

PLANTA DE PRODUCCIÓN DE ÓXIDO DE ETILENO

Trabajo final de grado
Grado en Ingeniería Química



Paula Lafuente Simó
Joan Ramón Pájaro Crespo
Anabel Rodríguez Rengel
Carlos Salgado Espinosa
Ferriol Viñas Francisco
Veronica Fernanda Zaldivar Sánchez

Tutor: Marc Perís

Año académico: 2019 - 2020

CAPÍTULO I



Especificaciones del proyecto

ÍNDICE

1. Especificaciones del proyecto	3
1.1 Definición del proyecto	3
1.1.1 Bases del proyecto	3
1.1.2 Alcance del proyecto	4
1.1.3 Localización de la planta	4
1.1.3 Abreviaciones	16
1.2 Características y propiedades de los compuestos	18
1.2.1 Materias primas	20
1.2.2 Producto final: óxido de etileno C_2H_4O	21
1.2.3 Subproductos y otros compuestos.....	24
1.3 Descripción del proceso de fabricación	27
1.3.1 Diagrama de bloques	27
1.3.2 Diagrama de proceso y balance de materia.....	28
1.3.3 Descripción detallada del proceso	37
1.3.4 Distribución por áreas	46
1.3.5 Descripción de las áreas.....	48
1.4 Especificaciones y necesidades de servicios de planta.	51
1.4.1 Electricidad.....	52
1.4.2 Gas natural	54
1.4.3 Agua de red	54
1.4.4 Agua contra incendios.....	54
1.4.5 Agua descalcificada y desmineralizada del proceso	55
1.4.6 Agua de refrigeración.....	55
1.4.7 Agua glicolada	56
1.4.8 Vapor sobrecalentado.....	56
1.4.9 Vapor de agua	57
1.4.10 Aire comprimido	57
1.4.11 Nitrógeno	58
1.4.12 DOWTHERM-A.....	59
1.4.13 Agua sobrecalentada.....	60
1.4.14 Consumo total de agua de red.....	60
1.5 Planificación de los recursos humanos de la planta	61

1.5.1 Distribución de cargos de la planta	62
1.6 Planificación temporal del proyecto constructivo	64
1.7 Bibliografía	67

1. Especificaciones del proyecto

1.1 Definición del proyecto

En este capítulo se presentan las especificaciones del proyecto de diseño de la planta industrial ETHOXID, la cual estará ubicada en el polígono industrial “Gasos Nobles” en La Canonja, Tarragona, España, y tendrá como objetivo la producción de óxido de etileno de elevada pureza a partir de oxígeno y etileno. El nombre de la empresa proviene del nombre en inglés de su producto final *Ethylene Oxide*.

En este capítulo se definirán diferentes características de la planta como su funcionamiento en general, los compuestos con los que se trabaja en ella y sus propiedades, la descripción del proceso de fabricación y de todas las áreas que lo componen, los servicios de la planta, además del cálculo del balance de materia y la programación temporal de la planta.

1.1.1 Bases del proyecto

El objetivo de este proyecto es el diseño de una planta industrial para la producción de óxido de etileno. La planta será diseñada con el fin de hacer viable la producción en continuo de óxido de etileno a partir de la reacción entre etileno y oxígeno, en presencia de un catalizador de plata en soporte de γ -alúmina.

El diseño de la planta se encuentra regido por las normativas de seguridad y medio ambiente, y sus especificaciones son las siguientes:

- **Capacidad de producción:** 120.000 t/año de óxido de etileno.
- **Funcionamiento:** 320 días/año de producción. Durante el año se dispone de 45 días para realizar paradas en planta, por lo que se ha decidido programar 2 paradas: una de 25 días en junio y otra de 20 en diciembre.
- **Presentación del producto:** líquido en bulk, recipientes de 263 m³ a presión.

La empresa ETHOXID puede asegurar que respeta las Normas de Correcta Fabricación que están referidas a la fabricación del material de partida a partir de cualquier tipo de síntesis química. Así mismo, todo el proyecto ha sido diseñado conforme al cumplimiento de los términos medioambientales, urbanísticos, seguridad e higiene y protección contra incendios.

1.1.2 Alcance del proyecto

El objetivo del proyecto es diseñar la planta industrial que produce óxido de etileno, por lo que su alcance incluye los puntos desarrollados a continuación:

- Diseñar y especificar todos los equipos necesarios en el proceso de producción de óxido de etileno.
- Diseñar y especificar las áreas de almacenaje de producto final, así como las áreas de carga y descarga.
- Diseñar y especificar las áreas de servicio.
- Diseñar los sistemas de control.
- Diseñar los sistemas de seguridad e higiene.
- Diseñar las áreas de las oficinas, laboratorios, vestuarios y zona de aparcamiento.
- Analizar el impacto medioambiental e identificar como hacer el tratamiento de los posibles residuos, ya sean sólidos, líquidos o gases.
- Realizar la evaluación económica y estudiar la viabilidad de la planta.
- Elaborar un plan de puesta en marcha.
- Encontrar posibles mejoras y ampliaciones de la planta.

1.1.3 Localización de la planta

La localización designada para la planta se encuentra en el término municipal de 'La Canonja', concretamente en el polígono industrial "Gasos Nobles". Dicho término municipal se encuentra en la comarca del Tarragonés, provincia de Tarragona. Así mismo, limita al noroeste con el término municipal de Reus y al sureste con el de Tarragona, y fue constituido como municipio independiente el 15 de abril de 2010.

En la **Figura 1.1** se puede observar la localización de la planta.

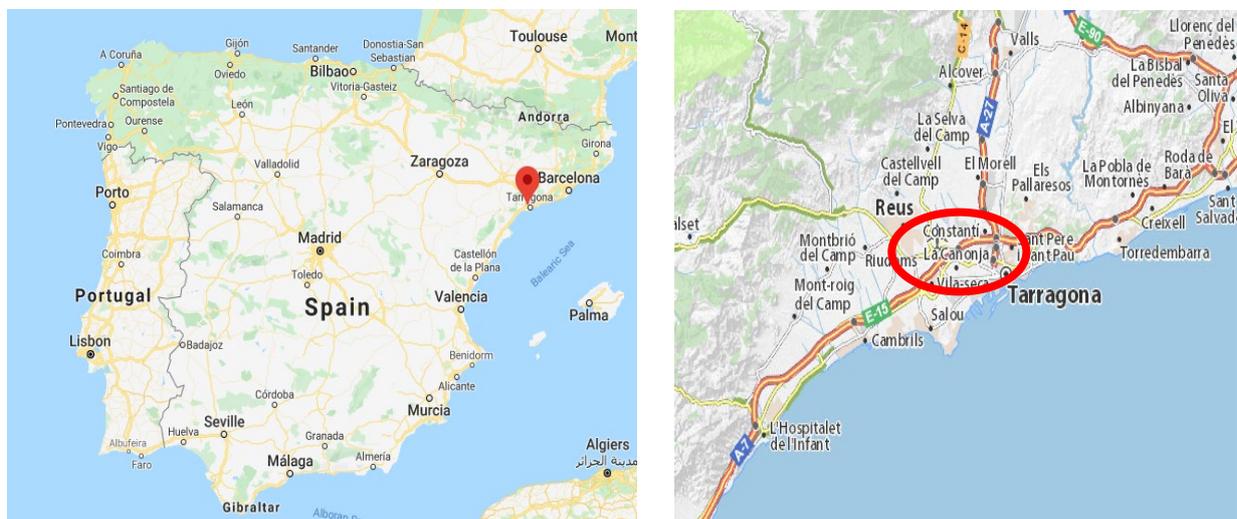


Figura 1.1. Localización de la planta de ETHOXID.

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

La parcela donde se ubicará la planta de ETHOXID tiene una superficie total de 53.235m² y su plano se puede observar a continuación en la **Figura 1.2**.

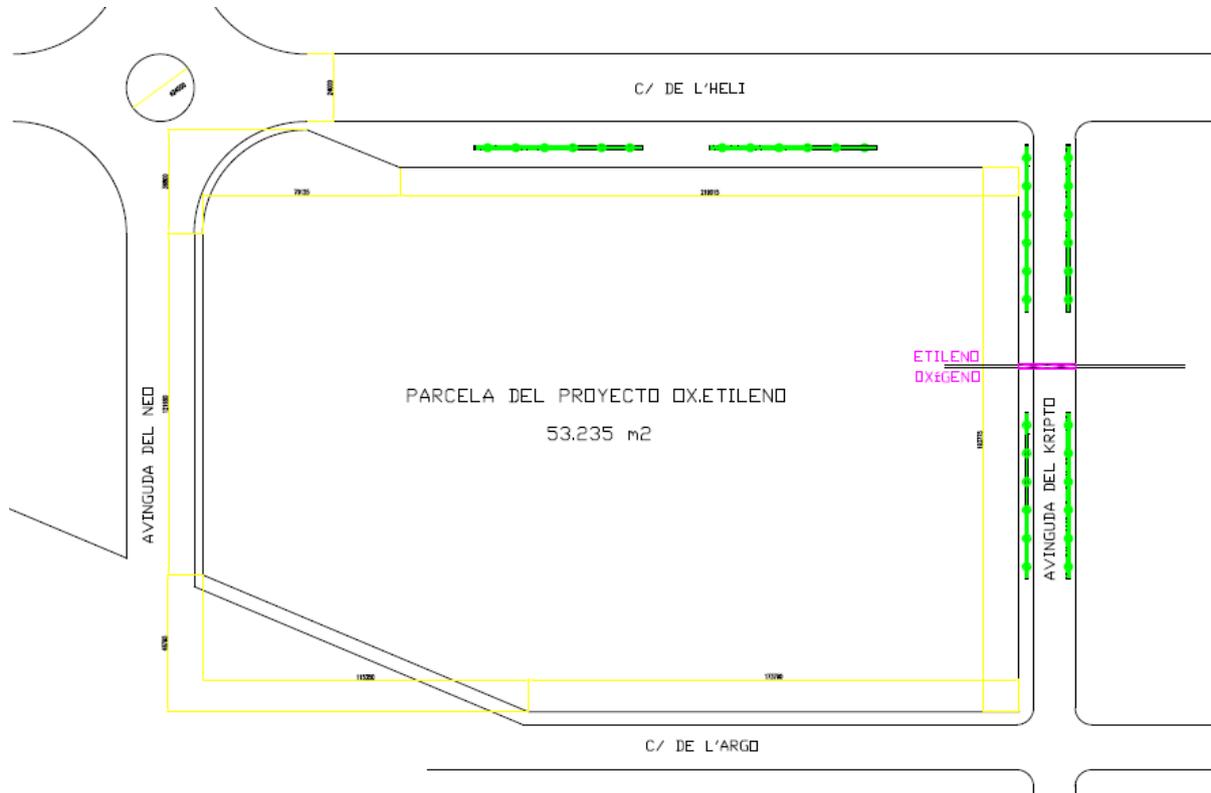


Figura 1.2. Plano de la parcela.

Los parámetros de edificación establecidos directamente según la normativa urbanística del municipio independiente 'La Canonja' para el polígono industrial 'Gasos Nobles', y con los que ETHOXID cumplirá, son los que se presentan en la **Tabla 1.1**.

Tabla 1.1. Parámetros de edificación de la parcela.

EDIFICABILIDAD	1,5 m ² techo/m ² de 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.

De los 53.235 m² totales de la parcela, se tiene una ocupación de 33.939,99 m², lo cual equivale a un 63.75% de ocupación, que se encuentra dentro del 75% de ocupación máxima. De los 33.939,99 m² ocupados, 14165.4134 m² equivalen a construcciones, por lo tanto se cuenta con 96 plazas de estacionamiento para cumplir con las 95 plazas necesarias. (1 plaza/150 m² construidos).

1.1.3.2 Servicios disponibles de la planta

El polígono industrial 'Gasos Nobles' presenta los servicios disponibles en la **Tabla 1.2**:

Tabla 1.2. Servicios disponibles de la planta ETHOXID.

Energía Eléctrica	Conexión desde la línea de 20 kV a pie de parcela, hace falta proporcionar una estación transformadora (espacio ya delimitado en el plano).
Gas Natural	Conexión a pie de parcela a media presión (1,5 kg/cm ²).
Alcantarillado	Red unitaria al centro de la calle a una profundidad de 3,5 m (diámetro del colector de 800 mm)
Agua De Incendios	La máxima presión es de 4 kg/cm ² , hace falta diseñar una estación de abombamiento y reserva de agua.
Agua De Red	Conexión a pie de parcela a 4 kg/cm ² con un diámetro de 200mm.
Terreno	Resistencia del terreno de 2 kg/cm ² a 1,5 m de profundidad sobre gravas.

1.1.3.3 Evaluación de las comunicaciones y accesibilidad de la planta

Para que un proyecto sea viable, uno de los factores que mayor influencia tiene es la localización de la planta, es por ello por lo que se realiza un estudio de las diferentes comunicaciones y opciones de acceso y de suministro de materias primas a ETHOXID, así como la distribución del producto final para su comercialización,

La Canonja es uno núcleo de población que, con motivo de la industrialización petroquímica, ha sufrido en las últimas décadas un gran cambio demográfico y urbanístico. Así mismo, La Canonja se encuentra a 5,2 km de Tarragona y 7,4 km de Reus, las dos ciudades más importantes de la provincia de Tarragona.

Comunicación vía terrestre:

El polígono sur de Tarragona cuenta con una amplia conexión de carreteras y vías ferroviarias. La comunicación a través de medios de transporte público con la población que se encuentra cerca de donde se ubica la ciudad es muy importante, ya que facilita la movilidad de los trabajadores, la cual cosa repercute en su bienestar y, por lo tanto, a la empresa.

La Canonja pertenece a la provincia de Tarragona y esta limita con las provincias de Barcelona y Lleida, a las cuales se llega en aproximadamente 1-2 horas en vehículo. Además, desde la Canonja se puede acceder en menos de 10 minutos al centro de Tarragona y en menos de 15 minutos a la ciudad de Reus.

- Conexiones por carretera: la nacional N-340 y autopista AP-7 conectada con la autovía A-7. La nacional N-340 es la carretera más larga de España y une Cádiz con Barcelona por toda la costa del Mediterráneo, haciendo posible la conexión con diez provincias diferentes. La AP-7 comunica toda la costa mediterránea española desde la frontera con Francia hasta Guadiaro (barriada de la ciudad de San Roque, Cádiz). Esta autopista, que mide 948,3 km, está dividida en 28 tramos en los cuales la intensidad media diaria de tráfico varía entre los 3.340 vehículos/día y 109.960 vehículos/día, teniendo en los tramos de Tarragona-Valencia un valor de 18.582 vehículos/día y en el tramo Barcelona-Tarragona un valor de 52.443 vehículos/día.
- Conexiones ferroviarias: la conexión ferroviaria más próxima se encuentra en el centro de la ciudad de Tarragona, por la cual circulan trenes de mercancías, comunicada con el puerto de la misma ciudad. En el año 2018 se transportaron 1.423.483 toneladas de mercancía en ferrocarril; en total, 4.089 trenes o 62.677 vagones circularon por las instalaciones del Port de Tarragona [1].

A 10 minutos en coche, o media hora en bus, de la Canonja se encuentra la estación de alta velocidad “Camp de Tarragona”. Esta tiene llegadas diarias de Barcelona-Sants y Figueres, y salidas diarias a Madrid-Puerta de Atocha, Valencia-Joaquin Sorolla, San Sebastián/Donostia, Sevilla-Santa Justa y Lleida-Pirineos.

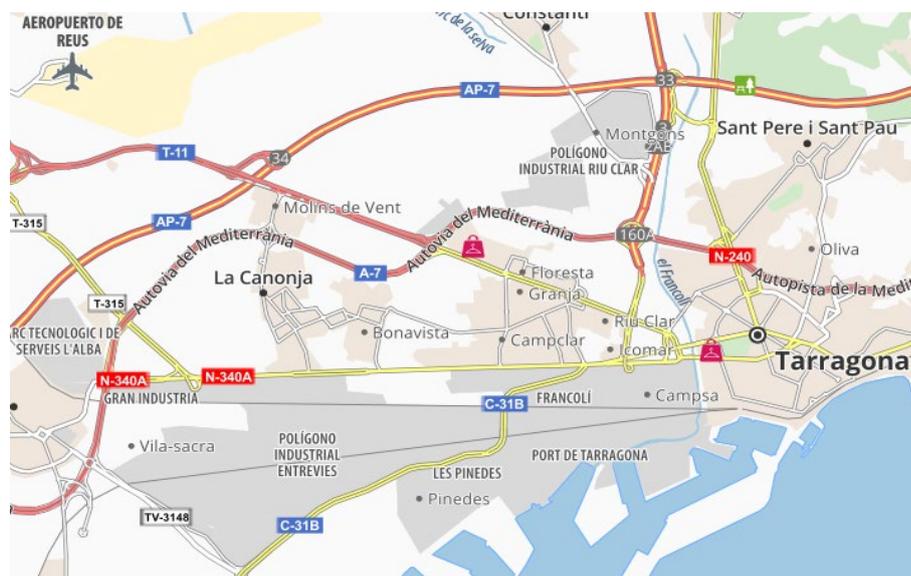


Figura 1.3. Mapa de las conexiones terrestres en La Canonja.

Comunicación vía aérea:

Una buena comunicación aérea es una ventaja competitiva para la empresa ya que implica mayor disponibilidad de vuelos y la facilitación del desplazamiento de proveedores, clientes, técnicos y recambios. La Canonja se encuentra a 7,5 km de distancia del aeropuerto de Reus y la planta industrial se encuentra, aproximadamente, a 8,5 km de este, el cual cuenta con conexiones tanto con España como con las demás capitales europeas. Así mismo, a 88 km se ubica el aeropuerto Josep Tarradellas Barcelona – El Prat, el cual es el primer aeropuerto en extensión y tráfico de Cataluña y el segundo aeropuerto con mayor tráfico de España.

El Aeropuerto de Reus se dedica al tráfico de pasajeros y operaciones, habiendo transportado 1.037.576 pasajeros en el año 2018. El Aeropuerto Josep Tarradellas El-Prat en Barcelona es el segundo aeropuerto en España de tráfico aéreo de carga. En 2018, la carga aérea total de mercancías movilizada en dicho aeropuerto se aproximó a los 174 millones de kilogramos. Este aeropuerto cuenta, además, con uno de los mayores tráfico de pasajeros, manejando un récord de 52.686.314 millones de pasajeros en el año 2019.



Figura 1.4. Destinaciones desde Barcelona.

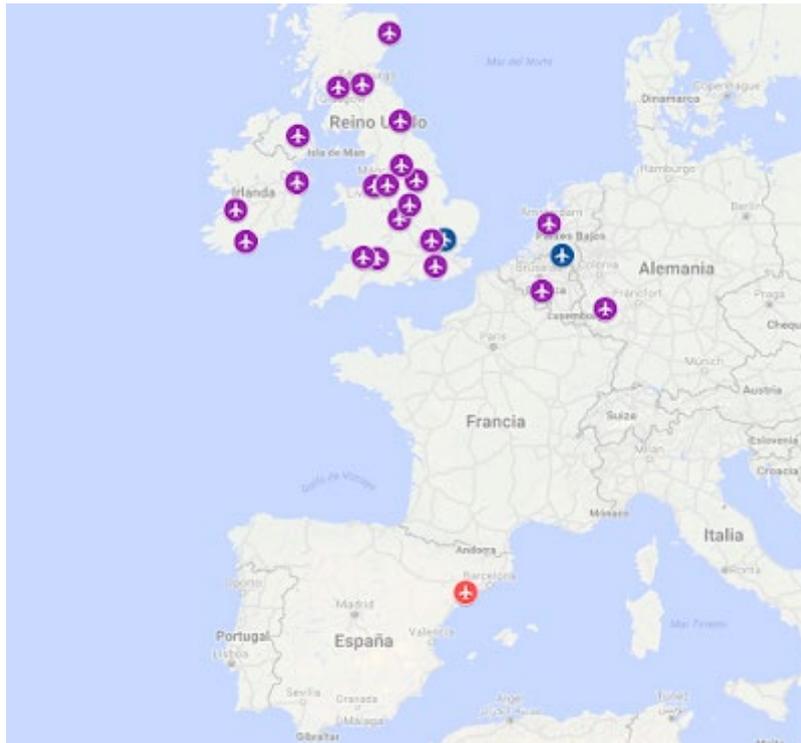


Figura 1.5. Destinaciones desde Reus.

Como se puede observar en las **Figura 1.5**, el aeropuerto de Reus está destinado únicamente a vuelos de ámbito Europeo mientras que el aeropuerto de Barcelona (**Figura 1.4**) adopta una gran cantidad de vuelos intercontinentales y nacionales, además de tener mucha más variedad de vuelos Europeos que el de Reus.

Comunicación vía marítima:

Otra manera de transportar mercancías entre diferentes países y continentes es vía marítima. La Canonja se encuentra a, aproximadamente, 10 km del Puerto de Tarragona, el cual es el quinto puerto más importante de España y punto clave para la industria química de Cataluña y las zonas adyacentes, puesto que cuenta con una plataforma específica para los barcos cargados de crudo y sus derivados. En el año 2019 se transportaron más de 32 millones de toneladas de mercancía en el Puerto de Tarragona, correspondiendo 1.791 toneladas a productos químicos, como se puede observar en la **Figura 1.6** (5.5% de la mercancía transportada total, como se observa en la **Figura 1.7**).

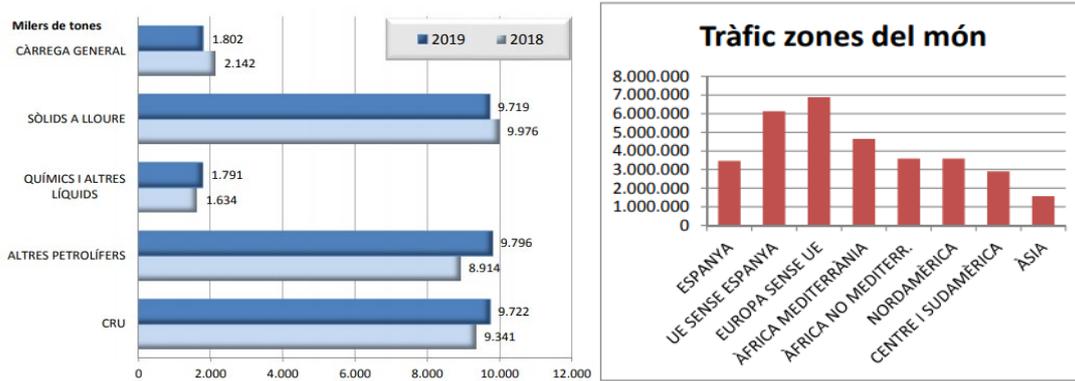


Figura 1.6. Representación gráfica del tráfico de mercancías en el Puerto de Tarragona en 2018 y 2019.

Los principales sitios con importación y exportación de mercancía en el Puerto de Tarragona se presentan en la **Figura 1.6**. Se observa que la mayor parte de la mercancía que se transporta se hace a países europeos fuera de la UE.

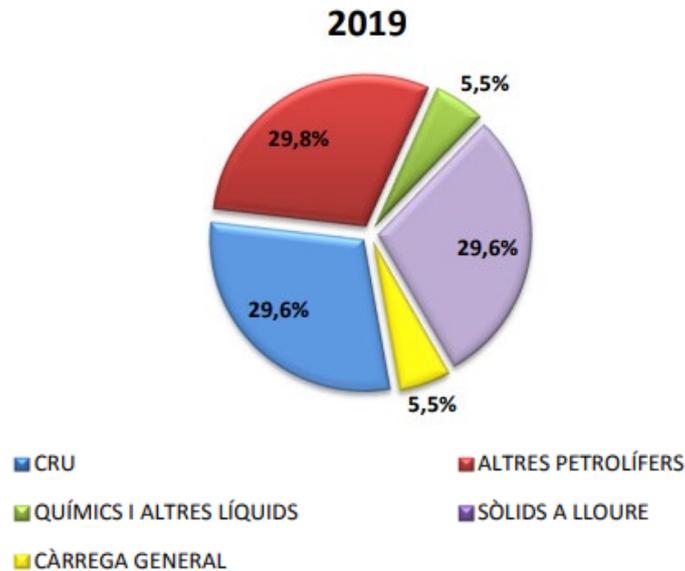


Figura 1.7. Distribución porcentual del tráfico de mercancías en el Puerto de Tarragona.

A 102 km de La Canonja se encuentra el Puerto de Barcelona, que es el puerto más grande de Cataluña, dividido en tres zonas principales adaptadas para cargas específicas, cargas comerciales y cargas industriales. El puerto de Barcelona tiene una localización óptima para manejar los envíos de todas las rutas marítimas del Mediterráneo y Asia, también es un destino popular entre los envíos que llegan a Europa desde América del Sur. En el año 2018 el Puerto de Barcelona gestionó alrededor de 66 millones de toneladas de mercancías, correspondiendo los productos químicos al 23% de los productos de carga y al 26 % de los productos de descarga, como se puede observar en la **Figura 1.8**.

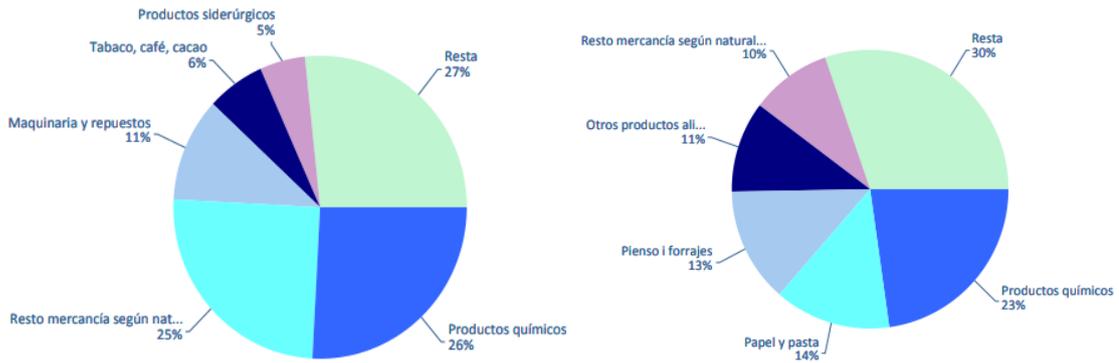


Figura 1.8. Distribución de los principales productos en el Puerto de Barcelona. Descarga, 2018.

De acuerdo con las estadísticas del Tráfico Marítimo del año 2018, los principales sitios con carga y descarga de mercancía en el Puerto de Barcelona se presentan en la **Figura 1.9** donde se observa que la mayoría de las mercancías a nivel intercontinental son transportadas a China.

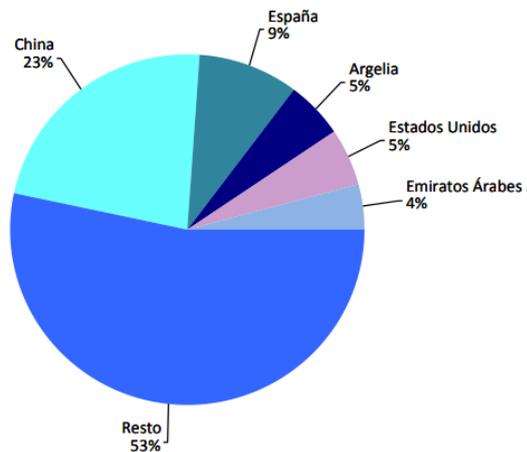


Figura 1.9. Principales países con tráfico de mercancía en el Puerto de Barcelona.

1.1.3.4 Características del medio físico

Climatología:

La Canonja se localiza a orillas del Mar Mediterráneo, su altura media es de 50 metros sobre el nivel del mar. Se ubica en la parte nororiental de la península ibérica en los 41° 13' de latitud norte y 1° 18' de longitud este, esta posición le otorga un clima templado (clima mediterráneo) con temperaturas promedio en invierno que rondan los 10°C, en verano unos 25°C, en otoño unos 19°C y durante la primavera unos 16°C [5].

Como se observa en la **Figura 1.10**, de junio a septiembre es la temporada templada donde se encuentra el mes más caluroso del año, agosto, con un promedio de 23,6°C habiendo llegado a valores de temperaturas máximas de 35°C entre los años 1982-2019.

En la **Figura 1.10** también se observa que la temporada fresca, que va de noviembre a marzo, tiene el mes más frío del año, enero, con una temperatura media de 9,2°C, habiendo llegado a valores de temperaturas mínimas de hasta 0°C, siendo rara la ocasión en la que se llegue a menos de 0°C.

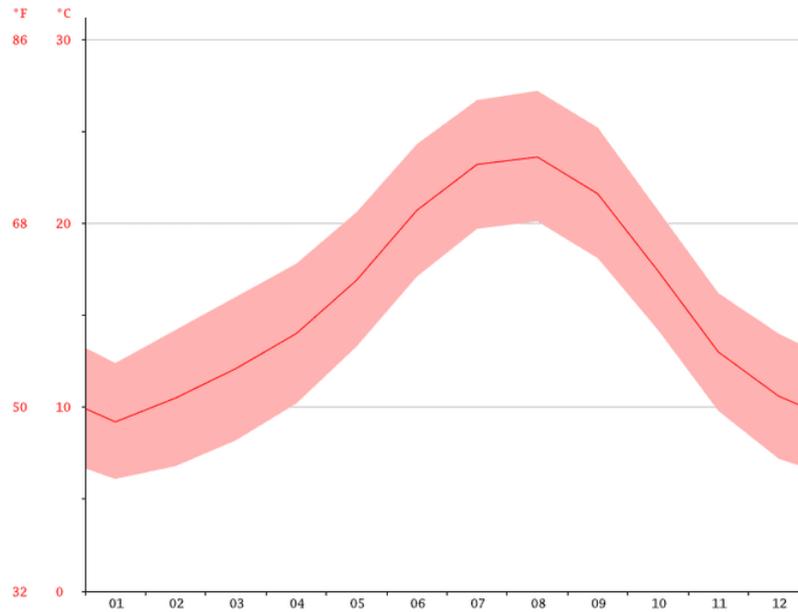


Figura 1.10. Promedio de temperaturas en La Canonja a lo largo del año.

En cuanto a la temporada de lluvia, **Figura 1.11**, esta dura 11 meses, del 28 de julio al 3 de julio, con un intervalo móvil de 31 días de lluvia, [12]. El periodo del año sin lluvia dura alrededor de 3,5 semanas, del 3 de julio al 28 de julio. La fecha aproximada con la menor

cantidad de lluvia es durante la tercera semana de julio. La humedad media durante el año varía entre 60 y 70%.

Octubre es el mes más lluvioso, teniendo un valor mínimo de 50 mm y llegando, incluso, a valores entre 90 y 100mm.

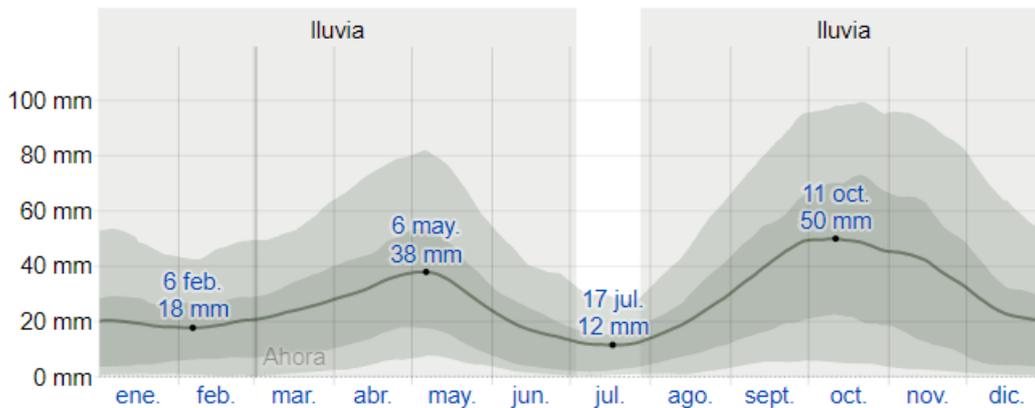


Figura 1.11. Temporada de lluvia en La Canonja.

Por lo que supone el viento, en la **Figura 1.12**, se representa la velocidad del viento durante los meses de 2019. Se observa que la temporada de ráfagas más fuertes se encuentra durante los meses de invierno (noviembre, diciembre, enero y febrero) y con algunos picos puntuales durante la primavera, llegando a alcanzar ráfagas muy fuertes de hasta 100 km/h.

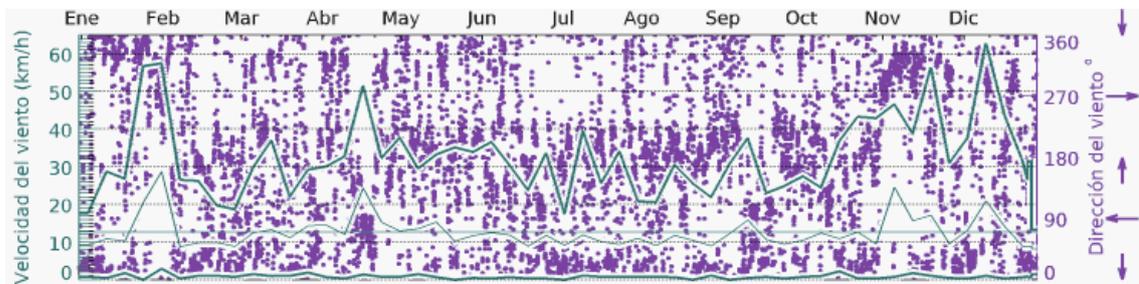


Figura 1.12. Gráfica del tiempo en La Canonja en 2019.

La humedad se mide a partir del nivel de comodidad de esta en el punto de rocío. Los puntos bajos indican un clima seco y los altos un clima húmedo. Así mismo, el punto de rocío tiende a variar lentamente, por lo que la temperatura no afecta a los cambios de la humedad.

El período más húmedo del año dura unos 3,7 meses de promedio, del 13 de junio al 2 de octubre aproximadamente, y durante ese tiempo el nivel de comodidad es bochornoso y opresivo, durante prácticamente el 17% de lo que dura el día. Así mismo, el día que suele ser más húmedo del año es a principios de agosto, con humedades que llegan al 68% de lo que dura el día. El día menos húmedo del año suele ser en febrero [12].

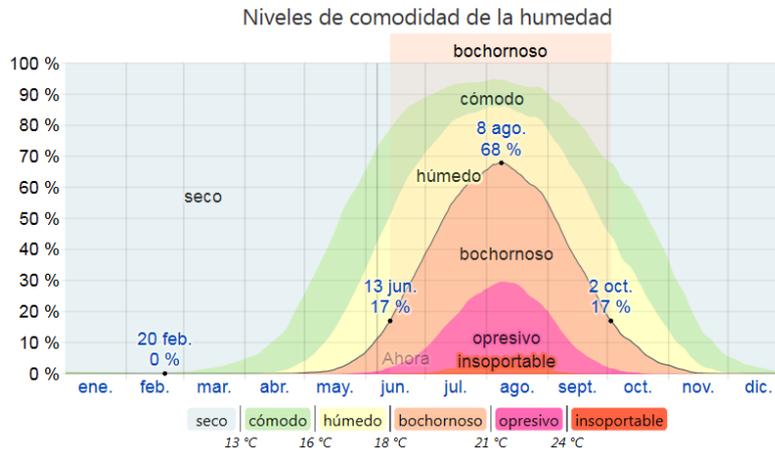


Figura 1.13. Porcentaje de tiempo pasado en varios niveles de comodidad de humedad, determinado por el punto de rocío.

Geografía y sismología:

Como se ha mencionado antes, La Canonja se ubica en la parte nororiental de la península ibérica en los 41°13' de latitud norte y 1°18' de longitud este, esta ubicación geográfica le posiciona en la Zona Sísmica Medvédev-Sponheuer-Kárník (MZK) Z1, que cuenta con una intensidad sísmica de IV (escala MSK). Según dicha escala es muy poco probable que se produzcan daños en zonas con intensidad esperada VI o VII y sólo hay daños en las líneas vitales a partir del grado VIII. Los daños graves no se producen hasta el grado X. Por líneas vitales se entiende: red viaria, transporte ferroviario, sistema eléctrico, aguas de abastecimiento, red de gas natural, oleoductos, embalses e instalaciones afectadas por la normativa SEVESO.

Así pues, al encontrarse la planta dentro de la zona IV, es muy poco probable que se produzcan daños provocados por sismos o terremotos.

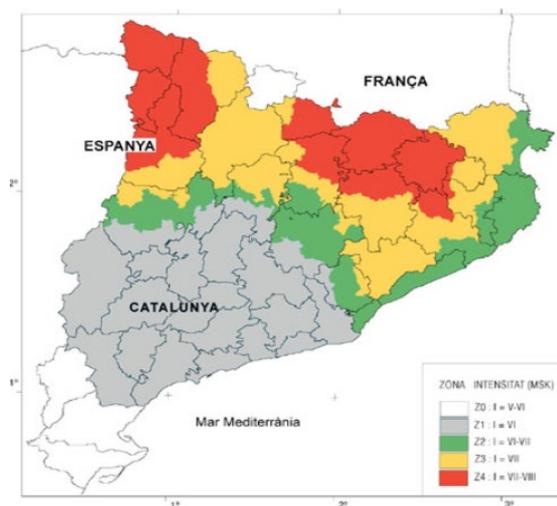


Figura 1.14. Mapa de diferenciación de las diferentes zonas sísmológicas.

1.1.3.5 Estudio de la población de la zona

La Canonja es un municipio de la provincia de Tarragona que limita con los municipios de Tarragona, Reus y Vilaseca.

Tarragona es un ciudad muy dispersa, dividida en 15 barrios. El barrio con más habitantes es el Centro de Ciudad con 35.735, y el más pequeño es Icomar con solo 685 [9]. Desde el año 2.000 Tarragona ha tenido una gran evolución demográfica, pasando de los 114.097 habitantes a los 132.299 actuales. Reus también ha tenido una evolución demográfica grande, pero no tanto como la de Tarragona, habiendo aumentado su población de 89.006 en el año 2.000, a 103.477. Y, finalmente, la Canonja ha aumentado su población desde el año 2.000 pasando de 4.251 habitantes a 5.893. Los 3 municipios han tenido aumento de la población y, teniendo en cuenta que cada uno tiene diferente valor de superficie, se observa que Tarragona y Reus han tenido un crecimiento similar (un 14%) y la Canonja ha tenido un crecimiento superior (27%).

Los barrios de Tarragona más cercanos a la zona industrial, como son Torreforta, Campclar y La Floresta, y el pueblo de La Canonja, han experimentado un gran crecimiento de población debido a la industrialización y a la cantidad de lugares de trabajo que ésta ha creado.

Teniendo en cuenta el sexo y las edades de la población, se observa que los tres municipios nombrados anteriormente son bastante parecidos. Los tres tienen más población de mujeres que de hombres, siendo esta diferencia muy pequeña ya que son un 51% de mujeres y un 49% de hombres, la mayoría de población se encuentran entre los 15 y 64 años y la minoría en población tienen una edad superior a los 85 años.

Comparando la población ocupada y desocupada en relación con la actividad económica, se encuentra que los municipios de Tarragona, Reus y la Canonja vuelven a tener valores parecidos. En los valores de la población ocupada Tarragona y Reus tienen un valor del 39% y la Canonja del 35%, y en la población desocupada tienen 15%, 17% y 16%, respectivamente.

1.1.3 Abreviaciones

En este apartado se presentan las nomenclaturas o abreviaciones que se usarán a lo largo del proyecto para poder facilitar y simplificar su comprensión y lectura en la denominación de áreas, equipos y mezclas de fluidos.

La planta ETHOXID está dividida en diferentes áreas o zonas de trabajo, sus abreviaciones se indican en la **Tabla 1.3**, teniendo en cuenta que su descripción está más detallada en los siguientes apartados.

Tabla 1.3. Abreviaciones de las diferentes áreas del proceso.

Abreviación del área	Descripción
A-100	Acondicionamiento y almacenamiento de materia primas
A-200	Reacción
A-300	Separación de óxido de etileno (C ₂ H ₄ O)
A-400	Purificación de óxido de etileno (C ₂ H ₄ O)
A-500	Tratamiento de CO ₂
A-600	Zona de almacenamiento de óxido de etileno (C ₂ H ₄ O)
A-700	Sala de control
A-800	Taller y zona de mantenimiento
A-900	EDAR
A-1000	Servicios
A-1100	Oficinas y laboratorios
A-1200	Zona social, vestidores y baños
A-1300	Estacionamiento de vehículos
A-1400	Control de entrada a la planta
A-1500	Área contra incendios
A-1600	Tratamiento de gases

Los diversos equipos usados en la planta ETHOXID también se han codificado de la siguiente manera en la **Tabla 1.4**.

Tabla 1.4. Abreviaciones de los diferentes equipos del proceso.

Código	Equipo
R	Reactores
E	Intercambiadores de calor
C	Columnas de destilación o absorción
T	Tanques flash
K	Compresores
P	Bombas centrífugas
T	Tanques de almacenamiento
CD	Condensadores
RD	Reboilers
CV	Calderas de vapor
TV	Turbinas de vapor
TR	Torre de refrigeración
CH	Chiller
EX	Expansores
TR	Transformador
G	Grupo electrógeno
SC	Scrubber

Por último, durante el proceso productivo se hace uso de diferentes compuestos fluidos que también disponen de una codificación específica. Todos ellos están representados mediante una F haciendo referencia así a que todos son fluidos. No obstante, en el caso de que dichos fluidos se encuentren en diferentes mezclas, estas se han codificado mediante una M tal y como se observa en las **Tablas 1.5 y 1.6**:

Tabla 1.5. Abreviaciones de los diferentes componentes fluidos del proceso.

Código	Compuesto
F01	Etileno
F02	Oxígeno
F03	Nitrógeno
F04	Agua
F05	Monoetanolamina
F06	Ácido Sulfhídrico
F07	Dióxido de Carbono
F08	Óxido de Etileno
F09	DOWTHERM-A

Tabla 1.6. Abreviaciones de las diferentes mezclas de componentes del proceso.

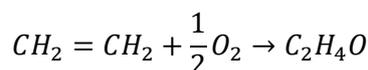
	Compuesto	Código	Mezcla
F01	Etileno	M01	F01, F02, F03
F02	Oxígeno	M02	F01, F02, F03, F04, F07, F08
F03	Nitrógeno	M03	F03, F04, F07, F08
F04	Agua	M04	F04, F07, F08
F05	Monoetanolamina	M05	F04, F08
F06	Ácido Sulfhídrico	M06	F02, F03, F04, F05, F06, F07, F08
F07	Dióxido de Carbono	M07	F01, F02, F03, F04, F05, F07, F08
F08	Óxido de Etileno	M08	F01, F03, F04, F05, F07
F09	DOWTHERM-A	M09	F04, F05, F07, F08
		M10	F01, F02, F03, F04
		M11	F01, F03, F04, F05, F07, F08
		M12	F01, F02, F03, F07, F08
		M13	F01, F02, F03, F04, F08
		M14	F04, F05
		M15	F01, F02, F03, F04, F08
		M16	F04, F05, F08
		M17	F03, F04, F05, F06

1.2 Características y propiedades de los compuestos

La reacción principal para la producción del óxido de etileno se trata de la oxidación directa del etileno mediante oxígeno puro obtenido por tubería desde una planta de fraccionamiento de aire.

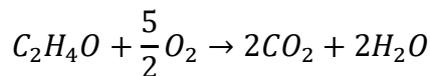
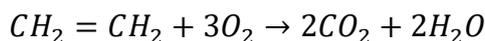
Así mismo, la reacción tiene lugar en un reactor multitubular de lecho fijo mediante un catalizador de plata que contiene hasta un 15% en peso de esta y la cual está depositada en forma de capa fina sobre un soporte inerte y poroso de alúmina (Al_2O_3).

Las condiciones bajo las cuales se trabaja suelen ser de 270°C de temperatura y 20 atm de presión y al ser una reacción exotérmica su entalpía es de -105 kJ/mol. La reacción principal es la siguiente.

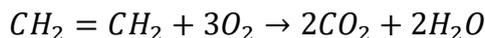


Sin embargo, no solo existe dicha reacción principal, sino que esta va acompañada de otras dos reacciones secundarias que son mucho más exotérmicas que la anterior, con unas entalpías de -1327 kJ/mol la de combustión del etileno y de 1223 kJ/mol la de reoxidación del óxido de etileno a dióxido de carbono y agua como subproductos. Por eso, se suele producir un calor medio de aproximadamente 500 kJ/mol de etileno consumido.

Las reacciones secundarias son las siguientes:



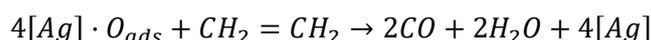
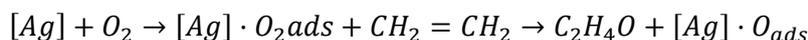
No obstante, debido a las condiciones de trabajo de los reactores de la planta ETHOXID, solo se llevará a cabo la primera de las reacciones secundarias, evitando así la oxidación total del etileno.



Estos procesos industriales pueden llegar a alcanzar un 65-70% de selectividad, incluso del 80% como valor máximo, en óxido de etileno.

Así mismo, el principio fundamental en el cual se basa la actividad catalítica se trata de la activación específica del oxígeno (O_2) en la superficie metálica de la plata del catalizador.

En primer lugar, se produce una absorción molecular del O_2 con la plata y, posteriormente, reaccionan con el etileno para dar óxido de etileno. Cabe indicar que el oxígeno atómico que resulta no puede llegar a formar más óxido de etileno y, en cambio, se usa para la quema de etileno y óxido de etileno produciendo CO_2 y H_2O , tal y como se indica en las reacciones siguientes, donde $[Ag]$ hace referencia al catalizador de plata:



Características del catalizador:

El catalizador usado en la producción de óxido de etileno consiste en plata soportada en un soporte poroso resistente al calor, un metal de transición del grupo VIA, un metal alcalino seleccionado de potasio y azufre, preferiblemente presente como iones de sulfato.

La plata se introduce en un soporte resistente al calor poroso, preformado por impregnación del soporte con una solución de un compuesto de plata. Si es necesario se puede usar un tratamiento térmico para descomponer el compuesto de plata en plata. La solución de impregnación contiene un agente reductor de un compuesto de plata en la solución.

1.2.1 Materias primas

Principalmente existen dos materias primas para este proceso: oxígeno y etileno, que se detallan a continuación:

Etileno (C₂H₄):

El etileno se trata de una de las materias primas de mayor consumo en la industria química. Aproximadamente la producción mundial es de 10⁸ Tm anuales. Más del 30% de la industria petroquímica utiliza el etileno como materia prima. El mayor consumo, 78% aproximadamente, es para la producción de plásticos, como por ejemplo para el polietileno (PE), como materia prima para el PVC, para la producción del poliacetato de vinilo (PAV) y también para cauchos. Así mismo, el etileno se usa en diferentes campos como la industria alimentaria (comida, bebidas...), fabricación de vidrio para automóviles, el cuidado de la salud (se usa como anestésico) o como refrigerante.

En primer lugar, la **Tabla 1.7** indica algunos de los usos más comunes a nivel mundial del etileno (% en peso):

Tabla 1.7. Uso del etileno a nivel mundial en % en peso.

PRODUCTO	MUNDO	EUA	EUROPA OCCIDENTAL	JAPÓN
Polietileno (LDPE y HDPE)	57	49	58	43
Cloruro de vinilo	14	15	14	18
Óxido de etileno y productos secundarios	13	13	10	11
Acetaldehído y productos secundarios	1	1	2	4
Etilbenceno y estireno	7	7	7	12
Otros (etanol, 1,2-dibromoetano, cloruro de etilo, propionaldehído, etilenimina)	8	15	9	12
Uso total (en 10 ⁶ t)	100	31,3	30	17,4

En segundo lugar, las características fisicoquímicas principales del etileno son las que recoge la **Tabla 1.8**:

Tabla 1.8. Propiedades fisicoquímicas del etileno.

FÓRMULA EMPÍRICA: C ₂ H ₄ (CH ₂ =CH ₂)	
PESO MOLECULAR	28,0 g/mol
PUNTO DE EBULLICIÓN	-104°C
PUNTO DE FUSIÓN	-169,2°C
DENSIDAD	1,18 kg/m ³
PRESIÓN DE VAPOR A 15°C	8100 kPa
PUNTO DE INFLAMACIÓN	Gas inflamable
TEMPERATURA DE AUTOIGNICIÓN	490°C
SOLUBILIDAD EN AGUA	Ninguna
LÍMITE DE EXPLOSIVIDAD, % EN VOLUMEN EN EL AIRE	2,7-36,0 %

Oxígeno puro (O₂):

El oxígeno es un gas incoloro, inodoro e insípido y que se caracteriza por su alta reactividad. El oxígeno tiene diferentes aplicaciones a nivel industrial. Además de usarse en campos como la medicina o la aeronáutica, es muy común su uso en los siguientes tipos de industrias:

- Química
- Esterilización
- Producción de papel
- Producción de ozono
- Tratamiento de potabilización de agua y tratamiento de residuos sólidos

Las características fisicoquímicas principales del oxígeno son las que recoge la **Tabla 1.9**:

Tabla 1.9. Propiedades fisicoquímicas del oxígeno.

FÓRMULA EMPÍRICA: O ₂	
PESO MOLECULAR	32,0 g/mol
PUNTO DE EBULLICIÓN	-183°C
PUNTO DE FUSIÓN	-218,8°C
DENSIDAD	1,429 kg/m ³
PRESIÓN DE VAPOR A 20°C	No aplicable
PUNTO DE INFLAMACIÓN	No aplicable
TEMPERATURA DE AUTOIGNICIÓN	No aplicable
SOLUBILIDAD EN AGUA A 20°C	3,1 mL/100 mL de agua

1.2.2 Producto final: óxido de etileno C₂H₄O

Uno de los productos químicos más usados a nivel mundial que se obtiene del etileno, es el óxido de etileno. Dicho compuesto es un gas muy tóxico a temperatura ambiente (20°C aproximadamente) que puede llegar a formar mezclas muy explosivas juntamente con el aire. Es soluble en agua y en diferentes disolventes orgánicos sea cual sea su proporción. Se trata de un compuesto tóxico e inflamable, incoloro y desprende un olor dulce. Así mismo, se usa y se guarda en forma líquida en recipientes con diferentes presiones aplicadas.

La producción mundial del óxido de etileno es de 14,5 millones de t/año aproximadamente. El óxido de etileno se suele producir en plantas industriales con capacidades próximas a las 100.000 t/año de producto, en el caso de ETHOXID se trata de 120.000 t/año.

IQOXE era la única planta de producción de óxido de etileno en la península Ibérica siendo la única compañía con la capacidad para poder abastecer de forma continuada la demanda nacional, siendo su producción de unas 140.000 toneladas anuales.

Así mismo, la producción en Norte América se resume en la **Tabla 1.10**, siendo la mayor producción de 770.000 toneladas anuales en Louisiana, Estados Unidos. [8]

Tabla 1.10. Producción de óxido de etileno en Norte América.

Compañía	Localidad	Capacidad (toneladas/año)
PEMEX	Morelos, La cangrejera, México	188.367
Alberta & Orient Glycol	Prentiss, Alberta, Canadá	275.000
BASF	Geismar, Louisiana, US	220.000
Dow Chemical	Prentiss, Alberta, Canadá	250.000
Dow Chemical	Fort Saskatchewan, Alberta, Canadá	285.000
Dow Chemical	Plaquemine, Louisiana, US	275.000
Dow Chemical	Seadrift, Texas, US	430.000
Dow Chemical	Taft, Louisiana, US	770.000
Eastman Chemical	Longview, Texas, US	105.000
Formosa Plastics	Point Comfort, Texas, US	250.000
Huntsman	Port Neches, Texas, US	460.000
LyonDellBasell	Bayport, Texas, US	360.000
Old World Industries	Clear Lake, Texas, US	355.000
Shell Chemicals	Geismar, Louisiana, US	420.000
Shell Chemicals	Fort Saskatchewan, Alberta, Canadá	320.000
Producción total anual (t/año)		4.963.367

Por último, la producción en Europa se resume en la **Tabla 1.11**, siendo la mayor producción de 500.000 toneladas anuales en Antwerp, Bélgica, [7]:

Tabla 1.11. Producción de óxido de etileno en Europa.

Compañía	Localidad	Capacidad (toneladas/año)
INEOS Oxide	Antwerp, Bélgica	420.000
INEOS Oxide	Cologne, Alemania	290.000
INEOS Oxide	Lavera, Francia	250.000
BASF	Antwerp, Bélgica	500.000
BASF	Ludwigshafen, Alemania	345.000
Shell	Moerdijk, Holanda	305.000
Clariant	Gendorf, Alemania	240.000
Sasol Germany	Marl, Alemania	215.000
Dow Benelux	Terneuzen, Holanda	165.000
IQOXE	Tarragona, España	140.000
PKN Orlen	Plock, Polonia	115.000
AkzoNobel Surface Chemistry	Stenungsund, Suecia	100.000
Nizhnekamskneft-ekhim	Nizhnekamsk, Rusia	270.000
Sibur-Neftekhim	Dzerzhinsk, Rusia	264.000
Producción total anual (t/año)		3.614.000

Tal y como se observa en las **Tablas 1.10 y 1.11**, la producción en Norte América es superior a la de Europa, siendo esta de 4.963.367 toneladas anuales.

Algunas de las características fisicoquímicas principales del óxido de etileno son las que recoge la **Tabla 1.12**.

Tabla 1.12. Propiedades fisicoquímicas del óxido de etileno.

FÓRMULA EMPÍRICA: C ₂ H ₄ O	
PESO MOLECULAR	44,05 g/mol
PUNTO DE EBULLICIÓN	10,6°C
PUNTO DE FUSIÓN	-112°C
DENSIDAD	899 kg/m ³
PRESIÓN DE VAPOR A 20°C	1,456 bar
PUNTO DE INFLAMACIÓN	< -18°C
TEMPERATURA DE AUTOIGNICIÓN	429°C
SOLUBILIDAD EN AGUA	Miscible
LÍMITE DE EXPLOSIVIDAD, % EN VOLUMEN EN EL AIRE	0,027

En la **Tabla 1.13** se especificarán algunos de los productos derivados del óxido de etileno a nivel mundial en % en peso:

Tabla 1.13. Productos derivados del óxido de etileno y su producción en % en peso a nivel mundial.

PRODUCTO	MUNDO	USA	EUROPA OCCIDENTAL	JAPÓN
Etilenglicol	61	57	44	59
Tensoactivos no iónicos	16	11	28	17
Etanolaminas	6	11	9	4
Éteres glicólicos	4	7	7	5
Otras aplicaciones	13	14	12	15
Uso total	14,5	3,8	2,2	0,97

En primer lugar, tal y como se puede observar en la **Tabla 1.13**, de todos los productos derivados del óxido de etileno, el etilenglicol es el más común e importante de todos a nivel mundial. Uno de los usos más importantes es como anticongelante del circuito de refrigeración de algunos motores eléctricos y su producción es de aproximadamente $13,6 \cdot 10^6$ t/año.

En segundo lugar, el siguiente producto más usado son los tensoactivos no iónicos: polioxietilenos. Algunos de los usos más importantes son la fabricación de cremas y emulsiones grasas útiles como plastificantes y para la obtención de poliuretanos y su producción es de aproximadamente $3,5 \cdot 10^6$ t/año.

1.2.3 Subproductos y otros compuestos

En todo el proceso se han considerado únicamente dos subproductos como son el Agua (H_2O) y el Dióxido de Carbono (CO_2). Así mismo, un tercer componente se usará como gas inerte: Nitrógeno (N_2).

Agua (H_2O):

Uno de los recursos más importantes para los procesos industriales es el agua, ya sea para la elaboración de sus productos, y/o para el mantenimiento de sus materiales y equipos. Todos los sectores industriales hacen uso del agua, desde los que elaboran productos alimenticios hasta los que elaboran aparatos electrónicos.

Algunas de las industrias que usan más agua son las siguientes:

- **Industria química:**

Representan un 25% y la mayor parte de estas instalaciones disponen de sistemas de recuperación, que permiten la reutilización en proceso del agua depurada.

- **Industrias agroalimentarias:**

Representan un 17%. Las industrias de bebidas incorporan el agua consumida como parte de su producto final.

- **Industrias metalúrgicas:**

Suponen un 13% y las instalaciones de fabricación de elementos de acero consumen gran cantidad de agua debido a los sistemas de refrigeración utilizados.

- **Industrias minerales:**

Con un 7% consumen agua en el proceso productivo para la generación de aguas de molienda y también por la alimentación de sistemas de refrigeración.

- **Industrias de gestión de residuos:**

Utilizan un 1% debido a que los vertederos sólo suministran agua en camiones cisterna para uso sanitario, y reutilizan el agua de lluvia recogida en balsas para usos no sanitarios.

Tabla 1.14. Propiedades fisicoquímicas del agua líquida.

FÓRMULA EMPÍRICA: H_2O	
PESO MOLECULAR	18,0 g/mol
PUNTO DE EBULLICIÓN	100°C
PUNTO DE FUSIÓN	0°C
DENSIDAD	1000 kg/m ³
PRESIÓN DE VAPOR A 100°C	760 mmHg

Dióxido de Carbono (CO₂):

El Dióxido de Carbono, o Anhídrido Carbónico, es un gas incoloro, inodoro, no inflamable y ligeramente ácido. Está compuesto por un átomo de carbono unido con enlaces covalentes dobles a dos átomos de oxígeno. Es más pesado que el aire y soluble en agua. A presión atmosférica y en condiciones normales de temperatura se encuentra en fase gas, o en fase sólida a -78,4°C (temperatura de sublimación) bajo la denominación de hielo seco. El CO₂ se obtiene industrialmente mediante el aprovechamiento de fuentes de CO₂ generadas por distintos procesos en la industria petroquímica, o bien, por la combustión de gas natural en procesos de cogeneración.

El Dióxido de Carbono se utiliza como agente extintor, eliminando el oxígeno encontrado, e impide que se genere una combustión. Además, se usa en la industria alimentaria para bebidas carbonatadas con el fin de darles efervescencia. También se utiliza para abono, en la industria de refrigeración y en medicina.

En este caso, dicho compuesto se genera como subproducto de la reacción secundaria de combustión de etileno y la planta dispone de un área en específico para su tratamiento final de purificación y así poderlo vender en fase gas mediante tubería a alguna empresa del mismo polígono “Gasos Nobles”.

Tabla 1.15. Propiedades fisicoquímicas del dióxido de carbono.

FÓRMULA EMPÍRICA: CO ₂	
PESO MOLECULAR	44 g/mol
PUNTO DE EBULLICIÓN	-195,8°C
TEMPERATURA CRÍTICA	-146,9°C
DENSIDAD GAS	1,848 kg/m ³
DENSIDAD LÍQUIDO	1032 kg/m ³
PRESIÓN CRÍTICA	73,82 bar
CALOR LATENTE DE SUBLIMACIÓN	137 cal/g
SOLUBILIDAD EN AGUA	101,1 cm ³ CO ₂ /100 cm ³ H ₂ O

Nitrógeno (N₂):

El nitrógeno es valorado como gas por sus propiedades inertes y como líquido por su capacidad de refrigeración y congelación. Prácticamente todos los sectores, por ejemplo, cualquier tipo de industria, pueden beneficiarse de sus propiedades únicas y concretas para mejorar la producción, optimizar el rendimiento y conseguir una mayor seguridad en las operaciones.

El nitrógeno de la planta se usará tanto como gas inerte para el proceso, para evitar la oxidación total del etileno, como para la inertización de equipos. Este se obtiene de una empresa llamada “Air Liquide” que se dedica, entre otros, al suministro y almacenamiento de gases y líquidos para diferentes campos de la industria. En nuestro caso, nuestras instalaciones almacenan grandes cantidades de nitrógeno a alta presión, 17 bares, que han sido transportadas en forma líquida para, posteriormente, obtener nitrógeno gas mediante vaporizadores incorporados en el proceso de almacenamiento.

Tabla 1.16. Propiedades fisicoquímicas del nitrógeno.

FÓRMULA EMPÍRICA: N ₂	
PESO MOLECULAR	28,0 g/mol
PUNTO DE EBULLICIÓN	-195,8°C
TEMPERATURA CRÍTICA	-146,9°C
DENSIDAD GAS	1,185 kg/m ³
DENSIDAD LÍQUIDO	805 kg/m ³
PRESIÓN CRÍTICA	33,9 bar
CALOR LATENTE DE VAPORIZACIÓN	47,6 cal/g
SOLUBILIDAD EN AGUA	0,0216 g N ₂ /L H ₂ O

1.3 Descripción del proceso de fabricación

1.3.1 Diagrama de bloques

En este apartado se presenta el diagrama de bloques del proceso de producción del óxido de etileno de la planta ETHOXID de una forma muy esquemática en la **Figura 1.15**.

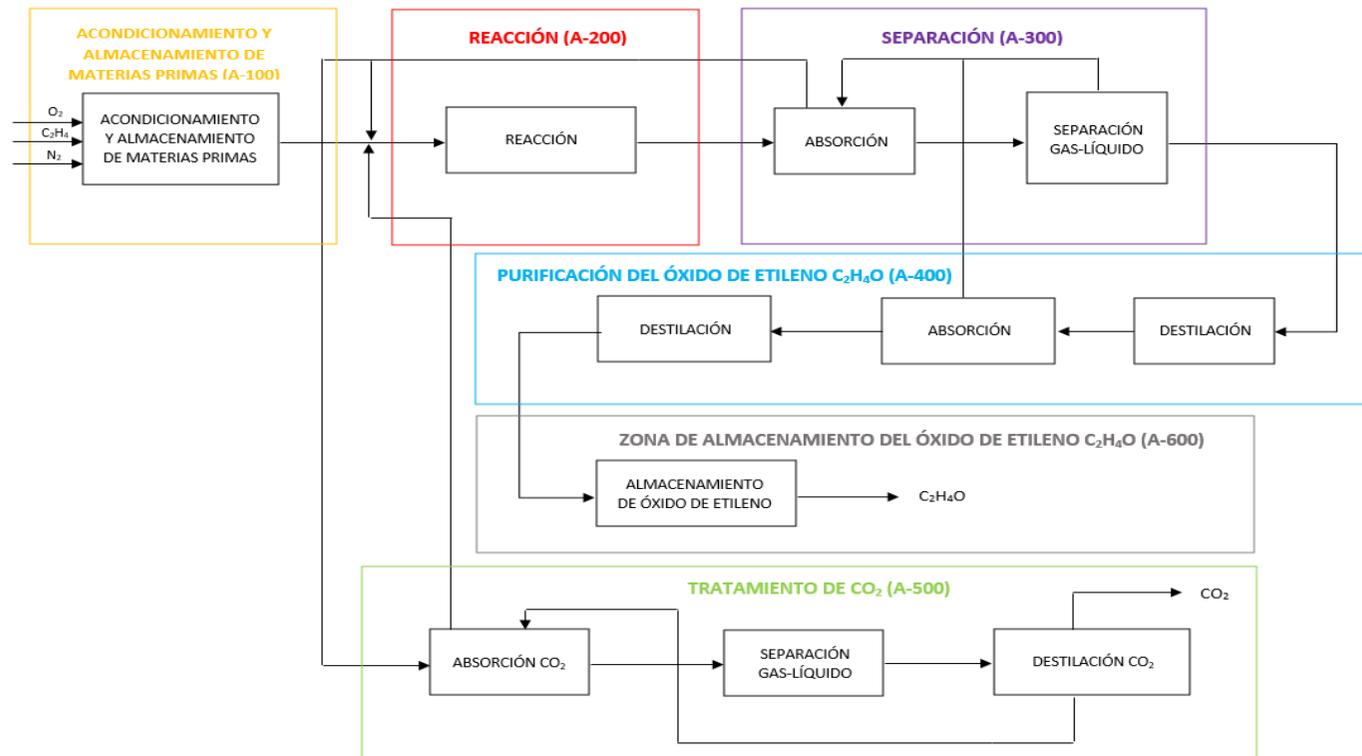


Figura 1.15. Diagrama de bloques del proceso productivo.

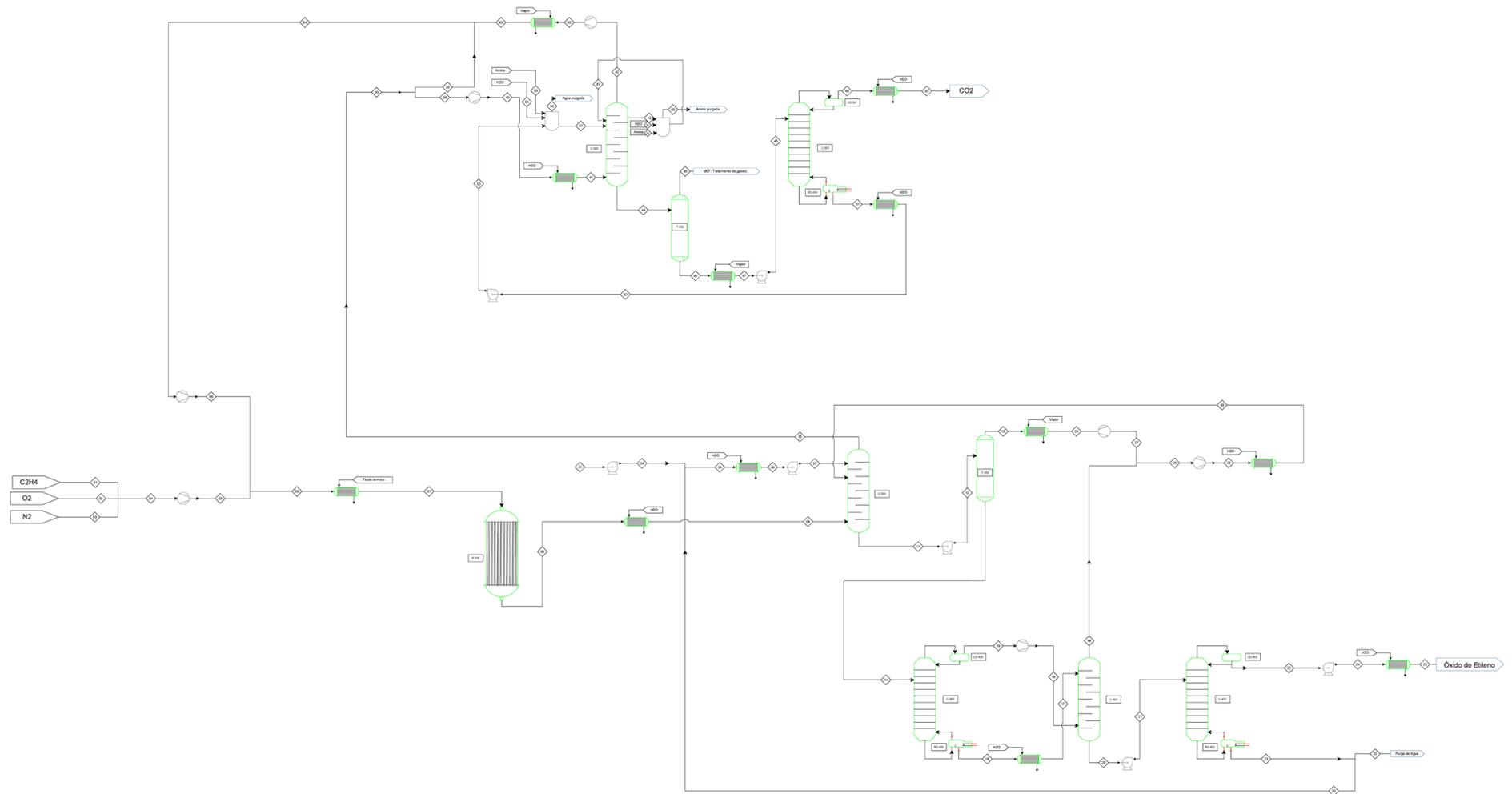
1.3.2 Diagrama de proceso y balance de materia.

En este apartado se presenta el diagrama del proceso de producción de óxido de etileno que se lleva a cabo en la planta ETHOXID. Dicho diagrama se presenta en la **Figura 1.16**. En este se muestran los equipos principales de la planta y los números de cada una de las corrientes del proceso. Posteriormente, se presentan en las **Tablas 1.17 – 1.25** los resultados obtenidos del balance de materia. En estas tablas se sigue la numeración del diagrama de proceso y se incluye para cada corriente su temperatura, fracción de vapor, presión, caudales molar y másico, entalpía molar y densidad. Se presenta también la composición de cada corriente en forma de fracciones molares de los componentes.

Para el balance de las corrientes dentro del área de purificación de CO₂ se han menospreciado las composiciones del metano, etano y propano que se forman a partir de la absorción del CO₂ en monoetanolamina y agua, ya que estos tienen composiciones del orden 10⁻²²⁰ y no influyen de manera significativa en el balance. Sin embargo, estos componentes han sido tomados en cuenta para otros capítulos donde se considera pertinente.

Se puede observar que en el balance de materia existen tres corrientes (54, 55, 59) cuyo caudal másico se indica como 0 kg/hora, es decir, nulo. Esto es debido a que dichas corrientes son de agua y monoetanolamina, y se utilizan para el tratamiento de CO₂. Inicialmente, durante la puesta en marcha, dichos fluidos circularán al proceso desde sus tanques de almacenamiento, por lo que el caudal de las corrientes no será nulo pero, una vez alcanzado el estado estacionario, el caudal de agua y amina pasará por una regeneración y será recirculado desde ese equipo. Por lo que el único caudal que se necesitará introducir al proceso de dichos fluidos será el equivalente a la purga que exista de ellos y no se necesitará introducir caudal en las corrientes mencionadas. Sin embargo, se han tomado en cuenta para el balance de materia con tal de seguir la numeración correcta del balance sin excluir ningún número de corriente.

El proceso de la planta ETHOXID ha sido simulado y diseñado en su totalidad con la ayuda de la herramienta Aspen HYSYS V10.



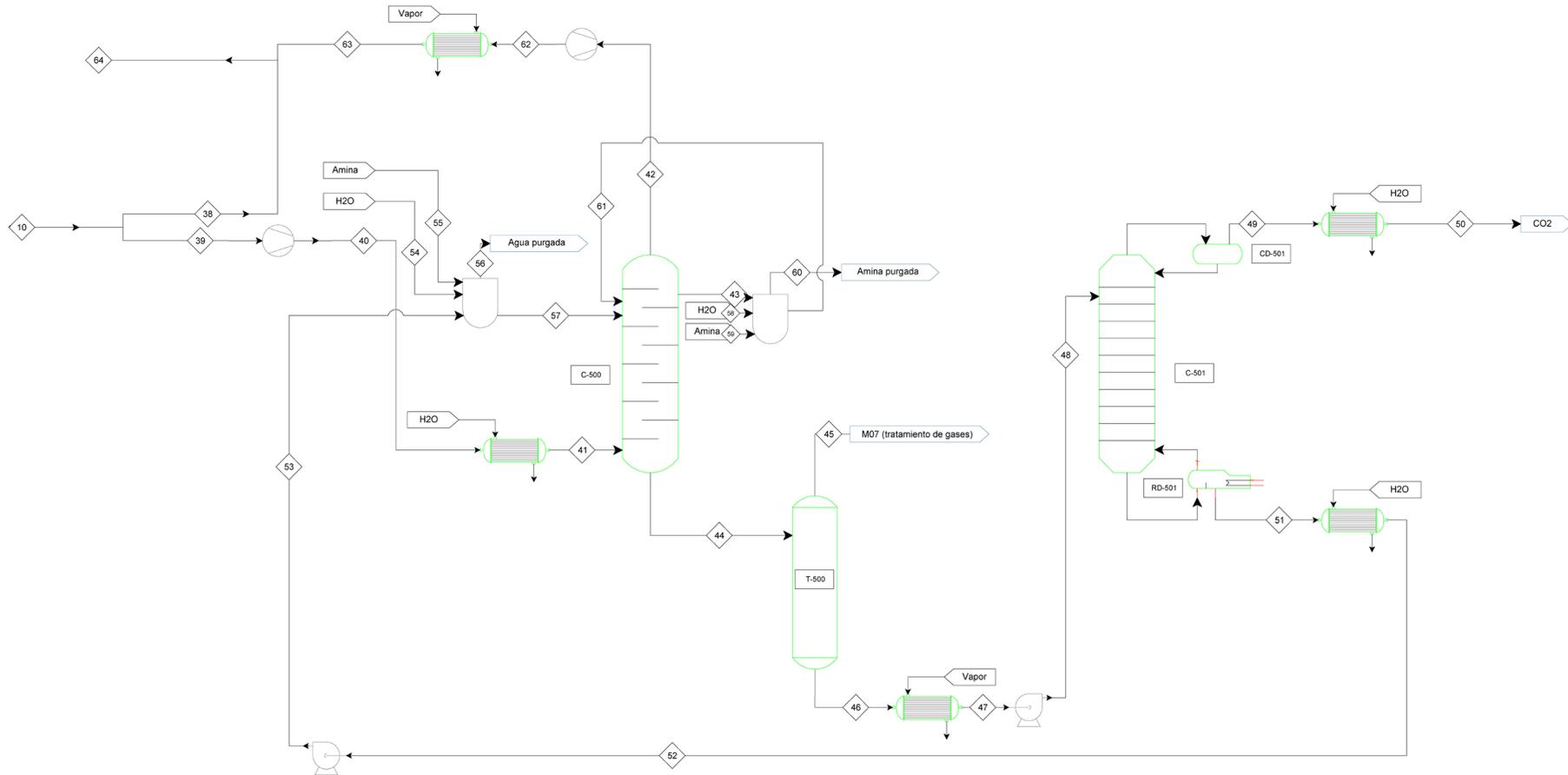


Tabla 1.17. Balance de materia de la planta de producción de óxido de etileno 1/9.

Nombre	1	2	3	4	5	6	7	8
Fracción de vapor	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Temperatura (°C)	25,0	25,0	25,0	23,9	89,4	102,2	270,0	270,0
Presión [kPa]	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	2015,0	2015,0	2000,0	1870,0
Caudal molar (kmol/h)	415,0	350,0	8,0	773,0	773,0	13724,3	13724,3	6771,6
Caudal másico (kg/h)	11642,3	11200,0	224,1	23066,4	23066,4	393138,2	393138,2	196569,0
Entalpía molar (kJ/kmol)	51849,2	-93,7	-75,6	27793,1	30203,7	3484,8	9714,8	1514,7
Densidad (kg/m ³)	12,12	13,03	11,35	12,50	20,64	18,66	12,64	11,99
Fracción molar de componente								
Etileno	1,0	0,0	0,0	0,5369	0,5369	0,2204	0,2204	0,1924
Oxígeno	0,0	1,0	0,0	0,4528	0,4528	0,0650	0,0650	0,0400
Nitrógeno	0,0	0,0	1,0	0,0103	0,0103	0,6867	0,6867	0,6959
Agua	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0032	0,0032	0,0115
Dióxido de carbono	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0246	0,0246	0,0332
Óxido de etileno	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0002	0,0002	0,0269

Tabla 1.18. Balance de materia de la planta de producción de óxido de etileno 2/9.

Nombre	9	10	11	12	13	14	15	16
Fracción de vapor	1,0	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0
Temperatura (°C)	60,0	26,2	38,3	38,6	39,3	39,3	38,2	120,2
Presión [kPa]	1842,1	1000,0	1300,0	3500,0	300,0	300,0	150,0	200,0
Caudal molar (kmol/h)	13543,2	13074,9	30822,9	30822,9	3,8	30819,1	390,0	30429,1
Caudal másico (kg/h)	393138,0	375283,1	565048,8	565048,8	119,5	564929,3	16745,7	548183,6
Entalpía molar (kJ/kmol)	-6282,9	-4133,0	-281378,0	-281324,0	-53049,3	-281353,0	-64490,0	-277679,0
Densidad (kg/m ³)	19,68	11,69	994,5	995,1	3,640	993,6	2,552	930,6
Fracción molar de componente								
Etileno	0,1924	0,1993	0,0	0,0	0,1203	0,0	0,0002	0,0
Oxígeno	0,0400	0,0414	0,0	0,0	0,0552	0,0	0,0003	0,0
Nitrógeno	0,6959	0,7209	0,0001	0,0001	0,5946	0,0	0,0015	0,0
Agua	0,0115	0,0038	0,9878	0,9878	0,0236	0,9879	0,0417	1,0
Dióxido de carbono	0,0332	0,0344	0,0002	0,0002	0,1262	0,0002	0,0132	0,0
Óxido de etileno	0,0269	0,0002	0,0119	0,0119	0,0800	0,0119	0,9432	0,0

Tabla 1.19. Balance de materia de la planta de producción de óxido de etileno 3/9.

Nombre	17	18	19	20	21	22	23	24
Fracción de vapor	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Temperatura (°C)	90,0	58,4	93,3	93,1	93,1	28,3	127,4	28,5
Presión [kPa]	173,0	200,0	120,0	167,0	250,0	200,0	250,0	512,0
Caudal molar (kmol/h)	30429,1	390,0	27,8	30791,3	30791,3	364,3	30427,0	364,3
Caudal másico (kg/h)	548183,6	16745,7	732,7	564196,6	564196,6	16053,1	548143,5	16053,1
Entalpía molar (kJ/kmol)	-279970,0	-63499,9	-236020,0	-277268,0	-277266,0	-77637,6	-277129,0	-77616,3
Densidad (kg/m ³)	956,3	3,205	1,047	950,0	950,1	859,6	924,2	859,6
Fracción molar de componente								
Etileno	0,0	0,0002	0,0030	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Oxígeno	0,0	0,0003	0,0036	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Nitrógeno	0,0	0,0015	0,0204	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Agua	1,0	0,0417	0,6636	0,988166	0,9882	0,0001	1,0	0,0001
Dióxido de carbono	0,0	0,0132	0,1814	0,000004	0,0	0,0003	0,0	0,0003
Óxido de etileno	0,0	0,9432	0,1281	0,011830	0,0118	0,9996	0,0	0,9996

Tabla 1.20. Balance de materia de la planta de producción de óxido de etileno 4/9.

Nombre	25	26	27	28	29	30	31	32
Fracción de vapor	0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,000	0,000	0,000
Temperatura (°C)	15,0	110,0	54,54	90,0	409,1	200,0	25,0	127,4
Presión [kPa]	505,8	297,0	120,0	120,0	1504,0	1501,0	101,3	250,0
Caudal molar (kmol/h)	364,3	3,8	3,8	31,6	31,6	31,6	6000,0	6085,4
Caudal másico (kg/h)	16053,1	119,5	119,5	852,2	852,2	852,2	108090,6	109624,7
Entalpía molar (kJ/kmol)	-78843,6	-50176,5	-52173,9	-213834,0	-200583,0	-210004,0	-284904,0	-277129,0
Densidad (kg/m ³)	878,5	2,852	1,382	1,080	7,237	10,79	1007,35	924,23
Fracción molar de componente								
Etileno	0,0	0,1199	0,1199	0,0171	0,0171	0,0171	0,0	0,0
Oxígeno	0,0	0,0551	0,0551	0,0098	0,0098	0,0098	0,0	0,0
Nitrógeno	0,0	0,5938	0,5938	0,0896	0,0896	0,0896	0,0	0,0
Agua	0,0001	0,0241	0,0241	0,5864	0,5864	0,5864	1,0	1,0
Dióxido de carbono	0,0003	0,1261	0,1261	0,1747	0,1747	0,1747	0,0	0,0
Óxido de etileno	0,9996	0,0809	0,0809	0,1224	0,1224	0,1224	0,0	0,0

Tabla 1.21. Balance de materia de la planta de producción de óxido de etileno 5/9.

Nombre	33	34	35	36	37	38	39
Fracción de vapor	0,0	0,0	0,000	0,0	0,0	1,0	1,0
Temperatura (°C)	127,4	25,0	107,2	26,0	26,1	26,2	26,2
Presión [kPa]	250	250,0	250,0	238,0	1500,0	1000,0	1000,0
Caudal molar (kmol/h)	24341,6	6000,0	30341,6	30341,7	30341,7	9809,9	3270,0
Caudal másico (kg/h)	438513,7629	108090,6	546604,4	546604,4	546604,4	281571,0	93857,0
Entalpía molar (kJ/kmol)	-277129	-284900,0	-278666,0	-284825,0	-284795,0	-4103,6	-4103,6
Densidad (kg/m3)	924,2311	1007,4	941,84	1006,6	1006,9	11,69	11,69
Fracción molar de componente							
Etileno	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1998	0,1998
Oxígeno	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0415	0,0415
Nitrógeno	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7203	0,7203
Agua	1,0	1,0	1,0	1,0000	1,0	0,0038	0,0038
Dióxido de carbono	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0344	0,0344
Óxido de etileno	0,0	0,0	0,0	0,0000	0,0	0,0002	0,0002

Tabla 1.22. Balance de materia de la planta de producción de óxido de etileno 6/9.

Nombre	40	41	42	43	44	45	46	47
Fracción de vapor	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00
Temperatura (°C)	216,7	40,3	40,0	40,0	47,4	48,4	48,4	62,0
Presión [kPa]	5005,0	5000,0	5000,0	5000,0	5000,0	101,3	101,3	101,3
Caudal molar (kmol/h)	3270,0	3270,0	3141,6	1643,4	16454,4	10,2	16447,6	16444,1
Caudal másico (kg/h)	93858,0	93858,0	88509,1	29831,5	371914,5	277,1	371656,1	371636,2
Entalpía molar (kJ/kmol)	2421,5	-4118,3	10287,7	-284349,0	-284271,0	-3092,0	-284468,7	-283307,0
Densidad (kg/m3)	35,01	57,57	56,19	992,1	1012,4	1,034	1012,3	995,8
Fracción molar de componente								
Etileno	0,19983	0,19983	0,20666	0,0	0,00026	0,38986	0,00002	0,00002
Oxígeno	0,04146	0,04146	0,04299	0,00004	0,00003	0,04739	0,0	0,0
Nitrógeno	0,72033	0,72033	0,74829	0,00034	0,00029	0,46105	0,00001	0,00001
Agua	0,00377	0,00377	0,00205	0,99636	0,89037	0,10041	0,89086	0,89086
Dióxido de carbono	0,03438	0,03438	0,0	0,00003	0,00686	0,00002	0,00687	0,00687
Óxido de etileno	0,00025	0,00025	0,00001	0,00003	0,00009	0,00117	0,00009	0,00009
Ácido sulfhídrico	0,0	0,0	0,0	0,00031	0,0	0,0	0,0	0,0
Monoetanolamina	0,0	0,0	0,0	0,00289	0,10210	0,00011	0,10216	0,10216

Tabla 1.23. Balance de materia de la planta de producción de óxido de etileno 7/9.

Nombre	48	49	50	51	52	53	54	55
Fracción de vapor	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Temperatura (°C)	62,6	-85,6	25,0	250,7	40,0	40,2	40,2	40,2
Presión [kPa]	4000,0	3500,0	3498,4	3690,0	3685,7	5000,0	5000,0	5000,0
Caudal molar (kmol/h)	16447,6	112,8	112,8	16334,8	16334,8	16334,8	0,0	0,0
Caudal másico (kg/h)	371656,1	4958,4	4958,4	366697,8	366697,8	366697,8	0,0	0,0
Entalpía molar (kJ/kmol)	-283211,9	-398584,9	-393748,9	-263085,9	-283761,5	-283722,4	-284544,0	-266741,0
Densidad (kg/m ³)	1005,3	101,3	79,18	807,1	1006,0	1006,3	994,4	1000,7
Fracción molar de componente								
Etileno	0,00002	0,00244	0,00244	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Oxígeno	0,00000	0,00014	0,00014	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Nitrógeno	0,00001	0,00076	0,00076	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Agua	0,89086	0,0	0,0	0,89701	0,89701	0,89701	1,0	0,0
Dióxido de carbono	0,00687	0,99656	0,99656	0,00003	0,00003	0,00003	0,0	0,0
Óxido de etileno	0,00009	0,00010	0,00010	0,00009	0,00009	0,00009	0,0	0,0
Ácido sulfhídrico	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Monoetanolamina	0,10216	0,0	0,0	0,10287	0,10287	0,10287	0,0	1,0

Tabla 1.24. Balance de materia de la planta de producción de óxido de etileno 8/9.

Nombre	56	57	58	59	60	61
Fracción de vapor	0	0	0	0	0	0
Temperatura (°C)	40,2	40,2	40,0	40,0	40,0	40,0
Presión [kPa]	5000,0	5000,0	5000,0	5000,0	5000,0	5000,0
Caudal molar (kmol/h)	7,10	16325,3	0,6	0,0	0,0	1644,0
Caudal másico (kg/h)	128,1	366555,7	10,8	0,0	0,6	29841,8
Entalpía molar (kJ/kmol)	-284540,0	-283706,0	-284555,0	-266767,0	-266767,2	-284349,0
Densidad (kg/m ³)	994,5	1006,3	994,4	1000,9	1000,9	992,1
Fracción molar de componente						
Etileno	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Oxígeno	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Nitrógeno	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0003
Agua	0,9988	0,8970	1,0	0,0	0,0	0,9964
Dióxido de carbono	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Óxido de etileno	0,0000	0,0001	0,0	0,0	0,0	0,0
Ácido sulfhídrico	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0003
Monoetanolamina	0,0012	0,1029	0,0	1,0	1,0	0,0029

Tabla 1.25. Balance de materia de la planta de producción de óxido de etileno 9/9.

Nombre	62	63	64	65
Fracción de vapor	1,0	1,0	1,0	1,0
Temperatura (°C)	-44,2	26,3	26,3	103,2
Presión [kPa]	1003,0	1000,0	1000,0	2015,0
Caudal molar (kmol/h)	3141,4	3141,4	12951,3	12951,3
Caudal másico (kg/h)	88500,8	88500,8	370071,8	370071,8
Entalpía molar (kJ/kmol)	7832,7	10227,7	-627,5	1890,1
Densidad (kg/m ³)	15,39	11,46	11,63	18,54
Fracción molar de componente				
Etileno	0,2067	0,2067	0,2015	0,2015
Oxígeno	0,0430	0,0430	0,0418	0,0418
Nitrógeno	0,7483	0,7483	0,7271	0,7271
Agua	0,0020	0,0020	0,0033	0,0033
Dióxido de carbono	0,0000	0,0000	0,0260	0,0260
Óxido de etileno	0,0000	0,0000	0,0002	0,0002

1.3.2.1 Comprobación del balance de materia.

Se procede a comprobar que el balance de materia realizado es correcto por medio del balance de materia global. Para esto se realiza el sumatorio de los caudales másicos de entrada al proceso y el sumatorio de los caudales másicos de salida del proceso y se comprueba que ambos sumatorios coinciden. Los resultados se presentan en las **Tablas 1.26 y 1.27**.

Tabla 1.26. Entrada de materia al proceso.

Corrientes de entrada	
Número de corriente	kg/h
1	11.642,3
2	11.200
3	224,104
31	108.090,6
54	0
55	0
58	10,8
59	0
sumatorio	131.167,9

Tabla 1.27. Salida de materia al proceso.

Corrientes de salida	
Número de corriente	kg/h
25	16.053,1
32	109.624,7
45	277,1
50	4.958,4
56	128,1
60	0,601
sumatorio	131.042

Se puede observar que la entrada y salida de materia al proceso difieren en 125,9kg/h, lo cual se traduce a un **0,096 %** de diferencia. Al no ser una diferencia significativa, el balance de materia se considera como correcto.

1.3.3 Descripción detallada del proceso

El proceso para producir óxido de etileno llevado a cabo en ETHOXID, y que puede ser observado en el diagrama de proceso del apartado anterior y en los diagramas del **Capítulo 10**, consiste en las siguientes etapas o áreas:

- Acondicionamiento y almacenamiento de materias primas A-100
- Reacción A-200
- Separación A-300
- Purificación de óxido de etileno A-400
- Tratamiento de dióxido de carbono A-500

1.3.3.1 Acondicionamiento y almacenamiento de materias primas A-100

En primer lugar, cabe especificar de donde provienen las materias primas que se usarán en la etapa de reacción del proceso. El oxígeno y el etileno son administrados por un complejo petroquímico del mismo polígono industrial a temperatura ambiente y a 11 bar por medio de tuberías que han sido diseñadas para los caudales necesarios en el proceso.

El nitrógeno necesario para la reacción se proporcionará a través de la empresa Aire Liquide, con sede principal en Madrid y también situada en la localidad de Reus [2], y será almacenado en forma líquida a -190°C y a 17 bar para después, mediante un vaporizador atmosférico, pasarlo a gas disminuyendo la presión a unos 10 bar para su mezcla con los corrientes puros de etileno y oxígeno. A parte de proporcionar el nitrógeno en líquido, la empresa nos suministrará:

- Tanques de almacenamiento (3 - 63 m³).
- Vaporizadores, para el cambio de fase del nitrógeno de líquido a gas.
- Control de nivel electrónico y televigilado.
- Fijación en el suelo de todos los elementos.
- Carteles de seguridad.
- Armarios eléctricos.

Una vez terminada la puesta en marcha y hechas todas las recirculaciones, la planta trabaja con un caudal de 8 kmol/h o 224 kg/h de nitrógeno en estado estacionario, por lo que se necesitan 5376 kg/día y, considerando un suministro semanal, 37632 kg/semana. El caudal volumétrico será de 47,04 m³/semana por lo que, si suministran el nitrógeno cada semana y, de acuerdo con el distribuidor, es necesario alquilar cuatro tanques de 53 m³.
Especificaciones en el capítulo Anexos de seguridad y equipos.

La razón por la cual se han alquilado cuatro tanques, a pesar de necesitar únicamente 47m³ semanales de nitrógeno, es que, aparte de necesitar este compuesto para el proceso, también se necesitará para la inertización de equipos de la planta y para la puesta en marcha. Por lo tanto, dos de los tanques estarán situados en el área de materias primas A-100 y otros dos en el área de servicios A-1000.

Cabe especificar que, aparte de todo el material que nos suministre la empresa, la planta deberá disponer de algunos recursos y servicios mínimos tales como:

- Planchada de hormigón para los tanques, vaporizadores y zona de descarga libre de asfaltos.
- Toma de agua y alimentación eléctrica.
- Valla de protección de unos 2 m con puerta de seguridad.

A los reactores también entran dos subproductos, provenientes de la reacción secundaria explicada en este mismo capítulo, el Agua (H_2O) y el Dióxido de Carbono (CO_2). La cantidad de estos dos será considerablemente inferior a la de los demás reactivos (ninguno de los dos supera el 3% molar).

Las corrientes de etileno, oxígeno y nitrógeno son mezcladas en línea, es decir, las tres corrientes se juntarán en una tubería que estará diseñada para tener una turbulencia adecuada y garantizar la mezcla de los gases. Estas corrientes serán mezcladas a 10 bar de presión y a temperatura ambiente.

Previamente a la simulación del proceso en HYSYS, se ha realizado un balance de materia sobredimensionado en un 20% la cantidad de reactivos que se necesitarían debido a las posibles pérdidas del proceso. Al diseñar el proceso en su totalidad, estas pérdidas han resultado menores y, gracias a esto y a las recirculaciones, las cuales tampoco se tenían en cuenta en el balance previo, se ha podido reducir la cantidad necesaria de materias primas que entran al proceso. Finalmente se obtiene una producción de óxido de etileno de 123.264 t/año, lo cual es un 2,65% mayor que la producción que se pretendía inicialmente de 120.000 t/año.

La otra sustancia que se encuentra en el área de obtención y acondicionamiento de materias primas es la monoetanolamina o etanolamina, mejor conocida como MEA, que será necesaria para el tratamiento de Dióxido de Carbono, que será descrito más adelante. La MEA, al igual que los reactivos y el nitrógeno, tendrá sus dos tanques de almacenamiento y acondicionamiento en esta área dónde será suministrada a medida que se vaya agotando.

1.3.3.2 Reacción A-200

Una vez definido de donde provienen las materias primas y las condiciones en las cuales llegan a la planta, se prosigue a detallar el área de reacción, la cual es la zona siguiente a la de acondicionamiento y almacenamiento de materias primas. Esta zona incluye los dos reactores activos R-100A y R-100B y un reactor inactivo R-100C que se pondrá en marcha en casos específicos como mantenimiento de otro de los reactores o regeneración o renovación de catalizador, con tal de que la producción pueda seguir en curso, es decir, en continuo. Dichos reactores serán multitubulares de lecho fijo y se usará un catalizador de plata sobre soporte de γ -alumina. Así mismo contarán con una carcasa por la cual circulará agua que evaporará al absorber el calor generado por la reacción, con el fin de mantener la temperatura del reactor controlada y constante a las condiciones óptimas de reacción.

Lo primero que ocurrirá en el área de reacción es la mezcla de reactivos con la corriente de recirculación de gases no reaccionados que provendrá de la zona de separación y de la zona de tratamiento de dióxido de carbono. La mezcla de dicha recirculación con los gases puros de entrada ocurrirá en una tubería y, seguidamente, entrará a un intercambiador de calor para tener la corriente de entrada al reactor a la temperatura adecuada de 270°C. Para que la corriente de recirculación se pueda mezclar con la de materias primas, se dispone de un compresor con el que se conseguirá la presión de 20,15 bar que es también la presión a la que entra la mezcla de etileno, oxígeno y nitrógeno puros a zona de reacción. Así mismo, en el intercambiador de calor previo a los reactores habrá una pérdida de presión de 0.15 bar y, por lo tanto, la corriente 7 entrará al reactor a 20 bar y 270°C.

Los reactores trabajan también a 20 bar y 270°C y se tratan de reactores isotérmicos en los cuales existe una pérdida de presión de 1,3 bar, por lo que los productos que salen del reactor se encontrarán a 270°C y 18,7 bar. Las reacciones que tendrán lugar en ellos han sido mencionadas anteriormente y el oxígeno, que es el componente limitante estequiométrico, será considerado como el componente clave y con respecto al cual se controlará la conversión.

Consecuentemente, teniendo en cuenta las relaciones estequiométricas, la conversión de oxígeno tiene que ser de un 20%, obteniendo en los reactores de ETHOXID un 20,30%. La conversión del etileno no deberá superar el 15% con el fin de poder eliminar de manera adecuada el calor de la reacción y, en este caso, se obtiene una conversión del 13,84%. Así mismo, el valor teórico del porcentaje molar del óxido de etileno a la salida de los reactores no debería superar el 3%, siendo el porcentaje obtenido del 2,69%.

Finalmente, los productos de los reactores se unirán en una sola corriente que pasará por un intercambiador de calor con tal de reducir su temperatura para así circular al área siguiente, que será la de separación del óxido de etileno obtenido A-300.

1.3.3.3 Separación A-300

El óxido de etileno, junto con los demás productos de la reacción, entra a la siguiente área, la de separación. En esta área se encuentra una columna de absorción C-300 y un tanque de separación flash T-300.

En la columna de absorción se utiliza agua como absorbente de óxido de etileno. Dicha agua es agua de red que pasará por los tratamientos necesarios en la EDAR de la planta. Inicialmente todo el caudal de agua necesario procederá de la estación depuradora, pero una vez encontrado el proceso en estado estacionario, gran parte del agua será recirculada y por lo tanto el caudal necesario proveniente de la EDAR será menor.

El agua entra a la columna a 26°C y, como se ha mencionado antes, la corriente de salida del reactor es enfriada a 60°C para posteriormente entrar a la absorción. También entrará la corriente **30** a la columna. Esta corriente consiste en gases de salida de las columnas del área de purificación del óxido de etileno A-400. Por lo tanto, dichas corrientes se juntarán y se recircularán a la absorción C-300 con el fin de reabsorber y recuperar todo el óxido de etileno que se haya perdido en el área de purificación y, así, aumentar el rendimiento de la planta.

Las condiciones de operación de la columna de absorción son de 13 bar en la zona de agotamiento y de 10 bar en la zona de rectificación. Esto es debido a que a mayor presión mayor es la eficacia absorbente. Por este motivo, del caudal total de entrada de óxido etileno que equivale a 368.603 kmol/h, se absorben 368.269 kmol/h, saliendo únicamente 0.334 kmol/h de este componente por cabeza de columna, lo cual significa una absorción del 99.91% respecto al óxido de etileno.

El caudal de reactivos no reaccionados que no han podido absorberse saldrá por cabeza de columna y se dividirá en dos, un 75% que se recircula a los reactores y un 25% que se irá a la zona del tratamiento del CO₂. Los reactivos no reaccionados y el óxido de etileno que sí han sido absorbidos abandonarán la columna por fondos y entrarán al tanque de separación flash T-300.

En el tanque de separación flash T-300 lo que se busca es separar parte de los gases no reaccionados que han sido absorbidos en la C-300 dejando en solución líquida, en su mayoría, óxido de etileno, con el fin de facilitar las operaciones en la zona de purificación. Para ello se eleva la presión de la corriente de salida de fondos de la absorción a una presión de 35 bar y se introduce al tanque que se encuentra a una presión de 3 bar, de esta manera, parte del etileno, oxígeno, nitrógeno, dióxido de carbono y una pequeña cantidad de agua, logran separarse y son recirculados a la absorción C-300. La corriente **14** de óxido de etileno en agua con poca cantidad de gases no reaccionados que abandona por fondos la T-300, entra al área de purificación de óxido de etileno A-400.

1.3.3.4 Purificación de óxido de etileno

La zona de purificación consiste en una serie de columnas que buscan separar el óxido de etileno del agua en la que ha sido absorbido y de los gases no reaccionados que se han ido arrastrando, además de equipos como bombas, compresor e intercambiadores de calor, aumentando así su grado de pureza.

La corriente **14** procedente del área de separación A-300 entra al área de purificación y se introduce primeramente en una columna de destilación C-400. Esta columna trabaja a una presión ligeramente más elevada a la atmosférica para favorecer la separación, concretamente a 2 bar en zona de agotamiento y 1.5 bar en zona de rectificación, y cuenta con un condensador parcial, por lo que el destilado se obtendrá en forma de vapor. El destilado será el óxido de etileno que se separa del agua de la corriente de entrada, y se obtiene a un 94.35% de pureza, por lo que se requiere de más operaciones de separación para obtener la pureza deseada.

La corriente de destilado y la del agua se acondicionan con un compresor y un intercambiador de calor respectivamente y se introducen de nuevo a una columna de absorción C-401 que, en este caso, se ha podido diseñar para trabajar a una presión de 1,67 bar en la zona de fondos de columna y a 1,2 bares en la zona de cabeza de columna, con el fin de reabsorber el óxido de etileno, esta vez con una menor cantidad de impurezas (nitrógeno, etileno, oxígeno, CO₂). La corriente que abandona la columna de absorción por cabezas será mayoritariamente vapor de agua con los reactivos no reaccionados, nitrógeno y CO₂, que se unirán a la corriente **27** (salida de gases del tanque T-300) en el área de separación para ser recirculadas a la primera columna de absorción del proceso C-300.

Como último paso de la purificación, la corriente absorbida en la columna C-401 se introduce en una columna de destilación C-402 para separar el agua de la corriente y así poder obtener por cabeza de columna el caudal de óxido de etileno. La columna trabaja a 2.5 bar en zona de agotamiento y 2 bar en zona de rectificación. En este caso se tiene un condensador total y por lo tanto se obtiene el óxido de etileno en estado líquido a 28°C y 2 bar con una pureza del 99,96%. Este óxido de etileno pasará por una bomba y un intercambiador para obtenerse a 5.06 bar y 15°C, condiciones a las cuales será enviado a la zona de almacenamiento para posteriormente poderse comercializar. Así mismo, la corriente de agua resultante de la destilación será también recirculada al área de separación A-300 y, como se había mencionado anteriormente, se utilizará como absorbente en la primera columna de absorción C-300 junto al agua procedente de la EDAR.

1.3.3.5 Tratamiento de CO₂

Como se ha explicado antes, con el fin de tratar parte del dióxido de carbono generado por la reacción de combustión, y para poder recircular gases no reaccionados con una menor cantidad de CO₂, el 25% de la corriente **10** que sale por cabezas de la primera absorción C-300 del proceso, entrará a la zona de tratamiento de CO₂. Esta zona consiste en una absorción química, un tanque de separación flash y una destilación para separar el CO₂ y regenerar la amina, además de una serie de intercambiadores de calor, bombas y un compresor.

La corriente proveniente de la zona de separación entra a la columna C-500. En esta columna, la corriente de gases que contiene CO₂ y una solución de monoetanolamina en agua entrarán en contacto en contracorriente, los radicales libres de la amina y el CO₂ reaccionarán y formarán un compuesto inestable y soluble en fase líquida, **[6]**. Las reacciones que se dan entre la solución y el CO₂ son reversibles, por lo tanto, la solución al salir de la columna es enviada a una regeneración (destilación). Para que la reacción entre el CO₂ y la monoetanolamina se lleve a cabo y se vea favorecida se deben cumplir condiciones de presiones elevadas y temperaturas bajas, por esto, antes de entrar a la columna, la corriente **39** es comprimida hasta 50 bar y enfriada a 40.4°C.

Se ha decidido utilizar la absorción química con aminas ya que es uno de los procesos más frecuentemente usados en la industria por ser de gran eficiencia en la absorción de CO₂, y se ha decidido utilizar monoetanolamina (MEA) ya que tiene bajo coste como solvente, es fácil de regenerar y con el dióxido de carbono es la más reactiva de las aminas y, por lo tanto, las reacciones se darán con mayor velocidad que con otras aminas, como, por ejemplo, la Dietanolamina (DEA). La MEA es también la amina con la que el caudal másico necesario será menor **[6]**, si se utilizara por ejemplo diisopropanolamina (DIPA), debido a su alto peso molecular, se requerirían caudales másicos muy elevados.

La absorción tendrá tres entradas, el gas ácido (gas con CO₂) entra por la parte inferior de la torre y la solución de agua con amina pobre (sin CO₂) tendrá dos entradas por la parte superior de la misma. En cada plato se dará una reacción de equilibrio entre la amina y el CO₂ que también ocasionará la formación de ácido sulfhídrico, metano, etano y propano. La columna tendrá tres salidas. Por la parte superior de la columna se extraerán los gases sin CO₂ y por el segundo plato se extraerá una corriente compuesta en un 99.64% por agua, el 0.36% restante será MEA, H₂S y una pequeña cantidad de nitrógeno. Por fondos se extraerá la corriente de gases dulces (sin CO₂) y será recirculada a la zona de reacción.

El metano, etano y propano formado en las reacciones de absorción tendrán composiciones muy pequeñas en las corrientes de salida, como se puede observar en la **Tabla 1.28**, motivo por el cual para el balance de materia no han sido tomadas en cuenta.

Tabla 1.28. Composiciones molares de los corrientes 42, 43 y 44 del área de tratamiento de CO₂.

Corriente	42	44	43
Composición molar de etano (C ₂ H ₆)	1,95E-224	1,24E-277	8,00E-231
Composición molar de metano (CH ₄)	3,25E-224	1,55E-278	1,28E-230
Composición molar de propano (C ₃ H ₈)	9,65E-234	1,61E-288	1,99E-240

La columna de absorción ha sido diseñada en Aspen HYSYS utilizando el *fluid package* de *acid gas – chemical solvent*, por lo tanto, las reacciones para este caso son generadas automáticamente por el programa utilizando los modelos de termodinámica y cálculo subyacentes en dicho paquete. Se ha introducido la lista de componentes y seleccionado MEA como solvente, el programa lo ha asociado con el paquete y se ha podido proceder a la simulación.

La corriente **44** rica en dióxido de carbono y con un pequeño porcentaje del resto de gases del proceso disueltos que sale por fondos de la columna C-500, entra en un tanque de separación flash T-500 que funcionará como un tanque de venteo para recuperar los gases disueltos en la solución ya que en la regeneración posterior podrían provocar la creación de espumas [6]. Se trata de un tanque flash ya que se encuentra a presión atmosférica, por lo que existe una disminución repentina de la presión de 50 bar a la que estaba la corriente de entrada, lo que consigue que los gases que se encontraban disueltos se vaporicen y se separen, arrastrando con ellos una pequeña cantidad de CO₂ y vapor de agua. Por lo tanto, por cabezas del tanque T-500 saldrá la corriente **45**, que se conforma principalmente de etileno, oxígeno y nitrógeno con una composición menor en vapor de agua y óxido de etileno. Esta corriente es enviada a la zona de tratamiento de gases de la planta ya que no podrá ser liberada a la atmosfera. Por fondos del tanque T-500 saldrá la corriente **46** y se conformará en su mayoría de la solución absorbente rica en CO₂ a presión atmosférica y 48°C.

Posteriormente, con el fin de minimizar costes de operación y disminuir la contaminación al medioambiente, se regenera la corriente de solvente. Para ello se alimenta la corriente **44** de amina rica en CO₂ a una torre de destilación en donde se lleva a cabo la desorción del CO₂. Las condiciones de esta torre son opuestas a las de la torre de absorción, ya que la columna trabajará a altas temperaturas y presiones altas, pero inferiores a la de la absorción. Por lo tanto, la corriente que entrará a la regeneración pasará previamente por una bomba y por un intercambiador de calor para aumentar tanto su presión como su temperatura.

La regeneración se trata de una destilación con condensación parcial en la que se busca eliminar el CO₂ de la amina, regenerándola para poder recircularse y ser reutilizada. La columna trabaja a 3.69 bares en la zona de agotamiento y 3.5 bares en la zona de rectificación. Por lo que antes de entrar a la columna la bomba subirá la presión del líquido absorbente con CO₂ a 4 bar. El intercambiador de calor conseguirá una temperatura de 62.6°C, pero dentro de la columna se trabajará a temperaturas que llegan a superar los 200°C. Por cabezas de la columna se obtendrá CO₂ con una pureza del 99.65% que será almacenado para su posterior comercialización mediante tubería y en estado gas a una empresa del mismo polígono industrial. Así mismo, la amina regenerada y el agua en las que se encontraba absorbido abandonarán la columna por fondos para recircularse a la absorción y utilizarse como mezcla absorbente una vez más. Como la corriente de amina abandona la destilación a altas temperaturas, se enfría y se presuriza para alimentarla de nuevo a la C-500.

Antes de recircular las corrientes **43** y **53** a la absorción, es necesario realizar una purga de aminas y de agua, para ello se realizan una serie de operaciones de separación. Del corriente **43** se purgará una pequeña cantidad de MEA, que será suministrada como amina nueva con un caudal equivalente al de purga. Debido a que la corriente **43** es una mezcla de agua, amina y gases disueltos, para realizar la purga, es necesario introducir la corriente **43** a una destilación que separará el caudal de amina deseado del resto de componentes de la corriente. La purga de la corriente **53** será de amina y de agua. Al igual que la corriente **43**, la corriente **53** es una mezcla de amina, agua y gases disueltos por lo que para realizar las purgas la corriente pasará por dos destilaciones distintas, una para separar el caudal de agua deseado y otra para separar el caudal de MEA, y de igual manera que con la corriente **43**, al proceso se suministrará agua y MEA nuevas en caudales equivalentes a los caudales de purga.

1.3.4 Distribución por áreas

La planta ETHOXID está dividida en diferentes áreas, o zonas de trabajo, y sus abreviaciones se indican en la **Tabla 1.29**.

Tabla 1.29. Abreviaciones y su descripción de las diferentes áreas de la planta ETHOXID.

Abreviación del área	Descripción
A-100	Descarga de reactivos, acondicionamiento y almacenamiento de materia primas
A-200	Reacción
A-300	Separación
A-400	Purificación de óxido de etileno
A-500	Tratamiento de dióxido de carbono
A-600	Almacenamiento y carga de producto de óxido de etileno
A-700	Sala de control
A-800	Taller de mantenimiento
A-900	EDAR
A-1000	Servicios de planta
A-1100	Oficinas y laboratorios
A-1200	Zona social, vestidores y baños
A-1300	Estacionamiento de vehículos
A-1400	Control de entrada a la planta
A-1500	Área contra incendios
A-1600	Tratamiento de gases

La distribución final de las áreas sobre el plano de la parcela que se ha diseñado es el que se puede observar en la **Figura 1.18**.



Figura 1.18. Distribución de las áreas de la planta sobre la parcela.

1.3.5 Descripción de las áreas

1.3.5.1 Área 100: Obtención, acondicionamiento y almacenamiento de reactivos

En esta área se descargan y almacenan las sustancias para llevar a cabo la reacción en la planta. Dichas sustancias, como el oxígeno y el etileno, se almacenan en tanques pulmón T-101 y T-102 a 11 bar. Dichos tanques pulmón se han diseñado para asegurar y controlar las condiciones del caudal estable en la entrada de proceso. Así mismo, están situados lo más cerca de la planta de la que provienen por tubería y lo más alejados del personal posible.

Mientras que el etileno y el oxígeno llegan a planta por tubería, el nitrógeno es proporcionado en tanques cisterna por una empresa externa y almacenados en tanque criogénico T-100 a 17 bares y -190°C en estado líquido. En esta misma área las sustancias son mezcladas entre ellas a 10 bar y con la recirculación del proceso, después de su acondicionamiento para el proceso con un compresor. Así mismo, en esta área se almacena la monoetanolamina que se usará posteriormente en el área A-500 para el tratamiento de CO_2 .

1.3.5.2 Área 200: Reacción

El área de reacción para producir óxido de etileno engloba a los 3 reactores multitubulares de lecho fijo de 60 m^3 cada uno (R-200A, R-200B, R-200C), dos de los cuales están activos y otro se utilizará en caso de emergencia, limpieza o mantenimiento de alguno de los otros dos reactores, así como los búnkeres que los protegen. También se encuentran en esta área los intercambiadores de calor a la entrada y salida del reactor para el correcto acondicionamiento de las sustancias y el aprovechamiento del calor generado en los reactores ya que las reacciones dadas son altamente exotérmicas.

1.3.5.3 Área 300: Separación

Esta área se dedica a la separación del óxido de etileno del resto de sustancias que se introducen o se generan en el proceso mediante una absorción y una separación flash. Los principales equipos para llevar a cabo la separación del óxido de etileno de las sustancias no deseadas son una columna de absorción C-300 y el tanque de destilación flash T-300.

1.3.5.4 Área 400: Purificación del óxido de etileno

Después de la separación T-300, es necesario purificar el óxido de etileno obtenido para obtener la pureza requerida de 99,96%. Los principales equipos empleados en la purificación son dos columnas de destilación C-400 y C-402 y una columna de absorción C-401. Juntamente con las correspondientes calderas/reboilers y condensadores de las

columnas de destilación, un compresor y un intercambiador de calor para el correcto acondicionado de la mezcla de sustancias.

1.3.5.5 Área 500: Tratamiento del dióxido de carbono

En el proceso hay 2 reacciones secundarias que producen CO₂, esta área se dedica al tratamiento de la dicha sustancia con el objetivo de separar, purificar y vender el CO₂, de esta manera rentabilizando más la planta.

Para el tratamiento del CO₂ se emplean una columna de absorción C-500, un tanque de destilación flash T-500 y una columna de destilación C-501, juntamente con un compresor y 4 intercambiadores de calor para el correcto acondicionado de las sustancias.

1.3.5.6 Área 600: Almacenamiento del óxido de etileno

Una vez alcanzado el grado de pureza requerido del 99,96%, el óxido de etileno es enviado a los tanques de almacenaje T-600A, T-600B, T-600C, T-600D, T-600E y T-600F, que se encuentran en esta área juntamente con los muelles de carga en los que los camiones cargarán el producto final. Dicho almacenaje tiene lugar a 5 atm y 15°C de temperatura y en 6 tanques de 250 m³ de capacidad cada uno.

1.3.5.7 Área 700: Sala de control

Todo el proceso de la planta es controlado desde la sala de control, la cual se sitúa en esta área. En esta sala se monitorizan y manipulan todos los parámetros y variables del proceso, para el correcto funcionamiento de todos los equipos.

1.3.5.8 Área 800: Taller de mantenimiento

En esta área se encuentra el taller de mantenimiento, donde se llevan a cabo todas las reparaciones que hay que hacer en planta. Esta área consta de un taller, un almacén para almacenar los materiales y recambios para dichas reparaciones. También hay un espacio destinado para guardar la maquinaria de limpieza de planta.

1.3.5.9 Área 900: EDAR

Todos los efluentes líquidos de purga provenientes de la planta son tratados en esta área donde se encuentra la EDAR. Suelen ser efluentes líquidos de purga del proceso, pero también se trata el agua de limpieza utilizado en los sumideros de carga del producto final, en el caso de derrame, y de efluentes de baños y limpieza de planta.

1.3.5.10 Área 1000: Servicios de planta

Los servicios de planta requeridos tales como la electricidad, suministro de agua de red, aire comprimido, gas natural, agua glicolada y nitrógeno se gestionan desde esta área. También se encuentran el transformador y el generador que suministrara electricidad a la

planta en el caso de corte en el suministro de electricidad. Dichos suministros serán especificados en el apartado de **1.4** de este capítulo.

1.3.5.11 Área 1100: Oficinas y Laboratorio

En esta área se ubican las oficinas y los laboratorios para los trabajadores de la empresa, en el laboratorio se controlará la calidad tanto de los productos como de los reactivos. También se llevará a cabo la investigación del departamento de I+D, para posibles mejoras y el desarrollo del proceso.

1.3.5.12 Área 1200: Zona social, vestidores y baños

La zona social junto con los vestidores y baños para los trabajadores de planta se encuentra en esta área. La zona social engloba la cocina, el comedor y una sala de descanso para los trabajadores.

1.3.5.13 Área 1300: Estacionamiento de vehículos

Los vehículos que entran en la planta son estacionados en esta área a no ser que sean para transporte de nitrógeno o para la recogida del producto. El aparcamiento se divide en 3 zonas, motocicletas, coches y autocares.

1.3.5.14 Área 1400: Control de entrada a la planta

Todo vehículo que quiera entrar en la planta tiene que pasar por el control de seguridad, en esta área se ubica la garita donde se efectúa el control de cualquier vehículo que quiera entrar en la planta.

1.3.5.15 Área 1500: Área contraincendios

Para la correcta prevención de accidentes, en esta área se ubica la balsa de agua contra incendios con su respectiva estación de bombeo, que suministrará agua a todos los elementos de seguridad contra incendios en caso de fuego o explosión.

1.3.5.15 Área 1600: Tratamiento de gases

El área de tratamiento de gases consta de un Scrubber y una antorcha para el tratamiento de gases. Los dos equipos sirven para tratar y evitar la emisión de ciertos gases a la atmósfera provenientes del área A-500 o bien posibles fugas de gases. Así mismo, están situados a la distancia de seguridad permitida de unos 60 m del proceso productivo de la planta.

1.4 Especificaciones y necesidades de servicios de planta.

Como se podrá ver a lo largo de este proyecto, para que la planta de producción de óxido de etileno de ETHOXID funcione de manera correcta, son necesarios diferentes servicios. Los servicios son operaciones auxiliares que buscan satisfacer las necesidades de la planta para hacer posible su actividad. Dichos servicios serán igual de importantes que el resto de las instalaciones y sustancias que se encuentren en la planta y se podrán clasificar en dos tipos: materia y energía.

Como servicios en forma de materia se tendrán nitrógeno, agua, vapor y aire comprimido. Y como energía se dispone de la electricidad y energía térmica en forma de gas natural, tal como se puede observar en la **Tabla 1.30**.

Tabla 1.30. Servicios requeridos en planta.

Servicio	Clasificación	Fuente
Agua de red	Materia	Externa, acometida a pie de parcela
Agua contra incendios	Materia	Interna (Área 1500)
Agua desmineralizada y descalcificada	Materia	Interna (Área 900)
Agua de refrigeración a 5°C	Materia	Interna (Área 1000)
Agua de refrigeración a 25°C	Materia	Interna (Área 1000)
Agua glicolada	Materia	Interna (Área 1000)
Agua sobrecalentada	Materia	Interna (Área 1000)
Vapor de Agua	Materia	Interna (Área 1000)
DOWTHERM-A	Materia	Interna (Área 1000)
Aire comprimido	Materia	Interna (Área 1000)
Nitrógeno	Materia	Externa, Air Liquide
Fluido refrigerante para el Chiller	Materia	Interna (Área 1000)
Electricidad	Energía	Externa, a pie de parcela
Gas natural	Energía	Externa, conexión a pie de parcela

A continuación, se realiza la descripción de cada uno de los servicios que se requieren para que la planta ETHOXID funcione de manera correcta.

1.4.1 Electricidad

Es la forma de energía más usada en la planta ETHOXID ya que debe ser abastecida a todas las áreas. Para este servicio se cuenta con una conexión a una línea de 20kV a pie de parcela, y por lo tanto se contará con una estación transformadora que permita convertir el voltaje al necesario para la alimentación a las diferentes zonas y equipos de la planta, en este caso, se dispone de un consumo de unos 41.700 kW, incluyendo el consumo de los equipos eléctricos y un 10% referido al consumo por las oficinas y edificios externos, por lo que el transformador se ha elegido de 50 MVA o lo que es lo mismo, 50.000kVA.

Tabla 1.31. Potencia consumida de todos os equipos de la planta en kW.

Equipo	Potencia (kW)
TR-01	74
CH-01	668
K-100	2.910
K-101	9.455
K-400	108
K-500	5.928
P-300	282
P-301	277
P-400	19
P-401	2,5
P-500	539
P-501	178
CV-01 Vapor de agua	5.231
CV-02 Dowtherm A	3.416
CV-03 Dowtherm A	3.416
CV-04 Agua sobrecalentada	7.224
Oficinas y edificios externos (10%)	3.973
Total (kW)	41.700

Gracias a la cogeneración algunas industrias comienzan a generar parte de la electricidad que consumen, este es el caso de ETHOXID que cuenta con un sistema de cogeneración con turbina de vapor.

Las turbinas de vapor son máquinas accionadas por un fluido en movimiento, en este caso, el fluido es el vapor de agua a alta temperatura y presión (190°C y 12,5 bar) que abandona el sistema de refrigeración de los reactores. La turbina de vapor accionará un generador que produce energía eléctrica transmitiéndola a través de líneas de transporte de energía eléctrica.

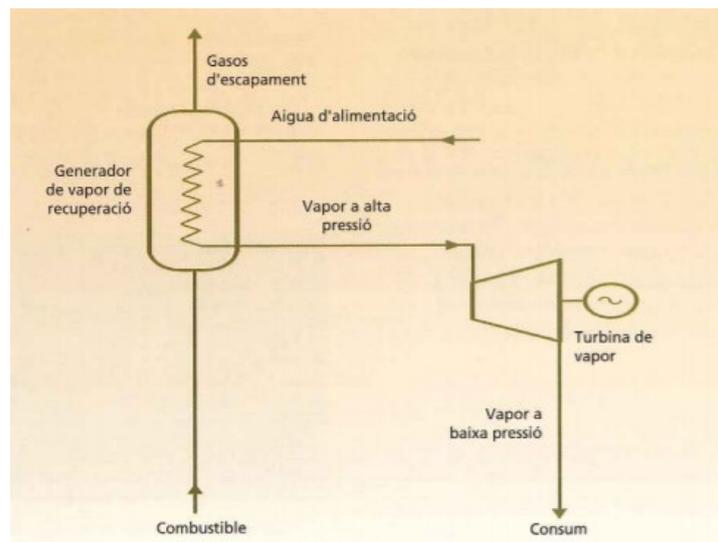


Figura 1.19. Esquema del funcionamiento de una turbina de vapor con cogeneración.

Desde el punto de vista de la generación de energía eléctrica, es necesario que el vapor de entrada de la turbina disponga de presión y temperatura como más altas posibles, como es en este caso 190°C y 12,5 bares, para poder conseguir un salto de entalpías mayor. Es decir, las condiciones y el caudal de entrada del vapor a la turbina determinarán la cantidad de electricidad autogenerativa.

La turbina tendrá también equipos auxiliares como un sistema de lubricación, de refrigeración del aceite de lubricación, un sistema de regulación y control, conductos de entrada y salida de vapor, un recinto de insonorización debidamente ventilado y una cimentación y soportes en que apoyarse.

Por último, se dispone también de un grupo electrógeno alternativo por si la estación transformadora dejara de suministrar electricidad. En este caso se trata de un generador de electricidad que podría llegar a abastecer la mayoría de la planta mediante gas natural como combustible.

1.4.2 Gas natural

El gas natural que se usa en la planta ETHOXID se usa como combustible de las diferentes calderas, las calderas de vapor de agua y Dowtherm A y la caldera de agua sobrecalentada, así como para los grupos electrógenos. Dicho combustible se obtiene mediante una conexión a pie de parcela a una presión media de $1,5 \text{ kg/cm}^2$. Así mismo, este servicio también servirá para el agua sanitaria usada en las oficinas, siendo este un 10% del total del de las calderas:

Tabla 1.32. Estimación del consumo del combustible gas natural de la planta ETHOXID.

Usos	Caudal de combustible (Nm ³ /h)
Calderas de vapor y agua sobrecalentada	1.732
Servicios sanitarios	173,2
Caudal total de combustible (Nm³/h)	1.905,2

1.4.3 Agua de red

El agua de red será suministrada a pie de parcela a 4 kg/cm^2 , se filtrará y pasará por un tratamiento en la EDAR para obtener agua descalcificada y desmineralizada. Una vez tratada pasará a un depósito a partir del cual se suministrará al proceso donde sea necesario. El agua será impulsada por bombas a través de tuberías de circuito cerrado, es decir que el agua que provenga de la EDAR, una vez utilizada en el proceso, será recirculada para pasar de nuevo por el tratamiento necesario, además se contará con un intercambiador de calor para asegurar que llega el punto de uso a la temperatura deseada.

El agua de red se utilizará para conseguir el agua descalcificada y desmineralizada que se usará en equipos como la absorción C-300 como intercambiadores de calor y el agua contra incendios. También, posteriormente a ser tratada, se utilizará en las zonas de vestuarios, oficinas y en los laboratorios. Otro de sus usos será la limpieza de equipos y riego de zonas verdes de la parcela.

1.4.4 Agua contra incendios

Provenirá del agua de red y será suministrada a los equipos de la red general antiincendios. Será almacenada en una balsa en el área A-1500 y contendrá la cantidad necesaria para abastecer los equipos antiincendios durante cierto tiempo de autonomía requerido de acuerdo con las normativas. El agua de incendios se encontrará a una presión de 4 kg/cm^2 por lo que para poder bombearla a los puntos de uso a la presión que se necesite, se contará con una estación de bombeo.

1.4.5 Agua descalcificada y desmineralizada del proceso

El agua descalcificada y desmineralizada se utilizará en las calderas para producir vapor, en las torres de refrigeración y posteriormente en los intercambiadores de calor, en los reactores, para las absorciones y, por último, para el consumo personal de los trabajadores. El objetivo de quitar las sales y los minares al agua es evitar problemas de formación de incrustaciones, corrosión y contaminación tanto en los equipos como en las tuberías por las que circulará el agua.

Para obtener el agua a estas condiciones, el agua de red pasará por los tratamientos necesarios, como una desmineralización de agua por intercambio iónico con resinas catiónicas y ósmosis inversa y procesos de descalcificación en el área A-1000 de servicios. A continuación, se ha estimado el consumo aproximado del agua de proceso a tratar:

Tabla 11.32. Caudal total de agua a descalcificar y desmineralizar en el A-1000.

Agua para tratar	Caudal (kg/h)
Refrigeración de los reactores	57.456
Intercambiadores de calor	598.764
Absorción	108.111
Consumo personal de los trabajadores	1.125
Caudal total para tratar (kg/h)	765.445
Caudal total para tratar (m³/h)	765,4

1.4.6 Agua de refrigeración

El agua es el más abundante, barato y medioambientalmente favorable de todos los refrigerantes que pueden ser usados en equipos de refrigeración. Sus propiedades térmicas son buenas, tiene alto calor latente de vaporización y su viscosidad es baja. Por lo tanto, en la planta ETHOXID se trabaja con el agua como fluido de refrigeración. El agua de refrigeración se necesitará a dos diferentes temperaturas para su uso en el proceso, 5°C y 25°C. Cabe especificar que dicho caudal de agua está diseñado para un circuito cerrado y así, reducir el consumo de agua de red.

Para obtener el agua 25°C se hará uso de torres de refrigeración, en las cuales se consigue disminuir la temperatura del agua caliente que proviene del proceso mediante la transferencia de calor y materia al aire que circula por el interior de la torre, [10]. Las torres utilizadas serán de tipo mecánico tiro natural y el consumo total de agua será el siguiente:

Tabla 1.33. Consumo de agua de refrigeración a 25°C para los intercambiadores de calor.

Equipo	Temperatura Entrada (°C)	Caudal (kg/h)
E-201	25	120.000
E-301	25	4.000
E-400	25	181.000
E-500	25	54.046
E-502	25	177.783
Caudal total de agua de refrigeración a 25°C (kg/h)		536.829

No obstante, las torres de refrigeración no serán útiles para obtener agua a menor temperatura que la del ambiente, por lo que para obtener agua a 5°C se ha instalado también un Chiller. En el Chiller el agua transmitirá su calor a un caudal de refrigerante. En este caso el refrigerante será agua glicolada. Así mismo, el caudal de agua a 5°C a tratar es el siguiente:

Tabla 1.34. Consumo de agua de refrigeración a 5°C proveniente del Chiller para los intercambiadores de calor.

Equipo	Temperatura Entrada (°C)	Caudal (kg/h)
E-300	5	49.000
E-401	5	15.000
Caudal total de agua de refrigeración a 5°C (kg/h)		50.500

El agua que abandona las torres de refrigeración y el Chiller a las temperaturas requeridas será circulada a todos los intercambiadores de calor del proceso donde se buscará disminuir la temperatura de las corrientes del proceso. Cuando el agua abandone los intercambiadores de calor, se recirculará a la EDAR para ser acondicionada una vez más y poder reutilizarse en las torres de refrigeración y el Chiller del área de servicios A-1000.

1.4.7 Agua glicolada

El agua glicolada es una mezcla de agua con glicol que será empleada en los equipos de refrigeración, como el Chiller, [4]. Se utilizará este fluido como refrigerante ya que es una de las alternativas con menos impacto ambiental, además de que supone un ahorro energético, [3].

1.4.8 Vapor sobrecalentado

El vapor sobrecalentado es aquel vapor producido como vapor sobresaturado que se ha elevado su temperatura sobre la del punto de ebullición, por lo que el vapor sobrecalentado se encuentra a una temperatura mayor, disminuyendo su densidad y viscosidad, lo cual le otorga nuevas funcionalidades.

1.4.9 Vapor de agua

En la industria, el vapor es necesario una gran variedad de tareas. En ETHOXID se utilizará principalmente para calentar corrientes del proceso por medio de intercambiadores de calor con vapor como fluido térmico. El vapor tendrá que estar a 200°C y a la presión de 15.5 bar con el fin de disminuir las áreas de intercambio de calor y los caudales necesarios.

El vapor entrará a los intercambiadores de calor, cederá su energía en forma de calor latente y condensará para abandonar el intercambiador como agua, tal y como se puede observar en la **Figura 1.20**. El condensado que abandone los intercambiadores será recirculado a la EDAR de la planta para ser tratado y posteriormente utilizado de nuevo para producir vapor en la caldera. Así mismo, el consumo total de vapor de agua es el siguiente:

Tabla 1.35. Consumo de vapor de agua proveniente de las calderas para los intercambiadores de calor

Equipo	Temperatura Entrada (°C)	Temperatura Salida (°C)	Caudal (kg/h)
E-302	200	199	5
E-501	200	199	8.000
E-503	200	199	230
E-504	200	199	3.200
Caudal total de vapor (kg/h)			11.435

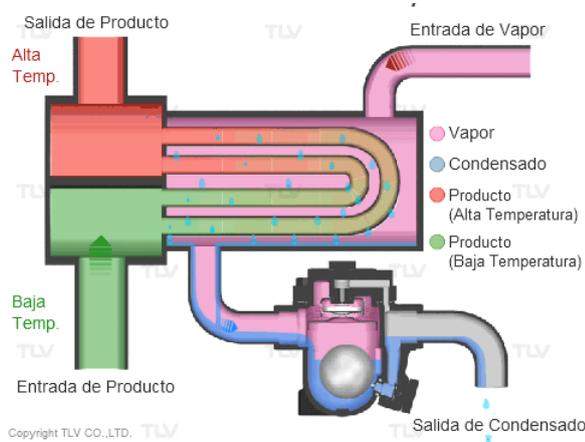


Figura 1.20. Esquema del funcionamiento de un intercambiador de calor usando vapor de agua como líquido calentador por carcasa. [11]

1.4.10 Aire comprimido

El aire comprimido como servicio de planta es muy versátil ya que tiene muchos usos. En ETHOXID se utilizará como actuador de válvulas, para hacer llegar las señales neumáticas a las válvulas de control.

El aire comprimido se producirá haciendo pasar el aire atmosférico a través de un compresor, que elevará la presión del aire al valor deseado. El aire comprimido llegará a las instalaciones a través de tuberías.

Para poder dimensionar la cantidad de aire comprimido necesario en la planta se necesita conocer el número total de válvulas y su caudal máximo. Normalmente, el caudal máximo de aire comprimido necesario para el funcionamiento de las válvulas es entre 1,5 m³/h y 3 m³/h y, sabiendo que se usan 477 válvulas en toda la planta, pero solo 80 son de control, la cantidad de aire comprimido será el producto del número total de válvulas de control y el caudal máximo que soportan:

Tabla 1.36. Consumo de aire comprimido necesario para las válvulas de la planta.

Número total de válvulas	Caudal total aire comprimido (Nm ³ /h)
80	240

Tal y como se puede observar en la **Tabla 1.36**, si solo se tuviera en cuenta el aire comprimido de las válvulas de control, el caudal de aire comprimido sería de 240 Nm³/h, no obstante, se le añade un 20% extra de lo que consumirían las 397 válvulas restantes, es decir, 286 Nm³/h, por lo que el consumo total será de 526 Nm³/h, ya que dichas válvulas del proceso cuando son activadas también consumen aire comprimido.

El aire comprimido podría presentar impurezas líquidas y sólidas. Las primeras son en su mayoría aceites procedentes del compresor y vapor de agua. Las segundas están formadas por polvos aspirados y partículas sólidas desprendidas de las instalaciones. Ambas reducen la vida útil en los equipos neumáticos. Por lo tanto, también será necesario llevar a cabo una limpieza del aire a utilizar. Algunos elementos para destacar en el tratamiento del aire comprimido son el secador encargado de eliminar la humedad del aire, el filtro que eliminará las partículas en suspensión y un regulador de presión que mantendrá la presión de trabajo adecuada y minimizará las oscilaciones de presión que surgen en la red.

1.4.11 Nitrógeno

El nitrógeno gas es otro importante servicio en la planta ya que resulta adecuado para varias aplicaciones, como manipulación de equipos y almacenamiento de productos.

En ETHOXID se utilizará el nitrógeno para garantizar un almacenamiento seguro del óxido de etileno, y para inertizar los tanques y mantener un espacio en el cual no haya posibilidad de descomposición o polimerización del óxido de etileno. También se utiliza para desplazar la humedad y contaminantes del sistema en la puesta en marcha, haciendo circular primeramente nitrógeno por todos los equipos antes de su utilización. Para poder estimar la cantidad exacta de nitrógeno usado en puesta en marcha para operaciones de inertización, se ha estimado como el 15% del volumen de todos los equipos que necesitan ser inertizados, obteniendo:

Tabla 1.37. Consumo de nitrógeno necesario en m³/h para la inertización de la planta en la puesta en marcha.

Equipo	Volumen (m ³)	Nitrógeno (m ³ /h)
R-200A	60	9
R-200B	60	9
C-300	130	19,5
T-300	50	7,5
C-400	85	12,8
C-401	47	7
C-402	128	19,2
C-500	25	3,8
T-500	33,5	5
C-501	89	13,4
T-600A, T-600B, T-600C, T-600D, T-600E, T-600F	1500	225
Caudal total de nitrógeno de inertización (m³/h)		331,2

Este fluido se obtendrá por medio de la empresa *Air Liquide*, [2], y se almacenará en forma líquida en el área A-1000 en dos tanques, posteriormente pasará por un vaporizador y se suministrará al proceso donde sea necesario. Estará conectado al resto de equipos.

1.4.12 DOWTHERM-A

En el área de servicios se encontrará también una caldera de aceite térmico DOWTHERM-A, el cual se utilizará como aceite térmico en el intercambiador de calor E-200. Este fluido suministrado a ETHOXID en forma líquida en barriles por DOW Chemical Ibérica y será convertido en gas en su respectiva caldera de aceite térmico. Se suministrará al intercambiador E-200 a 378°C y a presión de vapor, al pasar por el intercambiador cambiará de fase a líquida y podrá ser recirculado a la caldera para poder reutilizarse.

Se ha escogido trabajar con el fluido térmico en fase vapor ya que el coste en general al trabajar con el fluido en forma líquida y gas no difiere significativamente, por lo tanto, se han tomado en cuenta otras ventajas de trabajar con DOWTHERM-A en forma vapor condensante, entre las cuales se encuentran:

- Sistemas de fase vapor proveen más calor por unidad de masa que los sistemas en fase líquida.
- Los sistemas en fase vapor con condensación de este, proporcionan una fuente de calor más uniforme y un control más preciso de la temperatura por el usuario, lo cual como se ha mencionado antes es de especial importancia en este intercambiador.
- Un sistema equivalente al que se tiene en la planta ETHOXID, pero en fase líquida requería caudales más elevados del fluido térmico para mantener la misma uniformidad de temperaturas
- El calentamiento se puede lograr de manera más económica con vapor de condensación que con líquido a un alto caudal másico.

1.4.13 Agua sobrecalentada

El agua sobrecalentada es agua cuya temperatura está comprendida entre el punto de ebullición (100°C) y la temperatura crítica (374°C). En la planta ETHOXID se necesitará agua sobrecalentada para mantener una correcta refrigeración de los reactores.

El agua sobrecalentada estará a 190°C y será sometida a una presión de 12.6 bares para que no cambie de fase al sobrepasar el punto de ebullición. Así mismo, el consumo total de agua sobrecalentada será de 7,98 kg/s por cada reactor. Es por eso por lo que se dispone de una caldera de agua sobre calentada junto a las diferentes calderas de vapor en el área de servicios A-1000. El agua vaporizará y abandonará la carcasa de los reactores en estado vapor, que será recirculado a las turbinas de vapor para producir energía eléctrica, es decir, se diseñará en un circuito cerrado.

1.4.14 Consumo total de agua de red

Una vez especificados los diferentes servicios de la planta *ETHOXID*, se procede a determinar cuál será el consumo total de agua de red de la planta, teniendo en cuenta que la mayoría de agua que se usa en el proceso están diseñados en un circuito cerrado y, por tanto, únicamente de dispondrá del consumo de agua para absorciones, reposiciones por pérdidas y consumo personal de trabajadores:

Tabla 1.38. Consumo total de agua de red de la planta.

Servicio	Caudal (kg/h)
Agua de absorción	108.111
Reposición agua de refrigeración	6.562
Agua de consumo personal	1.125
Consumo total de agua de red (kg/h)	115.798
Consumo total de agua de red (m³/año)	889.329

Para el cálculo del consumo del agua de red total de la **Tabla 1.38** se ha tenido en cuenta, en primer lugar, el agua consumida para las operaciones de absorción C-300 y C-500, en segundo lugar, el agua de reposición del circuito cerrado de refrigeración a 5 y 25°C de la torre de refrigeración y el Chiller y, por último, el consumo personal de cada trabajador que se ha supuesto de unos 75 L/día y, teniendo en cuenta que al día cada trabajador únicamente realiza 8 horas, obteniendo un consumo de 9,38 kg/h. Así mismo, sabiendo que hay un total de 120 trabajadores en la planta, el consumo total será de 1125,6 kg/h.

Así mismo, para el consumo continuo de agua de reposición para posibles pérdidas del circuito cerrado de la planta, teniendo en cuenta el agua para los intercambiadores de calor y reactores, se ha estimado sobre un 1% de dicho caudal de 656.220 kg/h.

1.5 Planificación de los recursos humanos de la planta

La planta ETHOXID se ha diseñado para poder operar durante 320 días al año incluyendo dos paradas planificadas de 25 días en junio y 20 en diciembre para operaciones de mantenimiento. Es decir, se aprovechará para realizar tareas como las de limpieza, las de recambio de equipos o tareas de supervisión de las diferentes instalaciones de planta.

Así mismo, la planta opera los siete días de la semana (lunes a domingo), las veinticuatro horas al día, para poder alcanzar el objetivo mínimo de la producción de 123.264 t/año de óxido de etileno. Es por esta razón que se ha decidido disponer de cinco turnos rotatorios semanales, cuyas especificaciones son las siguientes:

Tabla 1.39. Especificaciones de los cinco turnos de trabajo de la planta ETHOXID.

Número de turno	Horario del turno
lunes a viernes	
1	07:00-15:00
2	15:00-23:00
3	23:00-07:00
sábado a domingo	
4	07:00-19:00
5	19:00-07:00

Tal y como se observa en la **Tabla 1.39**, de lunes a viernes los turnos serán de 8 horas de trabajo en tres horarios diferentes. No obstante, en los fines de semana solo habrá dos turnos que se irán rotando y los cuales serán de 12 horas.

Así mismo, a parte de los turnos para los operarios de planta, existen los turnos para los trabajadores de oficinas que incluyen básicamente los trabajadores del departamento de administración o marketing como secretaría, contabilidad o comerciales. Dicho turno será de lunes a viernes de 08:00 a 13:00h, una pausa para comer de 13:00 a 15:00h y, para finalizar la jornada laboral, de 15:00 a 18:00h con la posibilidad de realizar horas extras remuneradas hasta las 20:00h.

1.5.1 Distribución de cargos de la planta

En primer lugar, el personal de la planta ETHOXID se dividirá en los siguientes departamentos:

- **Departamento de ingeniería:** Es aquel departamento que supervisa y siempre está proponiendo mejoras en la mayoría de los departamentos de la planta, incluyendo en estos departamentos de control, mantenimiento o calidad.
- **Departamento de producción:** Es aquel departamento que tiene como objetivo principal el correcto y eficiente desarrollo de los productos finales de la planta, en este caso, óxido de etileno, es decir, transformar las materias primas y/o recursos como la energía o la mano de obra, en productos, bienes o servicios. Este departamento también incluye las funciones de supervisar que el sistema de control automatizado de la planta funcione correctamente.
- **Departamento de compras:** Es aquel departamento cuya función principal es la de llevar las cuentas de la empresa, es decir, se encargan de las compras de materias primas, servicios, mano de obra y los diferentes costes de la empresa.
- **Departamento comercial:** Es aquel departamento que se ocupa de las ventas, incluyendo en estas la captación de nuevos clientes mediante campañas publicitarias o bien por trato personal.
- **Departamento de mantenimiento:** Es aquel departamento cuya función principal es la de realizar y/o supervisar todas las tareas de mantenimiento de equipos e instrumentación de la planta.
- **Departamento de calidad:** Es el responsable del producto final que reciben los clientes, óxido de etileno. Debe verificar que el óxido de etileno sigue los parámetros de calidad establecidos y es así como se intentan reducir al máximo todos los costes de la planta.
- **Departamento de I+D+I:** Es aquel departamento cuya función principal es la de investigar, desarrollar e innovar para poder, por ejemplo, aumentar ventas, rentabilidad, abrir nuevos mercados o resaltar tu empresa por su alto nivel de innovación.
- **Departamento de recursos humanos:** Es aquel departamento cuya función principal es la de la gestión de los recursos humanos de la organización, como seleccionar y formar a los trabajadores que la empresa necesita, proporcionar a los trabajadores los medios necesarios para que puedan ejercer su trabajo e intentar que el trabajador satisfaga sus necesidades.
- **Departamento de finanzas:** Es aquel departamento que se dedica básicamente a todo el tema de la contabilidad de la planta.

Una vez se han definido los diferentes departamentos de la planta ETHOXID, se especifican los diferentes cargos que existen en cada departamento:

- **Director/Gerente de planta:** Es la mayor autoridad que se encuentra en la planta y el cual se encarga de realizar algunas de las decisiones más importantes, es decir, es la máxima responsabilidad de la empresa.
- **Directores de los departamentos:** Cada uno es el encargado de supervisar y gestionar dicha sección de la planta. Son el segundo escalón en responsabilidad.
- **Encargados:** Son aquellos trabajadores que deberán responder ante los directores de cada departamento. Son el tercer escalón en cuanto a grado de responsabilidad.
- **Operarios:** Trabajadores que se encargan básicamente de tareas del proceso productivo.
- **Técnicos de mantenimiento y laboratorio:** Técnicos que trabajan en el departamento de calidad, en el laboratorio y realizan tareas de mantenimiento.
- **Contables y administrativos:** Trabajadores del departamento de administración que llevan todo el papeleo de la empresa.
- **Comerciales:** Trabajadores del departamento de marketing y comercial que se dedican a la publicidad y la captación de clientes para la empresa.

Una vez se ha definido cuáles son los diferentes departamentos y los cargos de la planta ETHOXID, se procede a estimar la cantidad de personal necesario para la producción, teniendo en cuenta los turnos de trabajo:

Tabla 1.40. Distribución de los diferentes cargos de la planta ETHOXID.

Cargo	Número de trabajadores
Altos cargos	
Director/Gerente de planta	1
Directores de departamento	9
Encargados de departamento	14
Trabajadores y operarios	
Operarios de almacenamiento	20
Operarios de producción	30
Personal de control de producción	10
Comerciales	1
Técnicos de mantenimiento	5
Personal de calidad	4
Técnicos de laboratorio	8
Personal de limpieza	10
Personal recursos humanos	2
Contables	2
Administración	4

Tal y como se puede observar en la **Tabla 1.40**, se dispone de un total de 120 trabajadores en la planta ETHOXID. Este número es un poco más reducido debido a que la mayoría de los procesos de la planta están automatizados, por lo que existe una reducción de personal.

1.6 Planificación temporal del proyecto constructivo

En este apartado se presenta la planificación de construcción de la planta de ETHOXID, una vez sea aprobado el proyecto presentado. Se presenta un modelo esquemático de la planificación temporal del montaje de la planta de producción de óxido de etileno. Antes de poder realizar la planificación temporal es necesario definir previamente las tareas que se llevan a cabo, la duración de estas y el orden de ejecución. Esta información está reflejada en la **Tabla 1.41** y para que sea comprendida de forma más clara se ha hecho una representación gráfica de las diferentes tareas en forma de un diagrama de Gantt **Figura 1.21**.

Una ventaja que proporciona esta representación es que marca en rojo el camino crítico a seguir para cumplir el objetivo establecido. Es decir, marca las tareas críticas que se tienen que cumplir en tiempo establecido para llegar al final de la construcción en el mínimo tiempo posible. Las tareas que no son críticas, marcadas en azul, se pueden acortar o alargar sin afectar a la fecha de finalización del proyecto. Este diagrama de Gantt ha sido diseñado con el programa libre *OpenProj*. Según el esquema temporal propuesto la duración total de la construcción de la planta ETHOXID se encuentra sobre los 2 años y 2 meses.

Tabla 1.41. Tareas llevadas a cabo en la planta ETHOXID.

Número Tarea	Tarea	Duración (días)	Precedencia
1	Ingeniería de detalle	120	-
2	Obtención licencias de obras y actividades	180	-
3	Pedido de equipos	180	1
4	Limpieza de terrenos	60	2
5	Excavaciones y cimentación	120	4
6	Instalación de suministros	30	5
7	Viales y aceras	30	5
8	Oficinas y laboratorios	150	6
9	Zona social y vestidores	150	6
10	Aparcamiento	30	7
11	Garita de seguridad	5	7
12	Taller de mantenimiento	30	6
13	EDAR	60	6
14	Balsa contra incendios	30	6
15	Área de almacenamiento de reactivos A-100	60	3,7
16	Área de reacción A-200	60	3,7
17	Área de separación Óxido de Etileno A-300	60	3,7
18	Área de purificación Óxido de Etileno A-400	60	3,7
19	Área tratamiento CO ₂ A-500	60	3,7
20	Área almacenamiento Óxido de Etileno A-600	60	3,7
21	Área de servicios A-1000	60	3,7
22	Calibrado de equipos	90	15-21
23	Instalación de soportes, escaleras, plataformas y barandillas	30	15-21
24	Instalación de tuberías del proceso	60	15-20
25	Conexión de tuberías proceso-equipos	30	22,24
26	Instalación de tuberías de servicios	60	21
27	Conexión de tuberías servicios-equipos	30	22,26
28	Instalación de la instrumentación	60	22,24,26
29	Conexión instrumentación-equipos	30	28
30	Instalación sistema eléctrico	60	12
31	Conexión eléctrica a equipos	30	22,3
32	Conexión eléctrica a instrumentación	30	29,3
33	Aislamiento de equipos	30	31
34	Aislamiento de tuberías	30	29
35	Prueba de equipos	30	33,34
36	Pintura	30	35
37	Limpieza	30	36

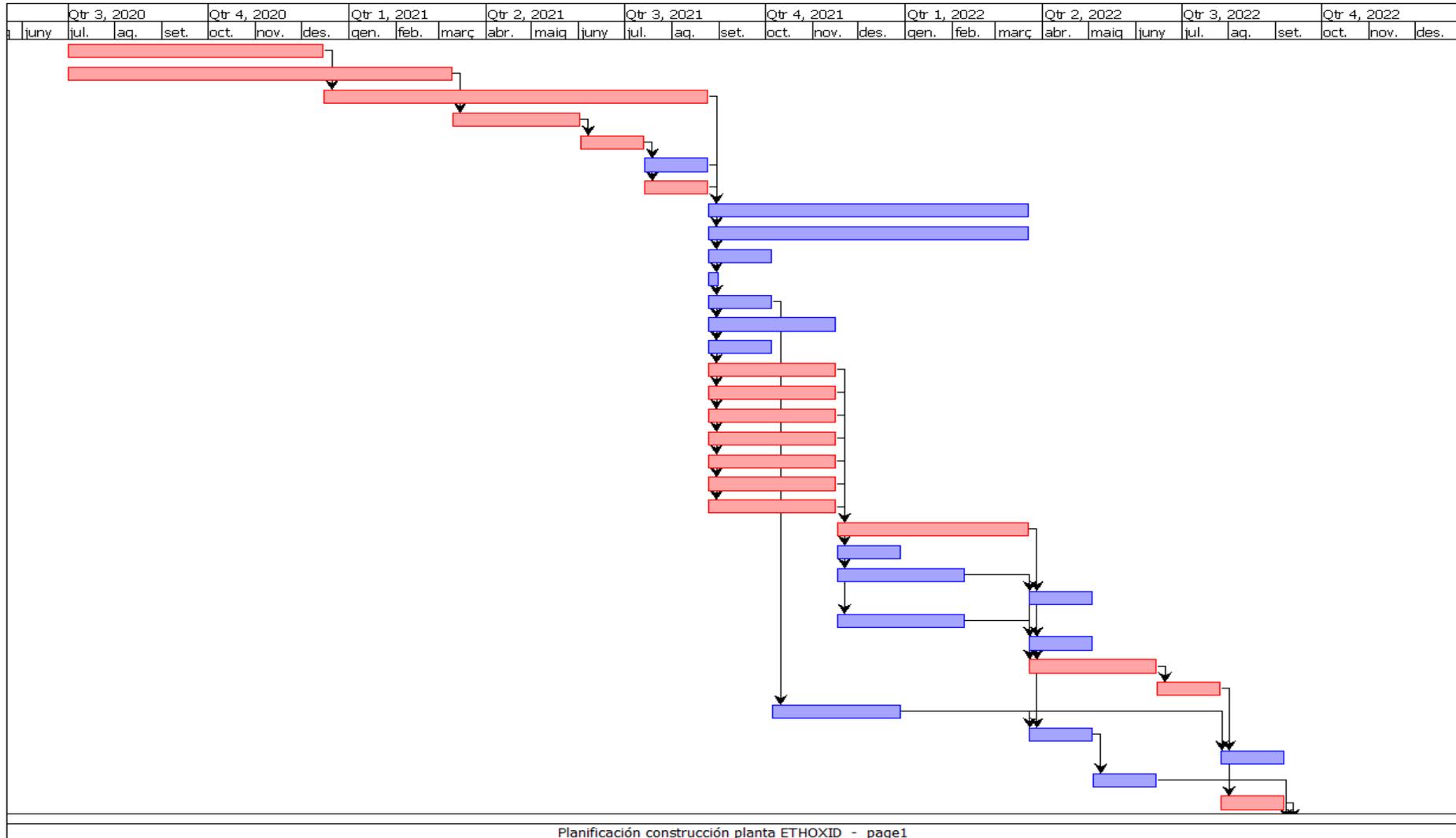


Figura 1.21. Diagrama de Gantt de la planificación de construcción de la planta ETHOXID.

1.7 Bibliografía

- [1] ADIF: Administrador de Infraestructuras Ferroviarias, Camp de tarragona; última consulta: 05/04/2020;
http://www.adif.es/es_ES/infraestructuras/estaciones/4104/informacion_000021.shtml
- [2] Air Liquide, Suministro de nitrógeno a industrias químicas, última consulta: 15/05/2020;
<https://industrial.airliquide.es/gas-nitrogeno>
- [3] Bernard Refrigeración, Refrigeración con Glicol, última consulta: 28/05/2020;
<https://www.josebernad.com/que-es-la-refrigeracion-con-glicol/>
- [4] Cero Grados Celsius, Aspectos técnicos de los Chillers, última consulta: 28/05/2020;
<https://0grados.com.mx/chillers-aspectos-tecnicos/>
- [5] Climate Data ORG, Clima de Tarragona, última consulta: 03/04/2020; <https://es.climate-data.org/europe/espana/cataluna/tarragona-1565/>
- [6] Erdmann E., Ale Ruiz L., Martínez J., Gutiérrez J. P., Tarifa E.; **“ENDULZAMIENTO DE GAS NATURAL CON AMINAS. SIMULACIÓN DEL PROCESO Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARAMÉTRICO”**, última consulta: 20/05/2020;
<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4134741.pdf>
- [7] ICIS: Independent Commodity Intelligence Services, Europe chemical profile: ethylene oxide, última consulta: 03/04/2020;
<https://www.icis.com/explore/resources/news/2013/04/13/9658385/chemical-profile-europe-ethylene-oxide/>
- [8] ICIS: Independent Commodity Intelligence Services, US chemical profile: ethylene oxide, última consulta: 03/04/2020;
<https://www.icis.com/explore/resources/news/2010/08/02/9380662/us-chemical-profile-ethylene-oxide/>
- [9] IDESCAT: Institut d'Estadística de Catalunya, Estudio de población de La Canonja, última consulta: 03/04/2020; <https://www.idescat.cat/>
- [10] Mundo HVACR, Torres de enfriamiento, última consulta: 28/05/2020;
<https://www.mundohvacr.com.mx/2009/03/torres-de-enfriamiento/>
- [11] TLV. Compañía especialista en vapor., Aplicaciones Principales para el Vapor de Agua, última consulta: 06/08/2020; <https://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/principal-applications-for-steam.html>

[12] Weather Spark, El clima promedio de Tarragona, última consulta: 03/04/2020;
<https://es.weatherspark.com/y/45958/Clima-promedio-en-Tarragona-España-durante-todo-el-año>