lo que la evaluación económica únicamente muestra ese valor.

Tabla 17. Análisis económico HE-130

Ítem	Material(USD)	Manpower(USD)	Horas
Subtotal	5000000	2453280	80000

Total material y mano de obra= **7453300 USD**

1.2.6 – VV-110 Hervidor

Tabla 9. Evaluación económica VV-110

Ítem	Material(USD)	Mano de obra(USD)	Horas
Equipo y configuración	24100.	1533.	50
Tuberías	18682.	25547.	855
Civil	0.	0.	0
Acero estructural	7591.	2520.	90
Instrumentación	25781.	10257.	338
Circuitos eléctricos	1093.	1345.	46
Aislamiento	0.	0.	0
Pintura	1418.	5711.	259
Subtotal	78665	46913	1638

Total material y mano de obra= **125600 USD**

1.2.7 – CP-110 Compresor

Tabla 10. Evaluación económica CP-110

Ítem	Material(USD)	Mano de obra(USD)	Horas
Equipo y configuración	981400.	13344.	438
Tuberías	26144.	26154.	877
Civil	0.	0.	0
Acero estructural	0.	0.	0
Instrumentación	43811.	49709.	1640
Circuitos eléctricos	4439.	11948.	408
Aislamiento	0.	0.	0
Pintura	1243.	5148.	233
Subtotal	1057037	106303	3596

Total material y mano de obra= **1163300 USD**

1.2.8 – D-110, D-120, M-110 y M-120

Son mezcladores y separadores por lo que el costo es nulo ya que su única función es separar o mezclar las corrientes que les llegan. El único costo es el de las tuberías ya analizado previamente.

1.3 – Sección de separación

En la sección de separación se incluirán los siguientes equipos y se procederá a la evaluación económica de cada uno de ellos:

- TW-110 Columna de destilación
- HE-140 Condensador
- HE-150 Rehervidor
- P-130 Bomba reflujo
- P-140 Bomba recirculación
- HV-110 Acumulador del condensador
- D-130 Separador 3
- D-140 Separador 4

1.3.1 - TW-110 Columna de destilación

Tabla 11. Evaluación económica TW-110

Ítem	Material(USD)	Mano de obra(USD)	Horas
Equipo y configuración	124600.	6318.	206
Tuberías	43687.	43887.	1475
Civil	0.	0.	0
Acero estructural	14263.	5049.	181
Instrumentación	57449.	46498.	1524
Circuitos eléctricos	2872.	2870.	99
Aislamiento	17310.	26668.	1180
Pintura	1242.	5771.	259
Subtotal	261423	137061	4924

Total material y mano de obra= **398500 USD**

1.3.2 - HE-140 Condensador

Tabla 21. Evaluación económica HE-140

Ítem	Material(USD)	Mano de obra(USD)	Horas
Equipo y configuración	1600.	1543.	53
Tuberías	4974.	23743.	795
Civil	0.	0.	0
Acero estructural	0.	0.	0
Instrumentación	8974.	7612.	252
Circuitos eléctricos	0.	0.	0
Aislamiento	1669.	3091.	137
Pintura	615.	3099.	140
Subtotal	17832	39088	1377

Total material y mano de obra= **56900 USD**

1.3.3 - HE-150 Rehervidor

Tabla 22. Evaluación económica HE-150

Ítem	Material(USD)	Mano de obra(USD)	Horas
Equipo y configuración	126500.	4315.	148
Tuberías	16504.	26471.	882
Civil	0.	0.	0
Acero estructural	0.	0.	0
Instrumentación	18551.	12999.	429
Circuitos eléctricos	0.	0.	0
Aislamiento	9355.	15805.	700
Pintura	459.	2513.	112
Subtotal	171369	62103	2271

Total material y mano de obra= **233500 USD**

1.3.4 - P-130 Bomba reflujo

Tabla 12. Evaluación económica P-130

Ítem	Material(USD)	Mano de obra(USD)	Horas
Equipo y configuración	8800.	1227.	40
Tuberías			
Civil	4778.	23083.	771
Acero estructural	0.	0.	0
Instrumentación	11367.	9650.	319
Circuitos eléctricos	2407.	5808.	198
Aislamiento	2828.	7529.	333
Pintura	343.	2049.	92
Subtotal	30523	49346	1753

Total material y mano de obra= **79900 USD**

1.3.5 - P-140 Bomba recirculación

Tabla 24. Evaluación económica P-140

Ítem	Material(USD)	Mano de obra(USD)	Horas
Equipo y configuración	12200.	1822.	59
Tuberías			
Civil	29446.	24970.	838
Acero estructural	0.	0.	0
Instrumentación	18057.	9650.	319
Circuitos eléctricos	2407.	5808.	198
Aislamiento	7352.	11669.	516
Pintura	486.	2531.	113
Subtotal	69948	56450	2043

Total material y mano de obra= **126400 USD**

1.3.6 - HV-110 Acumulador del condensador

Tabla 25. Evaluación económica HV-110

Ítem	Material(USD)	Mano de obra(USD)	Horas
Equipo y configuración	4900.	1530.	50
Tuberías	8321.	23171.	772
Civil	0.	0.	0
Acero estructural	0.	0.	0
Instrumentación	14474.	9688.	319
Circuitos eléctricos	0.	0.	0
Aislamiento	2784.	5731.	253
Pintura	363.	2083.	93
Subtotal	30842	42203	1487

Total material y mano de obra= **73000 USD**

1.3.7 - D-130, D-140 Separador 3 y 4

El costo de los separadores resulta nulo por la misma razón descrita anteriormente en la fase de separación.

1.4 – Costo total

Los costos totales de equipos por secciones serán los siguientes:

Tabla 26. Costo sección almacenamiento

Sección de almacenamiento	
Equipo	Costo(USD)
Tanque	2915600

Tabla 27. Costo sección de reacción

Sección de reacción	
Equipo	Costo(USD)
<i>P-110 Bomba de Benceno</i>	187000
<i>P-120 Bomba de Hidrógeno</i>	93300
<i>HE-110 Intercambiador de calor 1</i>	132400
<i>HE-120 Intercambiador de calor 2</i>	161400
<i>HE-130 Reactor</i>	7453300
<i>VV-110 Hervidor</i>	125600
<i>CP-110 Compresor</i>	1163300
Total	9316300

Tabla 28. Costo sección separación

Sección de separación

Equipo	Costo(USD)
<i>TW-110 Columna de destilación</i>	398500
<i>HE-140 Condensador</i>	56900
<i>HE-150 Rehervidor</i>	233500
<i>P-130 Bomba reflujo</i>	79900
<i>P-140 Bomba recirculación</i>	126400
<i>HV-110 Acumulador del condensador</i>	73000
Total	968200

Tabla 29. Costos totales

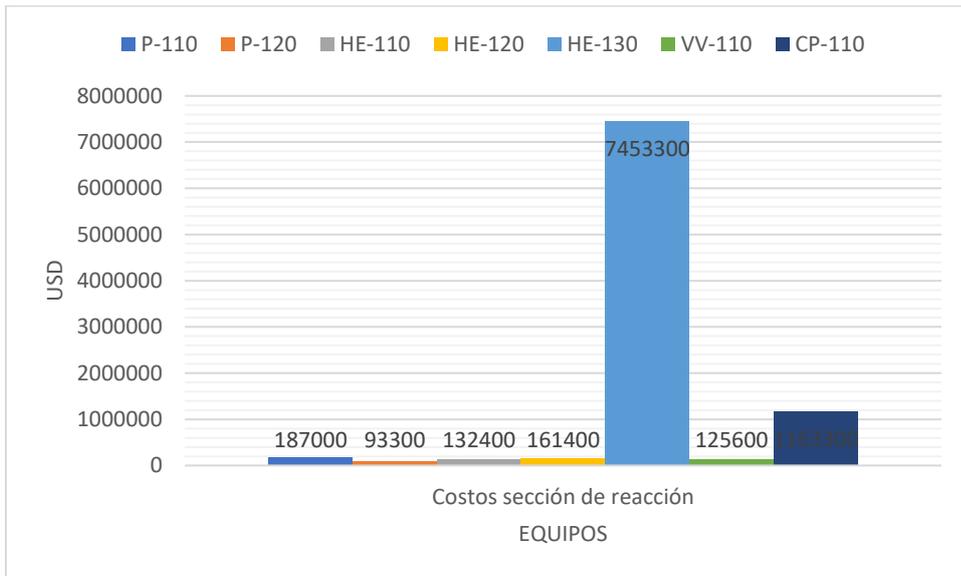
Secciones	Costo(USD)
<i>Sección de almacenamiento</i>	2915600
<i>Sección de reacción</i>	9316300
<i>Sección de separación</i>	968200
Total	13200100

La suma del costo total de todos los equipos asciende a **13200100 USD**.

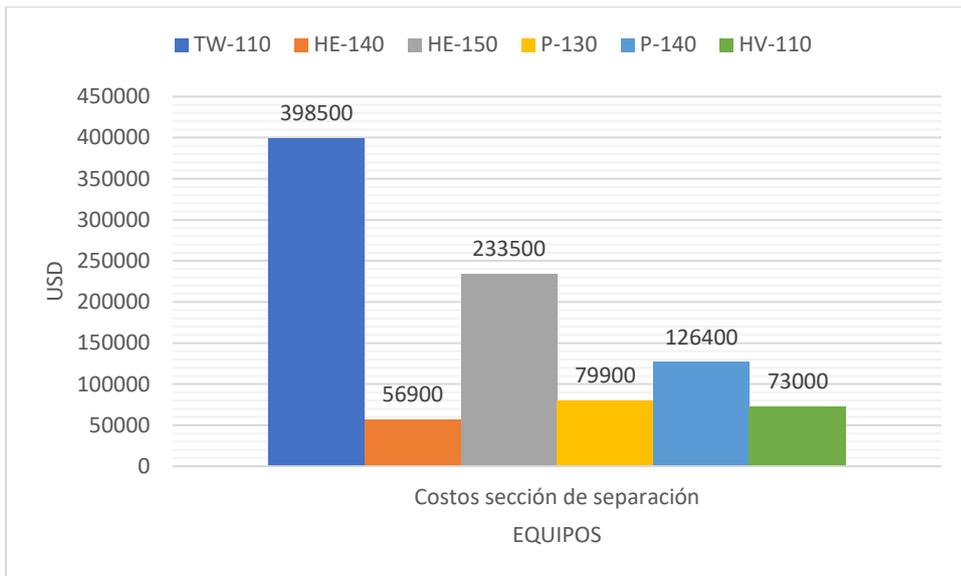
Se adjuntan unos gráficos en referencia a cada equipo y secciones.

- a) Gráfico 1 pertenece a la sección de reacción.
- b) Gráfico 2 pertenece a la sección de separación
- c) Gráfico 3 pertenece a los costes totales.

Gráfica 1. Sección de reacción



Gráfica 2. Sección de separación



Gráfica 3. Costos totales



Analizando las gráficas se comprueba que la sección de reacción es la que mayor coste implica en el proyecto, suponiendo un 70% del costo total, seguido de un 22% en el coste de almacenamiento y un 8% los costos de separación. Dentro de la sección de reacción, el equipo de reacción supone un 80% del costo de dicha sección.

Como era de esperar, el reactor del proceso supone la mayor parte de los costos de inversión en los equipos.

ANEXO 2 – Evaluación económica y vida del proyecto

En el siguiente capítulo del anexo se desarrollará la evaluación económica del proyecto completo, abordando distintos aspectos del mismo.

2.1 – Periodo de tiempo

Tabla 30. Periodo de tiempo del proyecto

<i>Periodo de tiempo</i>	
<i>Horas de funcionamiento</i>	8000 h/año
<i>Numero semanas</i>	52 sem/año
<i>Numero años</i>	16

2.2 – Programación

Tabla 31. Programación del proyecto

Programación	
<i>Fecha de inicio</i>	01/07/2017
<i>Duración periodo de inicio</i>	20 semanas
<i>Duración fase de construcción</i>	27 semanas
<i>Fecha finalización del proyecto</i>	10/07/2018

2.3 – Parámetros puesta en marcha

Tabla 32. Parámetros puesta en marcha

Puesta en marcha		
<i>Gastos de funcionamiento</i>	25	%/periodo
<i>Costos Laborales Operativos</i>	25	%/periodo
<i>Gastos Generales de la Planta</i>	50	%/periodo
<i>Costos administrativos</i>	8	%/periodo

2.4 – Parámetros generales de inversión

Tabla 33. Parámetros generales de inversión

Parámetros generales de inversión		
<i>Tasa de impuesto</i>	40	%/periodo
<i>Tasa de interés</i>	15	%/periodo
<i>Vida Económica del Proyecto</i>	15	periodo
<i>Valor rescate</i>	20	porcentaje
<i>Método de depreciación</i>	Línea recta	

2.5 – Resumen del capital del proyecto

Tabla 34. Resumen del capital del proyecto

Resumen del capital del proyecto		
<i>Equipo comprado</i>	USD	8.227.500,00
<i>Configuración del equipo</i>	USD	2.501.478,80
<i>Tuberías</i>	USD	847.810,10
<i>Civil</i>	USD	9.263,00
<i>Acero</i>	USD	68.550,00
<i>Instrumentación</i>	USD	877.485,70
<i>Electricidad</i>	USD	868.263,30
<i>Aislamiento</i>	USD	983.475,20
<i>Pintura</i>	USD	238.491,90
<i>Otros</i>	USD	8.785.801,00
<i>Subcontratos</i>	USD	0
<i>Administración</i>	USD	640.263,60
<i>Cuota del contrato</i>	USD	1.066.687,40
<i>Escalada</i>	USD	0
<i>Contingencias</i>	USD	7.534.520,50
Costo total del proyecto	USD	32.649.590,50

2.6 – Resumen ingenieril

Tabla 35. Resumen ingenieril

Resumen ingenieril		
<i>Ingeniería básica</i>	USD	557.100,00
<i>Ingeniería de detalle</i>	USD	911.500,00
<i>Adquisición de materiales</i>	USD	301.000,00
<i>Oficina en casa</i>	USD	296.400,00
Costo Total de Diseño, Ing, Compras	USD	2.066.000,00

2.7 – Costos materias primas y venta de productos

Tabla 36. Costos materias primas y venta de productos

Costos materias primas y venta de productos		
<i>Costo de materias</i>	USD/h	6.417,88
<i>Costo total de materias primas</i>	USD/año	51.343.013,53
<i>Ventas de productos</i>	USD/h	10.603,20
<i>Total Productos Ventas</i>	USD/año	84.825.600,00
<i>Nombre del producto principal</i>	Ciclohexano	
<i>Producción producto principal</i>	LB/H	35.344,00
<i>Producto principal Costo unitario</i>	USD/LB	0,30
<i>Producción del producto principal por período</i>	LB/año	282.752.000,00
<i>Ventas principales del producto</i>	USD/año	84.825.600,00
<i>Ventas de subproductos</i>	USD/año	0

2.8 – Costes de trabajo y mantenimiento

Tabla 13. Costes de trabajo y mantenimiento

Costes de trabajo y mantenimiento		
<i>Mano de obra operante</i>		
<i>Operadores por cambio</i>		3,00
<i>Costo unitario</i>	USD/Operador/h	17,00
<i>Costo total de mano de obra</i>	USD/período	408.000,00
<i>Mantenimiento</i>		
<i>Costo Total de Mantenimiento</i>	USD/período	111.000,00
<i>Supervisión</i>		
<i>Supervisores por turno</i>		1,00
<i>Costo unitario</i>	USD/Supervisor/H	23,00
<i>Costo total de la supervisión</i>	USD/período	184.000,00

2.9 – Resumen de resultados del proyecto

Tabla 14. Resumen de resultados del proyecto

Resumen de resultados del proyecto		
<i>Costo total del capital del proyecto</i>	32.649.590,50	Coste
<i>Costo total de materias primas</i>	51.343.013,53	USD/periodo
<i>Total Productos Ventas</i>	84.825.600,00	USD/periodo
<i>Costo Total de Mano de Obra y Mantenimiento</i>	703.000,00	USD/periodo
<i>Coste Total de Utilidades</i>	1.580.646,18	USD/periodo
<i>Costo Operativo Total</i>	58.456.252,49	USD/periodo
<i>Costo Laboral Operativo</i>	592.000,00	USD/periodo
<i>Costo de mantenimiento</i>	111.000,00	USD/periodo
<i>Cargos de funcionamiento</i>	148.000,00	USD/periodo
<i>Sobrecarga de planta</i>	351.500,00	USD/periodo
<i>Subtotal Costo Operativo</i>	54.126.159,71	USD/periodo
<i>Costos administrativos</i>	4.330.092,78	USD/periodo

2.10 – Resumen económico de la inversión

Tabla 15. Resumen económico de la inversión

INVERSIÓN	VALOR	
<i>Costo total del capital del proyecto</i>	32.649.590,50	USD
<i>Costo operaciones totales</i>	58.456.252,49	USD/año
<i>Costo de materias primas</i>	51.343.013,53	USD/año
<i>Costo servicios públicos</i>	1.580.646,18	USD/año
<i>Ventas totales de producto</i>	84.825.600,00	USD/año
<i>Tasa de rendimiento deseada</i>	15	%/año

Analizados todos los costes del proyecto se concluye que a los 5 años y 4 meses de la construcción de la planta ésta empieza a devolver el capital invertido. Debido a que la duración de la planta se estima en 16 años resulta un proyecto rentable para llevarlo a la práctica.