PLANTA DE PRODUCCIÓN DE ETILBENCENO

GRADO DE INGENIERÍA QUÍMICA

Irene Benítez | Antonio Funes | Eduardo Larrousse

María Lozano | Arnau Maestre | Joel Méndez

Judith Royo

Curso 2022/2023
Tutor: Josep A. Torá
Grupo 4

PLANTA DE PRODUCCIÓN DE ETILBENCENO

CAPÍTULO I: ESPECIFICACIONES

Irene Benítez Antonio Funes Eduardo Larrousse

María Lozano Arnau Maestre Joel Méndez

Judith Royo

Curso 2022/2023
Tutor: Josep A. Torá
Grupo 4

ÍNDICE

1.1 Definición del proyecto 5
1.1.1 Localización de la planta 5
1.1.1.1 Parámetros de edificación de la planta y plano de la parcela 5
1.1.1.2 Servicios disponibles en la planta 7
1.1.1.3 Comunicación y accesibilidad 7
1.2. Métodos de obtención del etilbenceno 15
1.2.1. Alquilación catalizada por AlCl3 16
1.2.2. Alquilación catalizada por zeolitas en fase vapor 17
1.2.3. Alquilación catalizada por zeolitas en fase líquida 18
1.2.4. Alquilación catalizada por zeolitas en fase mixta 19
1.3. Características fisicoquímicas de los componentes 19
1.3.1. Benceno 20
1.3.2. Etileno 21
1.3.3. Metano 22
1.3.4. Etano 23
1.3.5. Tolueno 24
1.3.6. Etilbenceno 25
1.3.7. Dietilbenceno 25
1.3.8. Propileno 26
1.4. Descripción del proceso 27
1.4.1. Diagrama de bloques 27
1.4.2. Descripción detallada del proceso 28
1.4.2.1. Elección del método de producción 28
1.4.2.2. Entrada y acondicionamiento de reactivos 28
1.4.2.3. Reacción de alquilación y transalquilación 28
1.4.2.4. Operaciones de separación 29
1.4.3. Balance de materia 30
1.4.4. Diagrama de proceso 34
1.5. Constitución de la planta 35
1.5.1. Plano de la planta 35
1.5.2. Descripción de las áreas 36
1.5.2.1. Área 100 36
1.5.2.2. Área 200 36
1.5.2.3. Área 300 38
1.5.2.4. Área 400 38
1.5.2.5. Área 500 38
1.5.2.6. Área 600 38
1.5.2.7. Área 700 39

1.5.2.8. Área 800 39
1.5.2.9. Área 900 39
1.5.2.10. Área 1000 39
1.5.2.11. Área 1100 39
1.5.2.12. Área 1200 39
1.5.2.13. Área 1300 40
1.5.2.14. Área 1400 40
1.6. Servicios requeridos de la planta 40
1.6.1. Agua de red 40
1.6.2 Agua contra incendios 41
1.6.3 Agua de refrigeración 41
1.6.4. Aire comprimido 43
1.6.5. Amoniaco 44
1.6.6. Electricidad 45
1.6.7. Gas natural 45
1.6.8. Nitrógeno 46
1.6.9. Vapor de agua 47
1.7 Programación temporal 48
1.8 Bibliografía 50

1.1 Definición del proyecto

El objetivo principal de este proyecto consiste en estudiar la viabilidad de una planta de producción en continuo de 350.000 Tn/año de etilbenceno mediante la alquilación del benceno con el etileno, así como comprender y diseñar una planta de producción de dicho componente.

En este apartado se hará un esbozo de tanto la localización, servicios y dimensionamientos de la planta, además de las características físicas de los reactivos que se van a utilizar, como la del producto y los subproductos que se generarán en el proceso de producción del etilbenceno.

1.1.1 Localización de la planta

La planta química EB production se sitúa en un terreno ficticio del Polígono Industrial Gases Nobles, en el término municipal de Tarragona, el cual pertenece a la comarca del Tarragonés, cuya província es Tarragona. A continuación, en la *Figura 1* se puede observar la situación geográfica del Tarragonés dentro de Cataluña.

Figura 2: Localización del Tarragonés en Cataluña

1.1.1.1 Parámetros de edificación de la planta y plano de la parcela

Como se ha comentado anteriormente, la planta está ubicada en el polígono Gases Nobles de Tarragona, concretamente, está delimitada por las avenidas Kriptó y Neó y por las calles Heli y Argó, ocupando un terreno de 53235 m² como puede observarse en la *Figura 2.*

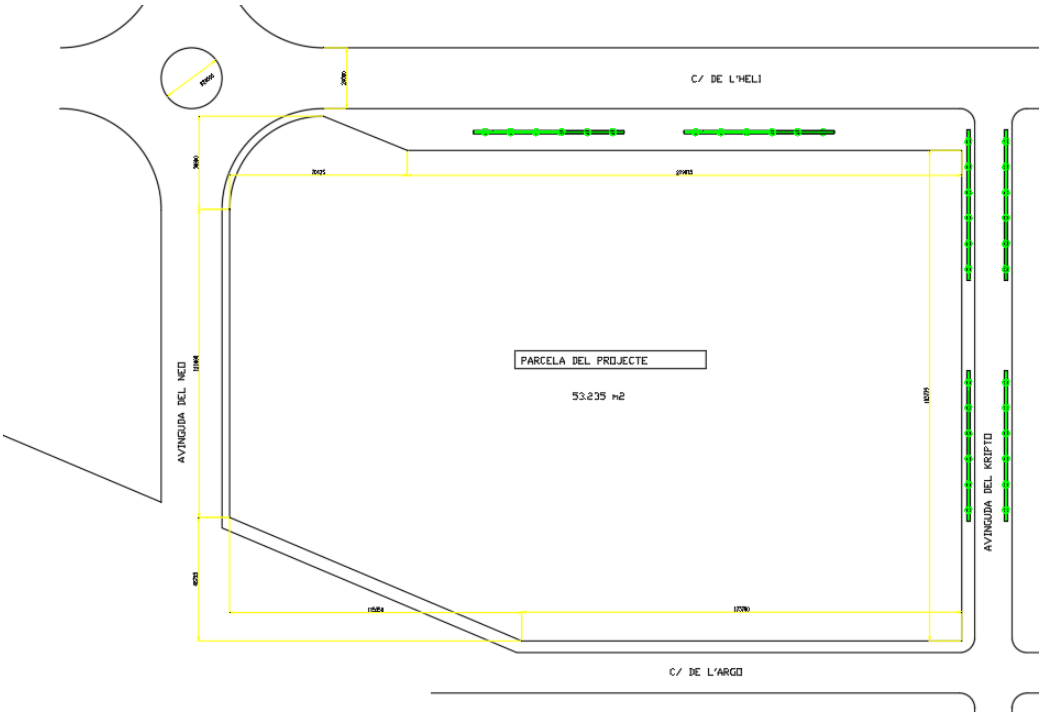


Figura 2: Plano de la parcela antes de construir

Como cualquier terreno, debe cumplir con los parámetros de edificación siguiendo la normativa urbanística del municipio al que pertenece, en este caso a Tarragona. A continuación, en la *Tabla 1,* se han recogido dichos parámetros:

Tabla 1: Parámetros de edificación según la normativa urbanística

EDIFICABILIDAD	1,5 m^2 techo / m^2 suelo
OCUPACIÓN MÁXIMA DE PARCELA	75%
OCUPACIÓN MÍNIMA DE PARCELA	20% de la superficie de ocupación máxima
RETRANQUEOS	5 m a viales y vecinos
ALTURA MÁXIMA	16 m y 3 plantas excepto en producción justificando la necesidad por el proceso
ALTURA MÍNIMA	4 m y 1 planta
APARCAMIENTOS	1 plaza/150 m^2 construidos
DISTANCIA ENTRE EDIFICIOS	1/3 del edificio más alto con un mínimo de 5 m

Como se puede observar en la *Tabla 1,* la ocupación máxima es un 75% del total del terreno, es decir, solo se pueden ocupar 39926,25 m^2 de los 53235 m^2 disponibles. Finalmente, se han ocupado 29028 m^2 y un total de 180 plazas de aparcamiento para cumplir con la normativa, aunque la plantilla de trabajadores es muy inferior al número de aparcamientos, por lo que no habrá ningún problema para aparcar, incluso si se aumenta la plantilla.

1.1.1.2 Servicios disponibles en la planta

Todas las plantas del polígono Gases Industriales disponen de unos servicios mínimos necesarios, estos se han recogido en la *Tabla 2.*

Tabla 2: Servicios disponibles en la planta

ENERGÍA ELÉCTRICA	Conexión desde la línea de 20kV a pie de parcela, hay que prever una estación transformadora
GAS NATURAL	Conexión a pie de parcela a media presión (1,5 kg/cm²)
ALCANTARILLADO	Red unitaria al centro de la calle a 3,5 m de profundidad (diámetro del colector de 800 mm
AGUA DE INCENDIOS	La máxima presión es de 4 kg/cm², es necesario diseñar una estación de bombeo y reserva de agua.
AGUA DE RED	Acometida a pie de parcela a 4 kg/cm² con un diámetro de 200 mm
TERRENO	Resistencia del terreno de 2 kg/cm2 a 1,5m de profundidad sobre gravas.

1.1.1.3 Comunicación y accesibilidad

La comunicación y accesibilidad son factores claves en el momento de elegir la ubicación de la planta, ya que tienen una gran influencia en la viabilidad del proyecto. Una buena comunicación de la planta con otras del mismo sector, en este caso del sector químico, permitirá la compraventa de posibles subproductos o productos no deseados que puedan servir como materia primera o ser de interés para otra empresa, lo que ahorraría gastos y tiempo de transporte y beneficios por la venta de productos no deseados, entre otros.

En el caso de la planta química EB production**,** está situada en el Polígono Industrial Gases Nobles y al lado del Polígono Químico, por lo que hay una gran cantidad de industrias dedicadas al sector químico alrededor, las cuales pueden ser potenciales clientes o proveedores.

En cuanto a la accesibilidad es recomendable que haya dos o más métodos para llegar a la planta tanto para el transporte de mercancías como para el transporte de personas, es decir, los trabajadores de la planta, siendo el transporte terrestre el más habitual, ya sea en vehículo propio por carretera o transporte público (autobús, tren, etc.). Respecto al transporte de mercancías, cobra mucho valor la accesibilidad mediante transporte marítimo y aéreo, ya que permiten el negocio con países de todo el mundo ya sea como proveedores o clientes, es decir, se abre la posibilidad de negociar con grandes potencias como Estados Unidos, China o Rusia entre otros, por

tanto, la empresa tendrá un mayor mercado de compra y venta, aumentando así los beneficios.

1.1.1.3.1. Transporte terrestre

El transporte terrestre es el más importante ya que es necesario en todos los transportes de mercancías, por mucho que quieras transportar un producto por vía aérea o marítima necesitas transportarlo por carretera desde la planta hasta el puerto o aeropuerto, por tanto, es necesario tener una buena red de carreteras que permita una conexión rápida con los principales puertos y aeropuertos de la zona y también una conexión lo más directa posible con las ciudades más importantes, tanto del país como pueden ser Barcelona o Madrid, como de Europa en general, Francia o Alemania entre otras.

En este caso, la planta química está situada en Tarragona, que al ser capital de provincia y ser de las más importantes en Cataluña junto con Barcelona, cuenta con una buena red de carreteras. Las más destacables son las siguientes:

- **Carretera N-340:** Es la carretera más larga de España, cuenta con 1250 km y une toda la costa mediterránea, desde Cádiz hasta Barcelona pasando por ciudades como Málaga, Murcia, Valencia o Tarragona. A continuación, se puede ver cuál es su recorrido.

Figura 3: Tramo Carretera Nacional N-340 (1250 km)

- **Autovía A-7:** La autovía A-7 es todo el tramo de la carretera N-340 que se ha convertido en autovía, por lo tanto, tiene prácticamente el mismo recorrido con la diferencia de que la A-7 nace en Algeciras y no en Cádiz. Al ser una autovía, las velocidades máximas permitidas son mayores que las de la N-340, siendo así una ruta más rápida, aunque suele estar bastante concurrida. A continuación, se puede ver cuál es su recorrido.

Figura 4: Tramo Autovía A-7 (1300 km)

- **Autopista AP-7:** La autopista AP-7 es prácticamente paralela a la autovía A-7, por lo tanto, su recorrido es parecido, a diferencia de que la AP-7 no acaba en Barcelona, sino que continua hasta La Junquera, frontera con Francia, es decir, la AP-7 es la principal conexión con el resto de Europa. A diferencia de la N-340 y la A-7, la AP-7 consta con diferentes zonas de pago, aunque actualmente el número de zonas de peaje se ha reducido considerablemente, también es más segura y menos concurrida que la A-7. A continuación se puede ver cuál es su recorrido.

Figura 5: Tramo Autopista AP-7 (1100 km)

- **Autovía A-2:** Es una de las seis autovías radiales de España, concretamente une Barcelona y Madrid, las dos ciudades más importantes de España, pasando por otras como Guadalajara, Zaragoza o Lérida. Aunque no consta de una conexión directa con Tarragona, se puede acceder fácilmente desde la N-240, carretera que une Tarragona y Bilbao. A continuación, se puede ver cuál es el recorrido de la A-2.

Figura 6: Tramo Autovía A-2 (504 km)

Teniendo en cuenta las principales carreteras nombradas, se puede llegar a Barcelona en poco más de 1 hora utilizando la AP-7 y, por tanto, se tarda prácticamente lo mismo en llegar al puerto de Barcelona y el aeropuerto Josep Tarradellas Barcelona-El Prat que serán dos de los principales puertos y aeropuertos de los que se hablará en los apartados de transporte aéreo y marítimo. Por otra parte, se puede llegar a Madrid en 5 o 6 horas (sin contar paradas) atravesando la autovía A-2 o autopista AP-2.

En referencia al transporte de personas, teniendo en cuenta que se dispone de vehículo propio, se tarda menos de 20 minutos en llegar a Tarragona desde ciudades como Reus o Salou o 30 minutos desde El Vendrell, que son algunas de las ciudades más pobladas de Tarragona. En caso de no disponer de vehículo propio, Tarragona dispone de una gran red de trenes y autobuses, las cuales conectan con otras provincias como Barcelona y Lérida, por lo que no supondría ningún problema llegar a la planta en transporte público. A continuación, se puede observar la red de conexiones ferroviarias de Tarragona y los enlaces con otras ciudades.

Figura 7: Red de conexiones ferroviarias de Tarragona

1.1.1.3.2. Transporte aéreo

El transporte aéreo es una forma de conectarse con otras empresas o clientes de todo el mundo, aunque no es el más utilizado para el transporte de mercaderías debido al alto coste y el poco volumen que ofrece en relación al transporte marítimo, pero si es el más utilizado para el transporte de personas, ofreciendo viajes alrededor del mundo de una forma rápida.

Actualmente, existen dos aeropuertos cercanos a la planta química, el primero y más cercano es el aeropuerto de Reus, situado a 11 km del centro de Tarragona, este aeropuerto es el más pequeño de los dos y se dedica a vuelos nacionales y europeos de pasajeros, no mercancías, sus destinos más habituales en Europa son diferentes ciudades de Reino Unido, Bélgica y Alemania como puede verse en la *Figura 8.* [1]

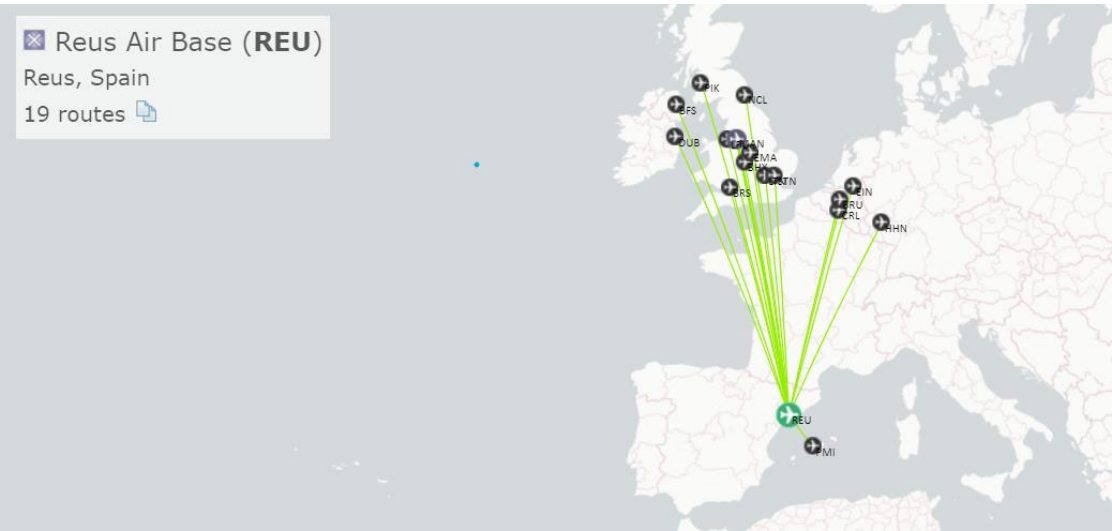


Figura 8: Principales destinos del aeropuerto de Reus

El otro aeropuerto es el Josep Tarradellas Barcelona-El Prat, situado a unos 90 km del centro de Tarragona, es decir a 1 hora circulando por la AP-7. El aeropuerto de Barcelona es el segundo con mayor tráfico de pasajeros en España, después del aeropuerto Adolfo Suárez de Madrid, este se dedica tanto al transporte de pasajeros como de mercancías y dispone de una gran variedad de vuelos constantes tanto nacionales, europeos e internacionales como puede verse en la *Figura 9.* [2]

Figura 9: Principales destinos del aeropuerto de Barcelona

1.1.1.3.3. Transporte marítimo

El transporte marítimo es el principal método de transporte de mercancías alrededor del mundo, por ello es de vital importancia disponer de uno o más puertos cercanos a la planta ya que serán imprescindibles para la importación y exportación de materias primas y productos.

El más cercano a la planta química es el puerto de Tarragona, situado a menos de 5 km del centro de la ciudad, este es conocido como el puerto químico de referencia en el sur de Europa y se dedica principalmente al transporte de crudo de petróleo y derivados como se puede observar en los datos registrados en los últimos años.

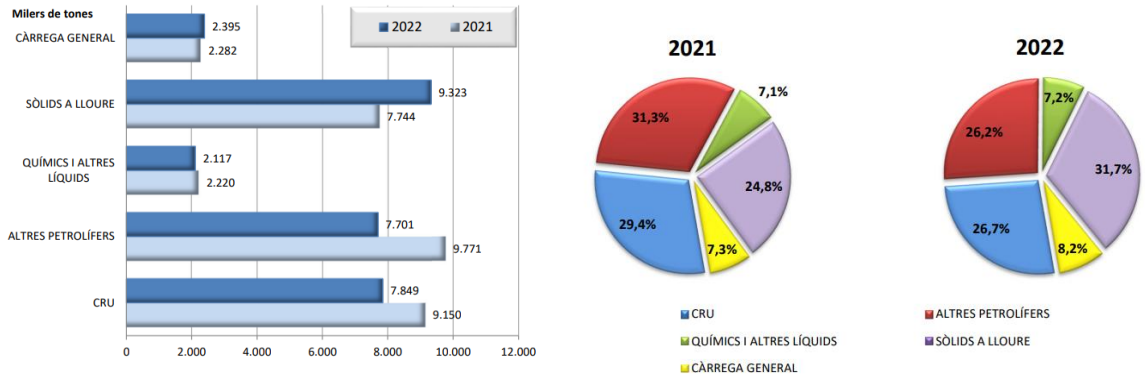


Figura 10: Registro del tráfico de mercaderías en el puerto de Tarragona en 2021 y 2022 [3]

En la *Figura 10* se puede observar como el transporte de crudo de petróleo y derivados representa más del 50% de todo el transporte de mercaderías en el puerto y el transporte de productos químicos representa alrededor del 7%, moviéndose unos 2000 miles de toneladas al año. Actualmente, el puerto de Tarragona dispone de una conexión con 60 países a través de las líneas marítimas regulares, en la *Figura 11* se

puede observar las toneladas que se transportan anualmente alrededor del mundo desde el puerto de Tarragona y que porcentaje representa del total.

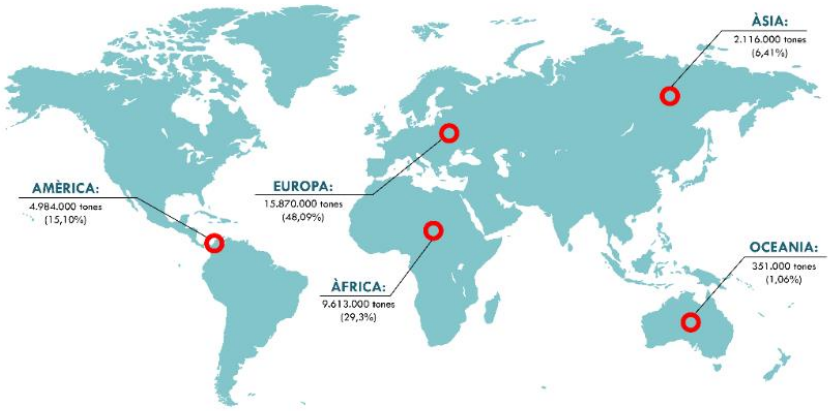


Figura 11: Transporte de mercancías alrededor del mundo desde el puerto de Tarragona [4]

Otro puerto cercano a la planta química es el puerto de Barcelona, situado a 100 km de la ciudad de Tarragona, es decir a 1 hora y 15 minutos circulando por la AP-7 y C-32, este es uno de los tres puertos con más tráfico de España junto con el puerto de Algeciras y Valencia. A continuación, se pueden observar las estadísticas de carga y descarga de los productos que más se transportan en el puerto de Barcelona.[5]

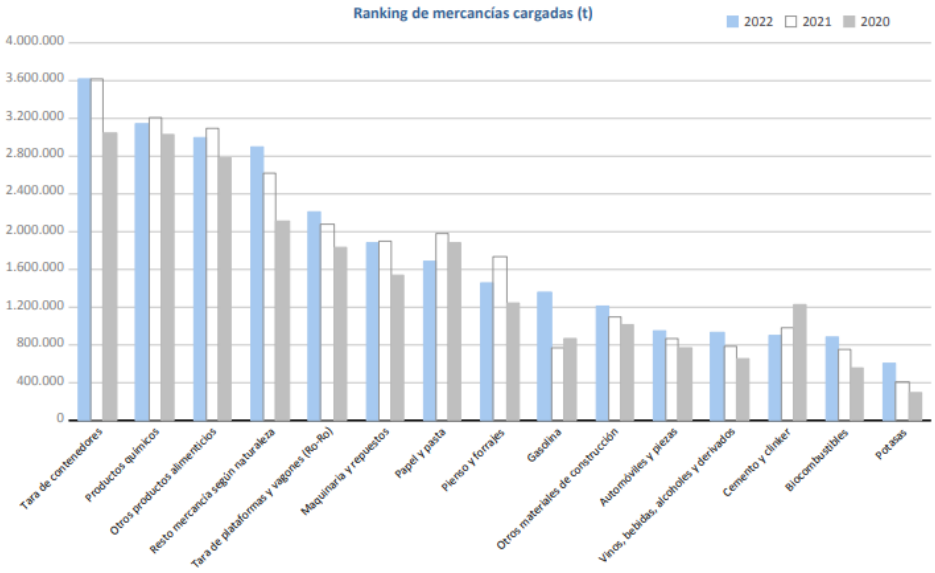


Figura 12: Ranking de mercancías cargadas en el puerto de Barcelona los últimos 3 años

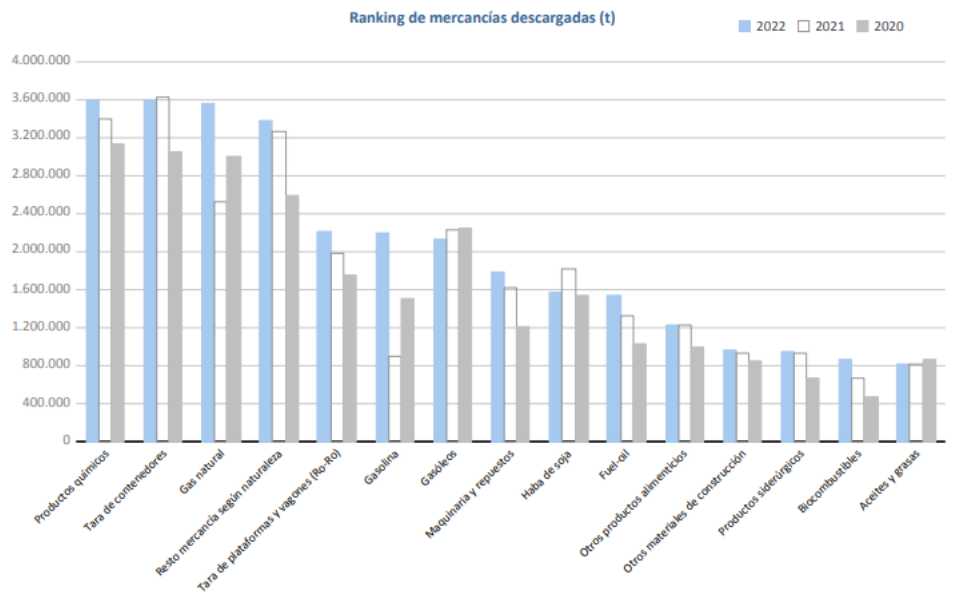


Figura 13: Ranking de mercancías descargadas en el puerto de Barcelona los últimos 3 años

Como puede observarse el las *Figuras 12 y 13,* los productos químicos ocupan los primeros puestos en el ránking de mercancías cargadas y descargadas ascendiendo a unos 6 millones de toneladas al año. Para hacerse una idea más visual de cómo está distribuido el tráfico de mercancías en el puerto se debe observar la *Figura 14,* la cual muestra que el tráfico de productos químicos representa entre un 20-25% del total.

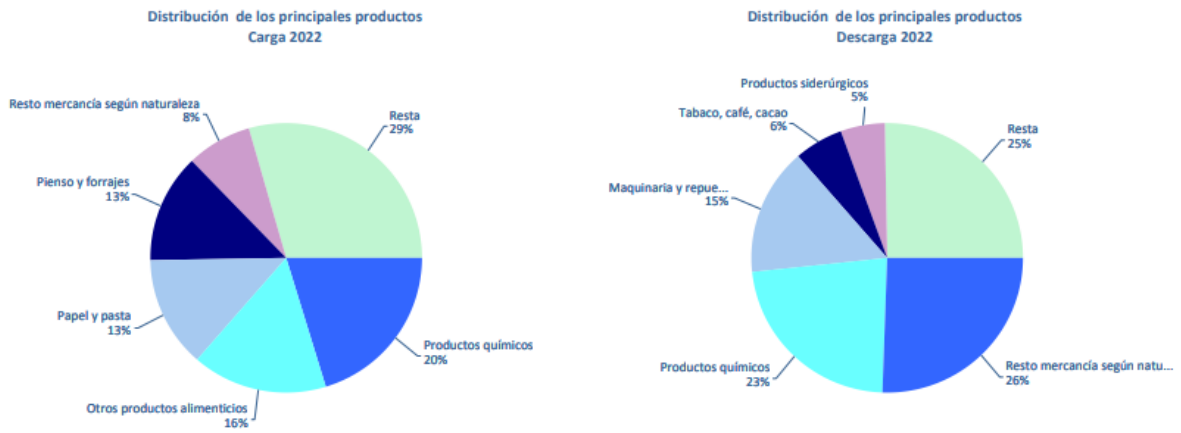


Figura 14: Distribución principales productos en el puerto de Barcelona en el año 2022

En cuanto a las líneas regulares del puerto de Barcelona, este establece conexión con prácticamente todo el mundo. A continuación se pueden observar los datos de la cantidad de contenedores cargados y descargados en el año 2022 dependiendo del país del que provienen o se envían.

Total	TEU llenos	% 22-21	% s/envase
China	399.518	-8,2%	26,8%
España	102.241	-11,6%	6,9%
Estados Unidos	98.091	13,0%	6,6%
Turquía	77.705	2,4%	5,2%
India	60.601	14,2%	4,1%
Emiratos Árabes Unidos	49.462	-7,1%	3,3%
Corea del Sur	41.511	1,5%	2,8%
Arabia Saudita	41.451	-16,7%	2,8%
México	39.344	1,0%	2,6%
Japón	35.051	14,9%	2,4%
Vietnam	32.647	22,4%	2,2%
Egipto	24.770	-4,8%	1,7%
Marruecos	23.911	-13,9%	1,6%
Argelia	22.561	-47,3%	1,5%
Brasil	21.434	5,3%	1,4%
Resto	418.315	3,6%	28,1%
TOTAL	1.488.612	-2,5%	100%

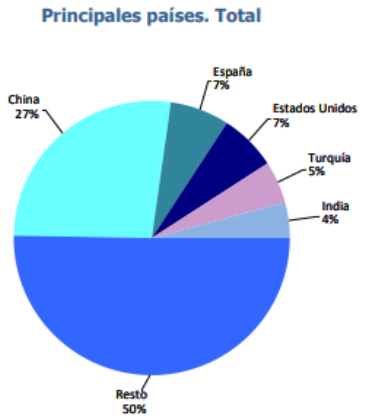


Figura 15: Datos de contenedores cargados y descargados en el puerto de Barcelona en el año 2022

1.2. Métodos de obtención del etilbenceno

El etilbenceno se produce mediante una reacción de alquilación de benceno con etileno. La alquilación consiste en la eliminación de un átomo de hidrógeno para añadir cadenas carbonatadas al anillo aromático[6]. La reacción es la siguiente:

$$C_6H_6 + C_2H_4 \rightarrow C_8H_{10} \quad (1)$$

A parte de la reacción principal se producen reacciones secundarias. Una es la reacción del etilbenceno con el etileno para producir dietilbenceno, un producto no deseado que puede provocar problemas a la hora de utilizar el etilbenceno para producir otros productos.

$$C_8H_{10} + C_2H_4 \rightarrow C_{10}H_{14} \quad (2)$$

Este dietilbenceno puede seguir reaccionando con el etileno hasta formar polietilbenceno, pero es posible minimizar la producción con mayor concentración de benceno que de etileno. Otra reacción secundaria que puede producirse debido a la adición de más benceno del necesario es aumentar la producción de etilbenceno reduciendo la cantidad de dietilbenceno presente en el proceso.

$$C_6H_6 + C_{10}H_{14} \leftrightarrow C_8H_{10} \quad (3)$$

Mediante la alquilación existen varios procesos para obtener el etilbenceno. En la Tabla 3 se muestran los diferentes tipos y diferentes licencias en cada tecnología.

Tabla 3:: Tipos de proceso de obtención de etilbenceno y sus licencias [7]

Process Type / Technology	Licensor / Developer
Alkylation of benzene with ethylene:	
Vapor-phase, zeolite-based	Mobil/Badger
Liquid-phase, zeolite-based	Lummus Crest/Unocal/UOP
Liquid-phase, $AlCl_3$-based	Monsanto/Lummus Crest
Liquid-phase, $AlCl_3$-based	Union Carbide/Badger
Liquid-phase, $AlCl_3$-based	Petroflex
Liquid-phase, BF_3-based (Alkar™)	UOP
Separation from C_8 aromatics:	
Distillation (superfractionation)	Badger
Extraction and purification	Eurotecnica
Liquid-phase adsorption	UOP

1.2.1. Alquilación catalizada por AlCl3

El primer proceso de producción industrial de etilbenceno fue desarrollado a partir de 1930 mediante la alquilación en fase líquida utilizando como catalizador el cloruro de aluminio. En la actualidad las plantas químicas que utilizan este método de producción utilizan la tecnología Monsanto/Lummus considerada la más avanzada.

La reacción de alquilación del benceno con etileno es exotérmica y se trata de una reacción con rendimientos casi estequiométricos de etilbenceno cuando está presente el cloruro de aluminio.

En el proceso convencional antiguo se introduce en el reactor, por un lado, una corriente de benceno seco previamente tratado en una columna de recuperación de benceno y en otra columna de deshidratación de benceno ya que es necesario reducir la cantidad del agua para prevenir la corrosión e incrementar la eficacia del catalizador. La segunda corriente que entra es etileno en fase gas junto con cloruro de etilo. La tercera corriente está compuesta por el catalizador que proviene de un tanque de mezcla junto con polietilbencenos generados en reacciones secundarias, que se recirculan hacia el reactor donde se produce la transalquilación que permite obtener etilbenceno y aumentar el rendimiento. Por último, el efluente de salida del reactor se enfría y se somete a una decantación para recuperar el catalizador y recircularlo al reactor. Por lo tanto, en el interior del reactor se lleva a cabo la alquilación de bencenos y la transalquilación de polietilbencenos los cuales reaccionan con el etileno y forman el producto deseado, el etilbenceno. La temperatura de trabajo son 130 ° C y la presión debe ser lo suficientemente alta para mantener en fase líquida los reactivos.

El etilbenceno producido en el reactor se purifica en tres columnas de destilación colocadas en serie. En la primera se separa y recircula el benceno que no ha reaccionado, en la segunda se extrae del proceso la corriente con el etilbenceno purificado por la parte superior y se eliminan los componentes polialquilados por la parte inferior de ésta. Esta corriente se introduce en una última columna de destilación de donde se recuperan los polietilbencenos para reconducirlos hacia el reactor.

Los inconvenientes del proceso convencional de alquilación con el cloruro de aluminio son la complejidad a la hora de tratar y eliminar las corrientes residuales debido al uso de este tipo de catalizador y además, el elevado coste que supone el mantenimiento de las tuberías y los equipos a causa de la corrosión que se genera debido al uso de un ácido de Lewis.

En el proceso Monsanto, lo que supuso fue una significativa reducción en el uso de catalizador. También en este proceso se elevaron las temperaturas hasta los 160-180ºC. Este rango de temperaturas asegura una mejor actividad del catalizador con el beneficio de que el calor de reacción se pueda recuperar como vapor de agua a baja presión. En este proceso encontramos dos reactores separados uno para la alquilación y otro para la transalquilación. La introducción de este último reactor aumenta la selectividad y el rendimiento global de reacción, además de reducir el catalizador gastado y los residuos producidos, ya que en la transalquilación el catalizador ya está disuelto en el efluente del reactor de alquilación.

Las desventajas de este proceso mejorado siguen siendo las mismas que en el proceso anterior porque aunque se hayan reducido notablemente los problemas de corrosión de los equipos y tuberías sigue representando un importante coste de mantenimiento y operación de las plantas.

1.2.2. Alquilación catalizada por zeolitas en fase vapor

El proceso de producción de etilbenceno de Mobil-Badger fue desarrollado en la década de 1970 en el cual se utiliza un catalizador de zeolita ZSM-5 ya que posee una estructura porosa y *es estable a temperaturas elevadas*. [8]

En la tecnología de tercera generación llevada a cabo a partir de 1990, las reacciones de alquilación y transalquilación se producen en reactores separados con condiciones de temperatura y presión distintas. El reactor de alquilación opera a una temperatura de entre los 400-450ºC y a una presión de 2-3 MPa. Además, es un proceso adecuado para corrientes de etileno diluidas.

La corriente de alimentación de benceno se trata previamente en una columna de destilación y el benceno obtenido atraviesa un intercambiador de calor para realizar un precalentamiento con el objetivo de vaporizar el reactivo. Posteriormente entra en el reactor de alquilación de lecho fijo el cual contiene la zeolita retenida. El etileno se introduce directamente por etapas con tal de mejorar el contacto entre ambos reactivos e incrementar el rendimiento.

El etilbenceno obtenido en el reactor de alquilación y los reactivos que no han reaccionado entran en la columna de recuperación de benceno de donde se obtiene el benceno por la parte superior, que se envía al reactor de alquilación. El etilbenceno y los compuestos polialquilados de los fondos se introducen en la segunda columna de destilación para obtener, por un lado el producto final por la parte superior y

extraerlo del proceso y por otro lado los polialquilados, que son introducidos en una tercera columna de destilación que permite extraer un residuo por fondos, que puede ser valorado como combustible y los polietilbencenos, los cuales son mezclados con el corriente de benceno que proviene de la columna de recuperación de benceno. Esta mezcla se transporta hacia el reactor de transalquilación donde se obtiene etilbenceno adicional y propileno. En este reactor se obtienen además hidrocarburos ligeros que son comercializados como combustible y por otro lado se obtiene el benceno y polietilbencenos que no han reaccionado y el etilbenceno, los cuales se dirigen hacia la columna de recuperación del benceno.

El catalizador sufre un envenenamiento a causa de la formación de coque en la combustión por lo que requiere un sistema de regeneración el cual se lleva a cabo cada 350 días, el cual coincide con la parada anual de la planta, ya que el catalizador deja de ser funcional cada 18-24 meses. Como la regeneración del catalizador implica la detención del reactor y requiere tiempo, dicha regeneración se hará antes de la puesta en marcha.

1.2.3. Alquilación catalizada por zeolitas en fase líquida

El proceso de alquilación con zeolitas en fase líquida es el que sustituyó al proceso catalizado con ácidos de Lewis en 1990. Las zeolitas tipo Y fueron las primeras en utilizarse en fase líquida, pero fueron sustituidas por las zeolitas beta y zeolitas MCM-22. Estos catalizadores poseen un tamaño de poro superior ya que se opera en fase líquida pero el sistema de regeneración se debe llevar a cabo fuera del reactor (los ciclos de regeneración son largos).

Una de las ventajas del proceso en fase líquida sobre el de fase vapor es que la temperatura de operación es más reducida por lo que se genera menos xileno en la combustión, de manera que disminuye el envenenamiento del catalizador aumentando su vida útil. Además, permite un mejor control térmico del proceso ya que se opera en un rango de temperatura de 150 a 195 ºC en el reactor de alquilación. y se debe trabajar con presiones más elevadas, alrededor de 4 MPa, para mantener disueltos los componentes más volátiles.

1.2.4. Alquilación catalizada por zeolitas en fase mixta

Este proceso de producción tiene la característica de trabajar en dos fases. Consiste en reorganizar el proceso de alquilación en fase gas para poder trabajar en un reactor de alquilación en fase gas y un reactor de transalquilación en fase líquida. De esta manera, la producción final de etilbenceno contiene una menor concentración de xileno.

Este proceso requiere de una zeolita tipo ZSM-5 para el paso de alquilación y una zeolita tipo Y para catalizar la reacción de transalquilación. La reacción de alquilación tiene lugar en el reactor de alquilación, el cual consiste en dos secciones: la sección de la destilación por el catalizador y la sección de la destilación estándar. El lecho catalítico se encuentra en la parte superior de la columna. Se alimenta el benceno por la parte superior de la columna, este componente se introduce en fase líquida. De forma simultánea, se alimenta el reactor con etileno en fase gas por la parte inferior de la sección catalítica. La acción descrita anteriormente crea un flujo en contracorriente entre los dos compuestos, fenómeno que causa una rápida disolución del etileno en la fase líquida del benceno y acelera la formación del etilbenceno en las zonas catalíticas.

Cómo que la reacción que tiene lugar en este reactor es altamente exotérmica, la energía desprendida se puede utilizar para posteriores operaciones unitarias cómo es el caso de las destilaciones encontradas en la parte de separación y purificación del producto.

El llevar a cabo este tipo de proceso de producción del etilbenceno, favorece en disminuir la temperatura de reacción, ya que sería la misma que la temperatura de reacción en un proceso en fase líquida, y una presión de trabajo de alrededor de 2 MPa ya que se trabajaría de la misma manera que en la alquilación en fase gas.

1.3. Características fisicoquímicas de los componentes

Los compuestos que intervienen en el proceso que se encuentran las materias primas son por un lado el benceno y el etileno que corresponden a los reactivos principales, a partir de los cuales se produce la reacción para formar etilbenceno.

El benceno se encuentra diluido con tolueno y el etileno con metano y etano. Por otro lado, se generan subproductos como el dietilbenceno y el polietilbenceno.

1.3.1. Benceno

El benceno es un hidrocarburo poliinsaturado aromático incoloro, volátil, explosivo y altamente inflamable que presenta una solubilidad considerablemente baja en agua debido a que es una molécula apolar. Se diluye fácilmente en disolventes orgánicos como el etanol y el cloroformo.

Figura 16: Estructura molecular del benceno

Además, el benceno es altamente reactivo si se somete a reacciones de sustitución electrofílica y adición. El benceno es un carcinógeno y puede causar efectos graves en la salud si se inhala, ingiere o entra en contacto con la piel.

Tabla 4: Propiedades físicas del benceno

Punto de ebullición (ºC)	80,1
Punto de fusión (ºC)	5
Densidad relativa de vapor	2,7
Viscosidad a 25ºC (cP)	0,652
Masa molecular (g/mol)	78,112
Densidad (g/L)	878,6
Punto de inflamación (ºC)	-11

El benceno se puede obtener de diferentes fuentes como el petróleo utilizando un craqueo, reformado catalítico o de la destilación. También se obtiene del carbón, gas natural u otros compuestos orgánicos como el etileno.

El benceno se puede utilizar para muchos procesos como materia prima, como en la fabricación de productos químicos y plásticos. Además se puede usar como solvente o aditivo (gasolina). También se puede utilizar para la fabricación de caucho, pero debido a sus efectos adversos para la salud, el uso del benceno se ha reducido en muchos países y se han adoptado medidas para controlar su uso y exposición.

1.3.2. Etileno

El etileno es un compuesto orgánico que se encuentra en fase gas y que está constituido por dos carbonos unidos mediante un doble enlace cada uno de los cuales está enlazado a dos átomos de hidrógeno. Este gas es inflamable e incoloro.

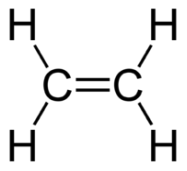


Figura 17: Estructura molecular del etileno

Se produce naturalmente en pequeñas cantidades en la atmósfera terrestre, pero la mayor parte del etileno se produce comercialmente a partir del petróleo y el gas natural. El etileno se obtiene mediante un proceso endotérmico de craqueo térmico a partir de nafta en estado líquido o etano en estado gaseoso.

Tabla 5: Propiedades físicas del etileno

Punto de ebullición (ºC)	-104
Punto de fusión (ºC)	-169
Densidad relativa de vapor	0,6
Viscosidad a 25ºC (cP)	-
Masa molecular (g/mol)	28,05
Densidad (g/L)	1,178
Punto de inflamación (ºC)	-136,1

El etileno es una molécula muy importante en la industria química, ya que se utiliza como materia prima para la síntesis de una gran variedad de productos, como plásticos, fibras, adhesivos, disolventes, entre otros. Además, el etileno es utilizado en la agricultura para acelerar la maduración de frutas y verduras y para controlar la caída de las hojas en algunas plantas.

1.3.3. Metano

El metano es un hidrocarburo saturado con un átomo de carbono central unido mediante enlaces covalentes a cuatro hidrógenos. La molécula es apolar por lo tanto es insoluble en disolventes polares como el agua. En condiciones normales se encuentra en estado gas, es incoloro e inodoro.

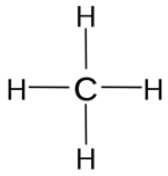


Figura 18: Estructura molecular del metano

Las emisiones de metano se generan principalmente en los procesos de extracción de combustibles fósiles, en la combustión de biomasa, animales de granja, en pantanos, vertederos, etc. El metano se produce también en la digestión anaerobia de la materia orgánica, el cual se acumula en un gasómetro para ser empleado como fuente de energía.

El metano es el componente mayoritario del gas natural el cual se utiliza como fuente de energía eléctrica y térmica, como combustible en las turbinas de gas o generadores de vapor. Además, se usa como materia prima en diversos procesos industriales como en la producción de hidrógeno, metanol, ácido acético y anhídrido acético.

Uno de los peligros del metano es que es un elemento altamente inflamable. [9]

Tabla 6: Propiedades físicas del metano

Punto de ebullición (ºC)	-161
Punto de fusión (ºC)	-183
Densidad relativa de vapor	0,6
Viscosidad a 25ºC (cP)	0,02
Masa molecular (g/mol)	16,04
Densidad (g/L)	0,657
Punto de inflamación (ºC)	-188

1.3.4. Etano

El etano es un hidrocarburo alcano compuesto por dos átomos de carbono y seis átomos de hidrógeno. El etano es una molécula simétrica polar por lo que la solubilidad en agua es bastante baja.

En condiciones normales, a temperatura ambiente y presión atmosférica, se encuentra en estado gas.

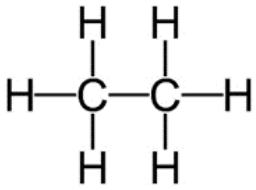


Figura 19: Estructura molecular del etano

El etano es un buen combustible que se encuentra en mayor proporción en el gas natural después del metano, por lo que se utiliza para obtener energía térmica y eléctrica. El etano principalmente se emplea en la industria para producir etileno, uno de los reactivos de este proceso, para la producción de polímeros como el polietileno y el cloruro de vinilo. Además, se utiliza como refrigerante.

Es un componente explosivo cuando está en contacto con el aire, es altamente inflamable y además es un gas contaminante de efecto invernadero. [10]

Tabla 7: Propiedades físicas del etano [11]

Punto de ebullición (ºC)	-88,6
Punto de fusión (ºC)	-182,8
Densidad relativa de vapor	1,05
Viscosidad a 25ºC (cP)	0,877
Masa molecular (g/mol)	30,07
Densidad (g/L)	1,355
Punto de inflamación (ºC)	-135

1.3.5. Tolueno

El tolueno es un compuesto orgánico aromático líquido incoloro y volátil. Es altamente inflamable y tóxico si se inhala en grandes cantidades, lo que puede causar efectos nocivos en la salud. Es un compuesto muy soluble en agua y es un buen conductor de electricidad. También es conocido por su capacidad para disolver sustancias como grasas, aceites y ceras.

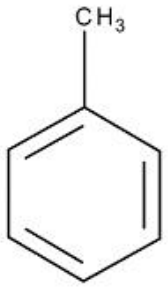


Figura 20: Estructura molecular del tolueno

A nivel industrial, el tolueno se produce a partir del petróleo crudo y se obtiene a través de procesos de destilación y refinación. También puede ser producido a partir de ciertos tipos de madera y biomasa.

Tabla 8: Propiedades físicas del tolueno

Punto de ebullición (ºC)	110,6
Punto de fusión (ºC)	-93
Densidad relativa de vapor	3,18
Viscosidad a 25ºC (cP)	0,59
Masa molecular (g/mol)	92,14
Densidad (g/L)	866,9
Punto de inflamación (ºC)	4

1.3.6. Etilbenceno

El etilbenceno es el producto que se obtiene en este proceso cuya estructura está compuesta por un anillo aromático unido a un grupo sustituyente denominado etilo. Es una sustancia que en condiciones normales se encuentra en estado líquido, es ligeramente soluble en agua, en cambio se diluye con disolventes orgánicos, grasas y aceites.

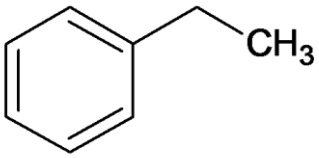


Figura 21: Estructura molecular del etilbenceno

El etilbenceno se sintetiza a partir de una reacción catalítica exotérmica de alquilación de benceno y etileno en fase líquida o vapor.
La producción del etilbenceno es útil para la elaboración de estireno mediante la deshidrogenación de éste para posteriormente obtener, por polimerización, poliestireno y fabricar resinas y algunos plásticos.
Es un compuesto inflamable y además es tóxico cuando entra en contacto directo con la piel, se inhala o ingiere de modo que supone un riesgo para la salud humana y también es peligroso para el medio ambiente. Por este motivo se debe seguir un protocolo estricto de seguridad al manipular el etilbenceno.

Tabla 9: Propiedades físicas del etilbenceno.

Punto de ebullición (ºC)	136
Punto de fusión (ºC)	-95
Densidad relativa del líquido	0,9
Viscosidad a 20ºC (cP)	0,669
Masa molecular (g/mol)	106,2
Densidad (g/L) a 25ºC	862,6
Punto de inflamación (ºC)	18

1.3.7. Dietilbenceno

Aparte de la obtención de etilbenceno durante el proceso también se generan subproductos que son compuestos no deseados. El etilbenceno reacciona con el etileno formándose dietilbenceno, el cual al reaccionar posteriormente con etileno

genera trietilbenceno, etc. De esta forma se genera polietilbenceno a partir de esta sucesión de reacciones secundarias en las que se van añadiendo grupos sustituyentes etilo al anillo aromático.

El etilbenceno es una sustancia completamente insoluble en agua. Es inflamable, nocivo al inhalar, ingerir o contactar con la piel y además es tóxico.

Tabla 10: Propiedades del dietilbenceno

Punto de ebullición (ºC)	182
Punto de fusión (ºC)	-75
Densidad relativa del vapor	4,6
Viscosidad a 20ºC (cP)	-
Masa molecular (g/mol)	134,2
Densidad (g/L) a 25ºC	0,86
Punto de inflamación (ºC)	56

1.3.8. Propileno

La corriente de benceno que se introduce en el proceso contiene además tolueno, que puede reaccionar al entrar en contacto con el etileno para formar etilbenceno y propileno.

$$C_6H_5CH_3 + 2C_2H_4 \rightarrow C_6H_5C_2H_5 + C_3H_6 \quad (4)$$

El propileno (o propeno) es un hidrocarburo alqueno que se presenta en fase gas en condiciones normales y se genera habitualmente en la termólisis del petróleo el cual es útil para sintetizar polipropileno, acrilonitrilo, óxido de propileno y diferentes alcoholes como el iso-propanol o el n-propanol. Otra aplicación del propeno en la industria petroquímica es como combustible y agente alquilante.

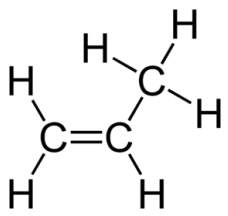


Figura 22: Estructura molecular del propileno

El propeno es un componente incoloro considerablemente inflamable con un olor similar al petróleo. [12]

Tabla 11: Propiedades físicas del propileno

Punto de ebullición (ºC)	-48,0
Punto de fusión (ºC)	-185
Densidad relativa del vapor	1,49
Viscosidad a 16,7ºC (μP)	83,4
Masa molecular (g/mol)	42,08
Densidad (g/L) a 20ºC	0,514

1.4. Descripción del proceso

1.4.1. Diagrama de bloques

El proceso está constituido por dos etapas principales en las cuales se produce la reacción de alquilación y de transalquilación respectivamente en las que se forma el producto de interés. Para optimizar el proceso y maximizar la calidad del producto se deben incluir una etapa de preparación de benceno para obtener la temperatura adecuada y posteriormente tres etapas de separación para obtener una pureza igual o superior al 99,5% de etilbenceno.

En la *Figura 23* se representa de manera general el conjunto de equipos necesarios para llevar a cabo el proceso de producción de etilbenceno, así como las corrientes de entrada y de salida con cada uno de los componentes presentes.

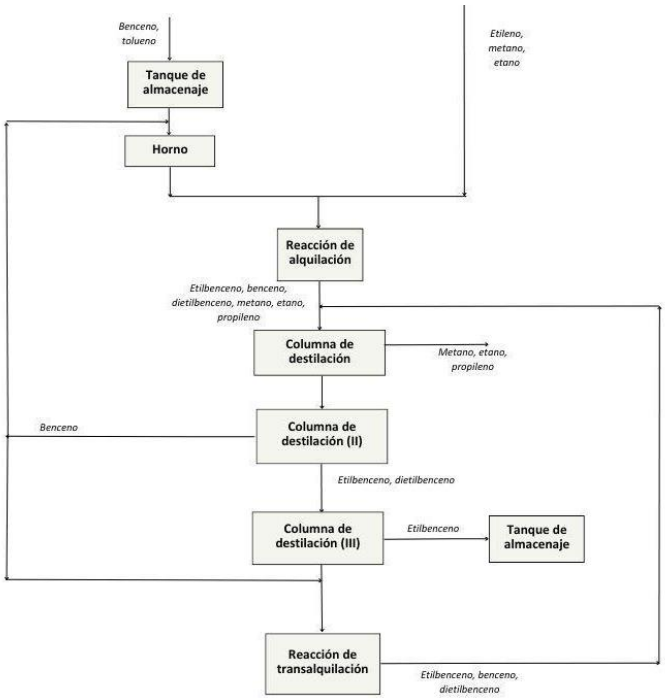


Figura 23: Diagrama de bloques del proceso

1.4.2. Descripción detallada del proceso

1.4.2.1. Elección del método de producción

El método de producción de etilbenceno en fase vapor es el más adecuado debido a que se introduce en el proceso etileno diluido con metano y etano. Este proceso permite operar con etileno diluido a diferencia del método en fase líquida, que requiere una corriente de etileno puro. El etileno y el eteno son compuestos muy parecidos, por lo tanto, la separación de estos componentes es más compleja y supone un coste económico más elevado.

1.4.2.2. Entrada y acondicionamiento de reactivos

El corriente de benceno llega a la planta en fase líquida con impurezas de tolueno de manera que en la alquilación se produce una reacción secundaria en la que el etileno y el tolueno forman etilbenceno y propileno, el cual debe eliminarse posteriormente. Esta corriente de reactivo atraviesa un intercambiador por donde circula el fluido caliente de salida de la zona de alquilación con el objetivo de aumentar la temperatura ya que los reactivos deben entrar al reactor a 375ºC aproximadamente. El etileno diluido con metano y etano se introduce en el proceso a temperatura ambiente y se divide en tres corrientes para introducir cada una en la entrada de cada reactor.

1.4.2.3. Reacción de alquilación y transalquilación

El reactor de alquilación debe operar con una entrada de benceno en exceso siendo el etileno el reactivo limitante para reducir la formación de polietilbencenos. La

proporción de etileno:benceno debe ser de entre 1:1 a 1:25 pero la más habitual suele ser de 1:5. La reacción se lleva a cabo en tres reactores continuos de lecho empacado dispuestos en serie, con el objetivo de reducir el volumen de operación para facilitar el control de la temperatura ya que se trata de una reacción altamente exotérmica. Los reactores son adiabáticos de manera que no existe un intercambio de calor entre el interior del reactor y el entorno, por lo tanto, se produce un aumento de la temperatura. En la salida de cada reactor se coloca un intercambiador de calor para enfriar el fluido con tal de no superar la temperatura máxima de operación. El intercambiador de la salida del primer reactor emplea agua de refrigeración y el de la salida del segundo reactor utiliza el dietilbenceno que se obtiene de la tercera columna para calentarlo hasta 415ºC antes de introducirlo en la transalquilación.

La corriente de salida de la reacción de alquilación contiene etilbenceno, benceno que no ha reaccionado, dietilbenceno, metano, etano y propileno, que atraviesan, en primer lugar, un intercambiador de calor donde se calienta el benceno de la entrada y se enfría la mezcla obtenida del tercer reactor y, en segundo lugar, un intercambiador con agua de refrigeración para acabar de reducir la temperatura hasta 42ºC.

1.4.2.4. Operaciones de separación

Posteriormente se colocan tres columnas de rectificación en serie donde se separan los subproductos, reactivos que no han reaccionado y otros compuestos del producto deseado. En la primera columna se separan los hidrocarburos, es decir, el metano, etano y propileno que son los compuestos más volátiles y se extraen en fase vapor por la parte superior. El resto de los componentes se encuentran en estado líquido y continúan en el proceso. En la segunda columna se recupera el benceno en forma de destilado, una parte del cual se recircula hacia el tanque pulmón de benceno al inicio del proceso y la otra parte se transporta hacia el tanque de la entrada del reactor de transalquilación. La tercera columna permite obtener por la parte superior el etilbenceno con una pureza del 99,8 % que se almacena en tanques para su posterior comercialización, y por la parte inferior se obtiene el dietilbenceno que se introduce en un horno junto con benceno recuperado en la segunda columna. Esta corriente gaseosa se introduce en el reactor de transalquilación donde el benceno reacciona con el dietilbenceno para generar etilbenceno, el cual se recircula hacia la entrada del intercambiador previo a la primera columna de destilación. De esta forma se incrementa la conversión global y se obtiene un mayor rendimiento.

1.4.3. Balance de materia

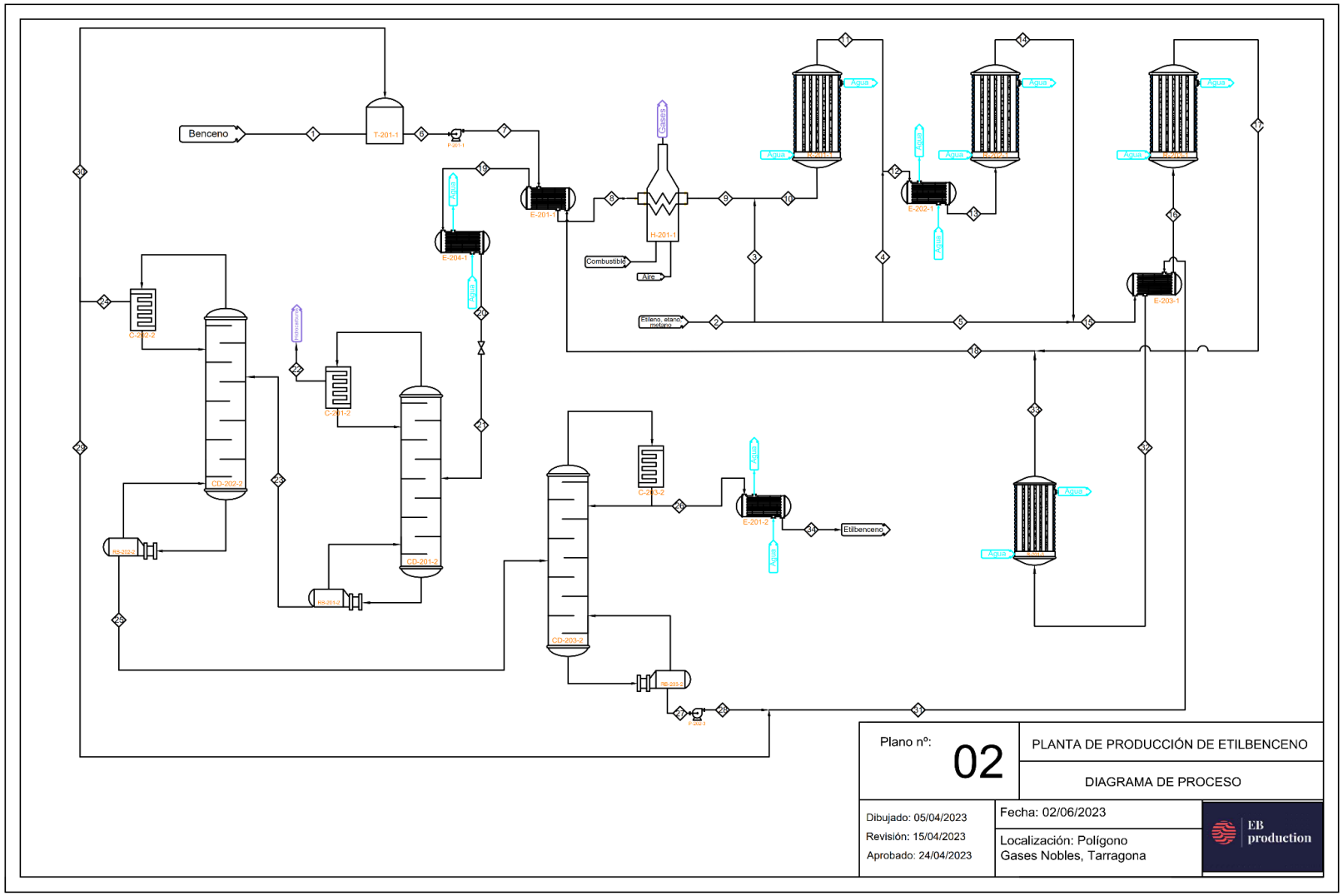
Corriente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Propiedades										
Fracción de vapor	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1
Presión (kPa)	101,3	2000	2000	2000	2000	101,3	2000	2000	2000	2000
Temperatura (ºC)	25	25	25	25	25	51,22	52,97	400	400	351,6
Densidad	872,2	21,18	21,18	21,18	21,18	843,6	842,3	27,92	27,92	24,23
Caudal másico (kg/h)	31447,6	22974,4	8041,0	8041,0	6892,3	57811,0	57811,0	57811,0	57811,0	65852,0
Composición másica										
Benceno	0,9901	0	0	0	0	0,9903	0,9903	0,9903	0,9903	0,8694
Etileno	0	0,5342	0,5342	0,5342	0,5342	0	0	0	0	0,0652
Etilbenceno	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dietilbenceno	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tolueno	0,0099	0	0	0	0	0,0084	0,0084	0,0084	0,0084	0,0074
Metano	0	0,1222	0,1222	0,1222	0,1222	0	0	0	0	0,0149
Etano	0	0,3436	0,3436	0,3436	0,3436	0	0	0	0	0,042
Propileno	0	0	0	0	0	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013	0,0011

Corriente	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Propiedades										
Fracción de vapor	1	1	1	1	1	1	1	1	0,7262	0,2264
Presión (kPa)	1999	1999	1999	1997	1997	1997	1995	1995	1965	1935
Temperatura (ºC)	446,1	400,2	375,5	448,6	413,6	375	443,8	441,4	217,39	42
Densidad	24,24	21,73	22,55	22,62	20,93	22,18	22,24	22,94	34,96	182
Caudal másico (kg/h)	65852,1	73893,2	73893,2	73893,2	80785,5	80785,5	80785,5	89570,6	89570,6	89570,6
Composición másica										
Benceno	0,7173	0,6392	0,6392	0,5098	0,4663	0,4663	0,3480	0,3537	0,3537	0,3537
Etileno	0,0053	0,0629	0,0629	0,0134	0,0578	0,0578	0,0116	0,0105	0,0105	0,0105
Etilbenceno	0,2121	0,189	0,189	0,3536	0,3234	0,3234	0,4703	0,4819	0,4819	0,4819
Dietilbenceno	0,0039	0,0035	0,0035	0,0179	0,0163	0,0163	0,0341	0,0311	0,0311	0,0311
Tolueno	0	0	0	0	0,0000	0,0000	0	0	0	0
Metano	0,0149	0,0266	0,0266	0,0266	0,0348	0,0348	0,0348	0,0313	0,0313	0,0313
Etano	0,042	0,0748	0,0748	0,0748	0,0977	0,0977	0,0977	0,0881	0,0881	0,0881
Propileno	0,0045	0,004	0,004	0,004	0,0037	0,0037	0,0037	0,0033	0,0033	0,0033
Corriente	**21**	**22**	**23**	**24**	**25**	**26**	**27**	**28**	**29**	**30**

Propiedades										
Fracción de vapor	0,3773	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Presión (kPa)	101,3	1013	101,3	101,3	101,3	101,3	101,3	2101	2101	2101
Temperatura (ºC)	25,58	-24	97,7	78,52	137,5	136,2	165,6	167,2	80,31	80,31
Densidad	7,96	1,71	799,1	812,7	758,1	760	728,5	729,7	812,3	812,3
Caudal másico (kg/h)	89570,6	11932,6	77638,1	31679,4	45958,6	42468,0	3490,6	3490,6	5069,0	26610,7
Composición másica										
Benceno	0,3537	0,001	0,4081	0,9999	0,0001	0,0002	0	0	0,9999	0,9999
Etileno	0,0105	0,0785	0	0	0	0	0	0	0	0
Etilbenceno	0,4819	0	0,556	0	0,9392	0,9981	0,2221	0,2221	0	0
Dietilbenceno	0,0311	0	0,0359	0	0,0607	0,0017	0,7779	0,7779	0	0
Tolueno	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Metano	0,0313	0,2353	0	0	0	0	0	0	0	0
Etano	0,0881	0,6615	0	0	0	0	0	0	0	0
Propileno	0,0033	0,0247	0	0,0001	0	0	0	0	0,0001	0,0001

Corriente	31	32	33	34
Propiedades				
Fracción de vapor	0	1	1	0
Presión (kPa)	2101	2101	2101	101,3
Temperatura (ºC)	118,7	415,3	417,7	60
Densidad	775,2	33,95	33,86	760
Caudal másico (kg/h)	8559,3	8559,3	8785,1	42468,0
Composición másica				
Benceno	0,5921	0,5921	0,4068	0,0002
Etileno	0	0	0	0
Etilbenceno	0,0906	0,0906	0,5889	0,9981
Dietilbenceno	0,3172	0,3172	0,0043	0,0017
Tolueno	0	0	0	0
Metano	0	0	0	0
Etano	0	0	0	0
Propileno	0	0	0	0

1.4.4. Diagrama de proceso



1.5. Constitución de la planta

La planta está situada en la parcela ubicada en el polígono industrial “Gases Nobles” y dispone de una superficie total de 53.235 m2 a través de la cual se han distribuido las diferentes áreas. Se incluyen, por un lado, las áreas dedicadas a la producción de etilbenceno y por otro lado, aquellas destinadas al personal de la planta. La zona de producción está constituida por una superficie total de 29.028 m^2.

1.5.1. Plano de la planta

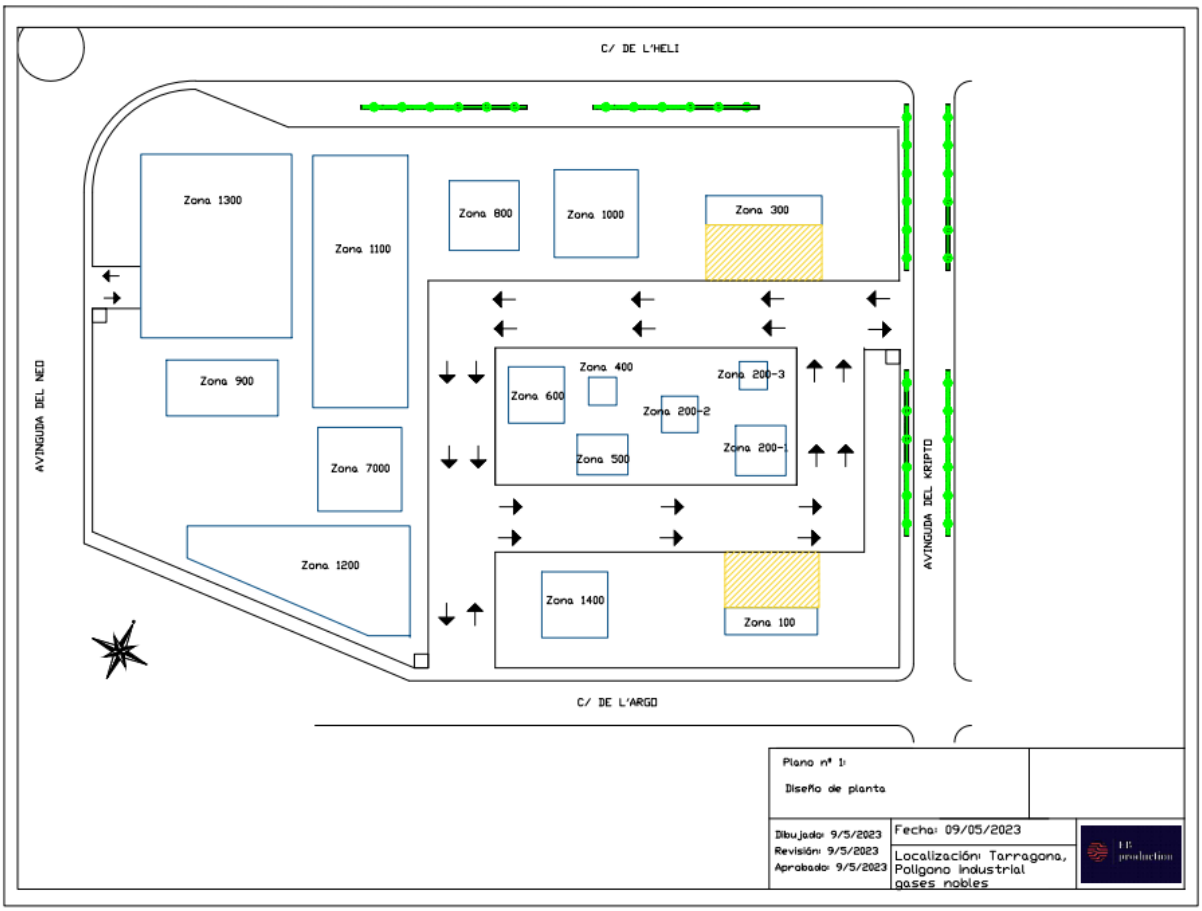


Figura 24: Plano de la planta de producción EB Production

En la *Figura 24* se muestra el plano de la parcela con la distribución de las diferentes áreas que conforman la planta.

1.5.2. Descripción de las áreas

1.5.2.1. Área 100

El área 100 es la primera zona del proceso de producción, destinada al almacenamiento de benceno (el cual contiene impurezas de tolueno), que es uno de los reactivos, el cual debe mantenerse en condiciones adecuadas. Esta zona está compuesta por ocho tanques con una capacidad suficiente para almacenar y administrar al proceso el benceno necesario durante tres días para así disminuir el flujo diario de camiones cisterna.

Los tanques se encuentran separados de la zona de reacción, deben mantenerse a temperatura ambiente y a presión atmosférica, además de someterse a una inertización con nitrógeno para prevenir la presencia de oxígeno, que puede provocar incendios o explosiones debido a la alta inflamabilidad del benceno. El tanque dispone de un conducto de entrada y salida de nitrógeno que es controlado por dos válvulas que mantienen la presión constante dentro del tanque, dejando entrar nitrógeno en caso que el tanque se vacíe y expulsando nitrógeno cuando este se llena.

El caudal de benceno administrado al área de reacción debe ser constante ya que se trata de un proceso continuo, de manera que el área de almacenamiento está conectada al área de reacción mediante tuberías a través de las cuales circula el reactivo impulsado con bombas centrífugas.

1.5.2.2. Área 200

El área 200 incluye todo el proceso de producción de etilbenceno y está dividida en tres subáreas:

- **Área 200-1:** Zona de alquilación
- **Área 200-2:** Zona de separación
- **Área 200-3:** Zona de transalquilación

El área 200-1 está formada por tres reactores continuos de lecho fijo (R-201-1, R-202-1, R-203-1) donde se produce la reacción principal del proceso en la cual se forma el etilbenceno a partir de benceno y etileno. Los reactores operan a una presión de 20 atm y a una temperatura de 375 a 450 ºC aproximadamente.

El benceno proviene del área 100 y entra en fase líquida a un tanque pulmón, junto con el benceno recirculado que proviene de la zona de separación, y el etileno se introduce directamente en fase gas al proceso mediante tuberías una vez el benceno ha sido calentado mediante el uso del intercambiador E-201-1 y está en fase vapor. Además hay una caldera (H-201-1) que funciona en caso de que el benceno a la salida del intercambiador no llegue a la temperatura necesaria. El intercambiador E-203-1 enfría la corriente de salida del segundo reactor con el dietilbenceno a

contracorriente que se dirige hacia la transalquilación. Los intercambiadores E-202-1 y E-204-1 permiten enfriar el fluido del proceso mediante agua de refrigeración colocados a la salida del primer y tercer reactor respectivamente. El fluido es enviado hacia la zona de separación a una temperatura de 42ºC y a presión atmosférica. La presión se reduce previamente mediante una válvula de expansión ya que la primera columna de separación trabaja a 10 atmósferas de presión.

El área 200-2 está formado por tres columnas de rectificación dispuestas en série en las cuales se separan los reactivos que no han reaccionado, subproductos y otros compuestos no deseados del producto final, el etilbenceno. La mezcla que proviene de la zona de alquilación a 42ºC y 10 atm se introduce en una primera columna de destilación CD-201-2 en la que se extrae por la parte superior los hidrocarburos en fase vapor ya que dispone de un condensador parcial (C-201-2) que permite, por un lado, recircular los otros compuestos en fase líquida a la columna y por otro lado, extraer en fase gas el metano, etano y propileno, que posteriormente se conducen a la zona de motores para ser utilizados como combustible para producir electricidad. En la segunda columna (CD-202-2) se extrae por la parte superior el benceno, que es el reactivo en exceso que no ha reaccionado, que posteriormente se recircula hacia el tanque pulmón del área 200-1 donde se mezclará con el benceno fresco. Por último, el producto final se obtiene se separa por la parte superior de la tercera columna (CD-203-2) y se conduce hacia el área 300 que es la zona dedicada al almacenamiento de producto acabado. El intercambiador E-201-2 está situado en la salida del destilado de esta columna para enfriarlo de 136ºC a 60ºC mediante agua de refrigeración para poder almacenarlo en condiciones adecuadas de temperatura, ya que este debe almacenarse a temperatura cercana a la ambiente, por eso se enfría hasta 60 ºC y en los tanques pasa a estar a temperatura ambiente con el paso del tiempo ya que estos no están aislados. Por otro lado, el dietilbenceno obtenido en la parte inferior se traslada hacia el área 200-3, donde se lleva a cabo la transalquilación.

En el área 200-3 se introduce el dietilbenceno que proviene del área de separación a una temperatura de 142ºC aproximadamente para producir etilbenceno en el reactor de transalquilación (R-201-3). Para incrementar la temperatura hasta 415ºC, que es la requerida, se bombea con la ayuda de una bomba que aumenta su presión a 20 atm para que esté a la presión adecuada para trabajar y además llegue al intercambiador E-203-1 en el que se aprovecha el fluido de salida del segundo reactor de alquilación R-202-1 para calentar la corriente de dietilbenceno. La corriente de salida de la transalquilación se dirige hacia la entrada del área 200-2 para separar el etilbenceno recuperado de las impurezas.

1.5.2.3. Área 300

El etilbenceno, que proviene del área 200-2 a una temperatura de 60ºC es almacenado en un total de diez tanques a presión atmosférica, en el que la temperatura del etilbenceno pasará a ser la temperatura ambiente con el paso del

tiempo ya que los tanques no están aislados. De igual forma que los tanques de almacenamiento de benceno, estos están diseñados con un lazo de control compuesto por dos válvulas que introducen o extraen el nitrógeno necesario para inertizarlos y eliminar totalmente la presencia de oxígeno dentro del tanque para evitar posibles incendios o explosiones. Además de esta forma se controla la presión dentro del tanque.

1.5.2.4. Área 400

El área 400 corresponde a las torres de refrigeración, las cuales se encargan de refrigerar el agua proveniente de los intercambiadores de calor del área 200, teniendo una cantidad de 3 torres de refrigeración en dicha zona. Dichos equipos tienen la función de reducir la temperatura con un salto térmico de 10 ºC, es decir el agua entra a 40 ºC y sale a 30 ºC, que es la temperatura a la que han sido diseñados los intercambiadores de calor. El agua que se pierde del proceso se suministra desde el área de servicios antes de volver a los intercambiadores de calor. Además, corresponde a los chillers que se encargan de refrigerar el etilenglicol del condensador de la primera columna.

1.5.2.5. Área 500

En el caso del área 500, éste tiene dos funciones principales, la primera, generar electricidad mediante motores de combustión en los que se utiliza el corriente rico en hidrocarburos que se obtiene de la primera columna de separación, en el caso de los motores comprados, estos tienen una eficiencia eléctrica del 38-39 % y una eficiencia térmica del 45%, teniendo una eficiencia total cercana al 85%. La segunda función es la de calentar el vapor de agua necesario para cerrar el circuito en el que se calientan los reboilers del área 200-2, para esto se utilizarán un total de 7 calderas. Debido a que ambos equipos generan calor debida a la combustión de los gases se ha decidido que sea un área separada de las otras para evitar subidas de temperatura no deseadas en otras zonas de la planta.

1.5.2.6. Área 600

La zona 600 es la encargada del tratamiento de residuos, más específicamente de gases, se encarga de la eliminación de partículas en suspensión como trazas de benceno en el corriente de nitrógeno y de dióxido y monóxido de carbono en el corriente de gases de combustión mediante filtros de carbón activado, para cumplir con los límites permitidos por la legislación vigente, teniendo un control de las emisiones que se generan en la planta.

1.5.2.7. Área 700

El área de mantenimiento tiene como función revisar, arreglar o cambiar todos los equipos dañados o que no funcionen correctamente. La función que realizan estos

empleados no es menospreciable ya que la planta requiere un mantenimiento constante y una vigilancia de todo para que no ocurra un desastre en la planta.

1.5.2.8. Área 800

La función del área 800 es encargarse del control de todos los lazos repartidos en las diferentes zonas de producción y almacenamiento, es decir, es la sala de control en la que se podrán visualizar y controlar todas las variables que interesa conocer.

1.5.2.9. Área 900

El área 900 corresponde al laboratorio, que tiene como función realizar el control de calidad de tanto los reactivos que vienen a la planta, como el producto que se produce, además de las diferentes funciones de I+D, ya que EB Production es una empresa que está en constante investigación para optimizar y mejorar el proceso productivo así como la calidad del producto o nuevos productos. Otra de sus funciones es analizar que los gases del área 600 este dentro de los valores esperados.

1.5.2.10. Área 1000

El área 1000 es la encargada de suministrar los servicios necesarios a la planta, en esta se encuentra el suministro de agua y electricidad (transformadores), para el suministro de los servicios se utilizan bombas o compresores capaces de impulsar los servicios a las zonas necesarias.

1.5.2.11. Área 1100

El área 1100 contiene los vestuarios para los trabajadores, en donde se les proporcionará los EPI's necesarios y taquillas para guardar sus pertenencias, el comedor que suministra alimento a los empleados y microondas para calentar la comida que puedan traerse al trabajo y finalmente las oficinas donde están tanto los abogados como los encargados de los diferentes departamentos como el de compra y venta de suministros y materias primas, ingenieros o comerciales, entre otros, además de los contables y el/la secretaria.

1.5.2.12. Área 1200

El almacén tiene como función almacenar tanto las bombonas de nitrógeno como materiales necesarios para realizar la puesta en marcha y suministros como bombas, compresores, válvulas que se utilicen dentro de la planta, planchas de acero para hacer las tuberias, codos, bridas y más suministros que serán de vital importancia para la producción de etilbenceno.

1.5.2.13. Área 1300

El área 1300 es la zona reservada para el párking para los empleados de la planta de producción de etilbenceno.

1.5.2.14. Área 1400

Y Finalmente el área 1400 que corresponde a la balsa contra incendios, que tiene como función suministrar el agua necesaria en los hidrantes como en las BIE's en el hipotético caso que se produzca un incendio dentro de EB Production.

1.6. Servicios requeridos de la planta

Como en cualquier planta, son necesarios una serie de servicios y materias auxiliares que no forman parte del proceso como tal pero son indispensables para la correcta operación de la planta o por razones de seguridad o para la puesta en marcha.

Debido a que para la puesta en marcha se requiere una cantidad demasiado elevada de algunas materias auxiliares o una potencia de algunos equipos mucho mayor que la necesaria durante la operación de la planta en condiciones normales, estos equipos serán proporcionados por empresas externas solo para las fases de puesta en marcha de la planta.

En el caso de nuestra planta los servicios necesarios son agua de red, agua contra incendios, agua de refrigeración, aire comprimido, chiller con amoníaco, electricidad, gas natural, nitrógeno y vapor de agua. A continuación se describe con mayor detalle los servicios mencionados, cuál es su requerimiento y como se producirán o comprarán.

1.6.1. Agua de red

El agua de red es aquella que se ocupa de abastecer de agua potable los equipos y servicios necesarios que no tengan que ver con el proceso de producción como podría ser en los baños o en las zonas de oficina o laboratorio.
Este servicio será suministrado de forma externa y llegará por una acometida situada a pie de parcela con un diámetro de 200 mm y una presión de 4 bars, la cual será suficiente para hacer llegar agua de red a todas las zonas de la planta donde será necesaria, por lo que no hará falta instalar ninguna bomba ni equipo auxiliar a parte del sistema de tuberías necesario para conectar la red de agua hacia las diferentes zonas de la planta.
Debido a que este servicio sólo será utilizado para las necesidades de los empleados (ir al baño, beber agua o limpiar el material de laboratorio entre otros) es difícil calcular cuál será el consumo de agua de red anual, pero este será despreciable si se compara con los gastos de agua para necesidades de producción. No obstante, se puede

estimar que su consumo podría estar entre 5 y 10 m³/h, lo que supondría un consumo anual de entre 42.000 y 84.000 m³, aunque esto es solo una estimación sin hacer ningún tipo de cálculo.

1.6.2 Agua contra incendios

El sistema de agua contra incendios es indispensable en zonas donde haya peligro de incendio o explosion debido al uso de productos inflamables, como es el caso de nuestra planta donde la mayoría de productos con los que se trabaja son inflamables. Por lo tanto, hemos de disponer de un sistema de agua contra incendios capaz de abastecer todos los equipos especiales de extinción que se han instalado por todas las zonas de la planta.

Además debido a la gran magnitud de la planta y del riesgo de incendio o explosión que hay, se ha construido una balsa para almacenar agua de reserva por si en caso de incendio los equipos de extinción necesitan absorber agua de la balsa o directamente los bomberos necesitan más agua puedan extraerla de forma rápida de nuestra balsa. Para ello, es necesario instalar una estación de bombeo de agua (EBA) para poder hacer llegar el agua de la balsa a los diferentes equipos de extinción.

Debido a que no está previsto tener incendios o explosiones de forma habitual ya que la planta ha estado diseñada en un entorno ATEX y con un sistema de control redundante para casos de fallos, se espera que no haya consumo de agua contra incendios de forma habitual, no obstante, los equipos y la balsa siempre deben de disponer de agua y pasar las revisiones pertinentes para cumplir con la normativa.

1.6.3 Agua de refrigeración

Dentro de nuestra planta, el agua de refrigeración juega uno de los papeles más importantes, ya que se trabaja a muy altas temperaturas (alrededor de 400 ºC) y se necesita enfriar hasta temperaturas cercanas a los 50 - 60 ºC utilizando intercambiadores de calor y los condensadores de las torres de separación también funcionan con agua, y como en estos el fluido de proceso debe producirse un cambio de fase, el calor intercambiado será muy elevado por lo que se requerirá un caudal de agua de refrigeración muy grande. A continuación, se muestra la *Tabla 12*, donde se ha hecho una lista de los requerimientos de agua de refrigeración por parte de los diferentes equipos.

Tabla 12: Requerimiento de agua de refrigeración.

Equipo	Temperatura Entrada (ºC)	Temperatura Salida (ºC)	Calor intercambiado (kW)	Caudal volumétrico (m^3/h)
E-202-1	30	40	1199,3	100,9
E-204-1	30	40	13498,9	1135,6
E-201-2	30	40	1731,9	145,7
C-202-2	30	40	6762,9	568,9
C-203-2	30	40	6206,9	522,1
Caudal volumétrico total (m^3/h)				**2473,2**

Como se puede observar en la *Tabla 12*, el caudal requerido de agua de refrigeración es de 2.473,2 m^3/h, lo cual es un caudal enorme, esto es debido a que solo se permite un salto térmico en el agua de 30 a 40 ºC, se ha decidido que este sea el salto térmico permitido ya que se ha diseñado un circuito cerrado para que el gasto de agua de refrigeración en condiciones de operación sea un consumo viable aunque el caudal que se necesita para refrigerar sea demasiado elevado. Para ello, se han comprado tres torres de refrigeración idénticas, del proveedor EWK, que volverán a enfriar el agua que sale de los intercambiadores y condensadores hasta 30 ºC. En la *Tabla 13*, se muestran algunas especificaciones de las torres elegidas, aunque estas se pueden ver con más detalle en el *Capítulo 2: Equipos.*

Tabla 13: Especificaciones de las torres de refrigeración

Especificaciones	
Proveedor	EWK
Modelo	EWB 5750
Longitud / Anchura / Altura (m)	10,02 / 6,37 / 3,42
Peso vacío / Peso operación (kg)	11600 / 16400
Calor disipada (kW)	9193

El funcionamiento de una torre de refrigeración consiste en hacer circular una gran masa de aire frío en contracorriente con el agua caliente haciendo que este aire capte

parte del agua caliente y enfríe el resto del agua que se podrá recircular al proceso, no obstante dentro de la torre se producen ciertas pérdidas de agua debido al propio funcionamiento de la torre, por lo que el caudal de agua perdido por evaporación será el caudal de agua que habrá que reponer y que realmente determinará el gasto de agua de refrigeración en condiciones normales de operación de la planta. A partir del diseño de la torre en hysys se ha determinado que la pérdida de agua de refrigeración por evaporación y gotas es de 33 m^3/h, por lo que este será el gasto operacional de agua de refrigeración, que haciendo el cálculo anual se traduce en un gasto de 277.200 m^3, o lo que es lo mismo, 275.994 toneladas de agua al año.

Además de esto, debido a que en los reactores se trabaja a temperaturas cercanas a la temperatura de autodescomposición/autoignición de alguno de los productos (500 ºC aproximadamente), se ha diseñado un sistema de control en el que si la temperatura de alguno de los reactores se acerca demasiado a esta temperatura se abrirán unas válvulas automáticas que permitirán el paso de un gran caudal de agua de refrigeración auxiliar por el interior de la camisa del reactor que permitirá enfriar el fluido para que no sobrepase la temperatura de autodescomposición/autoignición y así evitar posibles incendios y/o explosiones, debido a que este sistema de alarma no está previsto que se accione en condiciones normales de operación, no se ha tenido en cuenta el gasto de este agua de refrigeración en el cálculo de agua anterior, ya que en condiciones normales de operación los reactores no están refrigerados sinó que trabajan de forma adiabática.

1.6.4. Aire comprimido

El servicio de aire comprimido es esencial para el correcto funcionamiento del sistema de control dentro de nuestra planta, ya que todas las válvulas, tanto de control como las automáticas, funcionan con una señal neumática, para la cual se necesita aire comprimido. Es por eso que se ha decidido diseñar un compresor y un tanque de almacenamiento capaz de suministrar el aire comprimido necesario para las 160 válvulas instaladas en las diferentes zonas de la planta. A continuación, se muestra la *Tabla 14,* donde se pueden ver las necesidades de aire comprimido ya que cada válvula requiere entre 1,4 y 3 m^3/h de aire, por lo que el cálculo se ha realizado para el caudal máximo como se puede observar con mayor detalle en el *Capítulo 11. Manual de cálculos.*

Tabla 14: Planificación de las tareas necesarias para la construcción de la planta

Nº Total de válvulas	***Caudal máximo (m^3/h)***	***Caudal total de aire (m^3/h)***
160	3	480

Para ello se ha elegido un compresor del proveedor AtlasCopco, en la *Tabla 15* se pueden ver algunas de las especificaciones del equipo, aunque estas se pueden ver de forma más detallada en el *Capítulo 2. Equipos.*

Tabla 15: Especificaciones del compresor para aire comprimido

Especificaciones	
Proveedor	AtlasCopco
Modelo	GA 55 VSD
Longitud / Anchura / Altura (m)	1,10 / 1,15 / 1,97
Peso (kg)	1100
Potencia motor (kW)	55

1.6.5. Amoniaco

Para poder llevar a cabo una correcta separación de los diferentes componentes en la primera columna, es necesario que el condensador funcione con etilenglicol, ya que la temperatura a la que tiene que enfriar es demasiado baja y no se puede llevar a cabo con agua como en los demás condensadores ya que al estar a -24 ºC se congelaría. En el caso del condensador en cuestión, el amoníaco sufre un salto de temperatura de -35 a -40 ºC utilizando un caudal de 3.133 kg/h, para evitar un gran consumo de amoníaco, se han comprado cuatro chillers del proveedor INTARCON en el que se volverá a enfriar el amoníaco para hacerlo entrar de nuevo al condensador sin consumir amoníaco adicional, en la *Tabla 16* se pueden ver algunas de las especificaciones del equipo, aunque estas se pueden ver de forma más detallada en el *Capítulo 2. Equipos.*

Tabla 16: Especificaciones del chiller

Especificaciones	
Proveedor	INTARCON
Modelo	BWW-MPM-7
Longitud / Anchura / Altura (m)	10,88 / 2,22 / 2,37
Peso (kg)	8785
Calor disipada (kW)	314,8

1.6.6. Electricidad

La energía eléctrica es fundamental para el funcionamiento de la planta ya que es la encargada de hacer funcionar la mayoría de equipos desde bombas o compresores hasta las oficinas y laboratorios. Por lo tanto, es importante calcular el requerimiento de potencia eléctrica, que habrá que introducir en el transformador para que este la transforme al voltaje requerido por los equipos.

Como se ha calculado en el *Capítulo 11. Manual de cálculos,* la potencia eléctrica necesaria es de 1.468 kW que teniendo en cuenta las horas de trabajo de la planta en un año se traducen en 12.331.200 kWh, debido al gran corriente de hidrocarburos que se obtiene en la primera columna de separación, se ha decidido utilizarlo para producir energía por cogeneración, obteniendo un total de 406.633.323 kWh cada año, por lo que la potencia eléctrica producida es superior a la necesaria, lo que quiere decir que no será necesario que se suministre electricidad por parte de una empresa externa y que además la potencia sobrante se venderá para aumentar los ingresos. Debido a que la potencia eléctrica que se produce en los motores está a una tensión mayor de 380 V que es la tensión a la que trabajan la mayoría de equipos de nuestra planta, el transformador en cuestión tiene una potencia de 2.000 kVa.

Aunque la planta sea autosuficiente en términos de energía eléctrica, es necesario disponer de un grupo electrógeno, ya que una planta química no puede quedarse sin electricidad en ningún momento porque podría provocar un accidente, además de las pérdidas económicas que supone tener parada una planta de esta magnitud. Es por eso que el grupo electrógeno debe ser capaz de suministrar electricidad a los equipos más críticos del proceso como pueden ser las torres de refrigeración o el sistema de control además de otros servicios auxiliares, aunque debido a que los equipos que más potencia consumen son críticos, el equipo electrógeno instalado tiene una potencia de 2.285 kVa. Por norma general este tipo de grupos electrógenos funcionan

como motores de combustión, por lo que en caso de ser necesario su uso se verá afectado el consumo de gas natural de red contratado, ya que no se puede asegurar que independientemente del fallo eléctrico sigamos teniendo un gran caudal de hidrocarburos, aunque en caso de no verse afectado, este podría utilizarse para no aumentar el gasto de gas natural externo.

Cabe decir que tanto la potencia del transformador como del grupo electrógeno han sido sobredimensionados para no tener que cambiarlos en caso de posibles ampliaciones de la planta que aumenten el consumo eléctrico.

1.6.7. Gas natural

El gas natural es el combustible utilizado para las calderas y hornos de nuestra planta, concretamente disponemos de un horno encargado de calentar el benceno a la temperatura necesaria para entrar a los reactores y una caldera para calentar el circuito cerrado de vapor de agua para los reboilers, en el caso del horno, el gas natural solo será necesario para la puesta en marcha, ya que en condiciones normales de operación se ha diseñado un intercambiador que calienta el benceno a la temperatura necesaria utilizando el corriente de salida de los reactores y el horno únicamente funcionará en caso de que el intercambiador de calor no funcione correctamente y el benceno no consiga la temperatura necesaria, en ese caso se utilizará el corriente de hidrocarburos que se obtiene de la primera columna ya que su poder calorífico es suficiente y tenemos un gran exceso. De la misma forma funcionará la caldera de vapor, para la puesta en marcha se utilizará gas natural mientras que en condiciones normales de operación el combustible utilizado será una parte del corriente rico en hidrocarburos obtenido en la primera columna.

A continuación, se muestra la *Tabla 17* donde se pueden ver los requerimientos de gas natural para la puesta en marcha y el consumo del corriente de hidrocarburos utilizado en condiciones normales de operación.

Tabla 17: Consumo de gas natural y corriente de hidrocarburos

Equipo	***Consumo puesta en marcha (kg/h)***	***Consumo condiciones de operación (kg/h)***
H-201-1	735	0
C-501	16480	76,64

Además a estos consumos es necesario sumar el consumo de gas natural en las oficinas y laboratorios debido al uso de calefacción, duchas, etc. y al posible consumo que tendría el grupo electrógeno en caso de que se produjera un fallo en el sistema eléctrico y fuera necesario su uso.

1.6.8. Nitrógeno

Debido al peligro de incendio o explosión provocado por el uso de productos inflamables dentro de nuestra planta se ha decidido inertizar todos los equipos con nitrógeno para inertizar la atmósfera dentro de dichos equipos y que estos no contengan oxígeno que puede ser el causante de una explosion. En el caso del consumo de nitrógeno se observan dos consumos muy diferentes, el consumo durante la puesta en marcha en el que todos los equipos deben llenarse de nitrógeno y el consumo en condiciones normales de operación en el que solo hay consumo en los tanques de almacenamiento tanto de producto como de reactivo.

Como se ha calculado en el *Capítulo 11. Manual de cálculos,* el volumen necesario de nitrógeno es de 7.991,80 m^3 en el caso de la puesta en marcha, que es el volumen equivalente a los equipos de nuestra planta, mientras que en el caso del consumo en condiciones normales de operación, el consumo de nitrógeno es de 152 m^3/h a presión atmosférica, se ha decidido que el nitrógeno sea suministrado de forma externa y se comprarán botellas de nitrógeno comprimido para 3 semanas de operación y se irán recomprando conforme se vaya agotando.

1.6.9. Vapor de agua

Para el correcto funcionamiento de los reboilers se ha decidido crear un circuito de vapor de agua cerrado en el que el vapor entra a 370 ºC por el reboiler de la última columna que es el que mayor temperatura requiere y sale a 156 ºC por el reboiler de la primera columna que es el que menos temperatura requiere, de esta forma se consigue reducir el consumo de vapor de agua lo mínimo posible ya que se utiliza un caudal de 201.968 kg/h pero este se recircula de forma constante, por lo que en condiciones normales de operación no supondría ningún consumo en cuanto a materia, pero sí habrá consumo de combustible, que en este caso se utilizará parte del corriente de hidrocarburos que se produce en la planta, ya que para poder cerrar el circuito hay que volver a calentar el vapor hasta los 370 ºC necesarios para entrar al último reboiler y compensar la pérdida de presión que se produce en los reboilers, para ello se utilizarán varias calderas, debido a que el caudal de vapor es demasiado grande, y un compresor, de los cuales se pueden observar algunas de las especificaciones principales en las *Tablas 18* y *19,* aunque se pueden ver de forma más detallada en el *Capítulo 2. Equipos.*

Tabla 18: Especificaciones de la caldera

Especificaciones	
Proveedor	Vitomax HS
Modelo	M75 ECO 1
Potencia de combustión (kW)	21300

Tabla 19: Especificaciones del compresor

Especificaciones	
Proveedor	AtlasCopco
Modelo	GA 37L VSD^{+}
Longitud / Anchura / Altura (m)	1,10 / 1,15 / 1,97
Peso (kg)	1060
Potencia motor (kW)	37

1.7 Programación temporal

Una vez se ha hecho un estudio de viabilidad del proyecto, las tareas de ingeniería básica y tenemos luz verde por parte de los inversores para realizar el proyecto se procede a planificar y programar la construcción de la planta, para ello se realiza un diagrama de Gantt con las diferentes tareas a realizar, su duración aproximada y el orden de preferencia que deben seguir. A continuación, en la *Tabla 20* se presentan dichas tareas a realizar con su duración y orden de precedencia.

Tabla 20: Planificación de las tareas necesarias para la construcción de la planta

Nº de Tarea	Tarea	Duración (días)	Precedencia
1	Ingeniería de detalle	120	-
2	Licencia de obras	150	-
3	Demanda de equipos	150	1
4	Limpieza de terreno	60	2
5	Excavaciones y cimentación	60	4
6	Instalación de suministros	30	5
7	Aceras y viales	30	5
8	Aparcamientos	20	7
9	Edificación de oficinas	90	6
10	Instalación equipos A-100	60	3:7
11	Instalación equipos A-200	90	3:7
12	Instalación equipos A-300	60	3:7
13	Instalación equipos A-400	75	3:7
14	Instalación equipos A-500	60	3:7
15	Instalación equipos A-600	30	3:7
16	Instalación equipos A-1000	45	3:7
17	Construcción balsa contra incendios	30	3:7
18	Instalación de tuberías de proceso	60	10,11,12

Nº de Tarea	Tarea	Duración (días)	Precedencia
19	Instalación de tuberías de servicio	40	16
20	Instalación de instrumentación	45	18,19
21	Conexión de instrumentación a equipos	30	20
22	Aislamiento de tuberías	30	21
23	Aislamiento de equipos	30	21
24	Prueba y calibración de equipos e instrumentación	45	22,23
25	Pintura	30	24
26	Limpieza	20	25

Una vez realizado el listado de tareas a realizar necesarias para la construcción de la planta, con la ayuda del programa *OpenProj* se realiza el diagrama de Gantt para estimar la duración de la construcción y cuales son las tareas críticas y cuales tendrían margen de tiempo para retrasarse sin modificar la duración del proyecto, en este caso el camino crítico se muestra en color rojo mientras que las tareas correderas se muestran en color azul, en la *Figura 25* se puede observar el diagrama de Gantt realizado para el proyecto de construcción de nuestra planta, el cual tiene una duración aproximada de 2 años y medio debido a la gran magnitud de la planta y requerimiento de equipos especiales como reactores y columnas de separación que pueden requerir un mayor tiempo para su diseño y construcción que otros reactores o columnas de condiciones más comunes. Aun así la duración del proyecto puede ser menor por la posibilidad de haber sobreestimado la duración de algunas tareas o por el contrario puede ser mayor debido a problemas con las tareas críticas que pueden retrasar el proyecto.

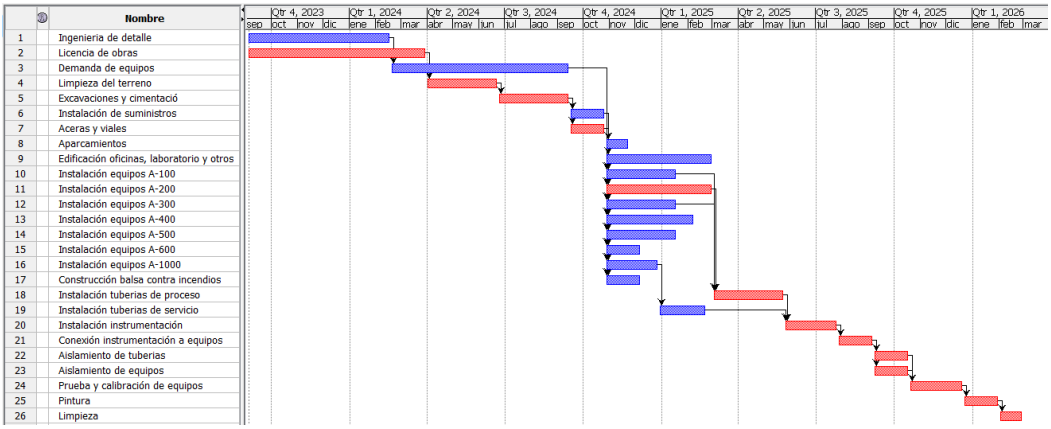


Figura 25: Diagrama de Gantt para la construcción de la planta

1.8 Bibliografía

1. OpenFlights.org: Flight logging, mapping, stats and sharing. Consultado (15/03/2023)
https://openflights.org/
2. *Aeropuerto de Barcelona El Prat. Datos técnicos y estadísticos del aeropuerto*. Aeropuerto de Barcelona. Consultado (15/03/2023)
https://www.aeropuertobarcelona-elprat.com/cast/aeropuerto-de-barcelona.htm
3. *Estadísticas - Autoridad Portuaria de Tarragona*. Port de Tarragona. Consultado (15/03/2023)
https://www.porttarragona.cat/es/servicio-negocio/negocio/estadisticas#cuadro-estadisticas
4. *Líneas regulares - Autoridad Portuaria de Tarragona*. Port de Tarragona. Consultado (15/03/2023)
https://www.porttarragona.cat/es/servicio-negocio/negocio/lineas-regulares
5. *Port Barcelona - Estadísticas*. (n.d.). Port de Barcelona. Consultado (16/03/2023)
https://www.portdebarcelona.cat/es/web/autoritat-portuaria/estadisticas
6. Fernández, G. (2009, Septiembre 15). *Alquilación de Friedel-Crafts del Benceno | Química Orgánica*. QuímicaOrgánica.net. Consultado (17/03/2023)
https://www.quimicaorganica.net/benceno-alquilacion-friedel-crafts.html
7. Colomina, P. P. (n.d.). *Diseño y estudio económico de un proceso de producción de Etilbenceno utilizando ProMax*. RiuNet. Consultado (18/03/2023)
https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/176036/Pascual%20-%20Diseno%20y%20estudio%20economico%20de%20un%20proceso%20de%20produccion%20de%20Etilbenceno%20utilizando%20ProMax.pdf
8. Weiming Yang (Enero 2016). Chinese Journal of Catalysis. Sciencedirect. Consultado (25/03/2023)
https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1872206715609652
9. Cornejo, L. (n.d.). *Boletín Científico*. Boletín Científico :: UAEH. Consultado (25/03/2023)
https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/prepa3/n4/m2.html
10. *Etano: qué es, estructura química, propiedades, usos, riesgos*. (n.d.). Lifeder. Consultado (27/03/2023)
https://www.lifeder.com/etano/
11. *Etano*. (n.d.). quimica.es. Consultado (27/03/2023)
https://www.quimica.es/enciclopedia/Etano.html
12. Bolívar, G. (2021, May 19). *Propileno: qué es, estructura química, propiedades, usos*. Lifeder. Consultado (28/03/2023)
https://www.lifeder.com/propileno/