

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO

Proyecto final

**Producción de óxido de propileno. Estudio de
prefactibilidad.**

Autor 1: Kuzel, Ulises Fabián

Autor 2: Coveperthwaite, Juan Marcos

Autor 3: Noguerol, Ignacio

Título al que se aspira: Ingeniero Químico

Director del proyecto: Ing. Pablo Ramón González

Co-director del proyecto: Ing. Silvana Martínez

San Rafael, 2026

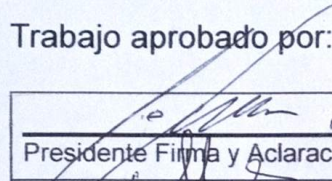
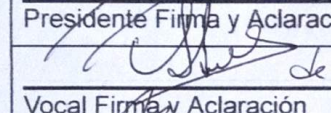
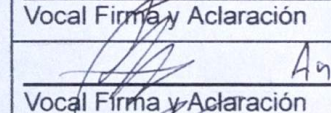
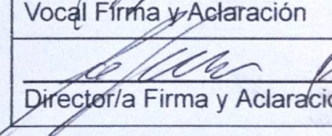
Estudio de prefactibilidad para una planta de óxido de propileno

Autor/a: Ignacio Noguero
Ulises Fabián Kuzel
Juan Marcos Coveperthwaite

Título al que se aspira:
Ingeniería Química

Nota Final: 10 (Diez)

Trabajo aprobado por:

| | |
|--|-------------------------|
|  Presidente Firma y Aclaración | <u>24-4-26</u> Fecha |
|  Vocal Firma y Aclaración | <u>24-4-26</u> Fecha |
|  Vocal Firma y Aclaración | <u>24-4-24</u> Fecha |
|  Director/a Firma y Aclaración | <u>24-4-26</u> Fecha |

Observaciones de corrección: _____

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO
FACULTAD DE CIENCIAS APLICADAS A LA INDUSTRIA**

San Rafael, Mendoza, 2026

AGRADECIMIENTOS

Ulises:

En primer lugar, agradezco a mis padres por su apoyo incondicional a lo largo de toda mi formación, por el esfuerzo realizado y por brindarme siempre las herramientas necesarias para alcanzar este objetivo.

A mis compañeros de estudio, con quienes compartí años de aprendizaje, esfuerzo y crecimiento, haciendo de este camino una experiencia mucho más enriquecedora.

Y especialmente a mi novia, Giuliana, por su apoyo constante, comprensión y acompañamiento en cada etapa de este proceso.

Juan:

A mi familia, por su apoyo incondicional a lo largo de toda mi formación, por brindarme las herramientas y valores necesarios para alcanzar este objetivo, y por acompañarme en cada desafío con paciencia y confianza.

A mis amigos, por el acompañamiento constante, el apoyo en los momentos difíciles y por hacer este camino mucho más llevadero.

A todos los que formaron parte de este proceso, gracias por contribuir de una u otra manera a la realización de este trabajo.

Ignacio:

A mi familia, por ser mi pilar incondicional y creer en mí en todo momento. Gracias por el apoyo y la paciencia durante estos años de esfuerzo; este logro es de todos.

A Martina, mi pareja, por su amor y compañía constante. Gracias por motivarme cada día y por ser mi refugio en los momentos más difíciles de la carrera.

A mis amigos y compañeros de estudio, por las jornadas compartidas, el trabajo en equipo y el apoyo mutuo. Sin ustedes, este camino no hubiera sido el mismo. Gracias a todos por ayudarme a cumplir este sueño.

Ambos:

Agradecemos a la Facultad de Cs. Aplicadas a la Industria que nos formó, y a sus autoridades, profesores y personal no docente que la conforman y hacen de este espacio un ambiente grato.

Damos las gracias a nuestro director, Pablo González, y a nuestra co-directora, Silvana Martínez, por su tiempo, dedicación y acompañamiento a lo largo de este trabajo.

A quienes nos brindaron aportes, ideas y apoyo durante todo el proceso, incluso en los momentos en que el cansancio se hacía presente.

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|--|----|
| CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN | 19 |
| 1.1 Introducción general..... | 19 |
| 1.2 Antecedentes y contexto histórico..... | 20 |
| 1.2.1 El proceso de la clorhidrina (primera generación) | 20 |
| 1.2.2 Procesos de co-oxidación o hidroperóxidos orgánicos (segunda generación) | 21 |
| 1.2.3 Proceso HPPO (tercera generación) | 21 |
| 1.3 Descripción de las materias primas | 22 |
| 1.3.1 Propileno..... | 22 |
| 1.3.2 Metanol..... | 25 |
| 1.3.3 Peróxido de hidrógeno..... | 28 |
| 1.3.4 Silicalita de titanio (TS-1) | 30 |
| 1.4 Descripción del producto final: óxido de propileno..... | 32 |
| 1.4.1 Propiedades físicas | 32 |
| 1.4.2 Propiedades químicas y reactividad | 33 |
| 1.4.3 Aplicaciones industriales..... | 34 |
| CAPÍTULO II: ESTUDIO DE MERCADO..... | 35 |
| 2.1 Introducción | 35 |
| 2.1.1 Principales usos y sectores de consumo | 35 |
| 2.1.2 Objetivo del estudio de mercado | 36 |
| 2.2 Descripción general del mercado | 36 |
| 2.2.1 Mercado nacional | 37 |
| 2.3 Mercado proveedor | 38 |
| 2.3.1 Materias primas | 38 |
| 2.3.2 Principales productores de propileno | 38 |
| 2.3.3 Principales productores de peróxido de hidrógeno..... | 40 |
| 2.3.4 Principales productores de metanol | 41 |
| 2.3.5 Mercado proveedor del catalizador TS-1 | 42 |
| 2.4 Mercado competidor | 43 |
| 2.4.1 Producción nacional | 43 |
| 2.4.2 Importaciones y proveedores internacionales..... | 43 |
| 2.4.3 Competidores indirectos | 44 |
| 2.5 Análisis de la demanda..... | 45 |

| | |
|---|----|
| 2.5.1 Sectores consumidores | 45 |
| 2.5.2 Volumen de consumo por sector | 46 |
| 2.5.3 Factores que afectan la demanda | 47 |
| 2.5.4 Tendencias de consumo..... | 48 |
| 2.6 Conclusiones del estudio de mercado | 48 |
| CAPÍTULO III: LOCALIZACIÓN | 50 |
| 3.1 Introducción | 50 |
| 3.2 Macrolocalización | 50 |
| 3.2.1 Parques industriales por región..... | 52 |
| 3.2.3 Matriz de ponderación | 53 |
| 3.2.4 Conclusión | 54 |
| 3.3 Microlocalización..... | 55 |
| CAPÍTULO IV: TAMAÑO..... | 67 |
| 4.1 Introducción | 67 |
| 4.2 Análisis de factores que afectan el tamaño | 67 |
| 4.2.1 Competencia..... | 67 |
| 4.2.2 Demanda proyectada | 67 |
| 4.2.3 Capacidad de satisfacción de la demanda..... | 70 |
| 4.2.4 Recursos humanos disponibles | 71 |
| 4.2.5 Capacidad de financiamiento..... | 71 |
| 4.2.6 Disponibilidad de materias primas y tecnología..... | 71 |
| 4.3 Determinación del tamaño | 72 |
| 4.3.1 Capacidad óptima de la planta..... | 72 |
| 4.4 Ritmo de trabajo | 72 |
| 4.4.1 Factores que influyen en la producción | 73 |
| 4.4.2 Programa de producción | 73 |
| 4.5 Conclusión..... | 75 |
| CAPÍTULO V: TECNOLOGÍA..... | 76 |
| 5.1 Introducción | 76 |
| 5.2 Selección del proceso de producción | 76 |
| 5.2.1 Opción tecnológica 1 | 76 |
| 5.2.2 Opción tecnológica 2 | 79 |
| 5.2.3 Opción tecnológica 3 | 84 |

| | |
|---|-----|
| 5.2.4 Proceso seleccionado | 86 |
| 5.3 Ingeniería básica..... | 87 |
| 5.3.1 Diagrama de flujo del proceso..... | 87 |
| 5.3.2 Descripción del proceso..... | 93 |
| 5.4 Ingeniería de detalle | 97 |
| 5.4.1 Reactor de epoxidación R-03..... | 97 |
| 5.4.2 Columna de stripping St-8..... | 103 |
| 5.4.3 Intercambiador de calor IC-10..... | 107 |
| 5.4.4 Condensador C-29 | 110 |
| 5.4.5 Columna de destilación D-24 | 112 |
| 5.4.6 Condensador C-26 | 117 |
| 5.4.7 Intercambiador de calor IC-14..... | 120 |
| 5.4.8 Evaporador flash EF-13..... | 122 |
| 5.4.9 Evaporador flash EF-16..... | 126 |
| 5.4.10 Compresores K-23 y K-19..... | 128 |
| 5.4.11 Columna de destilación D-33 | 131 |
| 5.4.12 Reboiler IC-17 | 134 |
| 5.4.13 Condensador C-38 | 136 |
| 5.4.14 Columna de absorción CA-41 | 138 |
| 5.4.15 Columna de destilación D-46 | 143 |
| 5.4.16 Condensador C-5 | 146 |
| 5.4.17 Reboiler IC-68 | 147 |
| 5.4.18 Columna de stripping St-51 | 149 |
| 5.4.19 Columna de destilación extractiva D-55 | 149 |
| 5.4.20 Condensador C-72 | 153 |
| 5.4.21 Reboiler IC-70 | 154 |
| 5.4.22 Reactor de hidrogenación R-59 | 156 |
| 5.4.23 Columna de destilación D-62 | 156 |
| 5.4.24 Condensador C-73 | 159 |
| 5.4.25 Reboiler IC-71 | 160 |
| 5.4.26 Intercambiador iónico Ión-65 | 162 |
| CAPÍTULO VI: INGENIERÍA DE PROCESOS | 164 |
| 6.1 Diseño y distribución de la planta..... | 164 |

| | | |
|---|---|-----|
| 6.1.1 | Introducción..... | 164 |
| 6.1.2 | Áreas características de la planta..... | 164 |
| 6.2 | Diseño y selección de equipos | 170 |
| 6.2.1 | Stripper ST-8 | 170 |
| 6.2.2 | Reactor R-03..... | 170 |
| 6.2.3 | Columna de destilación D-24 | 171 |
| 6.2.4 | Evaporador Flash EF-13 | 171 |
| 6.2.5 | Evaporador Flash EF-16..... | 172 |
| 6.2.6 | Compresores K-19 Y K-23..... | 172 |
| 6.2.7 | Columna de destilación D-33 | 173 |
| 6.2.8 | Columna de destilación D-46 | 173 |
| 6.2.9 | Columna de absorción CA-41 | 174 |
| 6.2.10 | Columna de Stripping D-55..... | 175 |
| 6.2.11 | Columna de destilación D-62 | 175 |
| 6.2.12 | Condensador C-26..... | 175 |
| 6.2.13 | Intercambiador de Calor IC-10..... | 176 |
| 6.2.14 | Condensador C-29 | 176 |
| 6.2.15 | Intercambiador de calor IC-14..... | 177 |
| 6.2.16 | Intercambiador de Calor IC-17 | 177 |
| 6.2.17 | Condensador C-38 | 178 |
| 6.2.18 | Condensador C-50 | 178 |
| 6.2.19 | Intercambiador de Calor IC-68..... | 179 |
| 6.2.20 | Condensador C-72 | 179 |
| 6.2.21 | Intercambiador de Calor IC-70..... | 180 |
| 6.2.22 | Intercambiador de Calor IC-71 | 180 |
| 6.2.23 | Condensador C-73 | 181 |
| 6.2.24 | Intercambiador iónico ion -65 | 181 |
| CAPÍTULO VII: INGENIERÍA DE GESTIÓN | | 183 |
| 7.1 | Introducción | 183 |
| 7.2 | Estructura organizacional..... | 183 |
| 7.2.1 | Principios de organización..... | 184 |
| 7.2.2 | Recursos humanos | 185 |
| 7.3 | Características de la organización..... | 186 |

| | |
|---|-----|
| 7.3.1 Constitución legal | 186 |
| 7.3.2 Razón social..... | 187 |
| 7.4 Organigrama..... | 188 |
| 7.5 Fichas de Función..... | 190 |
| 7.6 Descripción y análisis de cargos | 204 |
| 7.7 Planificación y turnos de trabajo | 206 |
| CAPÍTULO VIII: ASPECTOS AMBIENTALES | 209 |
| 8.1 Introducción | 209 |
| 8.2 Marco legal..... | 209 |
| 8.2.1 Legislación nacional | 209 |
| 8.2.2 Legislación provincial | 210 |
| 8.3 Descripción de los factores ambientales | 212 |
| 8.3.1 Medio físico..... | 212 |
| 8.3.2 Medio biótico..... | 221 |
| 8.3.3 Medio socioeconómico..... | 222 |
| 8.4 Evaluación de Impacto Ambiental | 227 |
| 8.4.1 Problemática ambiental asociada al proyecto..... | 227 |
| 8.4.2 Actividades del proyecto en sus distintas fases | 229 |
| 8.4.3 Metodología para la identificación y valoración de impactos ambientales | 230 |
| 8.4.4 Selección de equipos para el tratamiento de efluentes | 235 |
| 8.4.5 Conclusión | 237 |
| CAPÍTULO IX: ASPECTOS JURÍDICOS | 238 |
| 9.1 Introducción | 238 |
| 9.2 Marco legal..... | 238 |
| 9.2.1 Legislación nacional | 238 |
| 9.2.2 Legislación regional/provincial | 241 |
| 9.2.3 Legislación municipal..... | 243 |
| 9.3 Tramitación ambiental y habilitatoria - Hoja de ruta | 244 |
| 9.4 Marco impositivo | 245 |
| 9.4.1 Impuestos nacionales..... | 245 |
| 9.4.2 Impuestos regionales/provinciales..... | 247 |
| 9.4.3 Impuestos municipales en Ensenada | 248 |
| 9.4.4 Trámites e inscripciones impositivas..... | 249 |

| | |
|---|-----|
| CAPÍTULO X: ASPECTOS NORMATIVOS Y DE CALIDAD | 252 |
| 10.1 Introducción | 252 |
| 10.2 Normas a certificar | 252 |
| 1.2.1 Normas internacionales (ISO) | 252 |
| 10.2.2 Normas nacionales (IRAM)..... | 259 |
| 10.2.3 Normas internacionales | 260 |
| 10.3 Control de calidad | 261 |
| 10.3.1 Parámetros y plan de control | 261 |
| 10.3.2 Registros | 263 |
| 10.3.3 Técnicas de análisis | 266 |
| 10.3.4 Indicadores de calidad | 268 |
| CAPÍTULO XI: HIGIENE Y SEGURIDAD INDUSTRIAL..... | 270 |
| 11.1 Introducción | 270 |
| 11.2 Condiciones generales de trabajo y construcción | 271 |
| 11.2.1 Provisión de agua..... | 272 |
| 11.2.2 Instalaciones sanitarias y vestuarios | 273 |
| 11.2.3 Iluminación y color..... | 274 |
| 11.2.4 Ruidos y vibraciones | 275 |
| 11.2.5 Ventilación..... | 276 |
| 11.2.6 Condiciones térmicas..... | 277 |
| 11.2.7 Condiciones ergonómicas..... | 278 |
| 11.2.8 Certificaciones médicas | 278 |
| 11.3 Seguridad industrial..... | 279 |
| 11.3.1 Responsabilidad de la seguridad..... | 279 |
| 11.3.2. Investigación de incidentes y accidentes | 280 |
| 11.3.3. Indicadores de desempeño (KPIs) de seguridad..... | 280 |
| 11.3.4 Plan de seguridad..... | 281 |
| 11.3.5. Plan de respuesta ante emergencias | 284 |
| 11.3.6. Matriz de elementos de protección personal (EPP)..... | 285 |
| 11.3.7 Protección contra incendios..... | 288 |
| 11.3.4 Instalaciones eléctricas | 289 |
| 11.4 Gestión del riesgo y prevención | 289 |
| 11.4.1 Equipos de Protección Personal (EPP)..... | 289 |

| | |
|--|------------|
| 11.4.2 Señalización..... | 290 |
| 11.4.3 Capacitaciones..... | 292 |
| 11.4.4 Análisis de peligros y puntos críticos..... | 293 |
| CAPÍTULO XII: ANÁLISIS DE RIESGOS..... | 295 |
| 12.1 Introducción..... | 295 |
| 12.2 Identificación de factores de riesgo..... | 295 |
| 12.2.1 Riesgos físicos..... | 295 |
| 12.2.2 Riesgos químicos..... | 297 |
| 12.2.3 Riesgos mecánicos..... | 297 |
| 12.2.6 Riesgos tecnológicos..... | 299 |
| 12.2.7 Riesgos ambientales..... | 300 |
| 12.3 Matriz de riesgos..... | 302 |
| CAPÍTULO XIII: EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO..... | 304 |
| 13.1 Introducción..... | 304 |
| 13.2 Tasa de descuento..... | 304 |
| 13.3 Estructura de costos..... | 306 |
| 13.3.2 Cronograma de inversiones..... | 312 |
| 13.3.6 Costos totales..... | 320 |
| 13.5 Beneficios e ingresos..... | 323 |
| 13.5.1 Precio de venta..... | 323 |
| 13.5.2 Ingresos totales..... | 324 |
| 13.5.3 Contribución marginal..... | 324 |
| 13.5.4 Utilidad anual..... | 324 |
| 13.6 Flujo de caja y rentabilidad..... | 325 |
| 13.6.1 Flujo de caja..... | 325 |
| 13.6.2 Valor Actual Neto (VAN)..... | 327 |
| 13.6.3 Tasa Interna de Retorno (TIR)..... | 327 |
| 13.7 Conclusión..... | 328 |
| CAPÍTULO XIV: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD..... | 329 |
| 14.1 Introducción..... | 329 |
| 14.2 Parámetros a sensibilizar..... | 329 |
| 14.2.1 Sensibilidad del precio de venta..... | 329 |
| 14.2.2 Sensibilidad del costo de materia prima..... | 331 |

| | |
|----------------------|-----|
| 14.3 Conclusión..... | 333 |
| BIBLIOGRAFÍA | 334 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Fig. 1.1 Estructura molecular del OP | 19 |
| Fig. 1.2 Estructura electrónica del OP | 19 |
| Fig. 1.3 Reacciones para producción de OP por método de las clorhidrinas | 20 |
| Fig. 1.4 Producción de OP por peróxidos orgánicos | 21 |
| Fig. 1.5 Estructura del TS-1 | 31 |
| Fig. 2.1 Capacidad global de óxido de propileno por región | 36 |
| Fig. 2.2 Estructura del mercado local de óxido de propileno (2024) | 46 |
| Fig. 3.1 Distribución geográfica de parques industriales. | 53 |
| Fig. 3.2 Principales datos de parques industriales en Argentina, año 2016. | 53 |
| Fig. 3.3 Región probable para ubicación de la planta. | 54 |
| Fig. 3.4 Infraestructura en parques industriales APE..... | 55 |
| Fig. 3.5 Espacios industriales y grandes infraestructuras en Berisso y Ensenada | 56 |
| Fig. 3.6 Principales conexiones viales | 59 |
| Fig. 3.7 Accesos viales locales al Puerto La Plata..... | 60 |
| Fig. 3.8 Localización de los agrupamientos industriales | 61 |
| Fig. 3.9 Lote disponible en Ensenada – Zona Petroquímica. | 65 |
| Fig. 4.1 Consumo aparente de Óxido de Propileno. Periodo 2019-2024 | 68 |
| Fig. 4.2 Consumo aparente de OP corregido. Periodo 2019-2023..... | 69 |
| Fig. 4.3 Proyección Demanda Periodo 2025-2034..... | 70 |
| Fig. 4.4 Programa de producción mensual..... | 75 |
| Fig. 5.1 Diagrama de flujo de proceso por clorhidrina | 77 |
| Fig. 5.2 Reacción de clorhidrinación..... | 77 |
| Fig. 5.3 Reacción de hidrólisis de clorhidrina | 78 |
| Fig. 5.4 Reacción de epoxidación usando $\text{Ca}(\text{OH})_2$ | 78 |
| Fig. 5.5 Proceso por hidroperóxidos orgánicos..... | 80 |
| Fig. 5.6 Per-oxidación del estireno | 80 |
| Fig. 5.7 Epoxidación del propileno | 81 |
| Fig. 5.8 Oxidación del cumeno..... | 82 |
| Fig. 5.9 Reacción de epoxidación de propileno | 82 |
| Fig. 5.10 Deshidratación del CMA..... | 83 |
| Fig. 5.11 Deshidrogenación del CMA..... | 83 |
| Fig. 5.12 Diagrama de flujo del proceso Sumitono..... | 83 |

| | |
|--|-----|
| Fig. 5.13 Diagrama de flujo para HPPO..... | 84 |
| Fig. 5.14 Reacciones en serie de formación de 2-etilantrahidroquinona..... | 85 |
| Fig. 5.15 Reacción química principal para PO..... | 85 |
| Fig. 5.16 Diagrama de flujo del proceso HPPO | 87 |
| Fig. 5.17 Diagrama de flujo del proceso HPPO (purificación) | 88 |
| Fig. 5.18 Diagrama de flujo R-03 en DWSIM..... | 101 |
| Fig. 5.19 Corriente de salida del reactor | 102 |
| Fig. 5.20 Parámetros de diseño del reactor | 102 |
| Fig. 5.21 Tabla maestra de propiedades de entrada y salida..... | 102 |
| Fig. 5.22 Dimensiones del reactor y propiedades del catalizador | 102 |
| Fig 5.23 Diagrama de flujo en DWSIM D-24 | 115 |
| Fig 5.24 Diseño de la columna D-24 por DWSIM..... | 116 |
| Fig. 5.25 Compresor K-19 en DWSIM..... | 131 |
| Fig. 5.26 Compresor K-23 en DWSIM..... | 131 |
| Fig. 5.25 Columna D-33 diseñada en DWSIM..... | 133 |
| Fig. 5.26 Parámetros de cálculo D-33..... | 133 |
| Fig 5.29 Velocidades de carga e inundación en torres de relleno | 142 |
| Fig. 5.30 Diagrama de flujo en DWSIM D-46 | 143 |
| Fig. 5.31 Parámetros de diseño D-46 | 145 |
| Fig. 5.32 St-51 en diagrama de flujo | 149 |
| Fig. 5.33 Diagrama de flujo en DWSIM D-55 | 150 |
| Fig. 5.34 Parámetros de diseño D-55 | 152 |
| Fig. 5.35 Reactor R-59 en diagrama de flujo..... | 156 |
| Fig. 5.36 Diagrama de flujo en DWSIM D-62 | 157 |
| Fig. 5.37 Parámetros de diseño D-62 | 158 |
| Fig. 5.38 Estructura química de la resina Amberlyst 15 | 162 |
| Fig. 6.1 Layout general de la planta | 169 |
| Fig. 7.1 Diferencias entre SA y SRL..... | 186 |
| Fig. 7.2 Logo empresarial..... | 187 |
| Fig. 7.3 Organigrama..... | 190 |
| Fig. 8.1 Tipos y variedades de climas | 214 |
| Fig. 8.2 Ecorregiones climáticas de Argentina..... | 215 |
| Fig. 8.3 Gráfico por meses de precipitación y temperatura..... | 216 |
| Fig. 8.4 Velocidad promedio de los vientos en la zona | 217 |

| | |
|---|-----|
| Fig. 8.5 Tipos de suelo de Argentina y su ubicación | 218 |
| Fig. 8.6 Zonas sísmicas de Argentina..... | 219 |
| Fig. 8.7 Cuenca hidrográfica del Río de la Plata..... | 220 |
| Fig. 8.8 Biomas de la Argentina | 221 |
| Fig. 8.9 Red vial de La Plata..... | 225 |
| Fig. 10.1 Esquema de un cromatógrafo | 267 |
| Fig. 10.2 Titulador Karl Fisher..... | 267 |
| Fig. 10.3 Densímetro digital..... | 268 |
| Fig. 11.1 Triángulo de la jerarquía de control de riesgos..... | 271 |
| Fig. 11.2 Representación esquemática de las duchas de emergencia y lavaojos | 273 |
| Fig. 11.3 Ilustración de los vestuarios e instalaciones sanitarias..... | 274 |
| Fig. 11.4 Certificado de aptitud médica modelo..... | 279 |
| Fig. 11.5 Modelo de permiso de trabajo | 284 |
| Fig. 11.6 Árbol de causas modelo..... | 284 |
| Fig. 11.7 EPP generales para la protección integral del trabajador | 287 |
| Fig. 11.8 Ficha de registro de entrega de EPP | 287 |
| Fig. 11.9 Ejemplos de señalizaciones industriales | 290 |
| Fig. 11.10 Tipos de fuego y extintores | 292 |
| Fig. 13.1 Costos fijos..... | 317 |
| Fig. 13.2 Costos variables..... | 320 |
| Fig. 13.3 Costos totales..... | 321 |
| Fig. 13.4 Punto de equilibrio..... | 323 |
| Fig. 14.1 VAN vs Precio de venta..... | 330 |
| Fig. 14.2 TIR vs Precio de venta..... | 330 |
| Fig. 14.3 VAN vs Precio de propileno | 332 |
| Fig. 14.4 TIR vs Precio de propileno | 333 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla 1.1 Propiedades físicas del propileno..... | 23 |
| Tabla 1.2 Propiedades físicas del metanol..... | 26 |
| Tabla 1.3 Propiedades físicas del peróxido de hidrógeno | 29 |
| Tabla 1.4 Propiedades físicas del OP..... | 33 |
| Tabla 2.1 Evolución del mercado argentino de óxido de propileno..... | 37 |
| Tabla 2.2 Mercado local en 2024 | 38 |
| Tabla 2.3 Evolución de la producción del propileno para el 2020–2024. | 39 |
| Tabla 2.4 Evolución del mercado argentino del Metanol 2015–2024..... | 42 |
| Tabla 3.1 Productores de propileno en Argentina..... | 52 |
| Tabla 3.2 Capacidad de producción del proveedor de peróxido de hidrógeno (Brasil). . | 52 |
| Tabla 3.3 Productores de metanol en Argentina. | 52 |
| Tabla 3.4 Método de puntuaciones ponderadas..... | 54 |
| Tabla 3.5 Movimiento Puerto La Plata..... | 59 |
| Tabla 3.6 Evaluación de los factores objetivos..... | 62 |
| Tabla 3.7 Ponderación de factores subjetivos (W_j)..... | 63 |
| Tabla 3.8 Jerarquización de alternativas (R_{ij})..... | 63 |
| Tabla 4.1 Consumo aparente en argentina de Óxido de Propileno | 68 |
| Tabla 4.2 Consumo aparente corregido en argentina de OP..... | 69 |
| Tabla 4.3 Tiempos de programa de producción | 74 |
| Tabla 4.4 Programa de producción..... | 74 |
| Tabla 5.1 Matriz ponderada de tecnologías disponibles | 86 |
| Tabla 5.2 Resumen de corrientes y equipos principales involucrados..... | 92 |
| Tabla 5.3 Resumen de equipos utilizados y valores de diseño relevantes..... | 97 |
| Tabla 5.4 Flujos de entrada y salida del reactor R-03..... | 98 |
| Tabla 5.5 Resumen de componentes de corrientes 5 y 6 | 104 |
| Tabla 5.6 Configuración de empaques en la columna..... | 105 |
| Tabla 5.7 Resumen de corrientes de St-8..... | 107 |
| Tabla. 5.8 Disposición de tubos en intercambiador de calor | 109 |
| Tabla 5.9 Resumen de corrientes de St-8..... | 110 |
| Tabla 5.10 Propiedades físicas de N_2 y propileno en C-29 | 111 |
| Tabla 5.11 Propiedades físicas de metanol, PO y agua en C-29 | 111 |
| Tabla 5.12 Resumen de corrientes de salida del condensador | 112 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 5.13 Caudal másico por componentes D-24..... | 113 |
| Tabla 5.14 Temperatura de burbuja según componente | 114 |
| Tabla 5.15 Resumen de corrientes de ingreso a D-24 | 115 |
| Tabla 5.16 Tabla maestra de propiedades de salida de D-24..... | 116 |
| Tabla 5.17 Corrientes en D-24 | 117 |
| Tabla 5.18 Tabla maestra de propiedades de DWSIM para C-26..... | 118 |
| Tabla 5.19 Corrientes de salida de C-26..... | 120 |
| Tabla 5.20 Corrientes de IC-14 | 122 |
| Tabla 5.21 Corrientes de entrada de EF-13 | 123 |
| Tabla 5.22 Corrientes de salida de EF-13 | 126 |
| Tabla 5.23 Corrientes de entrada EF-16 | 126 |
| Tabla 5.24 Corrientes de salida EF-16 | 128 |
| Tabla 5.25 Parámetros para los equipos de compresión | 130 |
| Tabla 5.26 Corrientes de entrada D-33 | 131 |
| Tabla 5.27 Corrientes finales de D-33..... | 132 |
| Tabla 5.28 Parámetros finales de diseño D-33 | 134 |
| Tabla 5.29 Corrientes de IC-17 | 136 |
| Tabla 5.30 Corrientes de C-38..... | 138 |
| Tabla 5.31 Corrientes de entrada y salida CA-41 | 139 |
| Tabla 5.32 Tipos de relleno con propiedades físicas | 141 |
| Tabla 5.33 Tabla maestra de propiedades D-46..... | 144 |
| Tabla 5.34 Corrientes de entrada y salida D-46..... | 145 |
| Tabla 5.35 Corrientes de C-50..... | 147 |
| Tabla 5.36 Tabla maestra de propiedades en D-55 | 151 |
| Tabla 5.37 Corrientes finales D-55..... | 152 |
| Tabla 5.38 Tabla maestra de propiedades D-62 | 157 |
| Tabla 5.39 Corrientes en D-62 | 159 |
| Tabla 5.40 Corrientes en C-73..... | 160 |
| Tabla 6.1 Infraestructura de la planta | 168 |
| Tabla 6.2 Datos técnicos Columna Stripper ST-8 | 170 |
| Tabla 6.3 Datos técnicos Reactor R-03 | 171 |
| Tabla 6.4 Datos técnicos Columna de destilación D-24 | 171 |
| Tabla 6.5 Datos técnicos Evaporador Flash EF-13..... | 172 |
| Tabla 6.6 Datos Técnicos Evaporador Flash EF-16 | 172 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 6.7 Datos Técnicos Compresores K-19 y K-23 | 173 |
| Tabla 6.8 Datos Técnicos Columna de destilación D-33 | 173 |
| Tabla 6.9 Datos Técnicos Columna de destilación D-46 | 174 |
| Tabla 6.10 Datos Técnicos Columna de Absorción CA-41..... | 174 |
| Tabla 6.11 Datos Técnicos Columna Stripper D-55..... | 175 |
| Tabla 6.12 Datos Técnicos Columna de destilación D-46..... | 175 |
| Tabla 6.13 Datos Técnicos Condensador C-26 | 176 |
| Tabla 6.14 Datos Técnicos Intercambiador de Calor IC-10 | 176 |
| Tabla 6.15 Datos Técnicos Condensador C-29 | 177 |
| Tabla 6.16 Datos Técnicos Intercambiador de Calor IC-14 | 177 |
| Tabla 6.17 Datos Técnicos Intercambiador de Calor IC-17 | 178 |
| Tabla 6.18 Datos Técnicos Condensador C-38 | 178 |
| Tabla 6.19 Datos Técnicos Condensador C-50 | 179 |
| Tabla 6.20 Datos Técnicos Intercambiador de Calor IC-68 | 179 |
| Tabla 6.21 Datos Técnicos Condensador C-72 | 180 |
| Tabla 6.22 Datos Técnicos Intercambiador de Calor IC-70 | 180 |
| Tabla 6.23 Datos Técnicos Intercambiador de Calor IC-71 | 181 |
| Tabla 6.24 Datos Técnicos Condensador C-73 | 181 |
| Tabla 6.25 Datos técnicos Intercambiador Iónico Ión-65..... | 182 |
| Tabla 7.1 Datos Sociales, Tributarios y Comerciales..... | 188 |
| Tabla 7.1 Ficha de función del Gerente General..... | 191 |
| Tabla 7.2 Ficha de función del Gerente de Producción | 192 |
| Tabla 7.3 Ficha de función del Jefe de Finanzas..... | 192 |
| Tabla 7.4 Ficha de función del Contador..... | 193 |
| Tabla 7.5 Ficha de función del Asesor Legal..... | 194 |
| Tabla 7.6 Ficha de función del Jefe de compras | 195 |
| Tabla 7.7 Ficha de función del Comprador Técnico | 196 |
| Tabla 7.8 Ficha de función del Jefe de Producción..... | 196 |
| Tabla 7.9 Ficha de función del Laboratorista..... | 197 |
| Tabla 7.10 Ficha de función del Jefe de Mantenimiento | 198 |
| Tabla 7.11 Ficha de función del Operador | 198 |
| Tabla 7.12 Ficha de función del Jefe de Ingeniería | 199 |
| Tabla 7.13 Ficha de función del Técnico de Mantenimiento..... | 200 |
| Tabla 7.14 Ficha de función del Técnico de Electricista | 201 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 7.15 Ficha de función del Jefe de SSMA..... | 201 |
| Tabla 7.16 Ficha de función del Técnico de S y H..... | 202 |
| Tabla 7.17 Ficha de función del Técnico de Ambiente | 203 |
| Tabla 7.18 Ficha de función de Limpieza..... | 204 |
| Tabla 7.19 Ficha de función del Seguridad | 204 |
| Tabla 7.20 Categorización de cargos..... | 205 |
| Tabla 7.21 Categorización de Cargos | 207 |
| Tabla 8.1 Registro de temperaturas anual..... | 215 |
| Tabla 8.2 Precipitación media mensual | 216 |
| Tabla 8.3 Factores y subfactores por medio..... | 230 |
| Tabla 8.4 Criterios e indicadores | 232 |
| Tabla 8.5 Matriz de identificación de impactos..... | 233 |
| Tabla 8.6 Matriz de valoración | 234 |
| Tabla 8.7 Medidas de prevención y mitigación | 235 |
| Tabla 9.1. Síntesis del marco regulatorio nacional | 241 |
| Tabla 9.2. Marco regulatorio de la Provincia de Buenos Aires..... | 243 |
| Tabla 9.3 Pagos por ganancias..... | 245 |
| Tabla 9.4 Impuestos por débitos y créditos bancarios..... | 246 |
| Tabla 9.5 Alícuotas por contratos..... | 248 |
| Tabla 9.6. Estimación de costos administrativos y tasas de tramitación | 251 |
| Tabla 10.1 Plan de control de MPs | 262 |
| Tabla 10.2 Plan de control de proceso..... | 263 |
| Tabla 10.3 Plan de control de producto final | 263 |
| Tabla 10.4 Planilla registro de propileno | 264 |
| Tabla 10.5 Planilla registro de PH | 264 |
| Tabla 10.6 Planilla registro de metanol | 265 |
| Tabla 10.7 Planilla registro de TS-1..... | 265 |
| Tabla 10.8 Planilla registro de proceso | 265 |
| Tabla 10.9 Planilla registro de producto final | 266 |
| Tabla 10.10 Indicadores de calidad iniciales | 269 |
| Tabla 11.1 Nivel de LUX según cada tarea/área | 275 |
| Tabla 11.2 Caudal de aire necesario para ventilación por personas | 276 |
| Tabla 11.3 Porcentaje de trabajo según carga térmica | 277 |
| Tabla 11.4 Objetivos de los indicadores proactivos | 281 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 11.5 Matriz de EPP | 282 |
| Tabla 11.6 EPP sugerido por tarea..... | 286 |
| Tabla 11.7 Clasificación de fluido según colores de identificación..... | 291 |
| Tabla 11.8 Cronograma anual básico de capacitaciones | 293 |
| Tabla 12.1 Matriz de riesgos..... | 303 |
| Tabla 13.1 Inversión inicial - Terrenos | 307 |
| Tabla 13.2 Inversión inicial - Edificios e instalaciones..... | 308 |
| Tabla 13.3 Inversión inicial - Equipos y maquinaria..... | 309 |
| Tabla 13.4 Inversión inicial - Rodados | 310 |
| Tabla 13.5 Inversión inicial - Muebles y útiles | 310 |
| Tabla 13.6 Inversión inicial - Costos diferidos | 311 |
| Tabla 13.7 Inversión inicial total | 311 |
| Tabla 13.8 Cronograma de inversiones..... | 313 |
| Tabla. 13.9 Depreciaciones | 315 |
| Tabla 13.10 Amortizaciones | 315 |
| Tabla 13.11 Costos mano de obra..... | 316 |
| Tabla 13.12 Costos fijos de servicios..... | 316 |
| Tabla 13.13 Costos fijos..... | 317 |
| Tabla 13.14 Costos materia prima | 318 |
| Tabla 13.15 Costos de servicios | 318 |
| Tabla 13.16: Costos Servicios..... | 319 |
| Tabla 13.17 Costos variables..... | 319 |
| Tabla 13.18 Costos totales..... | 320 |
| Tabla 13.19 Punto de equilibrio..... | 322 |
| Tabla 13.20: Contribución marginal..... | 324 |
| Tabla 13.21: Utilidad anual | 325 |
| Tabla 13.22 Flujo de caja..... | 326 |
| Tabla 14.1: Sensibilidad-precio de venta..... | 330 |
| Tabla 14.2 Sensibilidad por precio de propileno..... | 332 |

RESUMEN

El presente proyecto final de ingeniería química desarrolla el diseño integral de una planta petroquímica destinada a la producción de óxido de propileno mediante la tecnología HPPO (peróxido de hidrógeno a óxido de propileno) con una capacidad de 23.000 t/año.

El proceso se fundamenta en la epoxidación catalítica de propileno utilizando un lecho fijo de silicalita de titanio (TS-1) y metanol como solvente orgánico polar.

A lo largo del trabajo, se aborda la simulación técnica del proceso, el dimensionamiento de equipos críticos como reactores y columnas de destilación extractiva, y el establecimiento de un sistema de gestión de calidad bajo normas ISO e IRAM.

Asimismo, se analiza el marco regulatorio ambiental y laboral vigente para la radicación industrial en Ensenada, Provincia de Buenos Aires.

El estudio incluye una evaluación económica detallada y una propuesta de indicadores de calidad para asegurar la competitividad del producto final en el mercado de polioles.

De esta manera, el proyecto integra conocimientos técnicos, legales y económicos para proponer una unidad productiva eficiente, segura y sustentable, alineada con los estándares internacionales de la industria petroquímica moderna.

PALABRAS CLAVES: óxido de propileno, tecnología HPPO, silicalita de titanio, diseño de plantas.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción general

El óxido de propileno (PO, por sus siglas en inglés, ó 2-metiloxirano) representa uno de los bloques de construcción fundamentales en la industria química moderna. Se trata de un compuesto orgánico de gran reactividad debido a la tensión de su anillo oxiránico, lo que le permite actuar como intermediario clave en la síntesis de una vasta gama de derivados industriales. A nivel global, el óxido de propileno es esencial para la cadena de valor de los poliuretanos, materiales en la vida cotidiana, desde espumas flexibles para colchones y asientos de automóviles hasta aislantes térmicos rígidos para la construcción y refrigeración. (Nijhuis, 2006)

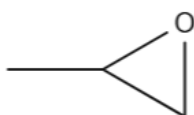


Fig. 1.1 Estructura molecular del OP

Fuente: Elaboración propia

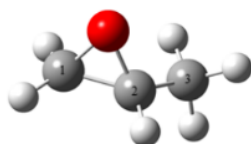


Fig. 1.2 Estructura electrónica del OP

Fuente (Pratama, F. W., Fadhlan, Z., Purnamadjadi, T. A., & Adjie, W. S. , 2025)

En el contexto económico actual, la demanda de óxido de propileno ha mostrado un crecimiento sostenido, impulsado por el desarrollo de economías emergentes y la necesidad de materiales más eficientes energéticamente. Se estima que el mercado global de este compuesto supera los 25 mil millones de dólares anuales, con una tasa de crecimiento compuesta (CAGR) proyectada entre el 4% y el 6% para la próxima década. Sin embargo, la producción de este insumo no está exenta de desafíos técnicos y ambientales. Históricamente, los métodos de obtención han estado asociados a la generación de subproductos de bajo valor comercial o a una carga contaminante significativa, lo que ha impulsado a la ingeniería química hacia la búsqueda de rutas de síntesis más verdes y eficientes.

Para la República Argentina, el óxido de propileno reviste una importancia estratégica particular. Actualmente, el país carece de una producción local que satisfaga la demanda interna, dependiendo casi exclusivamente de las importaciones provenientes de socios comerciales como Brasil. Esta situación de dependencia genera una vulnerabilidad ante las fluctuaciones de precios internacionales y la logística de transporte, además de representar una fuga de divisas.

El presente proyecto integrador tiene como finalidad el diseño y evaluación técnico-económica de una planta de producción de óxido de propileno en Argentina. La propuesta se centra en la adopción de una tecnología de última generación: el proceso de oxidación directa de propileno

con peróxido de hidrógeno (HPPO). Esta elección no es arbitraria; responde a una tendencia mundial hacia la "química verde", minimizando efluentes y subproductos, alineándose así con los estándares ambientales más rigurosos y ofreciendo una solución sostenible para la sustitución de importaciones en el mercado nacional.

1.2 Antecedentes y contexto histórico

La historia de la producción industrial de óxido de propileno es un claro reflejo de la evolución de la ingeniería química hacia procesos más selectivos y limpios. Desde principios del siglo XX, se han desarrollado tres generaciones principales de tecnologías:

1.2.1 El proceso de la clorhidrina (primera generación)

Desarrollado en la década de 1910 y dominante durante gran parte del siglo pasado, este método implica la reacción del propileno con cloro y agua para formar clorhidrina de propileno, que luego es saponificada con una base (usualmente lechada de cal o hidróxido de sodio) para cerrar el anillo epóxido.

El método de las clorhidrinas se realiza en dos etapas, dando lugar a óxido de propileno como único producto de la reacción. En el primer reactor, el propileno reacciona con cloro en presencia de agua, dando lugar a 1-cloropropan-2-ol y 2-cloropropan-1-ol con alta selectividad. En el segundo reactor, se lleva a cabo la deshidrocloración de estos compuestos mediante la adición de hidróxido de calcio para obtener PO, junto con cantidades estequiométricas de cloruro cálcico.

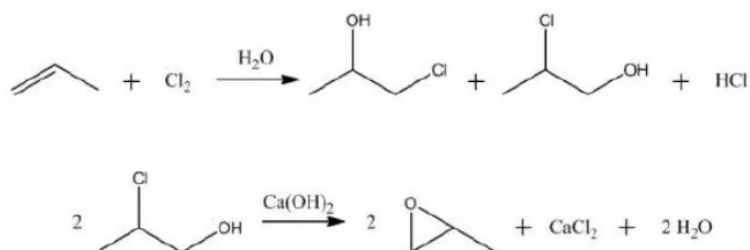


Fig. 1.3 Reacciones para producción de OP por método de las clorhidrinas

Fuente (Jianh Lu, K, 2026)

Aunque tecnológicamente maduro y de menor inversión inicial, este proceso presenta desventajas ambientales críticas. Por cada tonelada de óxido de propileno producido, se generan aproximadamente 40 toneladas de agua residual contaminada y cerca de 2 toneladas de sales inorgánicas (cloruro de calcio o sodio). Estas características han llevado al cierre paulatino de plantas basadas en esta tecnología en regiones con regulaciones ambientales estrictas, aunque aún persiste en ciertos mercados asiáticos.

1.2.2 Procesos de co-oxidación o hidroperóxidos orgánicos (segunda generación)

Este proceso fue desarrollado en la década de 1970 por Halcon Corp. y Atlantic Richfield Oil Corp., por lo que también se conoce como método Halcon. En este método se hace reaccionar un hidroperóxido con propileno para dar lugar a óxido de propileno junto con el alcohol correspondiente. Aunque hay varios peróxidos orgánicos capaces de llevar a cabo esta reacción, en la industria se hace comúnmente con los hidroperóxidos del tert-butilo (TBA-PO) o del etilbenceno (SM-PO), los cuales reaccionan con el propileno en presencia de un catalizador homogéneo de molibdeno (Halcon) o un catalizador heterogéneo de titanio soportado sobre sílica (Shell), obteniéndose óxido de propileno y tert-butil alcohol o 1-feniletanol. El proceso es altamente eficiente, obteniéndose conversiones mayores al 95% (basadas en el hidroperóxido) y selectividades superiores al 95%, siendo acetona el único subproducto obtenido.

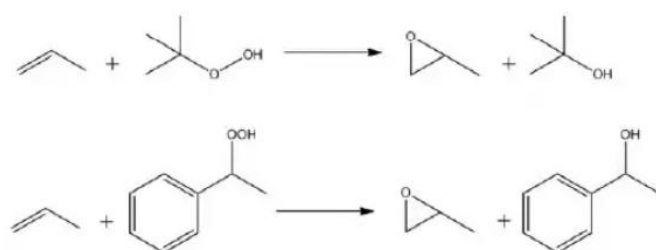


Fig. 1.4 Producción de OP por peróxidos orgánicos

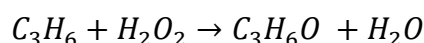
Fuente: (Propileno. D. T., 2017)

Sin embargo, tanto el tert-butil alcohol como el 1-feniletanol tienen una escasa aplicación industrial en la actualidad, por lo que comúnmente se deshidratan catalíticamente para obtener isobutileno o estireno, con una mayor aplicación. Pero, aunque tanto el isobutileno y el estireno son productos con valor industrial, su precio está severamente afectado por la situación del mercado, así como por la legislación medioambiental, por lo que la viabilidad del proceso es muy dependiente del subproducto obtenido.

1.2.3 Proceso HPPO (tercera generación)

A principios de la década de 2000, empresas líderes como BASF, Dow y Solvay comercializaron el proceso HPPO (Hydrogen Peroxide to Propylene Oxide). Este método representa un cambio de paradigma, ya que utiliza peróxido de hidrógeno como agente oxidante en presencia de un catalizador de silicalita de titanio y metanol como solvente.

La reacción global es:



La única sustancia generada además del producto deseado es agua. Este proceso elimina la formación de subproductos comerciales y residuos clorados, simplificando drásticamente las etapas de purificación y reduciendo la huella de carbono y el consumo de agua de la planta.

De esta forma, como alternativa, el óxido de propileno se obtiene mediante el proceso HPPO, en el que se combinan dos reactores catalíticos: uno para la producción del H₂O₂ que actúa como oxidante, y otro para la reacción de epoxidación.

La síntesis del H₂O₂ se lleva a cabo con el método tradicional de la autooxidación de la antrahidroquinona, comúnmente realizada a partir de 2-etilantrahidroquinona. En el proceso HPPO, la síntesis del H₂O₂ se lleva a cabo en un reactor donde la antrahidroquinona se oxida con aire y sin necesidad de catalizador, obteniéndose H₂O₂ y antraquinona, que se reduce catalíticamente en presencia de Pd. La reacción se lleva a cabo en una mezcla de una fase hidrofílica y otra hidrofóbica. Al estar los dos reactores en serie, la fase hidrofílica (metanol y agua) se puede alimentar directamente y sin necesidad de purificaciones al reactor de epoxidación, donde se produce la epoxidación del propileno en presencia de TS-1 como catalizador. Este método es capaz, por tanto, de generar óxido de propileno sin ningún otro subproducto, de forma que la viabilidad del proceso no está condicionada al precio de mercado de otros productos. También, se utiliza un catalizador heterogéneo (TS-1) altamente eficiente, reusable y capaz de llevar a cabo la reacción con selectividades superiores al 95%.

1.3 Descripción de las materias primas

Para garantizar la eficiencia del proceso HPPO y la calidad del producto final, es fundamental cumplir con especificaciones rigurosas de las materias primas principales: propileno, peróxido de hidrógeno y metanol.

1.3.1 Propileno

El propileno, denominado sistemáticamente como propeno por la IUPAC, es un hidrocarburo insaturado perteneciente a la familia de las olefinas o alquenos. Se identifica bajo el número CAS 115-07-1 y responde a la fórmula química C₃H₆, con un peso molecular de 42,08 g/mol. Estructuralmente, se compone de tres átomos de carbono y seis de hidrógeno, caracterizándose por la presencia de un doble enlace carbono-carbono que define su comportamiento químico y su alta reactividad.

Históricamente, el propileno fue la primera materia prima petroquímica empleada a escala industrial, inicialmente destinada a la síntesis de isopropanol mediante hidratación. A diferencia del etileno, el propileno no suele obtenerse intencionalmente como producto principal, sino que se genera mayoritariamente como coproducto en dos procesos clave: el craqueo al vapor (steam cracking) de hidrocarburos para la producción de etileno y el craqueo catalítico fluido (FCC) en las refinerías. En años recientes, debido a la creciente demanda de derivados como el polipropileno y el óxido de propileno, han surgido tecnologías nuevas como la deshidrogenación de propano, que permiten obtener propileno con mayor selectividad.

1.3.1.1 Propiedades físicas

El propileno es el reactivo limitante y su pureza define la eficiencia de la conversión. Debido a su naturaleza gaseosa y altamente inflamable, sus propiedades críticas y límites de explosividad son parámetros de diseño prioritarios.

| Propiedad | Valor/descripción | Unidad |
|---|-------------------------|-------------------|
| Peso molecular | 42,08 | g/mol |
| Número CAS | 115-07-1 | |
| Aspecto | Gas incoloro | |
| Olor | Leve, pétreo | |
| Punto de ebullición normal | -47,7 | °C |
| Punto de fusión | -185,25 | °C |
| Temperatura crítica | 91,8 | °C |
| Presión crítica | 46 | bar |
| Densidad (20°C, 1 atm) | 0,5139 | g/cm ³ |
| Presión de vapor | 10,2 | bar |
| Viscosidad | 0,088 | cP |
| Solubilidad de agua (20°C) | 384 | mg/L |
| Solubilidad en solventes orgánicos | Soluble en etanol, éter | |
| Punto de inflamación | -108 | °C |
| Temperatura de autoignición | 455 | °C |
| Límites de explosividad superior e inferior | 2 - 11,1 | % vol en aire |

Tabla 1.1 Propiedades físicas del propileno

Fuente: (Propileno. H. d., 2022)

1.3.1.2 Propiedades químicas y reactividad

La reactividad del propileno está dominada por su doble enlace carbono-carbono, rico en densidad electrónica. Esta característica lo convierte en un excelente nucleófilo, susceptible a ataques electrofílicos. Las reacciones químicas principales que experimenta se pueden clasificar en tres categorías:

1. Polimerización: es la reacción de mayor relevancia económica. En presencia de catalizadores Ziegler-Natta o metallocenos, el doble enlace se abre para formar largas cadenas de polipropileno isotáctico, un termoplástico versátil.
2. Adición electrofílica: el doble enlace permite la adición de diversas moléculas pequeñas. Ejemplos clásicos incluyen la hidratación para formar isopropanol o la cloración. En el contexto de este proyecto, la adición de un átomo de oxígeno al doble enlace (epoxidación) es la base para la producción de óxido de propileno, aunque esta reacción requiere catalizadores específicos (como la silicalita de titanio en el proceso HPPO) para evitar la combustión completa. (Ullmann, 2012)
3. Sustitución alílica: a diferencia del etileno, el propileno posee un grupo metilo con hidrógenos alílicos. Estos hidrógenos pueden ser sustraídos bajo condiciones oxidativas para formar radicales alilo, precursores en la síntesis de acrilonitrilo y ácido acrílico. (Ullmann, 2012)

Es un material extremadamente inflamable y puede formar mezclas explosivas con el aire en concentraciones que van desde el 2% al 11,1% en volumen. Además, debe evitarse su contacto con oxidantes fuertes fuera de condiciones controladas de reacción. (Propileno. A. L., 2026)

1.3.1.3 Grado de pureza y especificaciones

Para su comercialización y uso industrial, el propileno se clasifica en tres grados de pureza, definidos por la concentración del monómero y la naturaleza de sus impurezas:

- Grado refinería: contiene entre un 50% y un 70% de propileno, siendo el resto principalmente propano. Se utiliza comúnmente como combustible (GLP), en mezclas para potenciar el octanaje de gasolinas o en la síntesis de cumeno y alcohol isopropílico, donde las impurezas no son críticas.
- Grado químico: posee una pureza típica entre el 90% y el 95%. Es adecuado para la producción de derivados como oxo-alcoholes, acrilonitrilo y ácido acrílico.
- Grado polimérico: es el grado requerido para este proyecto (producción de óxido de propileno) y para la fabricación de polipropileno. Su pureza debe ser superior al 99,5%. Lo más crítico en este grado no es solo la concentración de propileno, sino la ausencia casi total de impurezas específicas como compuestos de azufre (COS, H₂S), monóxido de carbono, agua y acetilenos. Estas trazas actúan como venenos irreversibles para los catalizadores de alto rendimiento utilizados en los reactores de epoxidación y polimerización.

1.3.1.4 Aplicaciones industriales

El propileno es el segundo bloque de construcción más importante de la industria petroquímica global, sólo superado por el etileno. Sus aplicaciones son vastas y se ramifican en función de los derivados obtenidos:

- Polipropileno: absorbe cerca del 65-70% de la demanda mundial de propileno. Se utiliza en envases, industria automotriz, textiles y componentes médicos.
- Óxido de propileno (PO): representa aproximadamente el 7-8% del consumo global. Es fundamental para producir polioles de poliéter (para espumas de poliuretano), propilenglicoles y éteres de glicol.
- Acrilonitrilo: precursor de fibras acrílicas y resinas ABS.
- Cumeno: intermediario para la producción simultánea de fenol y acetona.
- Oxo-alcoholes: como el 2-etilhexanol y n-butanol, utilizados en plastificantes y solventes.

1.3.2 Metanol

El metanol, conocido también como alcohol metílico o alcohol de madera, es el miembro más simple de la familia de los alcoholes alifáticos. Su fórmula química es CH_3OH y se identifica con el número CAS 67-56-1. Se trata de un líquido ligero, volátil, incoloro y polar, características que lo convierten en uno de los disolventes y materias primas más versátiles de la industria química global. (Corporation, 2024)

A diferencia de los hidrocarburos derivados directamente del petróleo, la producción de metanol se basa fundamentalmente en la conversión de gas de síntesis (una mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno). Aunque históricamente se obtenía mediante la destilación destructiva de la madera, en la actualidad más del 90% del metanol mundial se produce a partir del gas natural mediante el proceso de reformado con vapor (*steam reforming*). Este proceso implica dos etapas principales: primero, la reacción endotérmica del metano con vapor de agua sobre un catalizador de níquel para generar gas de síntesis, y segundo, la síntesis catalítica de metanol a alta presión y temperatura.

En el contexto del proceso HPPO para la producción de óxido de propileno, el metanol no actúa como reactivo, sino como solvente de proceso. Su función es crítica: debe crear una fase líquida homogénea que permita el contacto íntimo entre el propileno (hidrofóbico) y la solución acuosa de peróxido de hidrógeno (hidrofílica), facilitando así la transferencia de masa y la reacción sobre el catalizador sólido. (Chemical, 2018)

1.3.2.1 Propiedades físicas

El metanol se caracteriza por su miscibilidad completa con el agua y con la mayoría de los disolventes orgánicos (como etanol, benceno y cetonas), lo que lo hace ideal para procesos de separación y extracción. Posee un momento dipolar alto, lo que explica su capacidad para disolver sales inorgánicas y facilitar reacciones polares.

Desde el punto de vista de seguridad y diseño, es un líquido altamente inflamable con una volatilidad intermedia. Su presión de vapor a temperatura ambiente es lo suficientemente alta

como para generar atmósferas explosivas en espacios confinados. A continuación, se detallan sus propiedades físicas clave según estándares internacionales. (Perry, R. H., & Green, D. W.)

| Propiedad | Valor/descripción | Unidad |
|---|--------------------------|-------------------|
| Peso molecular | 32,04 | g/mol |
| Número CAS | 67-56-1 | |
| Aspecto | Líquido volátil incoloro | |
| Olor | Alcohólico | |
| Punto de ebullición normal | 64,7 | °C |
| Punto de fusión | -97,6 | °C |
| Temperatura crítica | 239,4 | °C |
| Presión crítica | 80,9 | bar |
| Calor de vaporización | 1100 | kJ/kg |
| Densidad (15°C, 1 atm) | 0,791 | g/cm ³ |
| Viscosidad | 0,59 | cP |
| Solubilidad en agua | Miscible | |
| Punto de inflamación | 11 | °C |
| Temperatura de autoignición | 464 | °C |
| Límites de explosividad superior e inferior | 6 - 36 | % vol en aire |

Tabla 1.2 Propiedades físicas del metanol

Fuente: Elaboración propia en base a (Corporation, 2024) y P (Perry, R. H., & Green, D. W.)

1.3.2.2 Propiedades químicas y reactividad

Químicamente, el grupo hidroxilo (-OH) domina la reactividad del metanol. Aunque es una molécula estable a temperatura ambiente, puede experimentar diversas transformaciones bajo condiciones catalíticas:

1. Oxidación y deshidrogenación: es la base de su aplicación industrial más grande, la producción de formaldehído mediante oxidación con aire sobre catalizadores de plata o molibdeno
2. Carbonilación: reacciona con monóxido de carbono para producir ácido acético, un insumo clave para la industria de polímeros (proceso Monsanto/Cativa).
3. Formación de éteres: puede deshidratarse para formar dimetil éter (DME) o reaccionar con olefinas para formar éteres como el MTBE (metil terc-butil éter), utilizado como aditivo oxigenante en gasolinas.
4. Toxicidad y corrosividad: el metanol es tóxico para los seres humanos; su ingestión o absorción cutánea puede causar ceguera permanente (por formación de ácido fórmico en el organismo) y la muerte. Además, aunque no es corrosivo para la mayoría de los metales, ataca agresivamente a ciertos plásticos y gomas (como el caucho natural), lo que exige una selección cuidadosa de juntas y sellos en la planta. (Corporation, 2024)

1.3.2.3 Especificaciones químicas y grados de pureza

La pureza del metanol es un parámetro de control estricto en el proceso HPPO. El metanol de grado industrial típico (Grado A o AA) suele tener una pureza mínima del 99.85% en peso. Sin embargo, para la epoxidación de propileno, la presencia de ciertas impurezas puede ser fatal para la economía del proceso. (Technavio, 2025)

- Impurezas críticas: compuestos como aldehídos, cetonas y metales traza pueden catalizar la descomposición improductiva del peróxido de hidrógeno en agua y oxígeno, reduciendo la eficiencia de la planta y generando riesgos de seguridad por acumulación de oxígeno gas.
- Agua: aunque el metanol se mezcla con agua en el reactor, el metanol de alimentación fresca debe ser anhidro (<0.1% agua) para mantener el balance hídrico del sistema bajo control.
- Acidez: debe ser extremadamente baja (máx. 30 mg/kg como ácido acético) para evitar la corrosión de los equipos y la desactivación del catalizador de zeolita TS-1.

1.3.2.4 Aplicaciones industriales

El mercado global del metanol es vasto, superando las 100 millones de toneladas métricas anuales. Sus usos se dividen tradicionalmente en aplicaciones químicas y energéticas:

- Formaldehído (30-35%): principal derivado, usado en resinas para madera, tableros aglomerados y plásticos moldeados.
- Ácido acético (10-15%): precursor del acetato de vinilo (pinturas, adhesivos) y del PET (botellas de plástico).
- MTO/MTP (metanol a olefinas/propileno): una aplicación en rápido crecimiento, especialmente en China, donde el metanol (derivado del carbón) se transforma catalíticamente en etileno y propileno, compitiendo con los crackers de nafta tradicionales.
- Energía y combustibles: incluye su uso directo como combustible marino, mezcla en gasolinas, producción de biodiesel (transesterificación) y como portador de hidrógeno líquido para celdas de combustible.

1.3.3 Peróxido de hidrógeno

El peróxido de hidrógeno (H_2O_2), conocido coloquialmente como agua oxigenada, es un compuesto químico inorgánico que se destaca por ser un agente oxidante versátil y ambientalmente amigable. A escala industrial, se produce casi exclusivamente mediante el proceso de autooxidación de antraquinona (Proceso AO). Este método cíclico implica la hidrogenación catalítica de una antraquinona sustituida (generalmente 2-etilantraquinona) disuelta en una mezcla de solventes orgánicos, seguida de su oxidación con aire para regenerar la quinona y liberar peróxido de hidrógeno, el cual es finalmente extraído con agua y purificado por destilación fraccionada. (Kirk-Othmer, 2007)

En el marco de la producción de óxido de propileno mediante la tecnología HPPO, el peróxido de hidrógeno juega un papel estelar como donante de oxígeno. A diferencia de los oxidantes tradicionales basados en cloro o hidroperóxidos orgánicos, el H_2O_2 posee una "economía atómica" superior: su único subproducto tras la reacción es agua. Esta característica lo posiciona como un pilar de la "Química Verde", eliminando la generación de sales residuales y reduciendo drásticamente la huella ambiental del proceso. (Jones, 1999)

Sin embargo, el manejo de este insumo presenta desafíos ingenieriles significativos. Aunque termodinámicamente es inestable con respecto a su descomposición en agua y oxígeno, es cinéticamente estable en ausencia de catalizadores. La presencia de trazas metálicas (hierro, cobre, manganeso) o superficies rugosas puede desencadenar una descomposición exotérmica acelerada, lo que obliga al uso de materiales pasivados y estabilizantes químicos en su almacenamiento. (Solvay, 2026)

1.3.3.1 Propiedades físicas

El peróxido de hidrógeno puro es un líquido claro, incoloro (o ligeramente azulado en grandes volúmenes) y más viscoso que el agua. Debido a que la concentración industrial varía según la aplicación (35%, 50% o 70%), las propiedades físicas dependen directamente del porcentaje en peso de la solución acuosa. Para el proceso HPPO, se suelen requerir concentraciones altas (típicamente 70% p/p) para minimizar la carga hidráulica en el reactor y facilitar la posterior purificación del producto.

A continuación, se presentan las propiedades físicas para una solución estándar de grado industrial al 70%, fundamental para el diseño de bombas, tuberías y tanques de almacenamiento.

| Propiedad | Valor/descripción | Unidad |
|-------------------------------|--------------------------------|-------------------|
| Peso molecular | 34,01 | g/mol |
| Número CAS | 7722-84-1 | |
| Aspecto | Líquido límpido, incoloro | |
| Olor | Ligeramente acre | |
| Punto de ebullición normal | 108 | °C |
| Punto de fusión | -33 | °C |
| Presión de vapor | 18 | mmHg |
| Calor específico (25 °C) | 2,85 | kJ/(kg.K) |
| Densidad (15°C, 1 atm) | 1,1 | g/cm ³ |
| Viscosidad (20°C) | 1,17 | cP |
| Solubilidad en agua | Miscible en todas proporciones | |
| Temperatura de descomposición | 100 | °C |
| Descomposición exotérmica | - 98 | kJ |

Tabla 1.3 Propiedades físicas del peróxido de hidrógeno

Fuente: Elaboración propia basada en (Comercializadora e Importadora ASERING, 2026)

1.3.3.2 Propiedades químicas y reactividad

La reactividad del peróxido de hidrógeno se puede clasificar en 2 categorías principales, en relación al OP:

1. Descomposición: la reacción $2 \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$ es el principal riesgo de seguridad. Es fuertemente exotérmica. Si ocurre en un recipiente cerrado, la generación rápida de oxígeno gas (el volumen aumenta unas 2500 veces respecto al líquido) puede causar una explosión por sobrepresión. Por ello, los tanques de almacenamiento deben contar con sistemas de venteo de emergencia y diques de contención.

2. Oxidación: es un oxidante poderoso. En el reactor HPPO, bajo la acción del catalizador de silicalita de titanio, transfiere selectivamente un átomo de oxígeno al doble enlace del propileno para formar el anillo epóxido.

1.3.3.3 Aplicaciones industriales

Aunque su uso en la síntesis de óxido de propileno consume una porción creciente de la producción mundial, el mercado del peróxido de hidrógeno es diverso (Grand View Research, 2024):

- Industria de la pulpa y papel: representa el mayor consumo global. Se utiliza para el blanqueo de la pulpa de madera (celulosa) libre de cloro elemental (ECF) o totalmente libre de cloro (TCF).
- Textil: blanqueo de fibras naturales y sintéticas.
- Tratamiento de aguas y medio ambiente: se emplea para la oxidación avanzada de contaminantes orgánicos, reducción de la demanda química de oxígeno (DQO) y control de olores (sulfuros).
- Minería: se utiliza como fuente de oxígeno en procesos de lixiviación para mejorar la recuperación de oro y uranio.
- Electrónica: como agente de limpieza y grabado de alta pureza en la fabricación de semiconductores.

1.3.4 Silicalita de titanio (TS-1)

La silicalita de titanio, denominado TS-1, es un material cristalino microporoso constituido por TiO_2 y SiO_2 . Su estructura se deriva de la Silicalita-1, modificada mediante una sustitución isomorfa de átomos de Si(IV) por Ti(IV). Este material se distingue por sus propiedades excepcionales como catalizador heterogéneo en la oxidación de compuestos orgánicos empleando peróxido de hidrógeno (H_2O_2). Desde el punto de vista industrial, el H_2O_2 es un oxidante altamente atractivo debido a su bajo costo por átomo de oxígeno y a la ausencia de subproductos contaminantes, aunque su uso exige controles rigurosos para evitar descomposiciones no deseadas. La combinación de TS-1 con H_2O_2 ha demostrado altas selectividades en diversos estudios de reacción.

La actividad de los catalizadores a base de titanio para la oxidación de compuestos orgánicos es bien conocida. Wulff et al. en 1971 patentaron para Shell Oil un proceso para la epoxidación selectiva de propileno con hidroperóxidos como el hidroperóxido de etilbenceno (EBH) o hidroperóxido de terc-butilo (TBH) con el uso de un catalizador hecho de TiO_2 depositado sobre SiO_2 de alta área superficial. Una planta de Shell Oil para la producción de 130.000 toneladas/año de óxido de propileno en Moerdijk, Holanda, se basa en esta tecnología.

Las propiedades catalíticas del TS-1 son de gran interés científico y tecnológico: utilizando H_2O_2 es posible realizar la oxidación selectiva de olefinas y diolefinas a epóxidos, la hidroxilación de compuestos aromáticos, la oxidación selectiva de alcoholes primarios a aldehídos y alcoholes secundarios a cetonas, y la amoximación de cetonas. Los sistemas

catalíticos heterogéneos ofrecen ventajas tecnológicas en aplicaciones industriales con respecto a los sistemas homogéneos: separación y recuperación simple del catalizador de la mezcla de reacción, su reciclaje y eventual regeneración una vez desactivado, y una recuperación más fácil de los productos de reacción. (Notari, 1991)

1.3.4.1 Síntesis y variables de TS-1

El estudio de las propiedades catalíticas de cualquier material requiere que el producto se obtenga siempre con la misma composición química, estructura y actividad catalítica, y esto ha sido un problema serio en catálisis. Pero cuando el catalizador debe ser usado en una planta industrial, este problema se vuelve vital. Toda la planta se diseña bajo la suposición de que la reacción deseada tiene lugar con la velocidad y selectividad definidas en el proyecto. Por lo tanto, se ha prestado mucha atención a la síntesis de este nuevo catalizador, teniendo en cuenta todas las variables que podrían influir en el resultado final.

Las variables principales son:

- reactivos utilizados
- pureza, particularmente el efecto de los álcalis
- dimensiones de los cristalitos
- efectos del TiO₂ no estructural (fuera de la red)
- aglomeración de cristalitos

Los reactivos a emplear en la síntesis deben seleccionarse entre un número muy grande de posibles alternativas. Con el uso de tetraetilsilicato (TES) como fuente de SiO₂, tetraetiltitanato (TET) como fuente de TiO₂ e hidróxido de tetrapropilamonio (TPAOH) como base, se pudo obtener un alto grado de confiabilidad, y estos reactivos se han aplicado por tanto también para la producción industrial a pesar de sus precios bastante elevados. Pronto pareció que una de las características clave era la pureza de los reactivos y en particular el efecto de incluso trazas diminutas de álcalis: esto requirió el desarrollo de un proceso para la producción de TPAOH de alta pureza, ya que los productos comerciales disponibles entonces resultaron insatisfactorios.

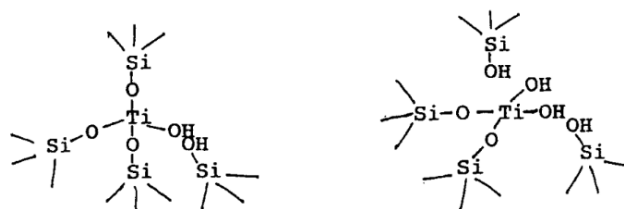


Fig. 1.5 Estructura del TS-1

Fuente: (Notari, 1991)

1.4 Descripción del producto final: óxido de propileno

El producto comercial estándar es una mezcla racémica de dos enantiómeros ópticos, aunque para aplicaciones industriales masivas no se requiere separación quirál. A temperatura y presión ambiente, se presenta como un líquido volátil, incoloro y con un olor etéreo característico, similar al del benceno o el éter dietílico. Su manejo requiere precauciones extremas debido a su naturaleza carcinógena (Clasificación 2B por la IARC) y su extrema inflamabilidad.

1.4.1 Propiedades físicas

El conocimiento preciso de las propiedades físicas del óxido de propileno es vital para el diseño de la etapa de purificación ("Downstream"). Un parámetro crítico es su punto de ebullición (34,2 °C). Al ser tan cercano a la temperatura ambiente en climas cálidos (como el verano en Argentina), el almacenamiento del producto final no puede realizarse en tanques atmosféricos convencionales; requiere esferas presurizadas o tanques refrigerados para evitar pérdidas masivas por evaporación y riesgos de emisión de vapores tóxicos. (Company, Product Safety Assessment: Propylene Oxide, 2026)

Asimismo, su solubilidad en agua (aprox. 40% a 20°C) implica que, en caso de fugas o derrames, el contaminante se dispersará rápidamente en cuerpos de agua, complicando las tareas de contención, a diferencia de los hidrocarburos insolubles que flotan.

| Propiedad | Valor/descripción | Unidad |
|--|----------------------------|-------------------|
| Peso molecular | 58,08 | g/mol |
| Número CAS | 75-56-9 | |
| Aspecto | Líquido claro, incolore | |
| Olor | Etéreo | |
| Punto de ebullición normal | 34 | °C |
| Punto de fusión | -112 | °C |
| Presión de vapor | 440 | mmHg |
| Calor de vaporización (P. eb) | 28,8 | kJ/kg |
| Temperatura crítica | 209,1 | °C |
| Presión crítica | 49,2 | bar |
| Densidad (20°C, 1 atm) | 0,83 | g/cm ³ |
| Punto de inflamación | -37 | °C |
| Temperatura de autoignición | 449 | °C |
| Viscosidad | 0,28 | cP |
| Solubilidad en agua (20 °C) | 400 | g/L |
| Umbral de olor | 10 - 200 | |
| Límite de explosividad superior e inferior | 2,3 - 36 | % vol en aire |

Tabla 1.4 Propiedades físicas del OP

Fuente: Elaboración propia en base a (Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo, 2022)

1.4.2 Propiedades químicas y reactividad

La química del óxido de propileno está dominada por la apertura del anillo oxiránico. Esta reacción es fuertemente exotérmica y puede ser catalizada tanto por ácidos como por bases. Las principales reacciones industriales que definen su valor comercial son:

1. **Hidratación:** La reacción con agua produce monopropilenglicol (MPG), utilizado en industrias farmacéuticas, alimenticias y como anticongelante. Si la reacción continúa con más moléculas de óxido, se forman dipropilenglicol y tripropilenglicol. (Technology, 2010)
2. **Polimerización:** Es la aplicación de mayor volumen. El óxido de propileno reacciona con un iniciador polifuncional (como glicerina o sacarosa) para formar polímeros de cadena larga terminados en hidroxilos (polioles de poliéter). Estos polioles, al reaccionar posteriormente con isocianatos, forman los poliuretanos (espumas rígidas, flexibles, elastómeros). Esta reacción es altamente exotérmica y requiere un control riguroso de temperatura para evitar una polimerización descontrolada. (Science, 2011)
3. **Isomerización:** Bajo ciertas condiciones o en presencia de catalizadores inadecuados, el óxido de propileno puede isomerizarse a propionaldehído, acetona o alcohol alílico. En el proceso HPPO, la isomerización es una reacción secundaria indeseada que reduce el rendimiento y la pureza del producto final.
4. **Incompatibilidades:** Reacciona violentamente con ácidos fuertes, bases cáusticas, aminas, agentes oxidantes fuertes y metales como el cobre y sus aleaciones, los cuales pueden catalizar su descomposición o polimerización explosiva. (Chemicals, 2021)

1.4.3 Aplicaciones industriales

Se utiliza principalmente como producto intermedio para la producción de polioles de poliéteres, glicoles de propileno y éteres de propilenglicol. Polioles de poliéteres en manufactura de espumas de poliuretano flexibles o rígidas. Glicoles de propileno en materias primas para resinas insaturadas de poliéster, humectantes en productos farmacéuticos, cosméticos y alimentos, fluidos de transferencia de calor, anticongelantes y desincrustadores de hielo para aviones. Éteres de propilenglicol en solventes y agentes de acoplamiento en pinturas y en la producción de recubrimientos, tintas, resinas y limpiadores.

En combinación con óxido de etileno, el OP puede copolimerizar en bloque, obteniéndose tensioactivos no iónicos útiles en detergentes y emulgentes. También, se usa para esterilizar una variedad de materiales que van desde instrumentos médicos de plástico hasta productos alimenticios. (Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo, 2022).

CAPÍTULO II: ESTUDIO DE MERCADO

2.1 Introducción

El presente capítulo tiene como objetivo analizar el mercado del óxido de propileno en la República Argentina e internacional, con el fin de evaluar la viabilidad comercial de la instalación de una planta industrial para su producción mediante el proceso de oxidación directa de propileno con peróxido de hidrógeno.

El óxido de propileno es un producto intermedio de elevada importancia dentro de la industria petroquímica, ya que constituye la materia prima principal para la obtención de poliéter polioles, propilenglicol y otros derivados de amplio uso en diversos sectores industriales. Su demanda se encuentra estrechamente ligada al nivel de actividad económica, particularmente a industrias como la construcción, la automotriz, la fabricación de bienes de consumo durables y la industria química.

En el contexto nacional, la producción de óxido de propileno es limitada o inexistente, lo que genera una dependencia significativa de importaciones para abastecer el mercado interno. Esta situación abre una oportunidad para evaluar la factibilidad de producción local, considerando la disponibilidad de materias primas, la infraestructura petroquímica existente y la cercanía a los principales centros de consumo.

2.1.1 Principales usos y sectores de consumo

El óxido de propileno se utiliza casi exclusivamente como insumo para la producción de otros compuestos químicos, siendo escaso su uso directo. A nivel mundial y nacional, los principales destinos del PO son los siguientes:

- Producción de poliéter polioles: representa el principal uso del óxido de propileno, con una participación aproximada del 60–70 % del consumo total. Los poliéter polioles son empleados en la fabricación de poliuretanos, utilizados a su vez en espumas flexibles (colchones, muebles), espumas rígidas (aislación térmica), elastómeros, recubrimientos, adhesivos y selladores.
- Producción de propilenglicol: alrededor del 20–25 % del óxido de propileno se destina a la obtención de propilenglicol, compuesto ampliamente utilizado en la industria química, farmacéutica, alimenticia y cosmética, así como en formulaciones de anticongelantes y fluidos térmicos.
- Éteres de glicol y otros derivados: una fracción menor del PO se emplea en la síntesis de éteres de glicol, utilizados principalmente como solventes industriales, además de surfactantes no iónicos y otros productos químicos especiales.

En Argentina, la demanda de estos derivados se encuentra asociada al desarrollo de sectores como la construcción, la industria automotriz, la fabricación de electrodomésticos, la industria del petróleo y gas, y la industria química en general.

2.1.2 Objetivo del estudio de mercado

El objetivo del presente estudio de mercado es caracterizar la oferta y la demanda de óxido de propileno en el ámbito nacional, identificando los principales sectores consumidores, la estructura del mercado actual y el grado de dependencia del comercio exterior.

Asimismo, el análisis permitirá establecer una base cuantitativa para la estimación de la demanda potencial de óxido de propileno, información que será utilizada posteriormente para definir la capacidad de diseño de la planta propuesta y evaluar su viabilidad técnico-económica.

2.2 Descripción general del mercado

A nivel mundial, el mercado del óxido de propileno se encuentra dominado por grandes complejos petroquímicos integrados, ubicados principalmente en América del Norte, Europa y Asia. En los últimos años, se ha observado una tendencia hacia la adopción de tecnologías de producción más eficientes y ambientalmente amigables, como el proceso HPPO, en reemplazo de tecnologías tradicionales con mayor impacto ambiental.

La figura 3.1 muestra la capacidad global de óxido de propileno por región. Como se puede apreciar en la figura la región Asia-Pacífico representa cerca de la mitad del consumo mundial de óxido de propileno, reflejando la concentración de la industria petroquímica y de derivados de poliéter polioles en ese territorio

Global Propylene Oxide Capacity by Region

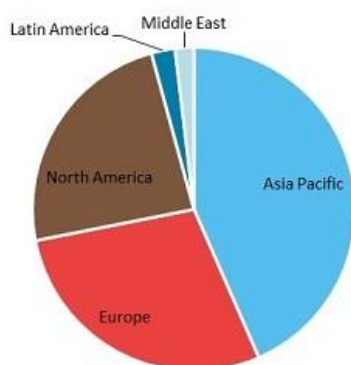


Fig. 2.1 Capacidad global de óxido de propileno por región

Fuente: (Propylene Oxide (PO) Global Market Forecast to 2035, 2025)

El crecimiento de la demanda global de óxido de propileno está impulsado principalmente por el aumento en el consumo de poliuretanos, particularmente en aplicaciones de aislamiento térmica y eficiencia energética, alineadas con políticas de reducción del consumo energético y emisiones de gases de efecto invernadero.

2.2.1 Mercado nacional

En la República Argentina, el óxido de propileno no cuenta con una producción local, por lo que el abastecimiento del mercado interno depende de las importaciones. Esta situación se replica en varios países de la región, donde la escala de producción requerida y la complejidad tecnológica han limitado históricamente el desarrollo de plantas locales.

| ÓXIDO DE PROPILENO | | | | | | |
|---------------------------|----------------|---------------------------------------|-----------------|----------------------|----------------------------------|-------------------|
| NCM: 2910.20.00 | | | | | | |
| AÑO | PRODUCCIÓN (t) | IMPORTACIÓN (t) | EXPORTACIÓN (t) | CONSUMO APARENTE (t) | VALOR COMERCIO EXTERIOR (US\$/t) | |
| | | | | | IMPORTACIÓN (CIF) | EXPORTACIÓN (FOB) |
| 2015 | — | 29.396 | — | 29.396 | 1.630 | — |
| 2016 | — | 21.474 | — | 21.474 | 1.117 | — |
| 2017 | — | 26.896 | — | 26.896 | 1.179 | — |
| 2018 | — | 22.444 | — | 22.444 | 1.446 | — |
| 2019 | — | 19.707 | — | 19.707 | 1.646 | — |
| 2020 | — | 20.319 | — | 20.319 | 1.305 | — |
| 2021 | — | 21.062 | — | 21.062 | 1.496 | — |
| 2022 | — | 18.089 | — | 18.089 | 2.244 | — |
| 2023 | — | 21.732 | — | 21.732 | 2.456 | — |
| 2024 | — | 10.249 | — | 10.249 | 2.200 | — |
| PRODUCTOR | LOCALIZACIÓN | CAPACIDAD INSTALADA (t/a al 31/12/24) | | PROCESO | MATERIAS PRIMAS | |
| No hay | | | | | | |

Tabla 2.1 Evolución del mercado argentino de óxido de propileno

Fuente: (Instituto Petroquímico Argentino (IPA), 2025)

La Tabla 2.1 presenta la evolución del mercado argentino de óxido de propileno para el período 2015–2024, según datos del Instituto Petroquímico Argentino (IPA). En ella se observa que, a lo largo de todo el período analizado, no existe producción nacional de óxido de propileno, por lo que el consumo aparente se abastece exclusivamente mediante importaciones.

Los volúmenes importados muestran una variabilidad interanual, con valores que oscilan entre aproximadamente 18 kt/año y 30 kt/año. Durante los años 2015 a 2017 se registran los mayores niveles de importación, superando las 25 kt/año, mientras que en el período 2019–2021 se observa una reducción asociada a la contracción de la actividad industrial y al contexto económico general. En el año 2024, el consumo aparente se ubica en torno a las 10,2 kt/año, reflejando una caída significativa respecto de los máximos históricos.

Dado que no se registran exportaciones, el consumo aparente coincide con el volumen importado, lo que evidencia una alta dependencia del mercado externo para el abastecimiento de este insumo estratégico para la industria química nacional.

En cuanto al valor del comercio exterior, se observa un incremento sostenido del precio CIF (que incluye el costo, seguro y flete) de importación, particularmente a partir del año 2021, alcanzando valores superiores a los 2200 US\$/t en los últimos años del período analizado. Esta tendencia puede asociarse al aumento de los costos internacionales de materias primas, energía y logística, así como a la concentración de la oferta global de óxido de propileno.

La demanda nacional de óxido de propileno se encuentra asociada al consumo de sus principales derivados, en particular polioles y propilenglicol, utilizados por industrias locales que abastecen tanto al mercado interno como, en algunos casos, al mercado regional.

| ESTRUCTURA DEL MERCADO LOCAL EN 2024 (porcentual) | |
|--|----|
| Polioles | 85 |
| Éteres glicólicos | 8 |
| Base para desemulsificantes y tensioactivos especiales | 7 |

Tabla 2.2 Mercado local en 2024

Fuente: (Instituto Petroquímico Argentino (IPA), 2025)

La estructura del mercado local en 2024 muestra que el principal destino del óxido de propileno es la producción de polioles, que concentra aproximadamente el 85 % del consumo total, seguido por la fabricación de éteres glicólicos (8%) y otros usos, como bases para desmulsificantes y tensioactivos especiales (7%). Esta distribución confirma la fuerte dependencia de la demanda nacional respecto del sector de poliuretanos, estrechamente vinculado a las industrias de la construcción, el mueble y la automotriz.

La existencia de un polo petroquímico desarrollado, la disponibilidad de propileno como subproducto de procesos de refinación y craqueo, y la presencia de empresas productoras de peróxido de hidrógeno en el país constituyen factores favorables para el análisis de una eventual producción local de óxido de propileno.

2.3 Mercado proveedor

El análisis del mercado proveedor resulta fundamental para evaluar la factibilidad del proyecto, ya que permite determinar la disponibilidad y accesibilidad de las materias primas necesarias para el proceso HPPO.

2.3.1 Materias primas

Las principales materias primas requeridas para la producción de óxido de propileno mediante el proceso HPPO son el propileno, peróxido de hidrógeno, metanol y el catalizador.

2.3.2 Principales productores de propileno

El propileno es una olefina básica de la industria petroquímica, obtenida principalmente como subproducto en procesos de refinación de petróleo (FCC) y en plantas de craqueo de naftas y gas natural. Su disponibilidad resulta un factor crítico para la viabilidad del proceso HPPO, dado que constituye la materia prima principal para la producción de óxido de propileno.

De acuerdo con información del Instituto Petroquímico Argentino (IPA) y reportes sectoriales, la producción de propileno en la República Argentina se concentra en polos petroquímicos

integrados, asociados a refinerías y complejos de cracking, donde se dispone de infraestructura adecuada para su separación, almacenamiento y transporte.

El Complejo Petroquímico Bahía Blanca constituye el principal nodo productor de olefinas del país. En este polo operan plantas de cracking que generan corrientes de etileno y propileno a escala industrial, destinadas principalmente a la producción de polipropileno y otros derivados. La capacidad instalada de propileno en este complejo se estima en varios cientos de miles de toneladas anuales, lo que lo posiciona como el principal proveedor potencial para nuevos proyectos petroquímicos en el país.

Por su parte, YPF genera propileno como subproducto en varias de sus refinerías, particularmente en aquellas que cuentan con unidades de craqueo catalítico fluido (FCC). Entre las principales se destacan la Refinería La Plata, la Refinería Luján de Cuyo (Mendoza) y la Refinería Plaza Huincul (Neuquén), donde las corrientes de propileno forman parte de los gases de refinería recuperados y destinados tanto al consumo interno como a su integración con la industria petroquímica. Estas corrientes, si bien están en parte destinadas al consumo interno de las propias instalaciones, representan una fuente relevante de propileno para el mercado nacional, contribuyendo al abastecimiento de la industria petroquímica local. (YPF, 2026)

Adicionalmente, la Refinería Campana, operada por AXION Energy, constituye otra fuente relevante de corrientes de propileno. Esta refinería cuenta con unidades de conversión profunda y recuperación de gases, que generan olefinas livianas como subproductos de los procesos de refinación, contribuyendo al balance global de oferta de propileno en el mercado nacional. No obstante, la existencia de capacidades productivas locales y de polos petroquímicos consolidados constituye un factor favorable para el abastecimiento de propileno requerido por el proceso HPPO. (Axion Energy, 2026)

La Tabla 2.3 presenta la evolución de la producción y destino del propileno en la República Argentina para el período 2020–2024, según datos del Instituto Petroquímico Argentino (IPA). De la información analizada se desprende que el país cuenta con una producción nacional significativa de propileno, la cual ha mostrado una tendencia creciente en los últimos años, alcanzando valores del orden de 430 kt/año en 2024.

| PROPILENO Producción y Destino (t) | | | | | |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 |
| Producción en refinerías | 192.466 | 288.854 | 302.097 | 321.057 | 412.177 |
| Producción en petroquímicas | 13.360 | 36.715 | 44.474 | 42.377 | 17.993 |
| Producción total | 205.826 | 325.569 | 346.571 | 363.434 | 430.170 |
| Importación | 600 | 2.007 | 5.111 | – | – |
| Consumo petroquímico | 198.339 | 288.094 | 301.384 | 328.177 | 281.854 |
| Usos como combustible y otros destinos | 7.487 | 37.475 | 45.187 | 35.257 | 148.316 |

Tabla 2.3 Evolución de la producción del propileno para el 2020–2024.

Fuente: (Instituto Petroquímico Argentino (IPA), 2025)

La mayor parte de esta producción proviene de refinerías de petróleo, donde el propileno se genera principalmente como subproducto de unidades de craqueo catalítico fluido (FCC). En contraste, la producción en plantas petroquímicas representa una fracción menor del total, lo que confirma el rol central del sistema refinador como fuente de abastecimiento de esta olefina.

Las importaciones de propileno resultan marginales en relación con la producción nacional, lo que evidencia que el mercado argentino es prácticamente autosuficiente en este insumo. En cuanto al destino del propileno producido, se observa que el consumo petroquímico absorbe la mayor parte del volumen disponible, destinándose principalmente a la fabricación de polipropileno y otros derivados, mientras que una fracción menor se utiliza como combustible u otros usos.

Estos valores ponen de manifiesto la existencia de una base productiva sólida y diversificada para el abastecimiento de propileno, condición fundamental para la viabilidad del proceso HPPO propuesto, el cual podría integrarse al esquema petroquímico nacional como un nuevo destino de valor agregado para esta materia prima.

2.3.3 Principales productores de peróxido de hidrógeno

El peróxido de hidrógeno constituye una materia prima crítica para el proceso HPPO, por lo que su disponibilidad, concentración comercial, logística y seguridad de suministro resultan determinantes para la viabilidad del proyecto.

Producción nacional

En Argentina, el principal productor de peróxido de hidrógeno es Atanor S.C.A., a través de su planta ubicada en Río Tercero (provincia de Córdoba). La producción nacional se encuentra estandarizada mayoritariamente en soluciones acuosas con concentraciones cercanas al 50 % p/p, formato ampliamente utilizado en industrias como la papelera, textil, alimenticia y minera. (Atanor, 2024)

Sin embargo, la capacidad total de producción nacional resulta limitada frente a los requerimientos del presente proyecto. El volumen anual de peróxido de hidrógeno necesario para el proceso HPPO representa una fracción significativa de la oferta local total, lo que torna inviable considerar al productor nacional como proveedor exclusivo sin afectar el abastecimiento del resto de los sectores industriales del país.

Adicionalmente, el uso de soluciones al 50 % implica un mayor volumen de transporte para una misma cantidad de peróxido de hidrógeno puro, lo que incrementa los costos logísticos y los riesgos asociados al manejo y traslado del producto.

Producción regional e importaciones

A nivel regional, Brasil cuenta con una industria de peróxido de hidrógeno ampliamente desarrollada, con productores de escala internacional como Solvay y Peróxidos do Brasil, que comercializan soluciones con concentraciones del 70 % p/p, habituales para aplicaciones químicas de gran escala.

La importación de peróxido de hidrógeno desde Brasil presenta ventajas significativas frente a la alternativa local, entre las cuales se destacan:

- Mayor disponibilidad de producto para abastecer volúmenes elevados de consumo,
- Reducción del volumen transportado debido a la mayor concentración del producto,

- Menor cantidad de viajes logísticos anuales,
- Mayor seguridad de suministro y continuidad operativa.

Estas características convierten a los productores brasileños en una alternativa robusta y confiable para el abastecimiento del peróxido de hidrógeno requerido por el proyecto.

Estrategia de abastecimiento

En función del análisis realizado, se adopta una estrategia híbrida de abastecimiento. Como proveedor principal, se define la importación de peróxido de hidrógeno al 70 % p/p desde Brasil, mediante contratos de suministro a largo plazo, garantizando el volumen requerido y optimizando la logística asociada.

De manera complementaria, se contempla la posibilidad de recurrir al productor nacional como proveedor secundario para compras puntuales o situaciones de contingencia, limitando su participación a una fracción reducida de la demanda total. Este esquema permite mitigar riesgos logísticos y regulatorios, aprovechando la cercanía geográfica del proveedor local sin comprometer la viabilidad global del proyecto.

A partir del análisis de disponibilidad, concentración comercial, logística y seguridad de suministro, se concluye que el abastecimiento principal de peróxido de hidrógeno para el proceso HPPO debe realizarse mediante importaciones desde Brasil, resultando esta alternativa la más adecuada desde el punto de vista técnico, económico y operativo.

2.3.4 Principales productores de metanol

El metanol constituye un insumo químico de amplia disponibilidad en la República Argentina, con un mercado local desarrollado y respaldado por producción nacional significativa. Según datos del Instituto Petroquímico Argentino (IPA), el país cuenta con dos productores industriales de metanol, ambos basados en el reformado de gas natural mediante el proceso Lurgi.

| METANOL | | | | | | |
|--|---------------------------------|------------------------|--|-----------------------------|---|--------------------------|
| NCM: 2905.11.00 | | | | | | |
| AÑO | PRODUCCIÓN (t) | IMPORTACIÓN (t) | EXPORTACIÓN (t) | CONSUMO APARENTE (t) | VALOR COMERCIO EXTERIOR (US\$/t) | |
| | | | | | IMPORTACIÓN (CIF) | EXPORTACIÓN (FOB) |
| 2015 | 425.043 | 93 | 152.713 | 272.423 | — | 295 |
| 2016 | 389.031 | 31.249 | 7.695 | 412.585 | 294 | 324 |
| 2017 | 350.990 | 74.743 | 5.826 | 419.907 | 338 | 426 |
| 2018 | 472.337 | 9.962 | 99.012 | 383.287 | 444 | 410 |
| 2019 | 456.430 | 14.734 | 116.966 | 354.198 | 385 | 254 |
| 2020 | 223.521 | 88.249 | 56.466 | 255.304 | 282 | 254 |
| 2021 | 376.764 | 5.096 | 97.121 | 284.739 | 555 | 352 |
| 2022 | 422.389 | 15.122 | 20.728 | 416.783 | 447 | 439 |
| 2023 | 392.566 | 92 | 167.573 | 225.085 | — | 290 |
| 2024 | 417.530 | 1.012 | 190.633 | 227.909 | 835 | 313 |
| PRODUCTOR | LOCALIZACIÓN | | CAPACIDAD INSTALADA (t/a al 31/12/24) | PROCESO | MATERIAS PRIMAS | |
| YPF S.A. | P. Huincul (Neuquén) | | 411.000 | Lurgi | Gas Natural | |
| ARAUCO ARGENTINA S.A. División Química | Pto. Gral. San Martín (Sta. Fe) | | 50.000 | Lurgi | Gas Natural | |

Tabla 2.4 Evolución del mercado argentino del Metanol 2015–2024.

Fuente: (Instituto Petroquímico Argentino (IPA), 2025)

El principal productor es YPF S.A., cuya planta ubicada en Plaza Huincul (Neuquén) posee una capacidad instalada del orden de 411 000 t/año, constituyéndose como el actor dominante del mercado nacional. La localización en cercanía a yacimientos de gas natural le otorga ventajas competitivas en términos de disponibilidad de materia prima y costos operativos. (YPF, 2026)

Complementariamente, Arauco Argentina S.A. – División Química, con planta en Puerto General San Martín (Santa Fe), cuenta con una capacidad instalada aproximada de 50 000 t/año, destinada principalmente al abastecimiento de usos industriales específicos. Si bien su participación es menor en términos de volumen, contribuye a diversificar la oferta local.

La producción nacional de metanol ha permitido históricamente cubrir la mayor parte del consumo interno, registrándose además exportaciones significativas en determinados años, lo que evidencia la existencia de excedentes productivos. En este contexto, el abastecimiento de metanol no representa una restricción para el desarrollo del proyecto, constituyendo un insumo ampliamente disponible en el mercado argentino.

2.3.5 Mercado proveedor del catalizador TS-1

El proceso HPPO emplea como catalizador a la zeolita de silicalita de titanio (TS-1), un material microporoso de alta selectividad que permite la epoxidación directa del propileno utilizando peróxido de hidrógeno como agente oxidante. A diferencia de las materias primas analizadas previamente, el catalizador TS-1 no se produce a escala industrial en la República Argentina y su abastecimiento se realiza a través del mercado internacional.

A nivel global, la producción y comercialización del catalizador TS-1 se encuentra concentrada en un número reducido de empresas químicas y tecnológicas, generalmente asociadas a grandes grupos petroquímicos o a proveedores especializados en catalizadores heterogéneos. Entre los principales productores y desarrolladores de este tipo de catalizadores se destacan empresas de alcance internacional como Evonik Industries, BASF, Clariant y Johnson Matthey, las cuales cuentan con amplia experiencia en la síntesis de zeolitas y materiales catalíticos avanzados. (Catalysts, 2025)

El catalizador TS-1 se comercializa usualmente como un producto de alto valor agregado, con especificaciones estrictas en cuanto a contenido de titanio, área superficial, estructura cristalina y estabilidad, dado que estas propiedades determinan la actividad y selectividad del proceso HPPO. Debido a su elevada vida útil y a que no constituye un insumo de consumo masivo, su participación en los costos operativos del proceso resulta acotada en comparación con las materias primas principales.

En el contexto nacional, la ausencia de producción local de TS-1 implica la necesidad de importar el catalizador, lo cual no representa una limitación significativa para el proyecto, dado que se trata de un insumo de bajo volumen relativo, fácilmente transportable y disponible en el

mercado internacional. Asimismo, la práctica habitual en plantas HPPO a nivel mundial es el suministro del catalizador en conjunto con la licencia tecnológica del proceso.

Los principales proveedores del catalizador TS – 1 son:

- ASC MATERIAL Advance Chemicals Supplier, empresa de alta tecnología comprometida con la producción y el desarrollo de nanomateriales avanzados. (ASC MATERIAL Advance Chemicals Supplier, 2024)
- CFS Camlin Fine Sciences, quien ofrece soluciones diversas, innovadoras y de alta calidad que amplían la vida útil en sectores de la industria alimentaria, nutrición animal, productos farmacéuticos y petroquímicos. (CFS Camlin Fine Sciences, 2025)

En cuanto al precio del catalizador TS – 1, los valores hallados en la página web oficial de uno de los proveedores es de USD 575/kg. (ASC MATERIAL Advance Chemicals Supplier, 2024)

2.4 Mercado competidor

2.4.1 Producción nacional

En la República Argentina no existe producción nacional de óxido de propileno a escala industrial. No se registran plantas productoras ni capacidad instalada para la obtención de este intermedio químico, por lo que el mercado interno depende en su totalidad del abastecimiento externo. En consecuencia, no existen competidores directos nacionales, y la oferta disponible en el país se satisface exclusivamente mediante importaciones.

2.4.2 Importaciones y proveedores internacionales

Dado el carácter inexistente de la producción local, las importaciones de óxido de propileno constituyen la principal fuente de abastecimiento del mercado argentino y representan, en la práctica, la competencia directa frente a una eventual producción nacional.

En la tabla 2.1 anteriormente citada, de acuerdo con estadísticas de comercio internacional y reportes de mercado, las importaciones argentinas de óxido de propileno han mostrado una tendencia creciente en los últimos años, alcanzando valores del orden de 20–22 kt anuales, con un valor comercial cercano a USD 50 millones. Estos volúmenes reflejan la totalidad del consumo aparente del país y evidencian la dependencia del mercado local respecto de la oferta internacional.

En cuanto al origen de las importaciones, Brasil se destaca como uno de los principales países proveedores, favorecido por la cercanía geográfica, la integración logística regional y la existencia de una industria petroquímica desarrollada. En 2019, Argentina importó un total de 19.706 toneladas de óxido de propileno, el cual fue adquirido completamente por DOW ARGENTINA y a su vez abastecido en su totalidad por la propia firma DOW BRASIL desde su planta de Candeias (Bahía), Brasil. Considerando que Argentina no produce óxido de propileno, las importaciones de este producto son equivalentes a su consumo aparente. (Company, dow, 2024)

Asimismo, el mercado argentino se abastece en menor manera, de manera directa o indirecta, desde otros polos petroquímicos globales, incluyendo Estados Unidos, países de Europa Occidental (Países Bajos, Alemania) y China, los cuales concentran una parte significativa de la producción mundial de óxido de propileno.

A nivel empresarial, el mercado internacional del óxido de propileno se encuentra dominado por grandes compañías químicas integradas, entre las que se destacan LyondellBasell Industries, The Dow Chemical Company, BASF SE, Shell Chemicals, INEOS Oxide y Huntsman International. Estas empresas operan plantas de gran escala y abastecen distintos mercados mediante exportaciones, constituyendo los principales actores que, de forma directa o indirecta, compiten en el mercado argentino.

La estructura descrita indica que el mercado nacional de óxido de propileno se encuentra expuesto a las condiciones del mercado internacional, incluyendo la volatilidad de precios, costos logísticos y disponibilidad externa. En este contexto, la instalación de una planta productora local permitiría sustituir importaciones, reducir la dependencia del abastecimiento externo y mejorar la integración de la cadena petroquímica nacional.

2.4.3 Competidores indirectos

Además de las importaciones de óxido de propileno, el mercado local se ve influenciado por la presencia de productos sustitutos o competidores indirectos, los cuales pueden reemplazar parcial o totalmente al óxido de propileno en determinadas aplicaciones industriales. Si bien estos productos no sustituyen de manera integral al óxido de propileno, su disponibilidad y precio inciden en la dinámica competitiva del mercado.

Uno de los principales grupos de competidores indirectos lo constituyen los polioles y poliéteres ya elaborados, importados principalmente desde mercados internacionales. En ciertos usos finales, como la fabricación de espumas de poliuretano, la importación directa de estos productos reduce la demanda local de óxido de propileno como insumo intermedio, desplazando el valor agregado fuera del país.

Asimismo, existen otros intermediarios oxigenados, tales como glicoles y derivados etoxilados, que compiten con productos obtenidos a partir del óxido de propileno en aplicaciones específicas, como solventes industriales, tensioactivos y formulaciones químicas. En estos casos, la competencia se da principalmente en términos de precio, disponibilidad y desempeño técnico del producto final.

Por otra parte, la importación de productos terminados o semielaborados, elaborados a partir de óxido de propileno en el exterior, constituye una forma indirecta de competencia, ya que satisface la demanda de los sectores consumidores sin requerir la transformación local del óxido de propileno. Este fenómeno es particularmente relevante en mercados donde el costo logístico y la escala de producción internacional resultan determinantes.

En conjunto, la existencia de competidores indirectos refuerza la importancia de analizar el mercado del óxido de propileno no solo desde la perspectiva del insumo químico en sí, sino también considerando la cadena de valor asociada. En este sentido, la producción local de óxido

de propileno permitiría fortalecer la integración petroquímica nacional, reducir la dependencia de productos importados con mayor grado de elaboración y mejorar la competitividad de la industria química argentina.

2.5 Análisis de la demanda

2.5.1 Sectores consumidores

La demanda de óxido de propileno en la República Argentina se encuentra directamente asociada al desempeño de diversos sectores industriales que lo utilizan como insumo intermedio para la obtención de productos de mayor valor agregado. Dado que no existe producción local del compuesto, el consumo interno se satisface íntegramente a través de importaciones, por lo que el análisis de los sectores consumidores resulta clave para caracterizar la demanda aparente del mercado.

El principal sector consumidor de óxido de propileno es la industria de polioles y poliéteres, los cuales constituyen la base para la fabricación de espumas de poliuretano. Estas espumas poseen aplicaciones extendidas en los rubros de la construcción, la industria del mueble, el aislamiento térmico y acústico, la refrigeración, la automotriz y la fabricación de colchones. Este sector concentra la mayor parte del consumo nacional, reflejando el carácter estratégico del óxido de propileno dentro de la cadena petroquímica.

En segundo lugar, se destacan los éteres glicólicos, dentro de los cuales el propilenglicol constituye el principal derivado obtenido a partir del óxido de propileno. Estos compuestos se utilizan fundamentalmente como solventes industriales y fluidos funcionales en formulaciones de pinturas, recubrimientos, tintas, productos de limpieza, anticongelantes y aplicaciones especiales en las industrias alimenticia, farmacéutica y cosmética. La demanda de este segmento se encuentra estrechamente vinculada a la actividad manufacturera y al nivel general de producción industrial.

El tercer sector relevante corresponde a la utilización del óxido de propileno como base para la formulación de desmulsificantes y tensioactivos especiales, empleados principalmente en la industria petrolera, el tratamiento de aguas, procesos de separación, formulaciones químicas específicas y aplicaciones industriales de alta especialización. Si bien este segmento presenta una participación menor en términos de volumen respecto a los polioles, se caracteriza por un mayor valor agregado y requerimientos técnicos particulares.

En conjunto, los sectores consumidores del óxido de propileno evidencian una demanda diversificada pero claramente concentrada en tres segmentos principales; polioles, éteres glicólicos (propilenglicol) y bases para desmulsificantes y tensioactivos especiales, lo cual permite anticipar que la evolución del consumo interno se encontrará principalmente condicionada por el comportamiento de la industria de la construcción, la actividad manufacturera y los sectores industriales de base.

En conjunto, los sectores consumidores del óxido de propileno evidencian una demanda diversificada pero fuertemente concentrada en la producción de polioles, lo cual permite anticipar que la evolución del consumo interno se encontrará principalmente condicionada por

el comportamiento de los sectores de la construcción, la industria manufacturera y la producción de bienes durables.

2.5.2 Volumen de consumo por sector

El volumen de consumo de óxido de propileno en el mercado argentino se analiza a partir del consumo aparente, el cual, dada la inexistencia de producción nacional, se corresponde directamente con los volúmenes importados, tal como se presentó en el análisis del mercado nacional.

Con el objetivo de estimar la distribución sectorial de la demanda, se adopta como referencia la estructura del mercado local reportada por el Instituto Petroquímico Argentino (IPA), que clasifica el consumo de óxido de propileno en tres grandes segmentos principales. Dicha estructura refleja de manera representativa el destino del producto dentro del entramado industrial argentino.

De acuerdo con esta clasificación y como se observa en la figura 2.2, el sector de polioles y poliéteres concentra aproximadamente el 85 % del consumo total de óxido de propileno. Este elevado porcentaje se encuentra asociado al rol dominante de las espumas de poliuretano en aplicaciones vinculadas a la construcción, el mobiliario, la refrigeración, la automotriz y el aislamiento térmico, constituyendo el principal destino del óxido de propileno a nivel nacional.

Estructura del mercado local de óxido de propileno (2024)

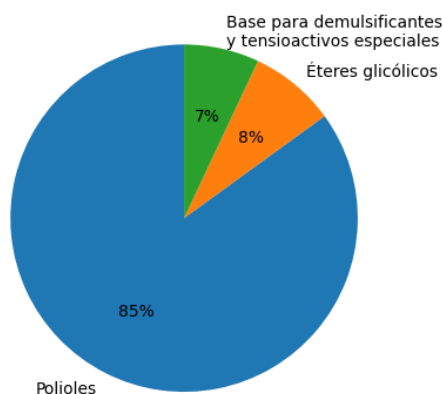


Fig. 2.2 Estructura del mercado local de óxido de propileno (2024)

Fuente: Elaboración propia

El segmento de éteres glicólicos, incluyendo al propilenglicol como principal derivado, representa alrededor del 8 % del consumo aparente. Este sector abastece aplicaciones como solventes industriales, anticongelantes, formulaciones químicas especiales y productos de las industrias alimenticia, farmacéutica y cosmética, presentando una demanda más diversificada y de menor volumen relativo.

Finalmente, el uso del óxido de propileno como base para la formulación de desmulsificantes y tensioactivos especiales concentra aproximadamente el 7 % del consumo total. Si bien este segmento posee una participación menor en términos de volumen, se caracteriza por un mayor

valor agregado y por requerimientos técnicos específicos, especialmente asociados a la industria petrolera, el tratamiento de aguas y aplicaciones industriales especializadas.

En conjunto, la distribución del consumo por sector pone de manifiesto una demanda fuertemente concentrada en la producción de polioles, acompañada por segmentos de menor volumen pero estratégicamente relevantes. Esta estructura resulta consistente con la observada en mercados internacionales y permite contar con una base sólida para la estimación de la demanda futura y el dimensionamiento preliminar de una planta de producción de óxido de propileno en el país.

2.5.3 Factores que afectan la demanda

La demanda de óxido de propileno en el mercado argentino se encuentra influenciada por un conjunto de factores económicos, industriales y estructurales, los cuales determinan tanto su nivel de consumo como su evolución en el tiempo. Dado el carácter de insumo intermedio del producto, su demanda se encuentra estrechamente vinculada al desempeño de los sectores industriales consumidores.

Uno de los factores más relevantes es el nivel de actividad de la industria de la construcción y de bienes durables, dado que el principal destino del óxido de propileno es la producción de polioles para espumas de poliuretano. La evolución de la obra pública, la construcción privada, la fabricación de mobiliario, electrodomésticos y componentes automotrices incide directamente sobre el consumo de este insumo.

Asimismo, el nivel general de actividad industrial constituye un determinante clave de la demanda, particularmente en los segmentos de éteres glicólicos, propilenglicol y tensioactivos especiales. Sectores como pinturas, recubrimientos, productos de limpieza, química fina y procesos industriales específicos presentan una relación directa entre su nivel de producción y el consumo de derivados del óxido de propileno.

Otro factor relevante corresponde al precio internacional del óxido de propileno y de sus materias primas, principalmente el propileno y el peróxido de hidrógeno. Las variaciones en los precios internacionales, así como los costos logísticos asociados a la importación, influyen sobre el costo de los productos derivados y pueden afectar la competitividad frente a sustitutos importados o productos terminados.

La disponibilidad de productos sustitutos y la importación de derivados elaborados constituye otro elemento que incide sobre la demanda local de óxido de propileno. La importación directa de polioles, glicoles u otros productos intermedios reduce el consumo interno del óxido de propileno como materia prima, desplazando etapas de transformación fuera del país.

Finalmente, factores de carácter estructural, tales como el grado de integración de la industria petroquímica nacional, las condiciones macroeconómicas, la disponibilidad de financiamiento y el marco regulatorio, influyen indirectamente en la demanda del producto. En este contexto, el desarrollo de producción local de óxido de propileno permitiría mitigar la exposición a estos factores externos y contribuir a una mayor estabilidad en el abastecimiento del mercado interno.

2.5.4 Tendencias de consumo

La evolución futura del consumo de óxido de propileno en la República Argentina se encuentra estrechamente vinculada a las tendencias de los sectores industriales que lo utilizan como insumo intermedio, más que a dinámicas propias del producto en forma aislada. En este sentido, el comportamiento esperado de la demanda puede caracterizarse como de crecimiento moderado y cíclico, en concordancia con la evolución de la actividad económica e industrial del país.

El principal impulsor de la demanda continuará siendo el sector de polioles y poliuretanos, asociado a la construcción, la fabricación de bienes durables y el desarrollo de materiales de aislamiento térmico y acústico. La creciente necesidad de eficiencia energética en edificaciones, junto con el uso extendido de materiales livianos y de alto desempeño, constituye un factor que tiende a sostener el consumo de espumas de poliuretano y, por ende, del óxido de propileno.

En los segmentos de éteres glicólicos y propilenglicol, la tendencia del consumo se encuentra asociada a la evolución de la industria manufacturera y de sectores como pinturas, recubrimientos, productos de limpieza y formulaciones especiales. Estos mercados presentan un comportamiento relativamente estable, con variaciones acompañando el nivel general de producción industrial.

Por su parte, el consumo de óxido de propileno destinado a la formulación de desmulsificantes y tensioactivos especiales se vincula al desempeño de sectores industriales específicos, como la industria petrolera y el tratamiento de aguas, los cuales muestran una demanda sostenida en el tiempo, aunque con menor participación relativa en términos de volumen.

Adicionalmente, desde el punto de vista tecnológico y ambiental, se observa una tendencia creciente hacia la adopción de procesos de producción más eficientes y ambientalmente favorables, lo cual favorece la implementación de tecnologías como el proceso HPPO. Este aspecto no necesariamente implica un aumento significativo del consumo total, pero sí refuerza la conveniencia de contar con producción local de óxido de propileno, orientada a mejorar la competitividad, reducir la dependencia de importaciones y fortalecer la integración de la cadena petroquímica nacional.

2.6 Conclusiones del estudio de mercado

Del análisis desarrollado en el presente capítulo se desprende que el mercado argentino de óxido de propileno se caracteriza por una dependencia total del abastecimiento externo, dado que no existe producción nacional a escala industrial. En consecuencia, el consumo interno se satisface íntegramente mediante importaciones, lo cual expone al mercado local a la volatilidad de precios internacionales, costos logísticos y disponibilidad externa del producto.

El estudio del mercado proveedor permitió identificar que las materias primas clave para la producción de óxido de propileno, particularmente el propileno y el peróxido de hidrógeno, se encuentran disponibles para el desarrollo del proyecto mediante una combinación de producción nacional e importaciones regionales consolidadas. En el caso del propileno, la oferta local proveniente del complejo petroquímico nacional resulta suficiente para abastecer los requerimientos del proceso.

Por su parte, el peróxido de hidrógeno presenta una disponibilidad nacional limitada en relación con los volúmenes requeridos, motivo por el cual se define una estrategia de abastecimiento basada principalmente en la importación desde Brasil, complementada con proveedores locales para situaciones de contingencia. Asimismo, los insumos específicos del proceso, como el catalizador TS-1, deben ser obtenidos a partir de proveedores internacionales especializados.

En conjunto, estas condiciones evidencian la factibilidad técnica y operativa del abastecimiento de insumos necesarios para una eventual planta productora de óxido de propileno, sin que la disponibilidad de materias primas represente una limitación para la viabilidad del proyecto.

En cuanto al mercado competidor, se determinó que la competencia directa en Argentina se encuentra constituida exclusivamente por proveedores internacionales, principalmente grandes empresas petroquímicas con plantas de gran escala. Asimismo, se identificaron competidores indirectos asociados a la importación de productos derivados y sustitutos, los cuales reducen el valor agregado local pero no eliminan la necesidad del óxido de propileno como insumo estratégico.

El análisis de la demanda mostró que el consumo de óxido de propileno en el país se encuentra fuertemente concentrado en la producción de polioles y poliuretanos, seguido por los segmentos de éteres glicólicos (propilenglicol) y bases para desmulsificantes y tensioactivos especiales. Esta estructura es consistente con la observada a nivel internacional y refleja una demanda industrial diversificada, aunque dominada por aplicaciones vinculadas a la construcción y a la industria manufacturera.

Asimismo, se identificaron los principales factores que condicionan la demanda, entre los que se destacan el nivel de actividad industrial, el desempeño del sector de la construcción, los precios internacionales del producto y de sus materias primas, y la disponibilidad de productos sustitutos importados. En este contexto, la demanda presenta un comportamiento cíclico, asociado a la evolución macroeconómica, pero con una base estructural sostenida.

Finalmente, el análisis de las tendencias de consumo indica que, si bien no se esperan crecimientos abruptos del mercado, existe una demanda estable y estratégicamente relevante de óxido de propileno en Argentina. En conjunto, los resultados del estudio de mercado respaldan la conveniencia de evaluar la instalación de una planta de producción local de óxido de propileno, orientada a la sustitución de importaciones, la mejora de la competitividad de la industria petroquímica nacional y el fortalecimiento de la integración de la cadena de valor.

CAPÍTULO III: LOCALIZACIÓN

3.1 Introducción

El presente capítulo tiene como objetivo analizar de manera exhaustiva los principales factores que influyen en la localización de una planta industrial. La correcta selección del sitio de emplazamiento resulta un aspecto clave para la viabilidad técnica y económica del proyecto, por lo que deben considerarse diversos factores relevantes.

Con el fin de reducir el número de alternativas posibles y facilitar la toma de decisiones, se realiza en primera instancia un análisis de macrolocalización, orientado a seleccionar la región más conveniente. Posteriormente, mediante un análisis de microlocalización y la aplicación de un método de puntuaciones ponderadas, se comparan distintas alternativas específicas, permitiendo identificar las zonas más favorables para el emplazamiento definitivo de la planta.

3.2 Macrolocalización

El análisis de macrolocalización tiene por objetivo determinar la región geográfica más conveniente para la instalación de la planta productora de óxido de propileno, considerando factores técnicos, logísticos, económicos y de abastecimiento de materias primas. En esta etapa se analizan alternativas a escala regional, sin profundizar aún en la selección del sitio específico.

Dado que el proceso considerado corresponde a la tecnología HPPO, la disponibilidad y logística de las materias primas críticas principalmente propileno y peróxido de hidrógeno adquieren un peso determinante en la toma de decisiones. En función de ello, se evaluaron como alternativas viables las regiones de Ensenada (provincia de Buenos Aires) y San Lorenzo (Provincia de Santa Fe), aplicando el método de puntuaciones ponderadas para realizar una comparación objetiva entre ambas.

Factores considerados y método de evaluación

Para la evaluación de las alternativas se empleó el método de puntuaciones ponderadas, asignando a cada factor un peso relativo de acuerdo con su importancia en el proceso productivo y una calificación entre 1 y 5 para cada alternativa (1: muy desfavorable; 5: muy favorable).

Los factores considerados fueron los siguientes:

- Proximidad a la fuente de propileno
- Logística de importación de peróxido de hidrógeno
- Proximidad al mercado consumidor
- Infraestructura industrial y portuaria
- Disponibilidad de parques industriales y servicios

El factor de proximidad a la fuente de propileno recibió la mayor ponderación, dado que se trata de un insumo gaseoso, de difícil transporte y con elevados costos logísticos, lo que hace indispensable minimizar distancias y riesgos operativos.

Análisis comparativo de alternativas

La región de Ensenada presenta una ventaja significativa en cuanto a la disponibilidad de propileno, ya que en dicha zona se encuentra la Refinería YPF La Plata, la cual posee una capacidad de producción del orden de 120.000 t/año de propileno. Esta capacidad resulta ampliamente suficiente para abastecer el requerimiento del proyecto y permite reducir de manera sustancial los costos de transporte, así como los riesgos asociados al manejo de gases presurizados. Por este motivo, Ensenada recibe la calificación máxima en este criterio.

En contraste, si bien la provincia de Santa Fe se encuentra relativamente cercana a polos petroquímicos relevantes, no posee una fuente directa de producción de propileno en su territorio inmediato, lo que implica una logística más compleja y mayores distancias de transporte, motivo por el cual se le asigna una puntuación intermedia en este factor.

En cuanto al peróxido de hidrógeno, la producción nacional se limita a concentraciones del 50 %, mientras que el proceso HPPO requiere peróxido al 70 %. En consecuencia, se prevé la importación desde la planta de Peróxidos do Brasil Ltda., ubicada en Curitiba, la cual ha incrementado su capacidad productiva hasta 230.000 t/año de peróxido de hidrógeno, garantizando un suministro estable y confiable. En este aspecto, Ensenada presenta una ventaja logística debido a su acceso directo a infraestructura portuaria de gran escala, lo que facilita la importación del insumo. Santa Fe, si bien cuenta con puertos fluviales, presenta una logística relativamente menos favorable para este tipo de importaciones.

Respecto a la proximidad al mercado consumidor, la provincia de Santa Fe resulta más favorable debido a su cercanía a los principales consumidores nacionales de óxido de propileno, particularmente en el cordón industrial del Gran Rosario y Puerto General San Martín. En este criterio, Santa Fe recibe una mayor calificación que Ensenada. No obstante, este factor posee una ponderación menor, dado que el producto final es considerablemente más sencillo de transportar que el propileno.

En relación con la infraestructura industrial y portuaria, Ensenada se destaca por su elevado nivel de desarrollo industrial, la presencia de complejos petroquímicos integrados y la disponibilidad de puertos marítimos de aguas profundas, lo que constituye una ventaja operativa significativa. Ambas regiones cuentan con parques industriales y servicios adecuados, aunque Ensenada presenta una ligera ventaja en términos de integración logística.

Finalmente, el abastecimiento de metanol, utilizado como solvente en el proceso y reciclado en gran parte, se encuentra garantizado a nivel nacional. En particular, la producción de YPF Neuquén, con una capacidad aproximada de 411.000 t/año de metanol, asegura la disponibilidad de este insumo para ambas alternativas, sin constituir un factor limitante en la decisión.

En las tablas 3.1, 3.2 y 3.3; pueden observarse las plantas de producción de las materias primas en Argentina, su capacidad de producción y respectiva ubicación.

| Productor | Ubicación | Producción Tn/año |
|--------------------------|------------------|-------------------|
| YPF S.A. | La Plata | 120.000 |
| Pan American Energy | Bs.As. - Mendoza | 36.533 |
| Trafigura Argentina S.A. | Bs.As. | 10.0157 |

Tabla 3.1 Productores de propileno en Argentina

Fuente: (Secretaría de Energía, 2026)

| Productor | Ubicación | Producción Tn/año |
|-------------------------------|------------------|-------------------|
| Planta da Peróxidos do Brasil | Curitiba, Brasil | 230.000 |

Tabla 3.2 Capacidad de producción del proveedor de peróxido de hidrógeno (Brasil).

Fuente (Solvay, 2025)

| Productor | Ubicación | Producción |
|-----------------------|-----------|------------|
| YPF S.A | Neuquén | 411 |
| Arauco Argentina S.A. | Santa Fe | 50 |

Tabla 3.3 Productores de metanol en Argentina.

Fuente: (Instituto Petroquímico Argentino (IPA), 2025)

3.2.1 Parques industriales por región

La disponibilidad de terrenos, infraestructura y servicios constituye otro de los criterios relevantes a considerar en la localización de una planta industrial. En este sentido, los parques industriales se definen como predios especialmente diseñados para la radicación de establecimientos manufactureros y de servicios, que cuentan con la infraestructura, el equipamiento y los servicios necesarios para el desarrollo eficiente de dichas actividades (Dirección de Desarrollo Regional – Subsecretaría de Industria, 2020).

La Figura 3.1 presenta la distribución geográfica de los parques industriales en la región comprendida por las provincias de Córdoba, Santa Fe, Buenos Aires y Entre Ríos, evidenciando la elevada concentración de este tipo de infraestructura en la zona centro del país.

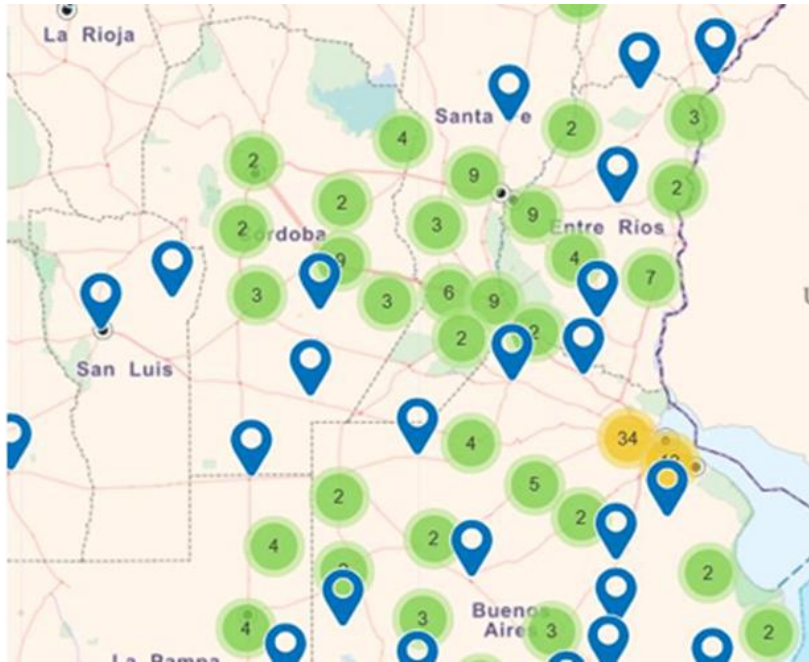


Fig. 3.1 Distribución geográfica de parques industriales.

Fuente: (RENPI, 2025)

La figura 3.2 muestra los principales datos de parques industriales en Argentina para el año 2016.



Fig. 3.2 Principales datos de parques industriales en Argentina, año 2016.

Fuente: (RENPI, 2025)

3.2.3 Matriz de ponderación

La aplicación del método de puntuaciones ponderadas arroja un mayor puntaje total para la alternativa Ensenada, lo que refleja una ventaja global desde el punto de vista técnico, logístico y económico. La cercanía a la fuente de propileno, la elevada capacidad productiva disponible

y la infraestructura portuaria consolidada resultan determinantes en el resultado final, compensando la menor proximidad relativa al mercado consumidor.

| Factor de localización | Ponderación | Ensenada (Puntaje) | Santa Fe (Puntaje) |
|--|-------------|--------------------|--------------------|
| Proximidad a la fuente de propileno | 0,3 | 5 | 3 |
| Logística de importación de H ₂ O ₂ (Brasil) | 0,2 | 4 | 3 |
| Proximidad al mercado consumidor | 0,15 | 3 | 5 |
| Infraestructura industrial y portuaria | 0,2 | 5 | 4 |
| Disponibilidad de servicios y parques industriales | 0,15 | 4 | 4 |
| Puntaje total ponderado | 1 | 4,35 | 3,8 |

Tabla 3.4 Método de puntuaciones ponderadas

Fuente: Elaboración propia

3.2.4 Conclusión

En base al análisis realizado, se concluye que la región de Ensenada, provincia de Buenos Aires, constituye la alternativa más conveniente para la macrolocalización de la planta productora de óxido de propileno. La elevada disponibilidad de propileno, la factibilidad logística para la importación de peróxido de hidrógeno al 70 %, la existencia de infraestructura industrial y portuaria de primer nivel y la disponibilidad de insumos complementarios a escala nacional consolidan esta región como la opción más adecuada para avanzar hacia la etapa de microlocalización.

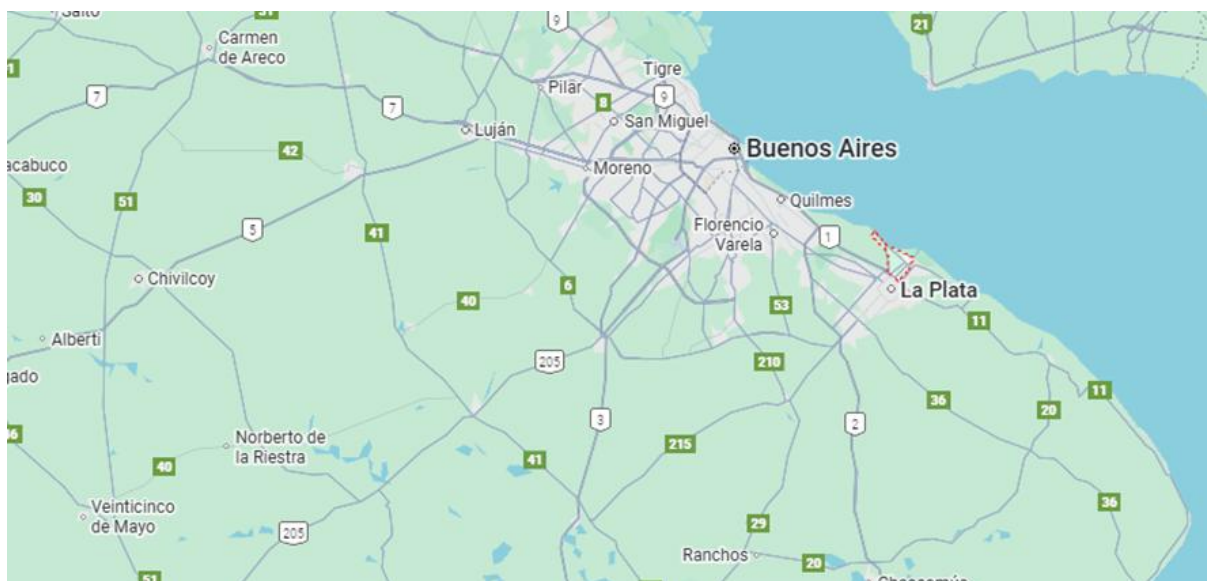


Fig. 3.3 Región probable para ubicación de la planta.

Fuente: (Google Maps, 2026)

3.3 Microlocalización

Luego de realizado el análisis de macrolocalización y seleccionada la región más conveniente para la radicación de la planta de producción de OP mediante el proceso HPPO, se procede a efectuar un estudio de microlocalización con el objetivo de definir el sitio específico para su instalación dentro de la región seleccionada. En este sentido, se ha determinado como localización óptima el partido de Ensenada, provincia de Buenos Aires, dentro del Polo Petroquímico Ensenada–La Plata.

El análisis de microlocalización se centra en la evaluación de factores tales como la disponibilidad de terrenos con uso de suelo industrial compatible, cercanía a las fuentes de materia prima, infraestructura y servicios disponibles, accesos logísticos y de transporte, disponibilidad de mano de obra calificada y beneficios normativos e impositivos. Para la comparación y selección final se considera el método de puntuaciones ponderadas, aplicado previamente a nivel regional.

| | | | | | | | |
|--|---------------------|----------------------------|----------------|----------|----------------|-----------|---------------------|
| POLO INDUSTRIAL PRIVADO DE GENERAL RODRÍGUEZ | BUENOS AIRES | GENERAL RODRÍGUEZ | PRIVADO | 50 | 264.992 | \$ | 13.249.600,00 |
| SECTOR INDUSTRIAL PLANIFICADO DE GENERAL VILLEGAS | BUENOS AIRES | GENERAL VILLEGAS GUILLERMO | PÚBLICO | 5 | 264.992 | \$ | 1.324.960,00 |
| PARQUE INDUSTRIAL HUDSON | BUENOS AIRES | ENRIQUE HUDSON | PRIVADO | 50 | 264.992 | \$ | 13.249.600,00 |
| PARQUE INDUSTRIAL CANTÁBRICA | BUENOS AIRES | HAEDO | PÚBLICO | 19 | 264.992 | \$ | 5.034.848,00 |
| PARQUE INDUSTRIAL DECA | BUENOS AIRES | HAEDO | PRIVADO | 122 | 264.992 | \$ | 32.329.024,00 |
| SECTOR INDUSTRIAL PLANIFICADO DE HIPÓLITO YRIGOYEN | BUENOS AIRES | HIPÓLITO YRIGOYEN | PÚBLICO | 5 | 264.992 | \$ | 1.324.960,00 |
| SECTOR INDUSTRIAL PLANIFICADO HUANGUELÉN | BUENOS AIRES | HUANGUELÉN | PÚBLICO | 6 | 264.992 | \$ | 1.589.952,00 |
| PARQUE INDUSTRIAL Y AREA DE SERVICIOS INDUSTRIALES VARELA 2 | BUENOS AIRES | INGENIERO JUAN ALLAN | PRIVADO | 50 | 264.992 | \$ | 13.249.600,00 |
| SECTOR INDUSTRIAL PLANIFICADO MIXTO PROMOCIONAL DE FLORENCIO VARELA | BUENOS AIRES | INGENIERO JUAN ALLAN | MIXTO | 5 | 264.992 | \$ | 1.324.960,00 |
| PARQUE INDUSTRIAL Y AREA DE SERVICIOS INDUSTRIALES Y LOGISTICA EBAPI | BUENOS AIRES | JOSE LEON SUAREZ | PRIVADO | 37 | 264.992 | \$ | 9.804.704,00 |
| PARQUE INDUSTRIAL VILLA FLANDRIA | BUENOS AIRES | JOSE MARIA JAUREGUI | PRIVADO | 32 | 264.992 | \$ | 8.479.744,00 |
| PARQUE INDUSTRIAL DON JULIO STEVERLYNCK | BUENOS AIRES | JOSE MARIA JAUREGUI | PRIVADO | 50 | 264.992 | \$ | 13.249.600,00 |
| PARQUE INDUSTRIAL JUNÍN | BUENOS AIRES | JUNIN | PÚBLICO | 84 | 264.992 | \$ | 22.259.328,00 |
| PARQUE INDUSTRIAL "LA MATANZA" | BUENOS AIRES | LA MATANZA | PRIVADO | 126 | 264.992 | \$ | 33.388.992,00 |
| SECTOR INDUSTRIAL PLANIFICADO DE LA PLATA II | BUENOS AIRES | LA PLATA | PÚBLICO | 5 | 264.992 | \$ | 1.324.960,00 |
| PARQUE INDUSTRIAL TROQUEL-COR ITUZAINGO SA DE LA REJA | BUENOS AIRES | LA REJA | PRIVADO | 6 | 264.992 | \$ | 1.589.952,00 |
| PARQUE INDUSTRIAL R25 | BUENOS AIRES | LA REJA | PRIVADO | 50 | 264.992 | \$ | 13.249.600,00 |
| PARQUE INDUSTRIAL CURTIDOR DE LANÚS | BUENOS AIRES | LANÚS | PÚBLICO | 50 | 264.992 | \$ | 13.249.600,00 |
| PARQUE INDUSTRIAL MIXTO C.E.P.J.L.E. | BUENOS AIRES | LANUS ESTE | MIXTO | 50 | 264.992 | \$ | 13.249.600,00 |
| SECTOR INDUSTRIAL PLANIFICADO DE LANÚS | BUENOS AIRES | LANÚS | PÚBLICO | 11 | 264.992 | \$ | 2.914.912,00 |

Fig. 3.4 Infraestructura en parques industriales APE

Fuente: (CAMARCO, 2026)



Terminal de contenedores Industria del petróleo Agrupamientos industriales Industrias petroquímicas
 Industrias metalmecánicas Zona Franca Central termoeléctrica

Fig. 3.5 Espacios industriales y grandes infraestructuras en Berisso y Ensenada

Fuente: (Adriani, H.L, Arturi, G.J., Calabresse, A., 2018)

Áreas industriales y uso del suelo en Ensenada

El partido de Ensenada forma parte de una de las microrregiones industriales más relevantes del país, caracterizada por una fuerte concentración de actividades vinculadas a la refinación de petróleo, la petroquímica y los servicios industriales asociados. Dentro de este contexto se destaca el Agrupamiento Industrial Ensenada (A.I.E.), desarrollado sobre los terrenos de la ex empresa petroquímica IPAKO.

La empresa IPAKO se instaló en Ensenada en el año 1962 con el objetivo de producir etileno y polietileno, cesando sus actividades en 1998 como consecuencia del proceso de apertura de importaciones y la recesión económica de finales de la década de 1990. Posteriormente, mediante la Ordenanza Municipal N° 3497/07, los terrenos e instalaciones fueron destinados a la conformación del Agrupamiento Industrial Ensenada, con fines de promoción, instalación y funcionamiento de emprendimientos industriales, comerciales y de servicios.

El A.I.E., inaugurado en el año 2009, cuenta con una superficie aproximada de 25 hectáreas y dispone de 24 unidades funcionales de diferentes dimensiones. Actualmente, las superficies construidas se encuentran ocupadas, albergando principalmente empresas dedicadas a servicios de ingeniería, mantenimiento industrial, integración de sistemas y actividades de soporte al Complejo Petroquímico Ensenada. El agrupamiento es administrado por la Municipalidad de

Ensenada y ofrece beneficios tales como exenciones de cargas municipales y facilidades para la adquisición de predios.

Adicionalmente, en el área del Polo Petroquímico Ensenada existen predios de gran superficie con zonificación industrial pesada. En particular, se identifica un lote de aproximadamente 8 hectáreas (80.124 m²), ubicado sobre el Camino Vergara, con zonificación Industrial UI 6 – Uso Industrial 6. Esta categoría de uso de suelo habilita la radicación de industrias de proceso continuo, petroquímicas y de manejo de sustancias peligrosas, resultando plenamente compatible con la instalación de la planta objeto del presente proyecto.

Disponibilidad de materia prima y proximidad a las fuentes de suministro

Uno de los factores determinantes en la microlocalización de la planta es la cercanía a las fuentes de materia prima, en particular al propileno, el cual constituye el insumo crítico del proceso HPPO. El propileno es un gas inflamable, de difícil y costoso transporte, que requiere condiciones especiales de almacenamiento y, preferentemente, suministro por ducto.

La localización propuesta en Ensenada presenta una ventaja estratégica significativa debido a la proximidad inmediata a la Refinería YPF Ensenada (Complejo Industrial La Plata), la cual cuenta con una capacidad de producción del orden de 120.000 t/año de propileno proveniente de unidades de cracking catalítico (FCC). La distancia entre el predio seleccionado y las instalaciones de YPF es del orden de 4 km, lo que hace técnicamente factible y económicamente conveniente el abastecimiento de propileno mediante poliducto, reduciendo de manera sustancial los costos de transporte y los riesgos asociados al traslado por camión.

En cuanto al peróxido de hidrógeno, se prevé su importación desde Brasil. La empresa Peróxidos do Brasil ha incrementado su capacidad productiva hasta aproximadamente 230.000 t/año, garantizando disponibilidad suficiente para abastecer la demanda del proyecto. El ingreso del peróxido se realizaría a través del Puerto La Plata, minimizando distancias terrestres y costos logísticos.

Por su parte, el metanol utilizado como solvente en el proceso HPPO, si bien se recicla en gran proporción, requiere reposición periódica. Este insumo puede ser provisto desde la planta de YPF en Neuquén, que cuenta con una capacidad de producción de aproximadamente 411.000 t/año, o bien mediante importación a través del puerto, lo cual refuerza la flexibilidad logística de la localización seleccionada.

Infraestructura, servicios y logística de transporte

La microrregión Ensenada–La Plata posee una infraestructura logística de escala regional, nacional e internacional. La producción industrial se apoya en tres modos de transporte principales: fluvial-marítimo, carretero y ferroviario.

El Puerto La Plata constituye una de las principales ventajas competitivas de la zona. Se trata del primer puerto argentino en el ingreso al Río de la Plata y cuenta con muelles de uso público, terminales privadas de YPF y COPETRO, y la terminal de contenedores TecPlata, desarrollada

con una inversión del orden de 400 millones de dólares. Esta terminal posee capacidad para operar buques tipo super post-panamax y manejar inicialmente 150.000 contenedores por año, con posibilidad de ampliación.

El movimiento portuario está dominado por combustibles y productos químicos, los cuales ingresan y egresan mayoritariamente por ductos y buques, lo que resulta altamente compatible con la operatoria del proyecto. En el año 2013 el puerto movilizó aproximadamente 4,42 millones de toneladas, de las cuales más de 3 millones correspondieron a combustibles líquidos.

En cuanto al transporte terrestre, la zona cuenta con accesos directos a la Autopista Buenos Aires–La Plata, principal vía de salida de la producción hacia la Región Metropolitana de Buenos Aires (RMBA), así como conexiones con la Ruta Provincial N° 11, la Ruta Nacional N° 2 y la Ruta Provincial N° 6, que vincula el puerto con los principales corredores logísticos del MERCOSUR.

Disponibilidad de mano de obra y entorno productivo

El partido de Ensenada y la ciudad de La Plata conforman un área con elevada densidad poblacional y una larga tradición industrial. La disponibilidad de mano de obra calificada constituye un factor favorable para la instalación de la planta, tanto para la etapa de construcción como para la operación y mantenimiento.

La región cuenta con instituciones educativas y de formación técnica de relevancia, entre las que se destacan la Universidad Nacional de La Plata, con facultades de Ingeniería, Ciencias Exactas y carreras afines, así como escuelas técnicas y centros de formación profesional orientados a la industria. Esto garantiza la disponibilidad de recursos humanos capacitados en áreas como procesos químicos, mantenimiento industrial, instrumentación, seguridad y gestión operativa.

Asimismo, la fuerte concentración de actividades petroquímicas y de servicios industriales ha favorecido el desarrollo de un entramado de pymes especializadas en mantenimiento, ingeniería y soporte técnico, lo cual constituye una ventaja adicional en términos de externalización de servicios y reducción de costos operativos.



Fig. 3.6 Principales conexiones viales

Fuente: (Puerto La Plata, 2024)

| Modo | Ingresos | Egresos |
|-------------|----------|---------|
| Ductos | 62% | 2% |
| Buques | 18% | 78% |
| Ferrocarril | 16% | 4% |
| Camión | 4% | 16% |

Tabla 3.5 Movimiento Puerto La Plata

Fuente: (Puerto La Plata, 2024)



Fig. 3.7 Accesos viales locales al Puerto La Plata

Fuente: (Puerto La Plata, 2024)

Análisis de microlocalización mediante el Método de Brown–Gibson

Para la selección de la microlocalización de la planta se aplicó el método de Brown–Gibson, una herramienta de análisis multicriterio que permite evaluar y comparar distintas alternativas de localización integrando factores objetivos y factores subjetivos en una única medida de preferencia.

Este método resulta especialmente adecuado para proyectos industriales, ya que combina variables cuantificables, como costos, distancias e infraestructura disponible, con aspectos cualitativos, tales como el entorno industrial, el marco institucional y la aceptación social, reduciendo el grado de subjetividad mediante un esquema estructurado de ponderaciones y comparaciones pareadas.

El procedimiento del método de Brown Gibson consta de cuatro etapas principales. En primer lugar, se identifican y ponderan los factores objetivos, evaluando el desempeño de cada alternativa en función de criterios técnicos y económicos relevantes. En segundo lugar, se analizan los factores subjetivos, asignando ponderaciones mediante comparaciones pareadas y jerarquizando las alternativas según su desempeño esperado en cada uno de estos factores. Posteriormente, se combinan ambos conjuntos de factores a través de una medida de preferencia de localización (MPL), incorporando un coeficiente que refleja la importancia relativa entre factores objetivos y subjetivos. Finalmente, se selecciona como localización óptima aquella alternativa que presenta el mayor valor de dicha medida.

La aplicación de este método permite justificar de manera sistemática y consistente la elección del emplazamiento de la planta, asegurando que la decisión final contemple tanto criterios técnicos y económicos como aspectos cualitativos relevantes para la viabilidad y sostenibilidad del proyecto.

Alternativas de localización consideradas

Se evaluaron tres alternativas dentro de la región pampeana con acceso a infraestructura petroquímica:

- Alternativa A: Ensenada – Zona Petroquímica (lote sobre Camino Vergara)
- Alternativa B: Ensenada – Zona industrial periférica
- Alternativa C: Santa Fe – Área industrial

Estas alternativas permiten comparar un emplazamiento óptimo cercano a la fuente de propileno con opciones industriales viables pero más alejadas.



Fig. 3.8 Localización de los agrupamientos industriales

Fuente: (Adriani, H.L, Arturi, G.J., Calabresse, A., 2018)

Factores considerados

Factores objetivos (FO)

Los factores objetivos son cuantificables o comparables en términos técnicos y económicos:

1. Distancia a la fuente de propileno (YPF Ensenada).
2. Accesibilidad logística (rutas nacionales, acceso portuario).
3. Disponibilidad de servicios industriales (energía eléctrica, gas natural, agua industrial).
4. Costo y disponibilidad del terreno.
5. Posibilidad de expansión futura.

Dado que el suministro continuo de propileno es crítico para la operación de la planta, la cercanía a YPF Ensenada y la accesibilidad logística reciben las mayores ponderaciones.

Factores subjetivos (FS)

Los factores subjetivos incorporan aspectos cualitativos relevantes para la viabilidad de largo plazo:

- Entorno industrial.
- Marco institucional y regulatorio.
- Flexibilidad futura.
- Aceptación social.

Evaluación de los factores objetivos (FOi)

Se asignan ponderaciones relativas (suman 1) y puntajes normalizados (1 a 5).

| Factor Objetivo | Peso | Ensenada – Zona Petroq. (A) | Ensenada – Periférica (B) | Santa Fe (C) |
|------------------------------------|------|-----------------------------|---------------------------|--------------|
| Distancia a YPF | 0,3 | 5 | 4 | 3 |
| Accesibilidad logística | 0,25 | 5 | 4 | 3 |
| Servicios industriales | 0,2 | 5 | 4 | 3 |
| Costo y disponibilidad del terreno | 0,15 | 4 | 5 | 4 |
| Expansión futura | 0,1 | 4 | 5 | 4 |

Tabla 3.6 Evaluación de los factores objetivos

Fuente: Elaboración Propia

Cálculo del FOi:

- $FO(A) = 0,30 \cdot 5 + 0,25 \cdot 5 + 0,20 \cdot 5 + 0,15 \cdot 4 + 0,10 \cdot 4 = 4,75$
- $FO(B) = 0,30 \cdot 4 + 0,25 \cdot 4 + 0,20 \cdot 4 + 0,15 \cdot 5 + 0,10 \cdot 5 = 4,25$
- $FO(C) = 0,30 \cdot 3 + 0,25 \cdot 3 + 0,20 \cdot 3 + 0,15 \cdot 4 + 0,10 \cdot 4 = 3,25$

Evaluación de los factores subjetivos (FSi)

a) Ponderación de factores subjetivos (Wj)

Mediante comparación pareada se obtienen los siguientes pesos:

| Factor Subjetivo | Wj |
|---------------------|------|
| Entorno industrial | 0,35 |
| Marco institucional | 0,25 |
| Flexibilidad futura | 0,2 |
| Aceptación social | 0,2 |

Tabla 3.7 Ponderación de factores subjetivos (Wj)

Fuente: Elaboración propia

b) Jerarquización de alternativas (Rij)

| Factor Subjetivo | A | B | C |
|---------------------|---|---|---|
| Entorno industrial | 1 | 2 | 3 |
| Marco institucional | 1 | 2 | 3 |
| Flexibilidad futura | 2 | 1 | 2 |
| Aceptación social | 2 | 2 | 1 |

Tabla 3.8 Jerarquización de alternativas (Rij)

Fuente: Elaboración propia

(1 = mejor desempeño)

c) Cálculo del FSi

Se asignan valores normalizados (3 para mejor, 2 intermedio, 1 menor).

- $FS(A) = 0,35 \cdot 3 + 0,25 \cdot 3 + 0,20 \cdot 2 + 0,20 \cdot 2 = 2,60$
- $FS(B) = 0,35 \cdot 2 + 0,25 \cdot 2 + 0,20 \cdot 3 + 0,20 \cdot 2 = 2,20$
- $FS(C) = 0,35 \cdot 1 + 0,25 \cdot 1 + 0,20 \cdot 2 + 0,20 \cdot 3 = 1,60$

Medida de Preferencia de Localización (MPL)

Se adopta $K = 0,65$, priorizando los factores objetivos por tratarse de un proceso petroquímico intensivo en insumos.

$$MPL_i = K \cdot FO_i + (1 - K) \cdot FSi$$

- $MPL(A) = 0,65 \cdot 4,75 + 0,35 \cdot 2,60 = 3,99$
- $MPL(B) = 0,65 \cdot 4,25 + 0,35 \cdot 2,20 = 3,53$
- $MPL(C) = 0,65 \cdot 3,25 + 0,35 \cdot 1,60 = 2,67$

Selección de la localización

La alternativa Ensenada – Zona Petroquímica obtiene el mayor valor de la Medida de Preferencia de Localización ($MPL = 3,99$), resultando la opción más conveniente para la implantación de la planta industrial. Esta localización se destaca por una combinación

favorable de factores técnicos, logísticos, institucionales y territoriales, entre los que se destacan los siguientes:

- Cercanía inmediata a la fuente de propileno, con una distancia aproximada de 4 km respecto a la planta de YPF Ensenada, lo que permite minimizar costos de transporte, reducir riesgos operativos y asegurar un abastecimiento continuo de materia prima crítica para el proceso productivo.
- Disponibilidad de un lote industrial específico con características plenamente compatibles con los requerimientos del proyecto. Se trata de un terreno de 8 hectáreas (80.124 m²) ubicado sobre Ruta Provincial N.º 215 – Camino Vergara, dentro de la Zona Petroquímica de Ensenada, con acceso directo desde vía principal, garita de seguridad privada, calles internas y servicios disponibles.
- Zonificación Industrial UI 6 (Uso Industrial 6), lo que habilita sin restricciones la instalación de plantas químicas y petroquímicas, asegurando la viabilidad normativa del proyecto y reduciendo riesgos regulatorios futuros.
- Inserción directa dentro del polo productivo de Ensenada, con accesos linderos a los principales complejos industriales de la región, tales como YPF, Petrocuvo y Camuzzi, favoreciendo la complementariedad productiva, la disponibilidad de servicios especializados y la sinergia con empresas del sector.
- Excelente accesibilidad logística, tanto por su conexión vial mediante Camino Vergara y la Ruta Provincial N.º 215, como por la cercanía al Puerto de La Plata, lo que facilita el ingreso de insumos, la salida de productos y la vinculación con mercados nacionales e internacionales.
- Plena disponibilidad de servicios industriales, incluyendo suministro de gas, electricidad, agua industrial y sistemas de infraestructura adecuados para procesos químicos continuos.
- Posibilidad de expansión futura, ya sea mediante la subdivisión del predio o la ampliación de la capacidad instalada, aspecto clave para un proyecto con potencial de crecimiento y escalabilidad.

El valor de mercado del predio analizado, estimado en USD 2.800.000, resulta coherente con su ubicación estratégica, su infraestructura disponible y su inserción dentro de un entorno industrial consolidado, constituyendo una alternativa competitiva en términos de costo-beneficio para el proyecto.

En función de los resultados obtenidos mediante el método de Brown–Gibson y del análisis detallado del lote específico, se selecciona la localización Ensenada – Zona Petroquímica como la más adecuada para la implantación de la planta industrial, sirviendo esta decisión como base para las etapas posteriores de diseño, evaluación económica y análisis ambiental del proyecto. (Sapag Chain & Sapag Chain, 2013)



Fig. 3.9 Lote disponible en Ensenada – Zona Petroquímica.

Fuente: (Zonaprop, 2025)

Conclusión del análisis de microlocalización

El análisis de microlocalización permitió evaluar comparativamente las distintas alternativas de emplazamiento para la planta industrial, considerando de manera integrada factores objetivos y subjetivos relevantes para la viabilidad técnica, económica y operativa del proyecto. Para ello, se aplicó el método de Brown–Gibson, el cual resulta especialmente adecuado para este tipo de decisiones al combinar criterios cuantificables con aspectos cualitativos vinculados al entorno industrial e institucional.

Las alternativas analizadas Polígono Industrial Berisso, Parque Industrial de Berisso y Agrupamiento Industrial Ensenada presentan en todos los casos condiciones generales favorables para la radicación de una planta química, en particular por su inserción en áreas industriales consolidadas y su cercanía al polo petroquímico de Ensenada. No obstante, el método permitió identificar diferencias significativas en el desempeño relativo de cada opción.

Los factores objetivos, ponderados con mayor peso en función de la naturaleza del proyecto, destacaron la importancia crítica de la proximidad a la fuente de propileno (YPF Ensenada), la accesibilidad logística y la disponibilidad de servicios industriales. En este sentido, el Agrupamiento Industrial Ensenada mostró ventajas claras asociadas a su localización dentro del polo petroquímico, su infraestructura existente y su integración funcional con empresas de servicios e insumos vinculadas a la industria química y petroquímica.

Por su parte, los factores subjetivos reforzaron esta tendencia, ya que el entorno industrial especializado, el marco institucional favorable, la aceptación social de la actividad industrial y la flexibilidad futura del emplazamiento resultan más consolidados en el Agrupamiento Industrial Ensenada en comparación con las otras alternativas evaluadas.

Como resultado de la aplicación del método de Brown Gibson y del cálculo de la Medida de Preferencia de Localización (MPL), se concluye que el constituye la alternativa más conveniente para la implantación de la planta, al presentar el mayor valor global de preferencia. Esta localización optimiza la logística de abastecimiento de materia prima crítica, reduce riesgos operativos, facilita el acceso a servicios industriales y se enmarca dentro de políticas públicas de promoción industrial, contribuyendo a mejorar la sustentabilidad y competitividad del proyecto en el largo plazo.

En consecuencia, se adopta el Agrupamiento Industrial Ensenada como emplazamiento seleccionado para el desarrollo del proyecto, sirviendo esta decisión como base para las etapas posteriores de diseño de planta, evaluación económica y análisis ambiental.

CAPÍTULO IV: TAMAÑO

4.1 Introducción

El tamaño de planta constituye uno de los parámetros fundamentales en el diseño de un proyecto industrial, ya que condiciona la selección de equipos, la inversión requerida, la organización operativa y la viabilidad económica del proceso. En el presente proyecto, el tamaño de planta para la producción de óxido de propileno mediante el proceso HPPO se determina considerando principalmente la demanda del mercado argentino, junto con factores técnicos, económicos y operativos.

Dado que se trata de un proyecto de grado, la determinación del tamaño no persigue reproducir una instalación industrial de gran escala, sino establecer una capacidad representativa y coherente con el mercado objetivo, que permita analizar integralmente el proceso productivo y sus implicancias técnicas.

4.2 Análisis de factores que afectan el tamaño

La determinación del tamaño de planta se ve influenciada por diversos factores, tanto internos como externos al proyecto. Entre los más relevantes se encuentran la competencia existente, la demanda proyectada del producto, la capacidad de satisfacción de dicha demanda, la disponibilidad de recursos humanos y la capacidad de financiamiento. (Sapag Chain & Sapag Chain, 2013)

4.2.1 Competencia

En el mercado argentino no existe producción nacional de óxido de propileno, por lo que el abastecimiento del producto se realiza exclusivamente mediante importaciones. Esta situación implica la ausencia de competencia directa a nivel local, lo cual constituye una oportunidad para la instalación de una planta productora orientada a la sustitución de importaciones.

No obstante, la competencia indirecta está dada por productores internacionales de gran escala, principalmente ubicados en América del Norte, Europa y Asia, que operan plantas con capacidades significativamente mayores y economías de escala consolidadas. En este contexto, el tamaño de planta propuesto debe ser compatible con un mercado interno limitado, sin pretender competir en volumen con los principales productores globales, sino enfocándose en el abastecimiento del mercado nacional.

4.2.2 Demanda proyectada

La demanda de óxido de propileno en Argentina se analiza a partir de la evolución del consumo aparente en el período 2019–2024, tomando como año base 2019 por corresponder al último año previo a las distorsiones macroeconómicas y sanitarias observadas a partir de 2020. En la Tabla 4.1 se presentan los valores de consumo aparente correspondientes a dicho período, mientras que en la Figura 4.1 se muestra su representación gráfica.

| Año | Demanda(t) |
|------|------------|
| 2019 | 19707 |
| 2020 | 20319 |
| 2021 | 21062 |
| 2022 | 18089 |
| 2023 | 21732 |
| 2024 | 10249 |

Tabla 4.1 Consumo aparente en argentina de Óxido de Propileno

Fuente: Elaboración propia basado en datos (Instituto Petroquímico Argentino (IPA), 2025)

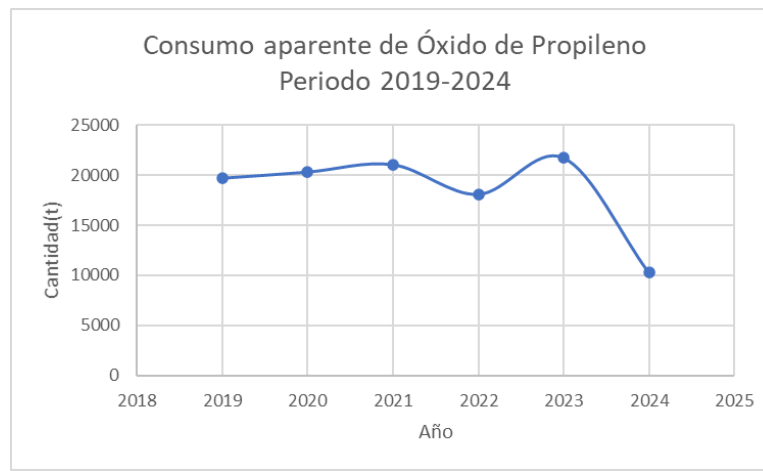


Fig. 4.1 Consumo aparente de Óxido de Propileno. Periodo 2019-2024

Fuente: Elaboración propia

Del análisis de la serie histórica se observa una tendencia general de crecimiento moderado entre los años 2019 y 2021, asociada al desarrollo de los sectores industriales consumidores del producto. Sin embargo, en el año 2022 se registra una caída significativa del consumo aparente, la cual puede considerarse un dato atípico. Esta disminución se explica principalmente por el contexto macroeconómico desfavorable, caracterizado por un elevado déficit comercial, restricciones a las importaciones y limitaciones cambiarias, que afectaron el abastecimiento de insumos industriales.

Asimismo, el valor correspondiente al año 2024 muestra una contracción aún más pronunciada del consumo aparente. Este comportamiento se asocia a la fuerte caída de la actividad industrial registrada durante dicho período, en un contexto de ajuste macroeconómico y reducción general del nivel de consumo. Dado que se trata de un año reciente y sujeto a condiciones transitorias, este valor no se considera representativo de la tendencia estructural de largo plazo del mercado.

En función de lo anterior, para la proyección de la demanda se adopta como base la tendencia observada en el período 2019–2023, realizando un tratamiento específico del dato correspondiente a 2022 con el objetivo de suavizar la curva y obtener una evolución más representativa del comportamiento real del mercado. Esta metodología resulta consistente con la empleada en proyectos académicos similares y permite estimar la demanda futura de óxido

de propileno a un horizonte de diez años, la cual será utilizada posteriormente para la determinación del tamaño de planta.

La Tabla 4.2 presenta los valores de consumo aparente corregidos, mientras que la Figura 4.2 muestra la curva suavizada correspondiente.

| Año | Demanda(t) |
|------|------------|
| 2019 | 19707 |
| 2020 | 20319 |
| 2021 | 21062 |
| 2022 | 21397 |
| 2023 | 21732 |

Tabla 4.2 Consumo aparente corregido en argentina de OP

Fuente: Elaboración propia basado en datos del Instituto Petroquímico Argentino (IPA)

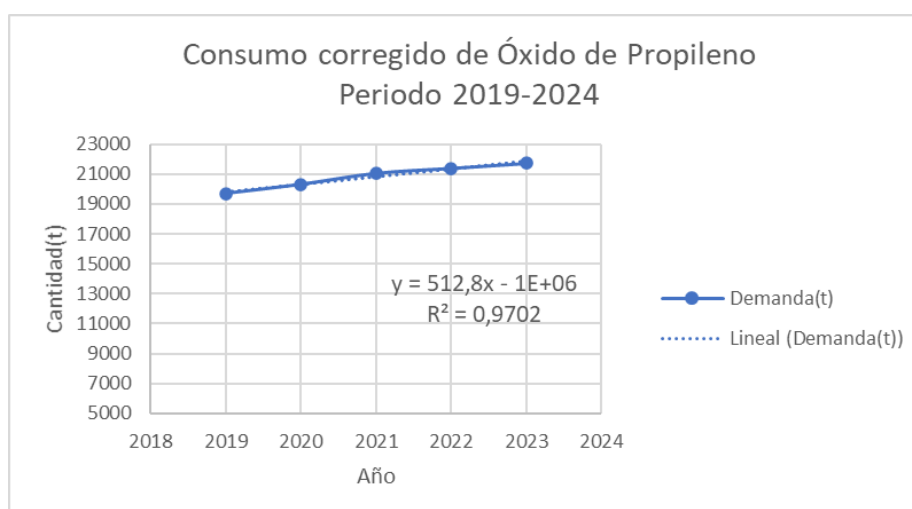


Fig. 4.2 Consumo aparente de OP corregido. Período 2019-2023

Fuente: Elaboración propia

A partir de los datos corregidos se observa una tendencia creciente y sostenida del consumo de óxido de propileno en el período analizado. El ajuste lineal obtenido presenta un coeficiente de determinación elevado, lo cual indica una adecuada correlación entre los datos y la tendencia adoptada. Este comportamiento permite considerar válida la extrapolación de la demanda a un horizonte de diez años, sobre la base de un crecimiento moderado del mercado.

La metodología empleada resulta consistente con la utilizada en proyectos académicos similares y permite estimar la demanda futura de óxido de propileno de manera razonable, evitando distorsiones asociadas a eventos coyunturales. Los resultados obtenidos a partir de esta proyección serán utilizados posteriormente como base para la determinación del tamaño de planta.

A partir de la curva de tendencia obtenida para el período 2019–2023, se realiza la proyección de la demanda de óxido de propileno a un horizonte de diez años, comprendido entre 2025 y

2034. La proyección se lleva a cabo mediante la extrapolación del ajuste lineal obtenido a partir de los datos de consumo aparente corregidos, cuya ecuación se presenta en la Figura 4.3.

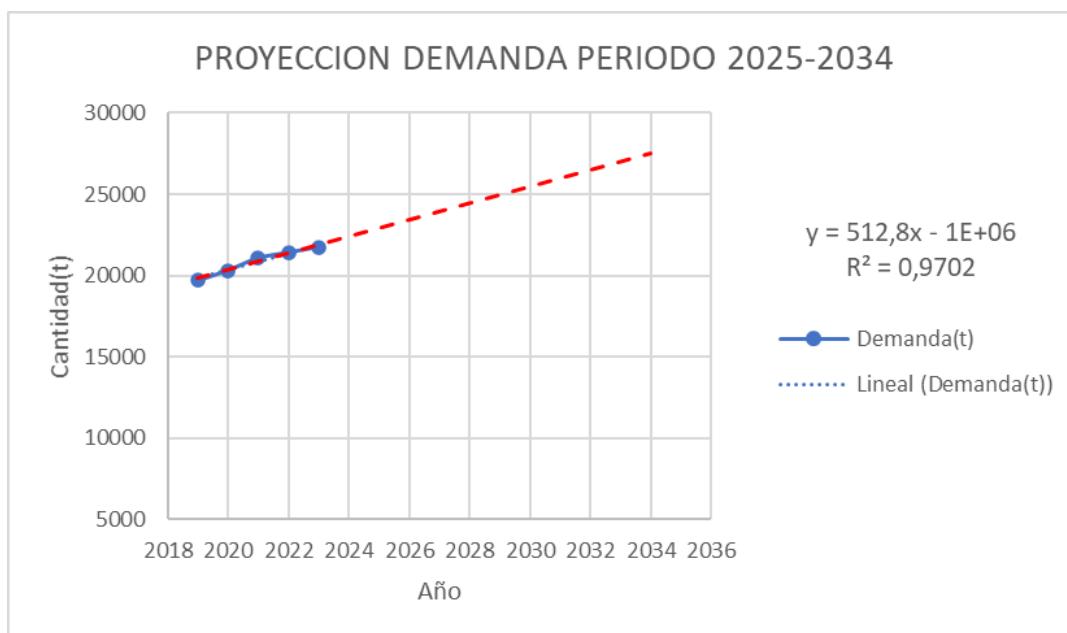


Fig. 4.3 Proyección Demanda Periodo 2025-2034

Fuente: Elaboración propia

La proyección resultante muestra un crecimiento sostenido de la demanda, alcanzando hacia el final del período valores del orden de 26.000 a 27.000 toneladas anuales. Este comportamiento se encuentra en concordancia con el crecimiento esperado de los sectores industriales consumidores de óxido de propileno y responde a una hipótesis de evolución moderada del mercado, sin considerar expansiones abruptas ni escenarios extraordinarios.

Cabe destacar que la metodología adoptada supone la continuidad de las condiciones estructurales del mercado observadas en el período analizado, y resulta adecuada para los fines del presente proyecto de grado. Los valores proyectados serán utilizados en los apartados siguientes para evaluar la capacidad de satisfacción de la demanda y definir el tamaño de planta más conveniente desde el punto de vista técnico y de mercado.

4.2.3 Capacidad de satisfacción de la demanda

Como se analizó en el Capítulo II, en la actualidad no existe producción nacional de óxido de propileno, por lo que la totalidad del consumo aparente del mercado argentino se satisface mediante importaciones. Esta situación se mantiene a lo largo del período histórico considerado y constituye una característica estructural del mercado local.

A partir de la proyección de la demanda realizada para el período 2025–2034, se observa que el consumo de óxido de propileno continuará presentando una tendencia creciente, alcanzando valores cercanos a las 26.000–27.000 toneladas anuales hacia el final del horizonte analizado. Dado que no se prevé la instalación de nuevas plantas productoras a nivel nacional, esta demanda futura puede considerarse íntegramente insatisfecha desde el punto de vista de la producción local.

En este contexto, la instalación de una planta productora de óxido de propileno permitiría sustituir parcial o totalmente las importaciones actuales, mejorando el abastecimiento del mercado interno y reduciendo la dependencia externa. Por lo tanto, la capacidad de satisfacción de la demanda se encuentra directamente asociada al tamaño de planta que se adopte, el cual deberá ser coherente con los valores de demanda proyectados.

4.2.4 Recursos humanos disponibles

La disponibilidad de recursos humanos capacitados no constituye un factor limitante para el desarrollo del presente proyecto. Argentina cuenta con profesionales formados en ingeniería química, química y disciplinas afines, así como con técnicos especializados con experiencia en la operación de plantas petroquímicas y químicas.

Asimismo, la existencia de polos industriales y complejos petroquímicos en distintas regiones del país favorece la disponibilidad de personal con conocimientos en operación, mantenimiento y control de procesos continuos, lo cual permite suponer que el recurso humano necesario para la operación de una planta de óxido de propileno puede ser adecuadamente cubierto.

4.2.5 Capacidad de financiamiento

La capacidad de financiamiento constituye un aspecto relevante en la definición del tamaño de planta, dado que los proyectos petroquímicos suelen requerir inversiones de considerable magnitud. En este sentido, resulta conveniente seleccionar un tamaño que pueda financiarse con un adecuado nivel de seguridad y estabilidad, y que a su vez permita alcanzar costos unitarios competitivos y un rendimiento aceptable del capital invertido.

Al momento de llevar a cabo la inversión necesaria, deben considerarse los recursos financieros disponibles y los distintos mecanismos de financiamiento existentes. Entre las alternativas más habituales se encuentran la participación de inversores privados, que pueden aportar capital sin generar endeudamiento financiero, aunque generalmente exigen cierto grado de participación en la toma de decisiones; los créditos bancarios, que permiten mantener el control total del proyecto pero implican costos financieros y compromisos de pago; y los subsidios o programas estatales de apoyo a la inversión industrial, los cuales pueden reducir el capital inicial requerido, aunque suelen estar sujetos a requisitos específicos y plazos determinados.

En el marco del presente proyecto de grado, este factor se analiza desde un enfoque conceptual, dejando el estudio detallado de las alternativas de financiamiento y su impacto económico para una etapa posterior de factibilidad.

4.2.6 Disponibilidad de materias primas y tecnología

La definición del tamaño de planta también se encuentra condicionada por la disponibilidad de las materias primas principales y por las características de la tecnología de producción seleccionada. La provisión de propileno y peróxido de hidrógeno ha sido analizada en capítulos anteriores, concluyendo que ambos insumos pueden considerarse disponibles para el rango de capacidades evaluado, ya sea a partir de producción nacional o mediante importaciones.

Por otra parte, si bien la selección detallada de la tecnología se desarrolla en un capítulo posterior, se adopta como referencia el proceso HPPO, el cual presenta ventajas ambientales y operativas frente a tecnologías convencionales. Este proceso se caracteriza por su escalabilidad

industrial, si bien la bibliografía especializada indica la existencia de capacidades mínimas recomendadas para su aplicación económica a gran escala.

En el marco de este proyecto de grado, dichas consideraciones se incorporan de manera conceptual, asumiendo que la tecnología seleccionada permite operar de forma confiable en el rango de capacidades definido a partir del análisis de mercado. El estudio detallado de las implicancias técnicas y económicas asociadas a la escala de operación se aborda en capítulos posteriores.

4.3 Determinación del tamaño

La determinación del tamaño de la planta constituye la instancia de síntesis del presente capítulo, en la cual convergen los análisis de demanda proyectada, competencia, capacidad de satisfacción del mercado y condiciones operativas previamente desarrollados. El objetivo de este apartado es definir una capacidad de producción que resulte técnica y económicamente viable, minimizando riesgos asociados a la sobrecapacidad y permitiendo, al mismo tiempo, acompañar el crecimiento futuro del mercado.

4.3.1 Capacidad óptima de la planta

A partir del análisis de la demanda proyectada de óxido de propileno para el período 2025–2034, se observa que el consumo nacional presenta una tendencia creciente, aunque con volúmenes relativamente reducidos y una marcada dependencia de las importaciones. En este contexto, no resulta conveniente diseñar una planta orientada a cubrir la totalidad de la demanda potencial, ya que ello implicaría un sobredimensionamiento inicial y mayores riesgos económicos y comerciales.

Asimismo, la inexistencia de producción nacional de óxido de propileno y la escala limitada del mercado argentino justifican la adopción de una estrategia conservadora, orientada a atender una porción significativa de la demanda, sin generar excedentes difíciles de colocar en el mercado local. A ello se suma que el proceso HPPO seleccionado presenta una capacidad mínima técnica de operación, lo que establece un límite inferior al tamaño de planta viable.

Considerando estos aspectos, se evalúa como razonable un rango de capacidad comprendido entre 20 y 30 mil toneladas anuales. Dentro de dicho intervalo, se prioriza un tamaño que permita acompañar el crecimiento proyectado de la demanda durante los primeros años de operación, manteniendo flexibilidad para futuras ampliaciones en caso de consolidarse un escenario de mayor consumo.

En función de lo anterior, se adopta una capacidad inicial de 23.000 toneladas anuales, contemplando desde la etapa de diseño la posibilidad de expansión futura de la planta. Esta estrategia permite equilibrar el riesgo de sobrecapacidad con la necesidad de asegurar una oferta local competitiva, reduciendo parcialmente la dependencia de importaciones y favoreciendo la viabilidad económica del proyecto.

4.4 Ritmo de trabajo

El ritmo de trabajo establece las condiciones operativas generales bajo las cuales se desarrollará la producción de óxido de propileno, independientemente del tamaño de planta adoptado. En este apartado se definen los criterios de operación, el régimen de funcionamiento y los factores

que influyen en la continuidad del proceso, los cuales serán utilizados posteriormente para relacionar la capacidad anual definida con los caudales horarios correspondientes.

4.4.1 Factores que influyen en la producción

La producción efectiva de la planta se encuentra influenciada por diversos factores operativos, entre los cuales se destacan la disponibilidad de los equipos, la confiabilidad del proceso, las paradas por mantenimiento y la estabilidad del régimen de operación. (Urbina, 2013)

Asimismo, factores como la calidad de las materias primas, el desempeño del catalizador y las condiciones de control del proceso inciden directamente en la continuidad productiva. Si bien estos aspectos serán analizados en mayor detalle en capítulos posteriores, en el presente estudio se asume un funcionamiento estable del proceso bajo condiciones normales de operación, adoptando criterios conservadores respecto a la disponibilidad anual de la planta.

Los parámetros definidos en este apartado constituyen la base operativa sobre la cual se calcularán, en secciones posteriores, los caudales de producción requeridos para alcanzar la capacidad anual seleccionada.

4.4.2 Programa de producción

Para la estimación del programa de producción se parte de la capacidad anual definida para la planta, considerando el régimen operativo previamente establecido, la jornada de trabajo continua y las paradas programadas por mantenimiento. El objetivo de este apartado es planificar la distribución temporal de la producción necesaria para alcanzar la producción anual objetivo.

Dado que el proceso HPPO corresponde a un proceso de operación continua, se adopta un esquema de producción de 24 horas diarias, con un total de 340 días efectivos de operación por año, contemplando paradas programadas destinadas a tareas de mantenimiento y ajustes operativos. Este régimen equivale a un total de 8.160 horas anuales de operación.

A partir de la producción anual objetivo de 23.000 toneladas de óxido de propileno, se determina la producción media diaria necesaria para cumplir con dicho objetivo, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$Producción\ diaria = \frac{Producción\ Anual}{Días\ efectivos\ de\ operación} \quad Ec. 4.1$$

$$Producción\ diaria = \frac{23000\ Tn/Año}{340\ días} = 67,647\ Tn/día$$

Sobre la base de estos valores, se procede a distribuir la producción anual de manera uniforme a lo largo de los meses del año, considerando la cantidad de días operativos y horas de trabajo correspondientes a cada mes. Esta distribución permite estimar la producción mensual requerida y las horas de operación asociadas, facilitando la planificación operativa y el análisis posterior del proceso.

La planta operará bajo un régimen continuo de 24 horas diarias, organizado en tres turnos de 8 horas, con un total de 340 días efectivos de operación anual. Este esquema resulta adecuado

para procesos petroquímicos continuos como el HPPO, permitiendo maximizar la eficiencia operativa y asegurar la estabilidad del proceso.”

En la Tabla 4.4 se detalla el programa de producción mensual, indicando los días operativos, las horas de trabajo y la producción correspondiente en cada mes. Asimismo, la Figura 4.4 presenta la representación gráfica de la producción mensual, permitiendo visualizar la distribución de la producción a lo largo del año operativo.

| JORNADA LABORAL | | | |
|---------------------------------|-------------|----------|------|
| Duración del año laboral | | 340 | Días |
| Días Laborales por mes | | 28-31 | Días |
| Esquema de Trabajo | | Continuo | |
| Turnos diarios | | 3 | |
| Turno Mañana | 6 am-14 pm | 8 | Hs |
| Turno Tarde | 14 pm-22 pm | 8 | Hs |
| Turno Noche | 22 pm-6 am | 8 | Hs |

Tabla 4.3 Tiempos de programa de producción

Fuente: Elaboración propia

| Mes | Días hábiles | Horas de trabajo | Producción (t) |
|--------------|--------------|------------------|----------------|
| Enero | 18 | 432 | 1217,647059 |
| Febrero | 28 | 672 | 1894,117647 |
| Marzo | 31 | 744 | 2097,058824 |
| Abril | 30 | 720 | 2029,411765 |
| Mayo | 31 | 744 | 2097,058824 |
| Junio | 30 | 720 | 2029,411765 |
| Julio | 31 | 744 | 2097,058824 |
| Agosto | 31 | 744 | 2097,058824 |
| Septiembre | 30 | 720 | 2029,411765 |
| Octubre | 31 | 744 | 2097,058824 |
| Noviembre | 30 | 720 | 2029,411765 |
| Diciembre | 19 | 456 | 1285,294118 |
| Total | 340 | 8160 | 23000 |

Tabla 4.4 Programa de producción

Fuente: Elaboración propia

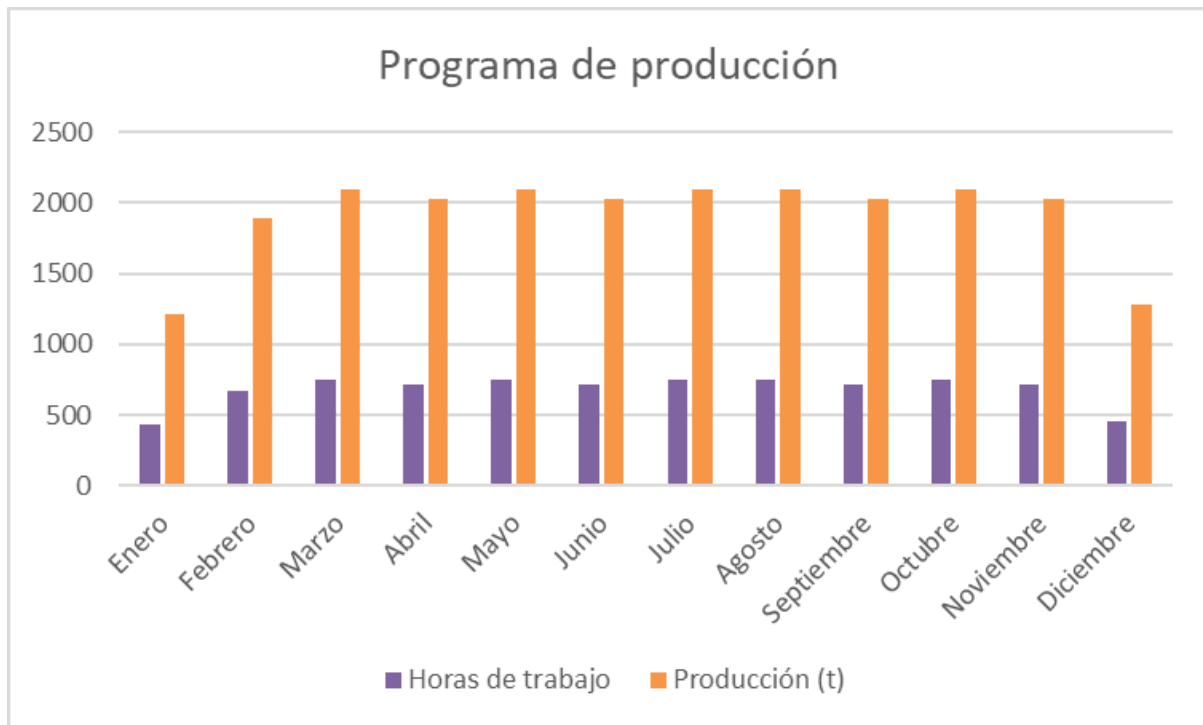


Fig. 4.4 Programa de producción mensual

Fuente: Elaboración propia

Cabe destacar que el programa de producción presentado corresponde a una planificación teórica, adoptada con fines de diseño y evaluación del proceso, asumiendo condiciones estables de operación durante todo el período considerado.

4.5 Conclusión

A partir del análisis integral de los factores que afectan el tamaño de la planta, se concluye que la adopción de una capacidad inicial de 23 mil toneladas anuales de óxido de propileno resulta adecuada para las condiciones actuales del mercado argentino. Este tamaño permite atender una fracción relevante de la demanda proyectada, minimizar riesgos asociados a la sobreproducción y mantener flexibilidad para futuras expansiones.

La definición del tamaño de planta, junto con el régimen operativo establecido, sienta las bases para el desarrollo de los capítulos posteriores, en los cuales se abordará la selección tecnológica, el diseño del proceso y la evaluación económica del proyecto.

CAPÍTULO V: TECNOLOGÍA

5.1 Introducción

La selección de la tecnología de producción constituye una de las etapas más críticas en el diseño de una planta industrial, ya que define no sólo la viabilidad técnica y económica del proyecto, sino también su huella ambiental y sostenibilidad a largo plazo. En el contexto de la industria petroquímica actual, la producción de óxido de propileno ha experimentado una evolución significativa, impulsada por la necesidad de reducir la generación de subproductos indeseados y minimizar el impacto ecológico de los efluentes.

El presente capítulo tiene por objeto evaluar las distintas rutas de síntesis disponibles comercialmente para la obtención de óxido de propileno. Se analizarán las ventajas y desventajas de los procesos tradicionales frente a las tecnologías emergentes, considerando factores determinantes como la eficiencia de conversión, la selectividad de los catalizadores, la gestión de coproductos y el consumo energético. A partir de este análisis comparativo, se procederá a la selección justificada del proceso más adecuado para cumplir con los objetivos de producción planteados en este proyecto, garantizando un equilibrio óptimo entre rentabilidad operativa y responsabilidad ambiental.

5.2 Selección del proceso de producción

Para determinar objetivamente la tecnología más adecuada para el presente proyecto, se elaboró una *matriz de selección ponderada*. Se definieron cinco criterios críticos de evaluación, asignando a cada uno un "peso relativo" (%) en función de su importancia estratégica para los objetivos de la planta (sostenibilidad, independencia comercial y eficiencia).

Los criterios seleccionados son:

1. Impacto ambiental y efluentes (30%): evalúa la cantidad y toxicidad de los residuos generados (salmuera, clorados, orgánicos).
2. Independencia de coproductos (25%): evalúa la libertad operativa frente a mercados secundarios (evitar depender de la venta de estireno/MTBE).
3. Simplicidad del proceso/CAPEX (20%): evalúa la complejidad del diagrama de flujo, cantidad de reactores y columnas de separación requeridas.
4. Seguridad del Proceso (15%): considera los riesgos operativos (manejo de cloro gas vs. peróxidos vs. presiones/temperaturas).
5. Consumo energético (10%): eficiencia térmica y requerimientos de servicios auxiliares.

Escala de puntuación:

- 10 - Excelente: cumple totalmente el criterio de forma óptima;
- 5 - Regular: cumple parcialmente o presenta inconvenientes manejables;
- 1 - Deficiente: presenta desventajas graves o riesgos altos.

5.2.1 Opción tecnológica 1

Proceso de la clorhidrina

La síntesis de óxido de etano y óxido de propeno utilizando la ruta de la clorhidrina fue descrita por primera vez en 1859 por Wurtz. En esta reacción, el alqueno reacciona con ácido hipocloroso (HOCl) para producir la clorhidrina. El ácido hipocloroso se produce *in situ* mediante una reacción de equilibrio del ácido con agua y cloro. Posteriormente, la clorhidrina es deshidroclorada utilizando hidróxido de potasio acuoso para producir el epóxido. La conversión de clorhidrinas a epóxidos se realiza mediante una adaptación de la síntesis de Wilkinson para éteres. Esta ruta ha sido durante mucho tiempo el proceso principal para producir tanto óxido de etileno como óxido de propeno. En la década de 1940, el proceso comenzó a eliminarse gradualmente para la epoxidación de eteno, debido al desarrollo de un proceso de epoxidación directa más eficiente que utiliza un catalizador de plata. Tras esa introducción, muchas plantas de epoxidación de eteno que utilizaban el proceso de la clorhidrina se convirtieron para la epoxidación de propeno. El proceso todavía se aplica para la epoxidación de propeno; sin embargo, en este momento, está siendo reemplazado gradualmente por los procesos de hidroperóxido, que son más amigables con el medio ambiente. (Nijhuis, 2006)

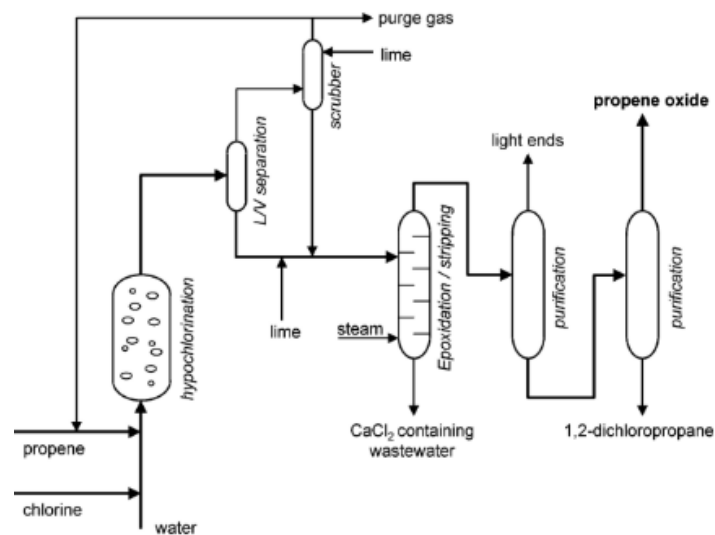


Fig. 5.1 Diagrama de flujo de proceso por clorhidrina

Fuente: (Nijhuis, 2006)

La Figura 5.1 muestra esquemáticamente el proceso de la clorhidrina. Los dos pasos de reacción en la producción de clorhidrina de propeno en el primer reactor (clorhidrinación) son la producción del complejo de cloronio de propeno en el primer paso de reacción,

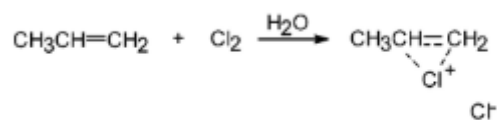


Fig. 5.2 Reacción de clorhidrinación

Fuente: (Nijhuis, 2006)

seguido por una reacción con agua para producir dos isómeros de clorhidrina de propileno.

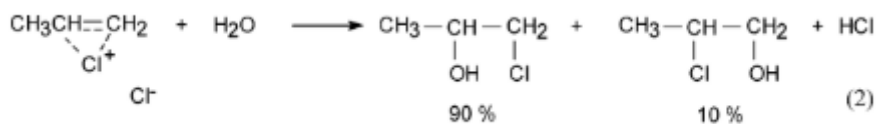


Fig. 5.3 Reacción de hidrólisis de clorhidrina

La selectividad de estas reacciones hacia los isómeros de clorhidrina es de 90%–95%. Los subproductos formados son principalmente 1,2-dicloropropano (de la reacción en fase gaseosa del propeno con cloro) y cantidades menores de dicloropropanoles (producidos a partir del cloruro de alilo, que también se forma en la fase gaseosa a partir de la reacción entre propeno y cloro), así como éteres dicloroisopropílicos (de la reacción del complejo de cloronio con la clorhidrina de propeno). Como se puede observar, este proceso genera muchos subproductos.

La clorohidrinación se realiza usualmente en un reactor de columna de burbujas a una presión de 1,5 bar y una temperatura de 323 K. Debido a la naturaleza corrosiva de la mezcla de reacción, es necesario el uso de equipos revestidos de goma, plástico o ladrillo.

En el reactor de epoxidación, la deshidrocloración de la clorhidrina de propeno ocurre utilizando una base (generalmente hidróxido de calcio).

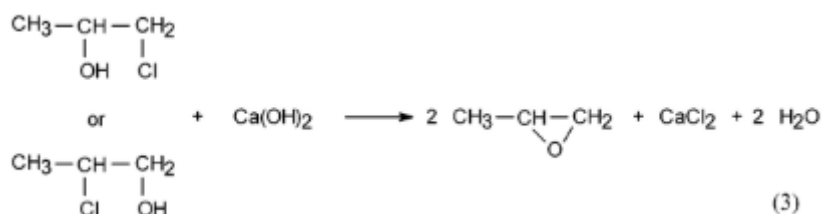


Fig. 5.4 Reacción de epoxidación usando Ca(OH)_2

Fuente: (Nijhuis, 2006)

El óxido de propileno se separa de este reactor mediante arrastre con vapor, para prevenir la hidrólisis catalizada por base del producto. La deshidrocloración se lleva a cabo en la misma columna donde los productos se separan de la corriente de aguas residuales (1 bar, 373 K).

Los hidrocarburos clorados que se producen terminan en la corriente de óxido de propileno y deben ser eliminados. La salmuera que sale del fondo del reactor contiene algunos propilenglicoles, ya que la hidrólisis del óxido de propileno no puede evitarse por completo. Estos glicoles y las pequeñas cantidades de otros hidrocarburos presentes deben eliminarse biológicamente. Posteriormente, la salmuera se descarga, ya que el cloruro de calcio en la corriente no tiene valor comercial. Esta es una de las principales desventajas del proceso de la clorhidrina, debido a que la cantidad de salmuera (5% CaCl_2) producida es usualmente 40 veces mayor que la cantidad de óxido de propileno producido, y es extremadamente difícil eliminar todos los hidrocarburos de esta corriente de aguas residuales.

La reutilización del cloruro de calcio no es económicamente viable debido a su bajo valor comercial. Alternativamente, se puede utilizar hidróxido de sodio en lugar de hidróxido de calcio. Esto presenta una ventaja: el cloruro de sodio producido puede utilizarse luego en la producción de cloro, el cual puede descargarse más fácilmente o reciclarse en la primera etapa del proceso. Por lo tanto, esta modificación es capaz de eliminar el problema ambiental de este proceso en gran medida.

La corriente de óxido de propileno crudo debe purificarse mediante destilación para separarla del agua y de los hidrocarburos clorados. En esta separación, nuevamente, se debe tener cuidado de que el óxido de propileno no se hidrolice a propilenglicol. La cantidad relativamente grande de 1,2-dicloropropano (hasta un 10%) se obtiene como un subproducto de la sección de separación. Dado que este compuesto tiene muy poca utilidad, no solo causa una pérdida en el rendimiento, sino que también genera un problema de eliminación.

Los dos problemas de eliminación (salmuera y subproductos clorados) son la razón principal por la cual no se construyen nuevas plantas de clorohidrina y las plantas antiguas se cierran en lugar de modernizarse. Solo se espera que las plantas a gran escala (> 100.000 toneladas/año) permanezcan operativas por un período más largo, ya que a menudo están integradas con plantas de producción de cloro, usando NaOH.

5.2.2 Opción tecnológica 2

Procesos de co-oxidación o hidroperóxidos orgánicos (segunda generación)

Los procesos de hidroperóxido se basan en la peroxidación de un alcano para formar un alquil-hidroperóxido. Estos alquil-hidroperóxidos reaccionan posteriormente con propeno, produciendo óxido de propeno y un alcohol. Una característica distintiva de estos procesos es que, además del óxido de propeno, se genera un coproducto en una proporción fija, usualmente de 2 a 4 veces la cantidad de óxido de propeno producido. Actualmente, se aplican comercialmente dos variantes de este proceso. La primera es el proceso de óxido de propeno-monómero de estireno (PO-SM, también abreviado comúnmente como SMPO), y aproximadamente el 60% de las plantas de hidroperóxido utilizan esta versión. En este proceso, el etilbenceno se oxida a hidroperóxido de etilbenceno, el cual reacciona con propeno para producir óxido de propeno y α -feniletanol. El α -feniletanol se deshidrata luego para producir estireno. La segunda variante en uso es el proceso de óxido de propeno-alcohol *terc*-butílico (PO-TBA). En este proceso, el isobutano se oxida a hidroperóxido de *terc*-butilo (TBHP), que reacciona con propeno para producir óxido de propeno y alcohol *terc*-butílico. Este último puede deshidratarse a isobuteno o convertirse directamente con metanol a metil-*terc*-butil éter (MTBE). Aunque son posibles otros procesos combinados, ninguno se ha aplicado hasta ahora. Otras posibilidades incluyen, por ejemplo, acetaldehído a ácido acético, 2-propanol a acetona, isopentano (vía alcohol *terc*-pentílico) a isopreno, cumeno (vía dimetilfenilmetanol) a α -metilestireno, y ciclohexeno (vía ciclohexanol) a ciclohexanona. (Nijhuis, 2006)

Proceso PO-SM

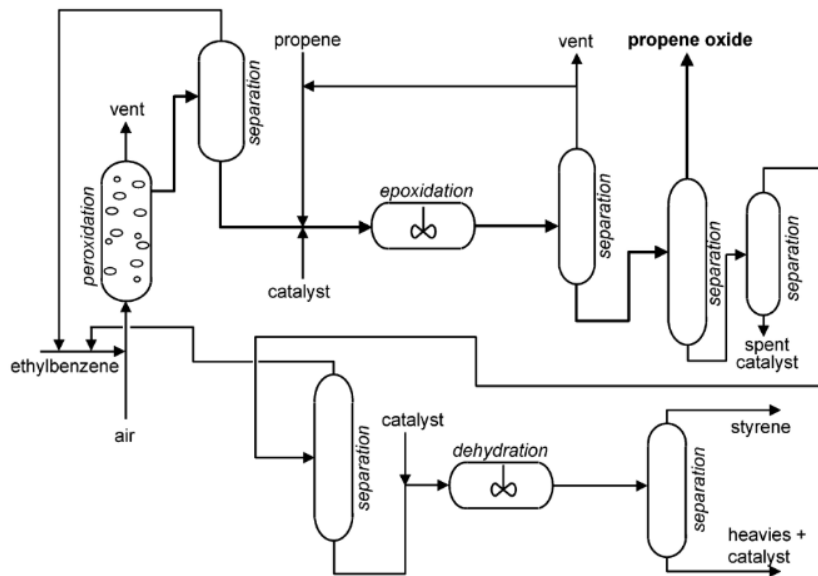


Fig. 5.5 Proceso por hidroperóxidos orgánicos

Fuente: (Nijhuis, 2006)

Las características de los procesos de hidroperóxido son que resultan selectivos y producen muchos menos residuos que el proceso de la clorohidrina. Sin embargo, la mayor desventaja de los procesos de hidroperóxido es que siempre se produce una cantidad fija de coproducto. Dado que los mercados para el óxido de propeno y los coproductos no están vinculados, podría surgir un problema si la demanda de uno de los productos colapsara. Debido a que el uso de MTBE como aditivo para combustibles se está volviendo menos favorable, las últimas plantas que se han construido utilizando tecnología de hidroperóxido son todas del tipo PO-SM.

La Figura 5.5 demuestra esquemáticamente el proceso PO-SM. El principio básico del proceso PO-TBA es similar al del proceso PO-SM, por lo que ambos procesos se discuten simultáneamente. El primer reactor convierte el etilbenceno o el isobutano de manera no catalítica en su hidroperóxido correspondiente mediante oxidación directa en fase líquida, utilizando oxígeno o aire. La oxidación se realiza usualmente en una columna de burbujeo a 400 K y 30 bar cuando se usa isobutano, o a 423 K y 2 bar en el caso del etilbenceno. La ecuación de esta reacción en el proceso PO-SM se presenta a continuación:

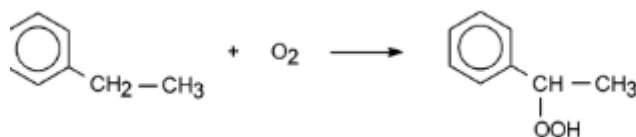


Fig. 5.6 Per-oxidación del estireno

Fuente: (Nijhuis, 2006)

Una desventaja de los procesos que utilizan isobutano es que una fracción relativamente grande del TBHP producido se descompone inmediatamente a TBA, reduciendo así la relación de óxido de propeno a coproducto. Los hidrocarburos no reaccionados se eliminan y reciclan. La corriente de hidroperóxido se envía a un segundo reactor, donde reacciona catalíticamente con propeno para producir óxido de propeno y un alcohol. La temperatura en este reactor es de aproximadamente 373 K a 30 bar de presión. El reactor utilizado para la epoxidación es

usualmente un reactor compartimentado con alimentación escalonada de propeno. La conversión total en los reactores es >95% (del hidroperóxido) con una selectividad >95% hacia el óxido de propeno, y el único subproducto producido es acetona. La reacción muestra la reacción de epoxidación en el proceso PO–SM:

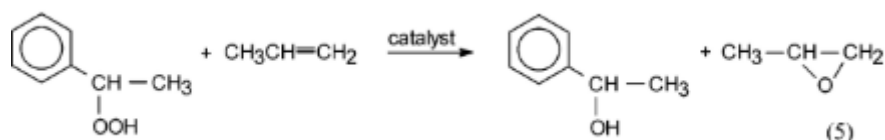


Fig. 5.7 Epoxidación del propileno

Fuente: (Nijhuis, 2006)

La mayoría de los procesos utilizan un catalizador homogéneo de tungsteno, molibdeno o vanadio, o bien un catalizador heterogéneo a base de titanio para catalizar la reacción de epoxidación. La eliminación de un catalizador homogéneo causa un problema de residuos/separación. Después del reactor, el propeno y el óxido de propeno se eliminan consecutivamente de la corriente líquida. En el caso del proceso PO–SM, la corriente restante todavía contiene algo de etilbenceno sin reaccionar, el cual luego se elimina y recicla. La corriente de alcohol puede entonces deshidratarse para producir estireno o isobuteno, o, para el proceso PO–TBA, el alcohol *terc*-butílico puede usarse directamente. Una reacción secundaria importante que puede ocurrir en esta deshidratación es la oligomerización del estireno producido, lo que resulta en una pérdida de actividad del catalizador y reduce su vida útil.

Proceso Sumitono

En el año 1999, Sumitomo Chemical inició investigaciones de laboratorio para desarrollar un nuevo proceso para la producción de óxido de propileno (PO) libre de coproductos. Este desarrollo culminó en 2003 con la puesta en marcha de la primera planta comercial. En la actualidad, operan cuatro plantas bajo esta tecnología, alcanzando una capacidad total de 900.000 toneladas anuales.

Aunque este método está estrechamente relacionado con los procesos de hidroperóxidos tradicionales (como PO-SM o PO-TBA), su innovación principal radica en el reciclaje del portador de oxígeno. El proceso consta de un ciclo de tres etapas de reacción (oxidación, epoxidación e hidrogenación) y dos etapas posteriores de purificación. La gran ventaja de este sistema es que el alcohol generado no se vende como subproducto, sino que se reconvierte a cumeno para ser reutilizado en el ciclo, lo que otorga total independencia de los mercados de coproductos, una limitación clave de los procesos convencionales.

Etapa 1: oxidación (formación de CMHP)

En la primera etapa, el cumeno se oxida con oxígeno para formar hidroperóxido de cumeno (CMHP). Esta es una reacción de autooxidación que se lleva a cabo en una emulsión alcalina y no requiere catalizador.

El uso de cumeno presenta ventajas operativas significativas frente al etilbenceno (utilizado en el proceso PO-SM):

- Estabilidad y selectividad: el cumeno es más fácil de hidroperoxidar y más estable. La selectividad para el CMHP es del 95% al 98%, muy superior al rango de 72-77% del hidroperóxido de etilbenceno (EBHP).
- Cinética: la reacción de oxidación es hasta cinco veces más rápida que la del etilbenceno, y la conversión por paso puede ser hasta dos veces más alta.



Fig. 5.8 Oxidación del cumeno

Fuente: (Nijhuis, 2006)

Etapa 2: Epoxidación

Posteriormente, el CMHP reacciona con propileno para obtener óxido de propileno (PO) y alcohol α, α -dimetilbencílico (también referido como CMA). Esta etapa se realiza en un sistema heterogéneo utilizando silicalita de titanio como catalizador.

Las condiciones de operación son críticas para maximizar el rendimiento:

- Condiciones: se opera a 60 °C y a una presión suficiente para mantener el propileno en fase líquida.
- Relación de reactivos: se emplea un exceso de propileno (relación molar 10:1 propileno-CMHP) para incrementar la velocidad de reacción.
- Control de impurezas: la alimentación debe contener menos del 1% de agua para evitar la hidrólisis del PO a glicoles.
- Control térmico: dado que la epoxidación es exotérmica, el control de temperatura es vital para evitar la descomposición térmica del hidroperóxido. Esto se logra mediante reactores con lechos de catalizador divididos e intercambiadores de calor intermedios.

Bajo estas condiciones, la conversión del CMHP supera el 95%. Las selectividades son excelentes: 95% con respecto al hidroperóxido y 99% con base en el propileno (Cavani & Gaffney, 2009).

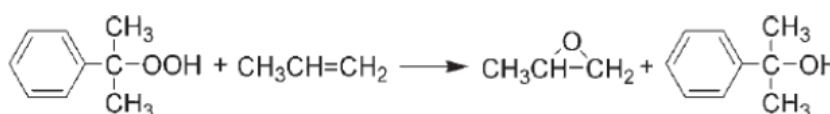


Fig. 5.9 Reacción de epoxidación de propileno

Fuente: (Nijhuis, 2006)

Etapa 3: Separación y reciclaje

Finalmente, tras separar el exceso de propileno, la mezcla de reacción se destila para separar una corriente liviana, rica en PO, de una corriente pesada que contiene cumeno y alcohol α , α -dimetilbencílico.

- El cumeno no reaccionado se recupera y recircula directamente.
- El CMA se somete a un proceso de deshidratación e hidrogenación (utilizando catalizadores como óxido de cobre-cromo) para regenerar el cumeno original, el cual se reintroduce al inicio del proceso, cerrando así el ciclo sin generación neta de coproductos.

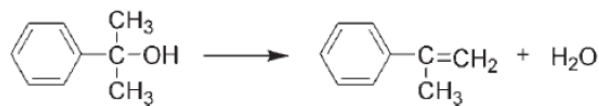


Fig. 5.10 Deshidratación del CMA

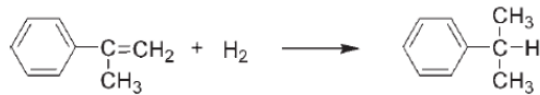


Fig. 5.11 Deshidrogenación del CMA

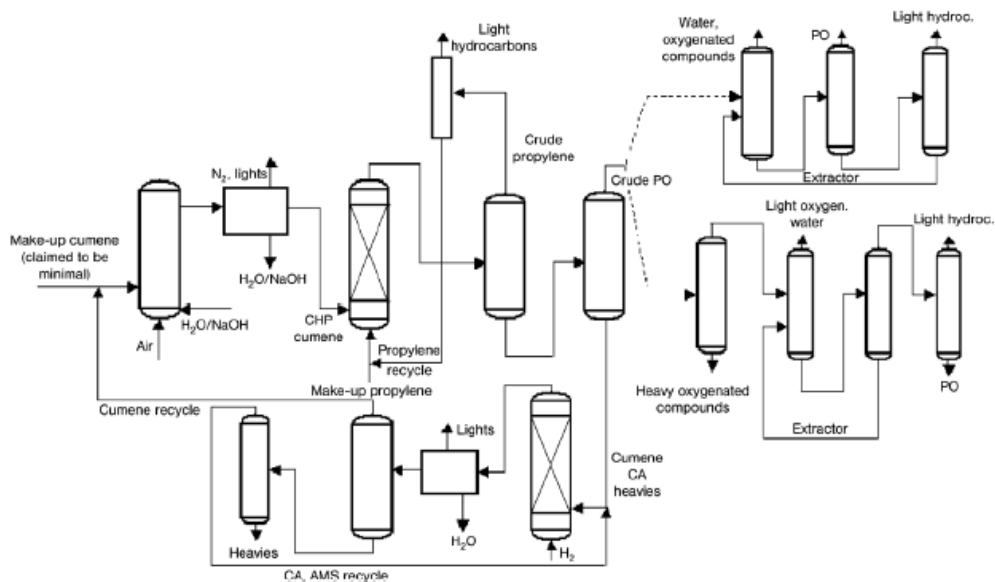


Fig. 5.12 Diagrama de flujo del proceso Sumitono

Fuente: (Nijhuis, 2006)

5.2.3 Opción tecnológica 3

Proceso con peróxido de hidrógeno (HPPO)

Un desarrollo reciente en la producción de óxido de propeno es su obtención utilizando peróxido de hidrógeno generado en un proceso integrado. El paso más costoso en muchos procesos químicos es la separación de los productos, lo cual también aplica para la producción de peróxido de hidrógeno. Actualmente, la mayor parte del peróxido de hidrógeno se produce utilizando el proceso de autooxidación de la antrahidroquinona. En este proceso, el peróxido se genera en forma diluida en una mezcla de agua y metanol. La zeolita silicalita de titanio-1 (TS-1) es capaz de epoxidar el propeno muy selectivamente utilizando peróxido de hidrógeno diluido. Para esta reacción también son posibles muchos otros catalizadores.

Una característica de ahorro de costos en este proceso es que, en lugar de separar el peróxido de hidrógeno producido, este puede utilizarse directamente en la epoxidación del propeno. La separación del propeno y del óxido de propeno de la mezcla de agua y metanol puede lograrse fácilmente, lo que permite una excelente integración entre el proceso de peróxido de hidrógeno y el proceso de epoxidación de propeno. Este proceso integrado fue desarrollado originalmente por Enichem, pero finalmente fue comercializado por Dow-BASF. La tecnología utilizada para la producción de peróxido de hidrógeno es proporcionada por Solvay, que participa en una *joint venture* (empresa conjunta) con BASF para suministrar el peróxido necesario para la epoxidación.

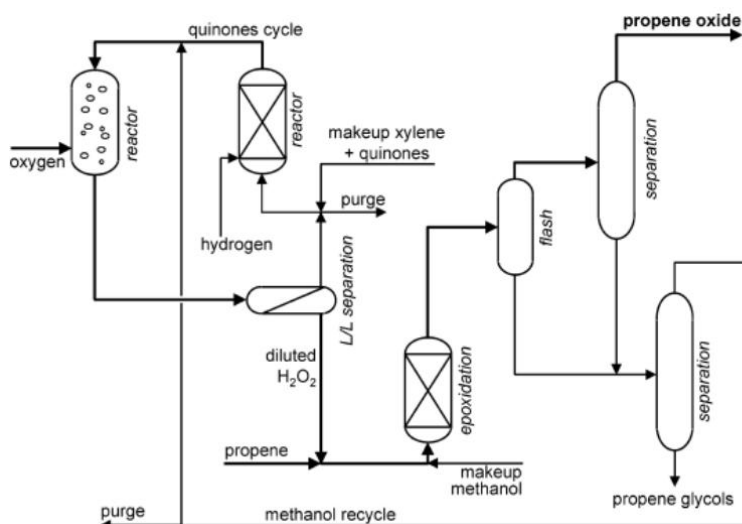


Fig. 5.13 Diagrama de flujo para HPPO

Fuente: (Nijhuis, 2006)

En la Figura 5.13 se ofrece una representación simplificada de dicho proceso integrado. Los dos reactores en la parte izquierda de esta figura representan la síntesis de peróxido de hidrógeno a partir de hidrógeno y oxígeno utilizando antrahidroquinonas, y el reactor del centro corresponde al reactor de epoxidación. Cuando las quinonas utilizadas en este proceso se someten a ciclos alternos de oxidación y reducción, producen peróxido de hidrógeno. Estas etapas de oxidación y reducción se llevan a cabo en dos reactores separados. Se emplea una columna de burbujeo para la oxidación de las quinonas, etapa durante la cual se genera el

peróxido de hidrógeno. Por otro lado, para la hidrogenación de las quinonas catalizada por paladio, se puede utilizar un reactor de suspensión (*slurry*), de lecho fijo o un reactor monolítico. Ambas operaciones, tanto la hidrogenación como la oxidación, se realizan a aproximadamente 320 K y 1,2 bar. Las reacciones siguientes ilustran las reacciones de producción de peróxido de hidrógeno para la 2-etilantrahidroquinona, que es la más comúnmente utilizada.

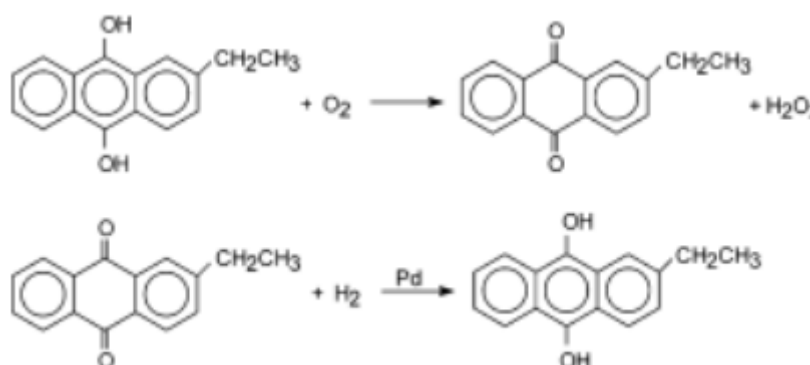


Fig. 5.14 Reacciones en serie de formación de 2-etilantrahidroquinona

Fuente: (Nijhuis, 2006)

Si la planta hiciera in situ el H_2O_2 , la síntesis de peróxido de hidrógeno se lleva a cabo en una mezcla compuesta por una fase hidrofóbica (por ejemplo, xileno) y una fase hidrofílica (agua + metanol). Estas fases se separan utilizando un decantador, tras lo cual se obtiene una corriente de agua y metanol que contiene el peróxido de hidrógeno. Finalmente, el peróxido de hidrógeno presente en esta corriente se utiliza para epoxidar propeno (alcanzando una conversión cercana al 100%), empleando TS-1 como catalizador.

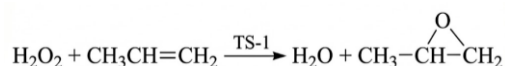


Fig. 5.15 Reacción química principal para PO

Fuente: Elaboración propia

La reacción de epoxidación utilizando TS-1 se lleva a cabo en un reactor de lecho fijo a 313 K y presión atmosférica. Tras algunos pasos de separación relativamente sencillos, se obtiene el óxido de propeno y la mezcla de agua y metanol se retorna a la etapa de síntesis de peróxido de hidrógeno.

Aunque también es posible utilizar otros catalizadores, como el óxido de molibdeno o el óxido de tungsteno, para epoxidar propeno con peróxido de hidrógeno, todos estos catalizadores son extremadamente sensibles a la presencia de agua. Por otro lado, no se prefieren los catalizadores homogéneos debido a los costos adicionales de separación que implican.

Degussa–Headwaters está comercializando una ruta comparable para la producción de óxido de propeno. Ellos han integrado con éxito un proceso para producir óxido de propeno utilizando peróxido de hidrógeno con el nuevo proceso Degussa–Uhde para la producción directa de peróxido de hidrógeno a partir de hidrógeno y oxígeno.

Un enfoque diferente en esta ruta de epoxidación sería llevar a cabo las tres reacciones (la oxidación y reducción de las quinonas y la epoxidación) en el mismo reactor. Este proceso se demostró a escala de laboratorio; sin embargo, su aplicación práctica se vería complicada por la naturaleza explosiva de la mezcla de hidrógeno y oxígeno. Además, la producción de peróxido de hidrógeno utilizando quinonas en un reactor único aún no se ha aplicado industrialmente, lo que hace que este enfoque sea más precario que el proceso de reactores separados. Una opción podría ser producir peróxido de hidrógeno utilizando catalizadores de oro, pero este sistema todavía se encuentra en una etapa temprana de investigación. Se ha demostrado que se puede producir óxido de propeno a escala de laboratorio utilizando un catalizador de Pd–Pt/TS-1, el cual también produce el peróxido de hidrógeno *in situ*. Sin embargo, la desactivación del catalizador y la oxidación del disolvente (metanol) siguen siendo problemas importantes. (Nijhuis, 2006)

5.2.4 Proceso seleccionado

Se presenta a continuación una matriz de ponderaciones para la selección de la tecnología:

| Criterio | Peso relativo | Clorhidrina | Hidroperóxidos (PO/SM/Cumeno) | HPPO |
|-------------------------------|---------------|-------------|-------------------------------|------|
| Impacto ambiental | 0,3 | 2 | 6 | 10 |
| Independencia de subproductos | 0,25 | 7 | 3 | 10 |
| Simplicidad del proceso | 0,2 | 5 | 4 | 9 |
| Seguridad operativa | 0,15 | 3 | 7 | 8 |
| Eficiencia energética | 0,1 | 5 | 6 | 8 |
| Puntaje total | 1 | 4,3 | 5 | 9,25 |

Tabla 5.1 Matriz ponderada de tecnologías disponibles

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Tabla 5.1, la tecnología HPPO obtiene la puntuación más alta (9.25), superando significativamente a las alternativas tradicionales.

- Clorhidrina (4.30): resulta penalizada fuertemente por su impacto ambiental (generación de salmuera y clorados) y los riesgos de seguridad asociados al cloro.
- Hidroperóxidos (5.00): aunque es un proceso probado, su puntaje se ve afectado por la baja independencia de coproductos; la necesidad de gestionar y vender grandes

volúmenes de Estireno o MTBE añade una complejidad comercial y logística no deseada para este proyecto.

- HPPO (9.25): se destaca por obtener la máxima puntuación en impacto ambiental e independencia, al ser un proceso limpio que solo genera agua y PO. Además, la simplicidad de su tren de separación (al no tener que purificar coproductos) favorece un menor costo de inversión y operación.

En base al análisis cuantitativo, se selecciona el proceso HPPO como la tecnología a desarrollar en la ingeniería de este proyecto.

5.3 Ingeniería básica

5.3.1 Diagrama de flujo del proceso

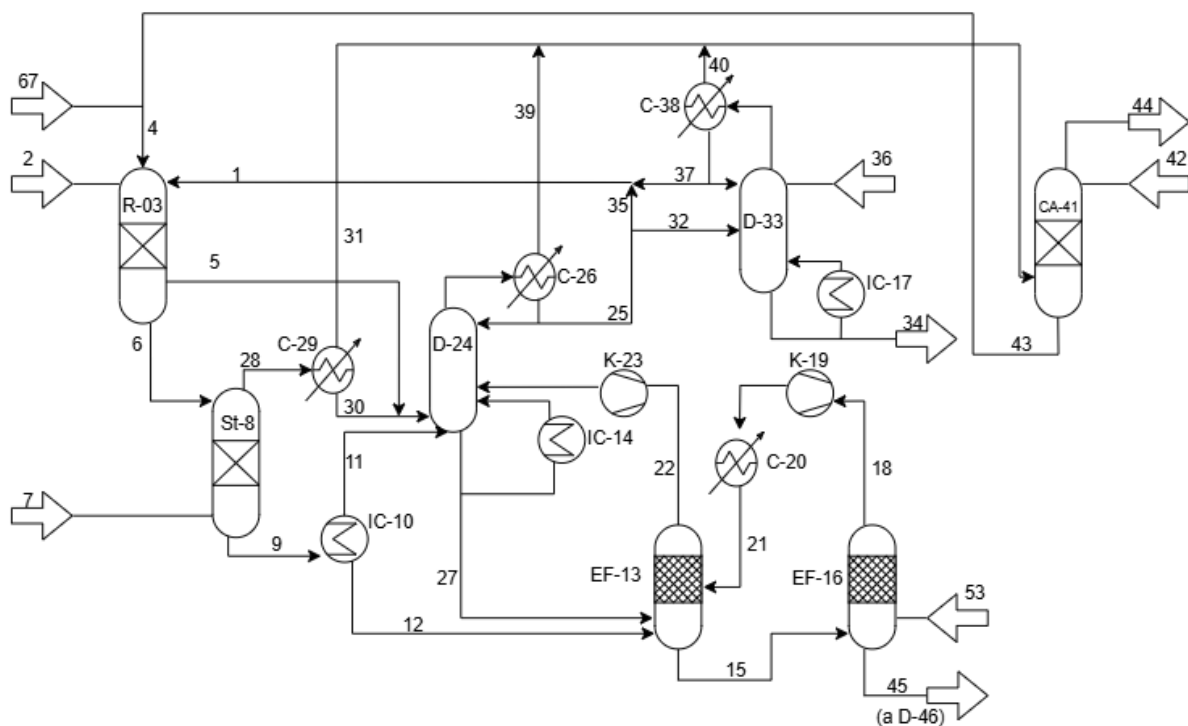


Fig. 5.16 Diagrama de flujo del proceso HPPO

Fuente: Elaboración propia a partir de (Alemania Patente nº EP3380458B1, 2019)

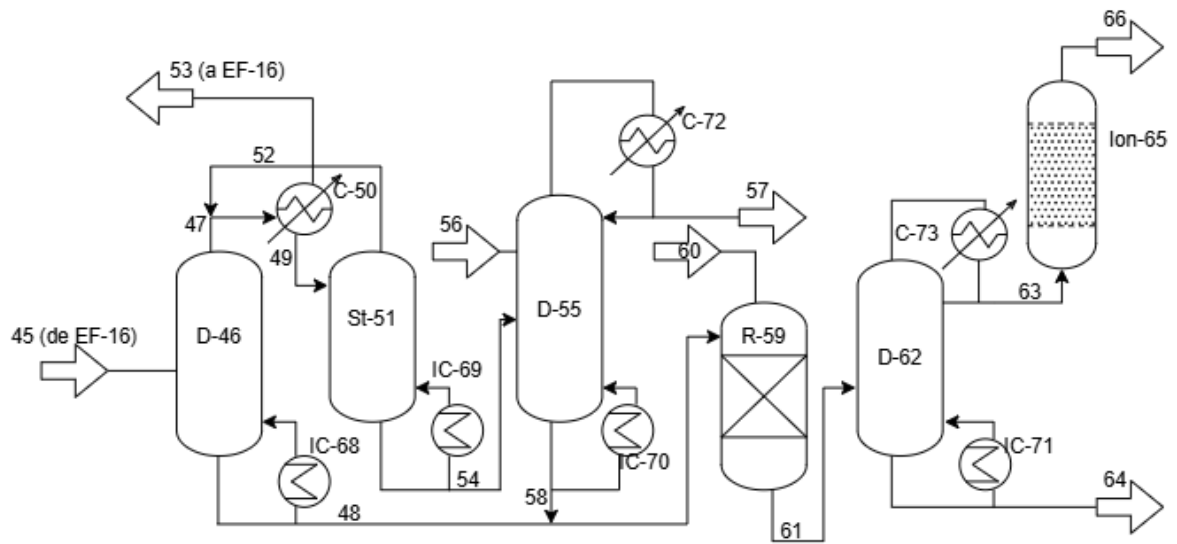


Fig. 5.17 Diagrama de flujo del proceso HPPO (purificación)

Fuente: Elaboración propia a partir de (Alemania Patente nº EP3380458B1, 2019)

| N° | Corriente / Equipo | Descripción |
|-----------|------------------------------|---|
| 1 | Alimentación de propileno | Propileno alimentado al reactor de epoxidación R-03 |
| 2 | Peróxido de hidrógeno | Agente oxidante de la reacción |
| R-03 | Reactor de epoxidación | Reactor con catalizador de silicalita de titanio |
| 4 | Metanol | Metanol utilizado como solvente |
| 5 | Fase líquida | Fase líquida separada rica en propeno |
| 6 | Mezcla de reacción líquida | Fase rica en agua y metanol |
| 7 | Nitrógeno | Gas inerte para stripping |
| St-8 | Columna de stripping | Equipo de despojamiento con N ₂ |
| 9 | Mezcla de reacción despojada | Corriente líquida tras stripping |
| IC-10 | Intercambiador de calor | Pre calentador con evaporación parcial de propeno |
| 11 | Corriente de vapor | Vapor generado en el intercambiador |
| 12 | Corriente líquida | Corriente líquida desde el intercambiador |
| EF-13 | Primer evaporador flash | Primera reducción de presión |
| IC-14 | Intercambiador de calor | Reboiler de la columna de destilación D-24 |
| 15 | Fase líquida (1er flash) | Líquido tras el primer flash |
| EF-16 | Segundo evaporador flash | Segunda reducción de presión |
| IC-17 | Intercambiador de calor | Reboiler de la columna de destilación D-33 |
| 18 | Fase vapor (2° flash) | Vapor del segundo flash |

| | | |
|------|----------------------------------|---|
| K-19 | Compresor | Compresión del vapor del 2º flash |
| C-20 | Condensador | Enfriamiento del vapor comprimido |
| 21 | Corriente del condensador | Vapor y/o líquido tras condensación |
| 22 | Fase vapor (1er flash) | Vapor del primer flash |
| K-23 | Compresor | Compresión del vapor del 1er flash |
| D-24 | Columna de destilación | Recuperación de propileno |
| 25 | Propeno recuperado | Producto de cabeza de D-24 |
| C-26 | Condensador de D-24 | Condensación del overhead de D-24 |
| 27 | Fondos de D-24 | PO, metanol y propeno disuelto |
| 28 | Gas de stripping | Gas saliente de la columna de stripping |
| C-29 | Condensador de St-8 | Condensación del gas de stripping |
| 30 | Condensado del stripper | Líquido condensado del gas de stripping |
| 31 | Gas residual | Gas no condensado del stripper |
| 32 | Fracción de propileno recuperado | Propileno enviado a D-33 |
| D-33 | Columna de destilación | Separación propeno / propano |
| 34 | Fondos de D-33 | Corriente rica en propano |
| 35 | Propileno reciclado | Propeno retornado al reactor |
| 36 | Propileno fresco | Alimentación fresca a D-33 |
| 37 | Cabeza de D-33 | Propeno purificado |

| | | |
|-------|-----------------------------------|---|
| C-38 | Condensador de D-33 | Condensación del overhead de D-33 |
| 39 | Gas no condensado (C-26) | Gases no condensables del condensador |
| 40 | Gas no condensado (C-38) | Gases no condensables del condensador |
| CA-41 | Columna de absorción | Absorción de propeno en metanol |
| 42 | Metanol recuperado | Metanol absorbente |
| 43 | Metanol cargado con propileno | Metanol enriquecido en propileno |
| 44 | Gas de salida | Gas empobrecido en propileno |
| 45 | Fase líquida (2º flash) | Corriente líquida hacia pre-separación |
| D-46 | Columna de pre-separación | Separación inicial de PO |
| 47 | Cabeza de pre-separación | PO, metanol y propeno |
| 48 | Fondos de pre-separación | Metanol, agua y H ₂ O ₂ |
| 49 | Corriente PO–metanol | Líquido condensado |
| C-50 | Condensador | Condensador de la cabeza D-46 |
| St-51 | Columna de stripping de propileno | Eliminación de propileno residual |
| 52 | Cabeza del stripping de propeno | Corriente rica en propeno |
| 53 | Vapor residual | Vapor no condensado |
| 54 | Fondos del stripping de propeno | PO y metanol |
| D-55 | Columna de óxido de propileno | Destilación extractiva |
| 56 | Solución acuosa con hidrazina | Solvente extractivo |

| | | |
|--------|-----------------------------------|---|
| 57 | Óxido de propileno purificado | Producto final |
| 58 | Fondos columna PO | Agua y metanol |
| R-59 | Reactor de hidrogenación | Eliminación de H ₂ O ₂ y carbonilos |
| 60 | Hidrógeno | Reactivo de hidrogenación |
| 61 | Corriente hidrogenada | Corriente tratada |
| D-62 | Columna de destilación de metanol | Recuperación de metanol |
| 63 | Cabeza de metanol | Metanol recuperado |
| 64 | Fondos de metanol | Agua y subproductos |
| Ion-65 | Intercambiador catiónico | Remoción de aminas |
| 66 | Metanol recuperado | Metanol purificado |
| 67 | Corriente al reactor | Metanol reciclado al reactor |
| 68 | Intercambiador de calor | Reboiler de la columna de destilación D-46 |
| 69 | Intercambiador de calor | Reboiler de la columna de stripping St-51 |
| 70 | Intercambiador de calor | Reboiler de la columna de destilación D-55 |
| 71 | Intercambiador de calor | Reboiler de la columna de destilación D-62 |
| 72 | Condensador | Condensador de la columna D-55 |
| 73 | Condensador | Condensador de la columna D-62 |

Tabla 5.2 Resumen de corrientes y equipos principales involucrados

Fuente: Elaboración propia

5.3.2 Descripción del proceso

Una corriente de alimentación de propileno (1), que puede comprender propileno fresco (36) y propileno reciclado (35, 37), se hace reaccionar de forma continua con una corriente de peróxido de hidrógeno (2), típicamente en forma de una solución acuosa que contiene 70 % en peso de H₂O₂, en un reactor de epoxidación (R-03). El reactor contiene un lecho fijo de un catalizador de titanosilicalita TS-1, preferentemente en forma extruida o esférica, con un tamaño de partícula seleccionado para minimizar la caída de presión y maximizar la selectividad. (Alemania Patente n° EP3380458B1, 2019)

La reacción de epoxidación se lleva a cabo en presencia de un solvente orgánico polar, preferentemente metanol (4), a una presión de operación de aproximadamente 2,4 MPa, suficiente para mantener la mayor parte del propileno en fase líquida. La temperatura de reacción se mantiene típicamente en el rango de 40 a 70 °C, más preferentemente entre 50 y 60 °C, mediante control térmico externo, dado que la reacción es exotérmica.

El propileno se utiliza preferentemente en una relación molar propileno/peróxido de hidrógeno de 1,1:1 a 30:1, más preferentemente de 2:1 a 10:1 y aún más preferentemente de 3:1 a 5:1, con el fin de maximizar la selectividad a óxido de propileno y minimizar la formación de subproductos. El tiempo espacial del reactor se selecciona típicamente entre 0,5 y 2 h⁻¹.

La cantidad de propileno alimentado se elige lo suficientemente alta como para proporcionar, a la salida del lecho fijo del catalizador, una mezcla de reacción líquida que comprende dos fases líquidas:

- una fase líquida rica en propileno (5), de menor densidad;
- una mezcla de reacción líquida (6) rica en agua, metanol y óxido de propileno, la cual tiene una densidad mayor que la de la fase rica en propileno.

La mezcla de reacción líquida (6) se somete a stripping con una corriente de nitrógeno (7) en una columna de stripping (St-8), diseñada preferentemente como una columna de platos o relleno estructurado, operando a una presión cercana a la del reactor (típicamente entre 2,2 y 2,4 MPa). El caudal de nitrógeno se selecciona para remover la mayor parte del propileno disuelto sin arrastrar cantidades significativas de metanol u OP.

La mezcla de reacción despojada (9) se calienta en un intercambiador de calor (IC-10), donde una parte del propileno residual disuelto se evapora para formar una corriente de vapor (11). La temperatura de salida del intercambiador se ajusta típicamente entre 60 y 90 °C, dependiendo del equilibrio vapor-líquido del sistema.

La corriente líquida resultante (12) se envía a un primer evaporador flash (EF-13), provisto de un demister para evitar el arrastre de gotas líquidas, donde la presión se reduce hasta aproximadamente 0,6 MPa. En estas condiciones se produce una separación adicional de propileno y compuestos livianos.

La fase líquida (15) obtenida en el primer evaporador flash se envía a un segundo evaporador flash (EF-16), también provisto de un demister, donde la presión se reduce adicionalmente hasta aproximadamente 0,13 MPa, promoviendo una desgasificación más profunda.

La fase vapor (18) formada en el segundo evaporador flash (EF-16) se comprime mediante un compresor (K-19), se enfría en un condensador (C-20) y la corriente resultante (21) se envía

nuevamente al primer evaporador flash (EF-13). En dicho evaporador, la fracción líquida de la corriente (21) se combina con el líquido formado por la despresurización de la corriente (12), mientras que la fracción vapor se combina con la fase vapor generada en EF-13.

La fase vapor (22) del primer evaporador flash se comprime mediante un compresor (K-23) y se envía a la sección inferior de una columna de destilación (D-24), operada a una presión de aproximadamente 2,1 MPa. Esta columna se diseña para recuperar propileno de alta pureza como producto de cabeza.

Una corriente líquida de propileno recuperado (25) se obtiene como producto de cabeza desde el condensador de la columna (C-26), con una pureza típicamente superior al 99 % molar. Los fondos de la columna (27), que comprenden óxido de propileno, metanol y propileno disuelto, se envían al primer evaporador flash (EF-13) para recuperación adicional de propileno.

El gas de stripping (28) procedente de la columna de stripping (St-8) se enfría en un condensador (C-29), obteniéndose un condensado del stripper (30) y una corriente de gas de salida (31). La corriente de vapor (11), el condensado del stripper (30) y la fase líquida rica en propileno (5) se envían conjuntamente a la sección inferior de la columna (D-24) para maximizar la recuperación de propileno.

Una parte (32) de la corriente de propileno recuperado (25) se envía a una segunda columna de destilación D-33, operada también a aproximadamente 2,1 MPa, donde se elimina el propano presente como impureza. La columna se diseña y opera preferentemente con un número de etapas teóricas y una relación de reflujo suficientes para proporcionar un producto de fondos (34) que contenga menos del 10% en peso de propileno, preferentemente menos del 2% en peso de propileno.

La parte restante (35) de la corriente de propileno recuperado se devuelve al reactor (R-03) como parte de la alimentación de propileno (1). El propileno fresco de alimentación (36) se introduce en la columna D-33 cerca de la parte superior, y el producto de cabeza (37) del condensador (C-38) se envía al reactor como alimentación y parcialmente como reflujo para controlar la temperatura de cabeza.

La corriente de gas de salida (31) de la columna de stripping (St-8) y los gases no condensados (39, 40) de los condensadores (C-26, C-38) se envían a una columna de absorción (CA-41), operada a una presión de aproximadamente 2,0 MPa, donde el propileno se absorbe en una corriente (42) de metanol recuperado. La corriente resultante (43), rica en metanol y propileno, se recicla al reactor como parte del solvente (4), mientras que la corriente gaseosa empobrecida en propileno (44) se descarga o se envía a tratamiento.

La fase líquida (45) obtenida en el segundo evaporador flash se envía a una columna de pre-separación (D-46), donde se separa por destilación para proporcionar una corriente de cabeza (47) que comprende óxido de propileno, metanol y propileno residual, y un producto de fondos (48) que comprende metanol, agua y peróxido de hidrógeno no reaccionado.

Una corriente líquida (49), rica en óxido de propileno y metanol, se condensa en un condensador (C-50). El propileno residual se elimina por stripping de dicha corriente en una columna de stripping de propileno (St-51). La corriente de cabeza (52) de esta columna se combina con la corriente (47), mientras que el vapor residual (53) del condensador (C-50) se devuelve al segundo evaporador flash (EF-16).

La corriente de fondos (54) de la columna de stripping de propileno se envía a la columna de óxido de propileno (D-55), donde se somete a una destilación extractiva utilizando una solución acuosa (56) que comprende hidrazina como solvente extractivo. La columna se diseña para obtener óxido de propileno purificado (57) como producto de cabeza, con una pureza superior al 99,9 % en peso, adecuado para grado polímero.

La corriente de fondos (58) de la columna D-55, que comprende agua y metanol, se combina con el producto de fondos (48) de la columna de pre-separación y se envía a un reactor de hidrogenación (R-59). En este reactor, operado típicamente a 50–120 °C y 2–5 MPa, se hidrogena con hidrógeno (60) en presencia de un catalizador para eliminar el peróxido de hidrógeno no reaccionado y subproductos carbonílicos.

La corriente hidrogenada (61) se envía a una columna de destilación de metanol (D-62), donde se separa en un producto de cabeza de metanol (63) y un producto de fondos (64) que comprende agua y subproductos, el cual se descarga. El metanol recuperado se trata en un intercambiador catiónico (Ion-65) en forma hidrógeno para eliminar trazas de aminas orgánicas, obteniéndose una corriente de metanol purificado (66). Una parte de esta corriente se utiliza como absorbente (42) en la columna de absorción y el resto, combinado con metanol de reposición, se recicla como corriente (67) al reactor de epoxidación. (Alemania Patente n° EP3380458B1, 2019)

| Equipo | Tipo | Presión de trabajo | Temperatura operativa | Observaciones de diseño |
|---------------|----------------------------------|---------------------------|------------------------------|--|
| R-03 | Reactor lecho fijo | 2,4 MPa | 50–60 °C | TS-1, relación C ₃ /H ₂ O ₂ = 3–5 |
| St-8 | Columna stripping N ₂ | 2,2–2,4 MPa | 40–60 °C | Remoción de C ₃ disuelto |
| IC-10 | Intercambiador | 2,2 MPa | hasta 90 °C | Pre-flash de C ₃ |
| C-29 | Condensador | 0,1 MPa | hasta 50 °C | Separar propileno + N ₂ de líquidos |
| EF-13 | Flash + demister | 0,6 MPa | 40–70 °C | Recuperación primaria C ₃ |
| EF-16 | Flash + demister | 0,13 MPa | 30–60 °C | Desgasificación profunda |
| K-19 | Compresor | 0,13 → 0,6 MPa | — | Reciclo vapores |
| K-23 | Compresor | 0,6 → 2,1 MPa | — | Alimentación D-24 |
| D-24 | Destilación propileno | 2,1 MPa | 40–60 °C cabeza | ≥99 % mol C ₃ |
| D-33 | Destilación propano | 2,1 MPa | similar D-24 | Fondo <1 % p/p C ₃ |
| CA-41 | Absorción | 2,0 MPa | 30–50 °C | Absorción C ₃ en MeOH |
| D-46 | Pre-separación | 0,1–0,3 MPa | — | OP/MeOH vs H ₂ O |
| St-51 | Stripping propileno | 0,1–0,3 MPa | — | Remoción C ₃ residual |
| D-55 | Destilación extractiva | 0,1 MPa | — | Hidrazina |
| R-59 | Hidrogenación | 2–5 MPa | 50–120 °C | Eliminación H ₂ O ₂ |

| | | | | |
|------|------------------|---------|--------------|------------------|
| D-62 | Destilación MeOH | 0,1 MPa | 65 °C cabeza | Reciclo solvente |
|------|------------------|---------|--------------|------------------|

Tabla 5.3 Resumen de equipos utilizados y valores de diseño relevantes.

Fuente: Elaboración propia

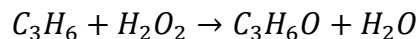
5.4 Ingeniería de detalle

5.4.1 Reactor de epoxidación R-03

Bases de cálculo y parámetros operativos

- Capacidad anual de PO: 23000 ton/año.
- Tiempo de operación: 8160 h/año.
- Flujo de producción de PO: 2818,63 kg/h.
- Conversión de H₂O₂ (χ)= 99%.
- Selectividad hacia PO: 99,7%.
- Alimentación de H₂O₂: solución acuosa al 70% m/m.
- Relación molar propileno/H₂O₂: 3:1.

La epoxidación del propileno con peróxido de hidrógeno sobre el catalizador TS-1 es:



Pesos moleculares (g/mol)

Propileno: 42,08

Peróxido de hidrógeno: 34,01

Óxido de propileno: 58,08

Agua: 18

Metanol: 32,04

Para producir 2818,63 kg/h de PO con una selectividad del 99,7%, los moles puestos en juego son:

- 48530,13 mol PO/h
- $\frac{48530,13 \text{ mol/h}}{0,997} = 48676,16 \text{ mol PH/h}$ que deben reaccionar
- Solución de PH al 70% , $\frac{48676,16 \text{ mol/h} \times 34,01 \text{ g/mol}}{0,7} = 2364,97 \text{ Kg PH/h}$

Para el propileno alimentado (1)

- Relación molar propileno/PH de 3:1, $48530,13 \text{ mol/h} \times 3 = 145.590,39 \text{ mol/h}$
- Masa de propileno $145.590,39 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \times 42,08 \text{ g/mol} = 6126,44 \text{ Kg/h}$

Para el solvente utilizado, metanol (4), la relación molar óptima es de 8:1 frente al PH.

$$a. 48676,16 \text{ mol} \frac{PH}{h} \times 8 \times 32,04 \frac{g}{\text{mol}} = 12467,67 \text{ Kg MeOH/h}$$

| Componente | Entrada (kg/h) | Salida (kg/h) | Observación |
|-------------------------------|--|--|--------------------------------------|
| Propileno | 6126,44 | 4078,15 | Exceso que se recicla (relación 3:1) |
| H ₂ O ₂ | 1655,47 (puro) | 4,97 kg/h (no reaccionan, o dan productos secundarios) | 99,7% de selectividad |
| Metanol | 12476,67 | 12476,67 | Solvente |
| Agua | 709,48 (asociada a H ₂ O ₂) | 873,54 (producida) + 709,48 = 1583 | Agua asociada + producida |
| PO | 0 | 2818,6 | Producto objetivo |

Tabla 5.4 Flujos de entrada y salida del reactor R-03

Fuente: Elaboración propia

Balance de masa y energía para el reactor flujo pistón

- a. En un PFR (flujo pistón), el balance se plantea por diferencial de masa de catalizador (W)

$$\frac{dx}{dW} = \frac{-r'_{PH}}{F_{PH,0}} \quad \text{Ec 5.1}$$

Donde $-r'_{HP}$ es la velocidad de consumo de peróxido de hidrógeno en $\text{mol.g}_{\text{cat}}^{-1}.\text{s}^{-1}$

- b. Para estimar la masa de catalizador TS-1 (W), se utiliza como valor de velocidad espacial óptimo de $1,2 \text{ h}^{-1}$

Con una alimentación de H₂O₂ puro de 1655,47 kg/h

$$W = \frac{\text{Flujo de H}_2\text{O}_2}{\text{Velocidad espacial}} = \frac{1655,47 \text{ Kg/h}}{1,2 \text{ h}^{-1}} = 1379,55 \text{ Kg de TS} - 1 \quad \text{Ec 5.2}$$

Este es el valor mínimo. En la práctica, se suele usar un exceso para compensar la desactivación, por lo que estimamos 2000 kg para asegurar estabilidad a largo plazo. El exceso planteado es necesario para compensar el decaimiento de la actividad y asegurar que la planta sea estable durante el año operativo de 340 días.

- c. Cálculo de la constante cinética (k')

Utilizando el método integral, suponiendo primer orden respecto al H₂O₂

$$k' = \frac{F_{v0}}{W} (-\ln(1 - X_A)) \quad \text{Ec 5.3}$$

Sabiendo que $\chi = 0,99$, $F_{v0} = 0,00385195 \text{ m}^3/\text{s}$

$$k' = \frac{0,00385195 \text{ m}^3/\text{s}}{2000 \text{ Kg}} (-\ln(1 - 0,99)) = 0,00000887 \text{ m}^3 \cdot \text{Kg}_{\text{cat}}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \quad \text{Ec 5.4}$$

d. Consideración de la desactivación del catalizador

La actividad decae en el tiempo de la siguiente forma:

$$a = e^{-t_d t} \quad \text{Ec 5.5}$$

La zeolita TS-1 tiene una vida útil probada de más de 6000 h (fuente)

Se suele considerar el final de la vida útil cuando la actividad cae al 50% ($a=0,5$), entonces utilizando la Ec 5.5:

$$0,5 = e^{-k_d \cdot 6000 \text{ h}}$$

$$k_d = \frac{\ln(0,5)}{6000} = 1,15 \cdot 10^{-4} \text{ h}^{-1}$$

La ecuación del balance de energía puesta en la reacción sigue la siguiente ecuación:

$$\frac{dT}{dW} = \frac{-r'_{PH}(-\Delta H) - U \cdot a \cdot (T - T_a)}{F C_p} \quad \text{Ec. 5.6}$$

Siendo $U \cdot a \cdot (T - T_a)$ el calor de remoción del refrigerante (agua) en la camisa del reactor para no sobrepasar los 55 °C. El término $-r'_{PH}(-\Delta H)$ representa la energía liberada por la reacción exotérmica. Se considera isotérmico para simplificaciones de cálculo, por lo cual $\frac{dT}{dW} = 0$.

Cálculo de volumen de reactor.

Ecuación de diseño

$$\frac{dX}{dW} = \frac{-r'_{PH}}{F_{PH,0}} \quad \text{Ec 5.7}$$

Donde:

- $F_{PH,0}$ = flujo molar de entrada de H_2O_2 puro, $13,66 \text{ mol/s}$ ($\frac{1672,2 \text{ Kg/h}}{3600 \times 34,01 \text{ g/mol}} \times 1000$)
- $-r'_{PH} = k' \cdot C_{\text{H}_2\text{O}_2}$
- $k' = 8,87 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}_{\text{cat}}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

Dimensionamiento del volumen de reactor R-03 (V)

La densidad aparente del lecho (ρ_{bulk}) se estima en 632 kg/m^3 .

$$V_{lecho} = \frac{W}{\rho_{bulk}} = \frac{2000 \text{ kg}}{632 \text{ kg/m}^3} = 3,16 \text{ m}^3 \quad \text{Ec 5.8}$$

Los números de tubos se calculan de la siguiente manera:

$$N_{tubos} = \frac{V_{lecho}}{\text{Área transversal} \times \text{Largo de tubos}} \quad \text{Ec 5.9}$$

Se propone un largo de tubos L de 6 m y un diámetro de 1,5", utilizando la ecuación Ec 5.9:

$$N_{tubos} = \frac{3,16 \text{ m}^3}{\left(\frac{\pi * (0,0381 \text{ m})^2}{4}\right) * 6 \text{ m}} = 462 \text{ tubos}$$

- Cada uno de los 462 tubos tienen 1,5" (38,1 mm), y comprende un área exterior de $0,00114 \text{ m}^2$. Ocupan un área transversal total de aproximadamente $0,52 \text{ m}^2$ ($3,16 \text{ m}^3/6 \text{ m}$).
- El pitch o paso entre tubos generalmente es 1,25 del diámetro, para que el agua de enfriamiento pueda liberar el calor generado.
- Factor de empaque: considerando el espacio necesario para el agua de enfriamiento (coraza), el área total del cabezal suele ser el doble de la de los tubos. ($0,52 \text{ m}^2 \times 2$)
- Diámetro de coraza de reactor: tendría un diámetro de aproximadamente 1,1 a 1,3 m.

Al usar un radio de 0,6 m, el volumen total del cilindro (reactor) exterior es de:

$$V = \pi r^2 H \quad \text{Ec 5.10}$$

$$V = \pi \cdot (0,6 \text{ m})^2 \cdot 6 \text{ m} = 6,79 \text{ m}^3$$

Calor generado: diseño de intercambio

El calor generado por la reacción es igual al calor removido por el agua de enfriamiento ya que se supone un estado isotérmico

$$r'_{PH} \cdot (-\Delta H) = U \cdot a \cdot (T - T_a) \quad \text{Ec 5.11}$$

El calor generado se calcula en base al flujo de entrada de H_2O_2 ($13,66 \text{ mol/s}$) y el calor de reacción puesto en juego -219.454 KJ/kmol (dato suministrado por DWSIM)

$$Q_{gen} = F_{molar} \cdot \Delta H \quad \text{Ec. 5.12}$$

$$Q_{gen} = 13,66 \text{ mol/s} \cdot 219,45 \text{ kJ/mol} = 2997,687 \text{ kW} \approx 3 \text{ MW}$$

Con los 462 tubos de 6 metros de largo y con uno supuesto de $U = 500 \text{ W/m}^2\text{K}$

Área de transferencia:

$$A_{\text{tubo}} = \pi \cdot d_t \cdot L \quad \text{Ec. 5.13}$$

$$A_{\text{tubo}} = 0,0381 \text{ m} \cdot 6 \text{ m} \cdot \pi = 0,7181 \text{ m}^2/\text{tubo}$$

$$A_{\text{tubo}} = 462 \text{ tubos} \cdot 0,7181 \text{ m}^2/\text{tubo} = 331,79 \text{ m}^2$$

El calor a remover es de 2997687 W.

El DMLT necesaria será de:

$$\Delta T_{ML} = \frac{Q}{U \cdot A} = \frac{2997687 \text{ W}}{500 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 331,79 \text{ m}^2} = 18,07 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{Ec 5.14}$$

El diseño es térmicamente bueno ya que un ΔT de 18,07 °C es ideal ya que permite que la temperatura del agua sea lo suficientemente baja para enfriar, pero no tanto como para requerir un sistema de refrigeración costoso (chiller), sólo con agua de enfriamiento de torre es correcto.

Para mantener la reacción isotérmica en 55 °C, el agua debería entrar, por ejemplo, a 28°C y salir a 48 °C (media de 38°C). Esto da un margen de casi 10 °C antes de que el agua sea demasiado caliente para ser útil.

Simulación en DWSIM

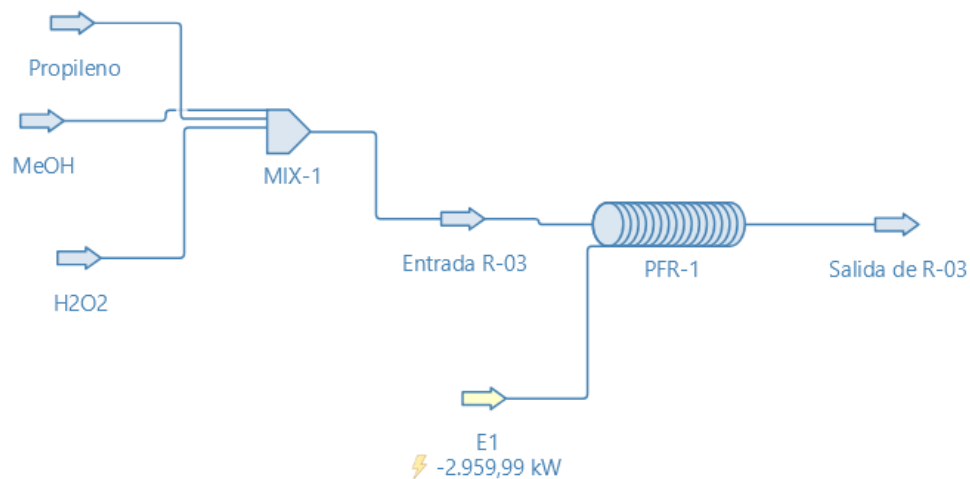


Fig. 5.18 Diagrama de flujo R-03 en DWSIM

| Salida de R-03 | | | | | |
|--|---------------|---------------|---------------|-----------|--------|
| Compound Amounts - Basis: Fracción molar | | | | | |
| Compuestos / Fases | Overall | Vapor | Líquido 1 | Líquido 2 | Sólido |
| Methanol | 0,56546822 | 0,028834789 | 0,56546822 | 0 | 0 |
| Propylene | 0,089190323 | 0,93629963 | 0,089190323 | 0 | 0 |
| 1,2-propylene oxide | 0,12291906 | 0,03164808 | 0,12291906 | 0 | 0 |
| Water | 0,22240092 | 0,0032174804 | 0,22240092 | 0 | 0 |
| Hydrogen peroxide | 2,1472521E-05 | 2,2251386E-08 | 2,1472521E-05 | 0 | 0 |
| Fracción | | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Total | | | | | |

Fig. 5.19 Corriente de salida del reactor

Nombre: R-03
 Descripción:

Components and Stoichiometry

| Nombre | Peso molar | ΔH_f (kJ/kg) | Incluir | A/C | SC |
|---------------------|------------|----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|----|
| Methanol | 32,0419 | -6271,17 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | 0 |
| Propylene | 42,0797 | 480,754 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | -1 |
| 1,2-propylene oxide | 58,078 | -1613,69 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | 1 |
| Water | 18,0153 | -13422,7 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | 1 |
| Hydrogen peroxide | 34,0147 | -4007,39 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | -1 |

Estequiometría: OK Equilibrar Calor de reacción (kJ/kmol_{BC}): -219454

Ecuación: CH2CHCH3 + HOOH <--> CH3-CHCH2O + HOH Componente base: Hydrogen peroxide

Heterogeneous Kinetic Reaction Parameters

Base: Molar Concentrations Fase: Mixture Tmin (K): 0 Tmax (K): 2000

Unidades de Cantidad:

Fig. 5.20 Parámetros de diseño del reactor

| Objeto | Salida de R-03 | Propileno | MeOH | H2O2 | |
|--------------|----------------|-----------|---------|---------|-------|
| Temperatura | 310,763 | 298,15 | 298,15 | 298,15 | K |
| Presión | 2,32664E+06 | 2,4E+06 | 2,4E+06 | 2,4E+06 | Pa |
| Flujo másico | 5,88773 | 1,72415 | 3,5 | 0,6636 | kg/s |
| Flujo molar | 174,913 | 40,9734 | 109,232 | 24,7071 | mol/s |

Fig. 5.21 Tabla maestra de propiedades de entrada y salida

Parámetros de cálculo
 General Dimensiones Catalyst Info Anotaciones Avanzado

Reactive Volume: 6,79 m³

Sizing Information: Largura Diameter

Tube Length: 5,95566 m

Tube Diameter: 38,1 mm

Number of Tubes: 1000

Catalyst Loading information are required when dealing with Heterogeneous Catalytic Reactions.

Catalyst Loading: 632 kg/m³

Catalyst Particle Diameter: 2 mm

Catalyst Void Fraction: 0,4

Fig. 5.22 Dimensiones del reactor y propiedades del catalizador

El reactor R-03 opera como un equipo de flujo pistón (PFR) multitubular diseñado para procesar 23.000 ton/año de óxido de propileno mediante la epoxidación catalítica con zeolita TS-1. Con una masa de catalizador de 2.000 kg distribuida en 462 tubos de 6 metros, el sistema garantiza una conversión del 99% de peróxido de hidrógeno y una selectividad del 99,7% hacia el producto objetivo.

La gestión térmica es crítica debido a la liberación de 3 MW de energía, la cual es removida mediante una corriente de agua de enfriamiento en la coraza que mantiene el proceso en condiciones isotérmicas a 55 °C, asegurando la estabilidad operativa y previniendo la desactivación acelerada del lecho.

5.4.2 Columna de stripping St-8

Este equipo tiene las siguiente entradas/salidas para analizar su diseño:

- Alimentación (corriente 6): viene del reactor R-03 cargada con agua, metanol, PO y el propeno que no reaccionó, calculado anteriormente.
- Agente de stripping (Corriente 7): se utiliza N₂ como gas inerte para arrastrar el propeno.
- Producto de fondo (corriente 9): es la mezcla de reacción "despojada" de gases, lista para ir al intercambiador IC-10.
- Producto de tope (corriente 28): Gas de stripping que contiene el propeno recuperado, el cual debe ir al condensador C-29.

Para el diseño de esta torre de relleno, se necesita valores típicos de transferencia de masa

- Relación gas/líquido (G/L): se necesita suficiente caudal de N₂ para que la presión parcial del propileno en la fase gaseosa sea lo suficientemente baja para despojarlo del líquido.
- El stripping suele favorecerse a presiones bajas y temperaturas moderadas.
- Número de unidades de transferencia (NOG): número de platos teóricos necesarios para realizar el despojamiento adecuado.

Para diseñar la torre, primero se calcula cuánto propileno queda atrapado en el líquido de la corriente 6: sabiendo que por la tabla 5.5 quedan restante 4078,15 kg/h de propileno, y considerando que el 95% sale por la corriente 5, la corriente 6 contendría 203,9 kg/h de propileno.

La carga líquida total del R-03 (sin propileno) es de 2818,6 kg/h de PO, 12476,67 kg/h MeOH y 1583 kg/h de agua, sumando un total de 16878,27 kg/h. Algo de esa corriente total líquida también se va por 6, aunque la menor parte.

| Componente | Flujo total (kg/h) | Corriente 5 [kg/h] | Corriente 6 [kg/h] |
|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Propileno | 4.078,15 | 3.874,24 (95%) | 203,91 (5%) |
| PO | 2.818,60 | 422,79 (15%) | 2.395,81(85%) |
| Metanol | 12.476,67 | 249,53 (2%) | 12.227,14 (98%) |
| Agua | 1.583,00 | 1,58 (0,1%) | 1.581,42 (99,9%) |
| TOTAL [kg/h] | 20.956,42 | 4.548,14 | 16.408,28 |

Tabla 5.5 Resumen de componentes de corrientes 5 y 6

Fuente: Elaboración propia

La columna recibirá la corriente 6, que es una fase acuosa-metanólica de 16.408,28 kg/h cargada con 203,91 kg/h de propileno disuelto. El objetivo analítico es reducir esa concentración de propileno a niveles de trazas (menores al 0,1% en peso) utilizando nitrógeno como agente de despojo. Dado que se opera a una presión elevada de 2,4 MPa, el diseño debe ser robusto para manejar la alta densidad del gas y garantizar que la fuerza impulsora de la transferencia de masa sea constante a lo largo de toda la altura del equipo.

El primer paso es determinar el diámetro de la columna mediante el criterio de velocidad de inundación. Con un flujo líquido de aproximadamente 16,4 t/h, la columna se ve limitada por el tráfico de líquido más que por el de vapor, ya que la cantidad de nitrógeno inyectado es relativamente baja en comparación.

El soluto (propileno) se transfiere de la fase líquida (Corriente 6) a la fase gaseosa (Nitrógeno, Corriente 7). Dado que el propileno es muy volátil y su solubilidad en la mezcla metanol-agua es baja, la resistencia principal a la transferencia de masa reside en la fase líquida. Por lo tanto, utilizaremos el modelo de unidades globales de transferencia referidas al líquido N_{tOL} y H_{tOL} .

a. Cálculo de número de unidades de transferencia

Para soluciones diluidas, como es este caso (sólo el propileno representa el 1,2% de la corriente líquida), la ecuación de diseño para el N_{tOL} es:

$$N_{tOL} = \frac{\ln\left[\frac{(x_2-y_1)/m}{(x_1-y_1)/m(1-A)}\right]+A}{1-A} \quad \text{Ec 5.15}$$

Siendo, x_1 y x_2 fracciones molares de propileno a la entrapa (tope) y a la salida(fondo de la torre). Se busca una recuperación del 99%, por lo que x_1 será casi 0 (0,01). y_1 es la fracción

molar de propileno en la entrada, que es 0 porque entra N₂ puro. m es la pendiente de la curva de equilibrio (ley de Henry) que tiende a ser grande en este caso. A es el factor de adsorción definido como $A = \frac{L}{m \cdot G}$. En stripping se busca un factor de despojo $S = \frac{1}{A}$ mayor a 1,2.

$$x_2 = \frac{203,91/42}{2395,81/58,08 + 12227,14/32 + 1581,42/18 + 203,91/42} = 0,0094 \quad \text{Ec 5.16}$$

Composición molar de $x_1 = 0,01.0,0094 = 0,000094$

- $y_1 = 0$
- $A = 0,15$ (S mayor a 1,2)
- m es mayor a 25 (ley de Henry)

Utilizando la ecuación 5.15 y reemplazando valores:

$$N_{tOLtOL} = \frac{\ln\left[\frac{(0,0094)/25}{(0,000094)/25}(1-0,15)\right] + 0,15}{1-0,15} = 5,4 \text{ unidades de transferencia}$$

b. Cálculo de altura de unidades de transferencia

La ecuación de diseño utilizada es:

$$H_{tOL} = \frac{L}{K_L a(1-x) \cdot M} \quad \text{Ec 5.17}$$

Siendo L flujo másico por unidad de área. Representa cuánto líquido fluye por cada metro cuadrado de área transversal de la torre por segundo. Observando la tabla 5.6 se estima el valor de L como 5,5 kg/m².s para anillos Raschig de 1”.

| Empaque | Tamaño nominal | | Rango de L' | | | m | K | P |
|--------------------|----------------|----------|----------------------|-----------------------|-------|-------------------|-------|-------------------|
| | mm | in | kg/m ² ·s | lb/ft ² ·h | m | | | |
| Anillos de Raschig | 13 | 0.5 | 0.68-2.0 | 500-1500 | 28.01 | 0.2323L' = 0.30 | -1.04 | |
| | | | 2.0-6.1 | 1500-4500 | 14.69 | | | 0.01114L' + 0.148 |
| | 25 | 1 | 0.68-2.0 | 500-1500 | 34.42 | 0 | 0.552 | |
| | | | 2.0-6.1 | 1500-4500 | 68.2 | | | 0.0389L' = 0.0793 |
| | 38 | 1.5 | 0.68-2.0 | 500-1500 | 36.5 | 0.0498L' = 0.1013 | 0.274 | |
| | | | 2.0-6.1 | 1500-4500 | 40.11 | | | 0.01091L' = 0.022 |
| 50 | 2 | 0.68-2.0 | 500-1500 | 31.52 | 0 | 0.481 | | |
| | | 2.0-6.1 | 1500-4500 | 34.03 | | | 0 | 0.362 |
| Sillas de Berl | 13 | 0.5 | 0.68-2.0 | 500-1500 | 16.28 | 0.0529 | 0.761 | |
| | | | 2.0-6.1 | 1500-4500 | 25.61 | | | 0.0529 |
| | 25 | 1 | 0.68-2.0 | 500-1500 | 52.14 | 0.0506L' = 0.1029 | 0 | |
| | | | 2.0-6.1 | 1500-4500 | 73.0 | | | 0.0310L' = 0.0630 |
| | 38 | 1.5 | 0.68-2.0 | 500-1500 | 40.6 | -0.0508 | 0.455 | |
| | | | 2.0-6.1 | 1500-4500 | 62.4 | | | 0.0240L' = 0.0996 |

Tabla 5.6 Configuración de empaques en la columna

Fuente: (Perry, R. H., & Green, D. W., 2008)

El K_L (coeficiente volumétrico de transferencia de masa) es una medida de qué tan rápido se transfiere el propileno del líquido al gas, suponiendo en este caso un valor típico para anillos

rasching de $0,0068 \text{ s}^{-1}$. El término "a" representa el área interfacial (superficie del relleno) por unidad de volumen empacado. $(1-x) \cdot M$ (media logarítmica de la fracción de inerte) define que para soluciones muy diluidas (donde el propileno es solo el 1,2% de la mezcla), este valor es prácticamente 1, ya que la fracción molar del solvente $(1-x)$ es casi la unidad en toda la torre. Utilizando la Ec. 5.17 y reemplazando valores:

$$H_{tOL} = \frac{5,5 \text{ Kg/m}^2 \text{ s}}{0,0068 \text{ s}^{-1} 1000 \text{ Kg/m}^3 \cdot 1} = 0,81 \text{ m}$$

La altura total del lecho se calcula como:

$$Z = H_{tOL} \cdot N_{tOL} \quad \text{Ec 5.18}$$

$$Z = 5,4 \cdot 0,81 \text{ m} = 4,374 \text{ m}$$

Para el cálculo de la columna St-8, el flujo másico de líquido es $\frac{16408,28 \text{ Kg/h}}{3600 \text{ s/h}} = 4,56 \text{ kg/s}$

El área transversal será de $S = \frac{\text{Flujo}}{L} = \frac{4,56 \text{ kg/s}}{5,5 \text{ kg/m}^2 \text{ s}} = 0,83 \text{ m}^2$, por ende el diámetro $D = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,83 \text{ m}^2}{\pi}} = 1,03 \text{ m}$.

El caudal de N_2 necesario se estima como

$$G = \frac{S \cdot L}{m} \quad \text{Ec 5.19}$$

Siendo L el caudal molar de la corriente líquida:

$$L = 2395,81/58,08 + 12227,14/32 + 1581,42/18 = 511,2 \text{ kmol/h}$$

$$G = \frac{1,5 \cdot 511,2 \text{ kmol/h}}{25} = 30,672 \text{ kmol/h} = 858,82 \text{ kg/h}$$

Finalmente, el balance de energía en la St-8 es simplificado debido a su carácter isotérmico, pero es vital considerar que el nitrógeno debe entrar precalentado o a la temperatura de la torre para no enfriar la mezcla y afectar la solubilidad del gas.

La salida de tope (28) llevará el nitrógeno cargado con el propileno recuperado hacia el condensador C-29, donde se enfriará para recuperar la mayor cantidad de orgánicos antes de que el gas inerte siga su camino hacia la columna de absorción CA-41.

| Componente | 6 [kg/h] | 28 [kg/h] | 9 [kg/h] | Justificación |
|----------------|-----------|-----------|----------|---|
| Propileno | 203,91 | 201,87 | 2,04 | Recuperación del 99% por stripping. |
| PO | 2.395,81 | 23,96 | 2.371,85 | Arrastre mínimo estimado (1%). |
| Metanol | 12.227,14 | 61,14 | 12.166 | Arrastre bajo (0,5%) por ser el solvente. |
| Agua | 1.581,42 | 0,16 | 1.581,26 | Prácticamente nulo (0,01%) en el tope. |
| N ₂ | 0 | 858,2 | 0 | Gas inerte de despojo (Corr. 7) |

Tabla 5.7 Resumen de corrientes de St-8

5.4.3 Intercambiador de calor IC-10

Para su diseño se requiere un balance de energía. Primero, se calcula cuánta energía se necesita para calentar y evaporar parcialmente la corriente 9 (16121,15 kg/h).

El calor sensible puesto en juego desde los 50 °C (salida de St-8) a 80°C se calcula de la siguiente manera, estimando un Cp de la mezcla de 3,2 kJ/kg°C.

$$Q_S = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad \text{Ec 5.20}$$

$$Q = 16121,15 \text{ kg/h} \cdot 3,2 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \cdot 30^\circ\text{C} = 1547,63 \text{ kJ/h} = 430 \text{ kW}$$

Para evaporar el propileno residual y una posible fracción de metanol/PO que actúa como gas de arrastre, se asume una vaporización de 322,423 kg/h para la corriente 11 (2% de líquidos + propileno casi en su totalidad).

$$Q_L = 322,43 \text{ kg/h} \cdot 800 \text{ kJ/kg} = 257938,4 \text{ kJ/h} = 71,65 \text{ kW}$$

$$Q_T = 71,65 \text{ kW} + 430 \text{ kW} = 501,65 \text{ kW}$$

Se utiliza vapor saturado de baja presión a 130 °C como fluido calefactor, lo que proporciona una diferencia de temperatura media logarítmica de:

$$\Delta T_{LM} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad \text{Ec 5.21}$$

$$\Delta T_{LM} = \frac{(130^{\circ}\text{C} - 50^{\circ}\text{C}) - (130^{\circ}\text{C} - 80^{\circ}\text{C})}{\ln\left(\frac{80^{\circ}\text{C}}{50^{\circ}\text{C}}\right)} = 63,83^{\circ}\text{C}$$

Aplicando un coeficiente global de transferencia de calor $U = 850 \text{ W/m}^2\text{K}$, el cual es característico para este tipo de evaporadores parciales donde la ebullición mejora significativamente la transferencia, obtenemos un área de intercambio requerida de:

$$A = \frac{Q}{W\Delta T_{LM}} \quad \text{Ec 5.22}$$

$$A = \frac{501650\text{W}}{850 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 63,83 \text{ K}} = 9,25 \text{ m}^2$$

Se utilizan tubos de acero inoxidable BWG16 estándar, con un diámetro exterior de $\frac{3}{4}$ " , con un largo de 3m. área por tubo. Haciendo uso de la Ec 5.13:

$$A_{tubo} = \pi \cdot 0,01905 \text{ m} \cdot 3 \text{ m} = 0,1795 \text{ m}^2$$

El número de tubos se ve definido como:

$$N_{tubos} = \frac{9,25 \text{ m}^2}{0,1795 \text{ m}^2} = 52 \text{ tubos en un paso.}$$

Para asegurarse el flujo turbulento, se comprueba el $N^{\circ}\text{Re}$ mayor a 10.000. El flujo por tubo es:

$$m = \frac{16121,15\text{kg/h}}{52 \text{ tubos}} = 310 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 0,086 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \text{ por tubo.}$$

El área interna del tubo BWG 16 con d_i de 0,01575 m es de $a = 0,00019482 \text{ m}^2$. Por ende, la velocidad será de :

$$v = \frac{0,086 \text{ kg/s}}{850 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,00019482 \text{ m}^2} = 0,52 \text{ m/s}$$

El $N^{\circ}\text{Re}$ queda definido como

$$Re = \frac{\rho v d_i}{\mu} \quad \text{Ec 5.23}$$

$$Re = \frac{850 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,52 \text{ m/s} \cdot 0,01575 \text{ m}}{0,0005 \text{ Pa}\cdot\text{s}} = 13.904,58$$

Verificando un valor mayor a 10.000 (régimen turbulento).

| DISPOSICION DE TUBOS EN INTERCAMBIADORES DE CALOR | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|------|------|-----|-----|-----|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----|----|----|----------------------------|---------------------------|
| 37 | 35 | 33 | 31 | 29 | 27 | 25 | 23 1/4 | 21 1/2 | 19 1/4 | 17 1/4 | 15 1/4 | 13 1/2 | 12 | 10 | 8 | Diámetro carcasa (pulgada) | |
| 1269 | 1143 | 1019 | 881 | 763 | 663 | 553 | 481 | 391 | 307 | 247 | 193 | 135 | 105 | 69 | 33 | 3/4" en 15/16" Δ | Tubos fijos |
| 1127 | 1007 | 889 | 765 | 667 | 577 | 493 | 423 | 343 | 277 | 217 | 157 | 117 | 91 | 37 | 33 | 3/4" en 1" Δ | |
| 965 | 865 | 765 | 665 | 587 | 495 | 419 | 355 | 287 | 235 | 183 | 139 | 101 | 85 | 33 | 33 | 3/4" en 1" □ | |
| 699 | 633 | 551 | 481 | 427 | 361 | 307 | 247 | 205 | 163 | 133 | 103 | 73 | 57 | 33 | 15 | 1" en 1 1/4" Δ | |
| 595 | 545 | 477 | 413 | 359 | 293 | 257 | 215 | 179 | 139 | 111 | 83 | 65 | 45 | 33 | 17 | 1" en 1 1/4" □ | |
| 1242 | 1098 | 964 | 846 | 734 | 626 | 528 | 452 | 370 | 300 | 228 | 166 | 124 | 94 | 58 | 32 | 3/4" en 15/16" Δ | Dos pasos tubos fijos |
| 1088 | 972 | 858 | 746 | 646 | 556 | 468 | 398 | 326 | 264 | 208 | 154 | 110 | 90 | 28 | 28 | 3/4" en 1" Δ | |
| 946 | 840 | 746 | 644 | 560 | 486 | 408 | 346 | 280 | 222 | 172 | 126 | 94 | 78 | 48 | 26 | 3/4" en 1" □ | |
| 888 | 808 | 730 | 652 | 582 | 518 | 458 | 402 | 348 | 292 | 242 | 192 | 142 | 102 | 32 | 16 | 1" en 1 1/4" Δ | |
| 594 | 522 | 450 | 402 | 348 | 296 | 248 | 210 | 172 | 136 | 106 | 76 | 56 | 40 | 26 | 12 | 1" en 1 1/4" □ | |
| 1126 | 1008 | 882 | 768 | 648 | 558 | 460 | 398 | 304 | 234 | 180 | 134 | 94 | 64 | 34 | 8 | 3/4" en 15/16" Δ | Dos pasos tubos en "U" |
| 1000 | 882 | 762 | 674 | 566 | 484 | 406 | 336 | 270 | 212 | 158 | 108 | 72 | 60 | 26 | 8 | 3/4" en 1" Δ | |
| 884 | 778 | 688 | 586 | 506 | 436 | 362 | 304 | 242 | 188 | 142 | 100 | 72 | 52 | 30 | 12 | 3/4" en 1" □ | |
| 610 | 532 | 466 | 396 | 340 | 284 | 234 | 192 | 154 | 120 | 84 | 58 | 42 | 26 | 8 | XX | 1" en 1 1/4" Δ | |
| 526 | 464 | 406 | 356 | 304 | 256 | 214 | 180 | 134 | 100 | 76 | 58 | 36 | 22 | XX | XX | 1" en 1 1/4" □ | |
| 1172 | 1024 | 904 | 788 | 680 | 576 | 484 | 412 | 332 | 266 | 196 | 154 | 108 | 84 | 48 | XX | 3/4" en 15/16" Δ | Cuatro pasos tubos fijos |
| 1024 | 912 | 802 | 692 | 596 | 508 | 424 | 360 | 292 | 232 | 180 | 134 | 96 | 72 | 44 | XX | 3/4" en 1" Δ | |
| 880 | 778 | 688 | 590 | 510 | 440 | 366 | 308 | 242 | 182 | 142 | 100 | 72 | 58 | 44 | XX | 3/4" en 1" □ | |
| 638 | 560 | 486 | 422 | 368 | 308 | 258 | 212 | 176 | 138 | 104 | 78 | 60 | 44 | 24 | XX | 1" en 1 1/4" Δ | |
| 534 | 476 | 414 | 360 | 310 | 260 | 214 | 188 | 142 | 110 | 84 | 78 | 48 | 40 | XX | XX | 1" en 1 1/4" □ | |
| 1092 | 976 | 852 | 740 | 622 | 534 | 438 | 378 | 286 | 218 | 166 | 122 | 84 | 56 | 28 | XX | 3/4" en 15/16" Δ | Cuatro pasos tubos en "U" |
| 968 | 852 | 744 | 648 | 542 | 462 | 386 | 318 | 254 | 198 | 146 | 98 | 64 | 52 | 20 | XX | 3/4" en 1" Δ | |
| 882 | 748 | 660 | 560 | 482 | 414 | 342 | 286 | 222 | 174 | 130 | 90 | 64 | 44 | 24 | XX | 3/4" en 1" □ | |
| 584 | 508 | 440 | 376 | 322 | 266 | 218 | 168 | 142 | 110 | 74 | 50 | 36 | 20 | XX | XX | 1" en 1 1/4" Δ | |
| 500 | 440 | 384 | 336 | 286 | 238 | 198 | 166 | 122 | 90 | 66 | 50 | 32 | 16 | XX | XX | 1" en 1 1/4" □ | |
| 1106 | 964 | 844 | 732 | 632 | 532 | 440 | 372 | 294 | 230 | 174 | 116 | 80 | XX | XX | XX | 3/4" en 15/16" Δ | Seis pasos tubos fijos |
| 964 | 852 | 744 | 640 | 548 | 464 | 388 | 322 | 258 | 202 | 156 | 104 | 66 | XX | XX | XX | 3/4" en 1" Δ | |
| 818 | 724 | 634 | 536 | 460 | 394 | 324 | 266 | 212 | 158 | 116 | 78 | 54 | XX | XX | XX | 3/4" en 1" □ | |
| 586 | 514 | 442 | 382 | 338 | 274 | 226 | 182 | 150 | 112 | 82 | 56 | 34 | XX | XX | XX | 1" en 1 1/4" Δ | |
| 484 | 430 | 368 | 318 | 268 | 226 | 184 | 154 | 116 | 86 | 66 | 44 | XX | XX | XX | XX | 1" en 1 1/4" □ | |
| 1058 | 944 | 826 | 716 | 596 | 510 | 416 | 358 | 272 | 206 | 156 | 110 | 74 | XX | XX | XX | 3/4" en 15/16" Δ | Seis pasos tubos en "U" |
| 940 | 826 | 720 | 626 | 518 | 440 | 366 | 300 | 238 | 184 | 134 | 88 | 56 | XX | XX | XX | 3/4" en 1" Δ | |
| 820 | 718 | 632 | 534 | 458 | 392 | 322 | 268 | 210 | 160 | 118 | 80 | 56 | XX | XX | XX | 3/4" en 1" □ | |
| 562 | 488 | 426 | 356 | 304 | 252 | 206 | 168 | 130 | 100 | 68 | 42 | 30 | XX | XX | XX | 1" en 1 1/4" Δ | |
| 478 | 420 | 362 | 316 | 268 | 224 | 182 | 152 | 110 | 80 | 60 | 42 | XX | XX | XX | XX | 1" en 1 1/4" □ | |
| 1040 | 902 | 790 | 682 | 576 | 484 | 398 | 332 | 258 | 198 | 140 | 94 | XX | XX | XX | XX | 3/4" en 15/16" Δ | Ocho pasos tubos fijos |
| 902 | 798 | 692 | 588 | 496 | 422 | 344 | 286 | 224 | 170 | 124 | 82 | XX | XX | XX | XX | 3/4" en 1" Δ | |
| 760 | 662 | 576 | 490 | 414 | 352 | 288 | 228 | 174 | 132 | 94 | XX | XX | XX | XX | XX | 3/4" en 1" □ | |
| 542 | 466 | 400 | 342 | 288 | 240 | 190 | 154 | 120 | 90 | 66 | XX | XX | XX | XX | XX | 1" en 1 1/4" Δ | |
| 438 | 388 | 334 | 280 | 230 | 192 | 150 | 128 | 94 | 74 | XX | XX | XX | XX | XX | XX | 1" en 1 1/4" □ | |
| 1032 | 916 | 796 | 688 | 578 | 490 | 398 | 342 | 254 | 190 | 142 | 102 | 68 | XX | XX | XX | 3/4" en 15/16" Δ | Ocho pasos tubos en "U" |
| 908 | 796 | 692 | 600 | 498 | 422 | 350 | 286 | 226 | 170 | 122 | 82 | 52 | XX | XX | XX | 3/4" en 1" Δ | |
| 792 | 692 | 604 | 512 | 438 | 374 | 306 | 254 | 194 | 146 | 106 | 70 | 48 | XX | XX | XX | 3/4" en 1" □ | |
| 540 | 464 | 404 | 340 | 290 | 238 | 190 | 154 | 118 | 90 | 58 | 38 | XX | XX | XX | XX | 1" en 1 1/4" Δ | |
| 456 | 396 | 344 | 300 | 254 | 206 | 170 | 142 | 98 | 70 | 50 | 34 | XX | XX | XX | XX | 1" en 1 1/4" □ | |

Tabla. 5.8 Disposición de tubos en intercambiador de calor

Fuente: (Cao, 2014)

El arreglo de tubos será cuadrado con tubos 3/4 en 1" para acomodar los 53 tubos con un diámetro de carcasa de 10", maximizando el coeficiente de transferencia del lado de la carcasa. El tipo de cabezal será un AES (flotante para facilitar la incrustación posible por PO), con 53 tubos de 3/4" de 3 m de largo.

Dado que se diseña el equipo con 53 tubos en un solo paso y se logra un Reynolds de 13.923, la mezcla sale de los tubos con suficiente turbulencia para evitar que el vapor se separe prematuramente dentro del intercambiador, asegurando que la fracción de vapor calculada llegue íntegra al punto de separación 11 y 12.

| Componente | Flujo Total (kg/h) | Corriente 11 (Vapor a D-24) [kg/h] | Corriente 12 (Mezcla a EF-13) [kg/h] | Justificación del reparto |
|-------------------------|--------------------|------------------------------------|--------------------------------------|--|
| Propileno | 2,04 | 0,41 | 1,63 | El propileno se reparte; el K-23 recuperará lo que quede en la 12. |
| Óxido de Propileno (PO) | 2.371,85 | 47,44 (2%) | 2.324,41 | El grueso del PO va al flash para ser recuperado progresivamente. |

| | | | | |
|--------------|-----------|------------|-----------|--|
| Metanol | 12.166,00 | 243,32 | 11.922,68 | Vaporización parcial del 2%. |
| Agua | 1.581,26 | 31,25 (2%) | 1.550,01 | Acompaña la fase líquida mayoritaria hacia el EF-13. |
| TOTAL [kg/h] | 16.121,15 | 322,42 | 15.798,73 | |

Tabla 5.9 Resumen de corrientes de St-8

5.4.4 Condensador C-29

Para profundizar en el diseño del C-29, es fundamental comprender que este equipo opera bajo un régimen de transferencia de calor con presencia de gases incondensables, lo que lo diferencia drásticamente de un condensador de vapor puro.

El proceso consiste en recibir la corriente 28, una mezcla gaseosa saturada que contiene nitrógeno, propileno, metanol, óxido de propileno (PO) y agua. A medida que esta mezcla entra en contacto con la superficie fría de los tubos, se produce una disminución de la temperatura que reduce la capacidad de carga de vapor del gas inerte, forzando la licuación de los componentes pesados que forman la corriente 30. Este fenómeno ocurre de forma progresiva a lo largo de la longitud del equipo, donde la composición del gas cambia continuamente a medida que se retiran los condensables.

Carga térmica puesta en juego

La energía total que debe ser retirada por el agua de enfriamiento se calcula mediante la suma de términos entálpicos:

Calor sensible del gas (Q_{sg}), el cual representa la energía necesaria para enfriar el flujo de nitrógeno y propileno desde los 50°C de entrada hasta los 35°C de salida.

$$Q_{sg} = m_{gas} C_{pg} (T_{entr} - T_{sal}) \quad \text{Ec 5.24}$$

En esta expresión, el flujo másico m_{gas} incluye los 858,2 kg/h de nitrógeno y los 201,87 kg/h de propileno. El calor específico (C_{pgas}) debe ser ponderado según la fracción molar de cada gas a la temperatura media de operación:

| Componente | Flujo másico (kg/h) | Peso mol (g/mol) | Fracción molar | PM prom | Flujo molar (kmol/h) | Cp (KJ/kg.°C) |
|----------------|---------------------|------------------|----------------|---------|----------------------|---------------|
| N ₂ | 858,2 | 28,01 | 0,86 | 24,22 | 30,64 | 1,04 |
| Propileno | 201,87 | 42,08 | 0,14 | 5,70 | 4,80 | 1,53 |
| TOTAL | 1060,07 | | 1 | 29,91 | 35,44 | 1,1 |

Tabla 5.10 Propiedades físicas de N₂ y propileno en C-29

Haciendo uso de la Ec 5.24:

$$Q_{sg} = 1060,07 \text{ Kg/h} \cdot 1,1 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} (50 - 35)^\circ\text{C} = 4,86 \text{ kW}$$

Calor latente de condensación, que es el calor liberado por el cambio de fase de los vapor orgánicos y el agua.

$$Q_L = \sum_{i=1}^n m_i \cdot \Delta H_i \quad \text{Ec 5.25}$$

| Componente | Flujo másico (kg/h) | Peso mol (g/mol) | Fracción molar | PM prom | Flujo (kmol/h) | ΔH (kJ/kg) |
|------------|---------------------|------------------|----------------|---------|----------------|--------------------|
| Metanol | 61,14 | 32,04 | 0,821 | 26,30 | 1,91 | 950 |
| PO | 23,69 | 58,08 | 0,175 | 10,19 | 0,41 | 410 |
| Agua | 0,16 | 18 | 0,004 | 0,07 | 0,01 | 2340 |
| TOTAL | 84,99 | | 1,000 | 36,55 | 2,33 | 18,94 |

Tabla 5.11 Propiedades físicas de metanol, PO y agua en C-29

$$Q_L = 18,94 \text{ kW}$$

El coeficiente global de transferencia se ve altamente influenciado por la resistencia de la película gaseosa de N₂. Por lo tanto, para calcular el U:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{agua}} + R_f + \frac{t_{tubo}}{k_{mat}} + \frac{1}{h_{gas}}} \quad \text{Ec 5.26}$$

$$U \approx h_{gas} = 150 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Calculando el ΔT_{LM} como en la Ec 5.21:

$$\Delta T_{LM} = \frac{(50^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C}) - (35^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C})}{\ln\left(\frac{20^\circ\text{C}}{10^\circ\text{C}}\right)} = 14,43^\circ\text{C}$$

Aplicando un coeficiente global de transferencia de calor $U = 150 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Ec 5.22)

$$A = \frac{23800 \text{ W}}{150 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 14,43 \text{ K}} = 11 \text{ m}^2$$

Se utilizan tubos de acero inoxidable BWG16 estándar, con un diámetro exterior de ¾”, con un largo de 3m. Con la Ec 5.13:

$$A_{\text{tubo}} = \pi \cdot 0,01905 \text{ m} \cdot 3 \text{ m} = 0,1795 \text{ m}^2$$

El número de tubos se ve definido como:

$$N_{\text{tubos}} = \frac{11 \text{ m}^2}{0,1795 \text{ m}^2} = 62 \text{ tubos en un paso.}$$

El arreglo de tubos será triangular 30° para acomodar los 62 tubos con un diámetro de carcasa de 10” maximizando el coeficiente de transferencia del lado de la carcasa. El tipo de cabezal será un AES (flotante para facilitar las incrustación posibles por PO), con 62 tubos de ¾” de 3 m de largo. Por tubos va el agua de enfriamiento y por carcasa los gases más algo de líquidos.

| Componente | Entrada (28) [kg/h] | Líquido (30) [kg/h] | Gas (31) [kg/h] | Justificación |
|----------------|------------------------|------------------------|--------------------|---|
| N ₂ | 858,2 | 0,43 | 857,77 | Incondensable; mínima solubilidad en metanol. |
| Propileno | 201,87 | 3,03 | 198,84 | Mayoría al gas; un 1,5% se solubiliza en el condensado. |
| Metanol | 61,14 | 59,31 | 1,83 | Condensación del 97% por baja presión de vapor. |
| PO | 23,96 | 21,8 | 2,16 | Condensación del 91%; el resto satura el nitrógeno. |
| Agua | 0,16 | 0,16 | 0 | Condensación prácticamente total. |
| TOTAL | 1.145,33 | 84,73 | 1.060,60 | |

Tabla 5.12 Resumen de corrientes de salida del condensador

5.4.5 Columna de destilación D-24

Para que el propileno salga por arriba con alta pureza, se seleccionan los componentes que definen el corte:

- Clave liviano (LK): propileno (componente a recuperar por cabeza).
- Clave pesado (HK): PO.
- No clave pesados (NHK): metanol y agua.

La alimentación de esta torre es una mezcla de cuatro corrientes:

- Corriente 5: fase orgánica del reactor (4548,14 kg/h).
- Corriente 30: condensado del stripper (84,73 kg/h).
- Corriente 11: vapor de IC-10 (322,42 kg/h).
- Corriente 22 (del K-23): vapor comprimido desde el EF-13 (2 kg/h aproximadamente).

La estrategia de integrar cuatro corrientes distintas —la fase orgánica del reactor, el condensado del stripper, el vapor del intercambiador y el gas comprimido del sistema de flash— permite maximizar la eficiencia del proceso al centralizar la recuperación de la materia prima en un solo equipo de alta presión.

| Componente | Caudal másico (kg/h) |
|----------------|----------------------|
| Propileno (LK) | 3879,68 |
| PO (HK) | 492,03 |
| Metanol | 552,16 |
| Agua | 32,99 |
| Nitrógeno | 0,43 |

Tabla 5.13 Caudal másico por componentes D-24

La alimentación total (4957,29 kg/h) entra como vapor húmedo, debido a la mezcla de corrientes líquidas con gases.

Parámetros de diseño analíticos (Método de Fenske-Underwood)

- Número mínimo de platos (N_{\min}) - Ecuación de Fenske

Usando la volatilidad relativa del propileno (α) respecto al PO a 2,1 MPa ($\alpha_{LK-HK} = 2,5$)

$$\alpha_{LK-HK} = \frac{K_{C_3H_6}}{K_{PO}} \quad \text{Ec 5.27}$$

$$KI = \frac{y_i}{x_i} \simeq \frac{P_{i,sat}}{P} \quad \text{Ec 5.28}$$

| Componente | Fórmula | T _b normal (1 atm) |
|--------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| Propileno | C ₃ H ₆ | -47,6 °C |
| Óxido de propileno | C ₃ H ₆ O | 34,0 °C |

Tabla 5.14 Temperatura de burbuja según componente

Condiciones de operación: 2,1 MPa a 40-60 °C

A 50°C el propileno está muy por encima de su temperatura de burbuja, por lo tanto, su valor de K sería mucho mayor a 1, aproximadamente 10. En cambio, el PO está cerca de su T_b, y su P_{sat} es de 2 bar, por lo tanto:

$$K_{PO} = \frac{2 \text{ bar}}{21 \text{ bar}} = 0,1$$

La volatilidad relativa estimada será de:

$$\alpha_{LK-HK} = \frac{10}{0,1} = 100$$

Se propone una recuperación de propileno del 99%, con un arrastre del PO en el destilado del 1%. Por ende, las corrientes de destilado (D) y fondos (B) serán:

$$D_{LK} = 0,99 \times 3879,68 \text{ kg/h} = 3860,3 \text{ kg/h}$$

$$D_{HK} = 0,01 \times 492,03 = 2,46 \text{ kg/h}$$

$$B_{LK} = 3879,68 \text{ kg/h} - 3860,3 = 19,4 \text{ kg/h}$$

$$B_{HK} = 492,03 - 2,46 \text{ kg/h} = 489,6 \text{ kg/h}$$

$$\frac{x_{D,LK}}{x_{d,HK}} = \frac{3860,3}{2,46} = 1569$$

$$\frac{x_{B,HK}}{x_{B,LK}} = \frac{189,6}{19,4} = 25,3$$

$$N_{min} = \frac{\ln\left(\frac{x_{DLK} \cdot x_{BHK}}{x_{DHK} \cdot x_{BLK}}\right)}{\ln(\alpha_{LK-HK})} \quad \text{Ec 5.28}$$

$$N_{min} = \frac{\ln(1569 \cdot 25,3)}{\ln(100)} = 3,3 \text{ platos} \simeq 4 \text{ platos mínimos}$$

Aplicando la ecuación de Fenske para la separación propileno/óxido de propileno, considerando una volatilidad relativa promedio $\alpha = 100$ a 2,1 MPa y recuperaciones del 99 % del propileno en el destilado y 99 % del óxido de propileno en fondos, se obtuvo un número mínimo de platos teóricos del orden de 2–3, lo que confirma que la separación es altamente favorable desde el punto de vista termodinámico.

Para verificar lo calculado, se procede a dimensionar la columna D-24 con DWSIM:

| Tabla maestra de propiedades | | | | | | |
|------------------------------|-----------|----------|-------------|----------|------------|-------|
| Objeto | Propileno | PO | Nitrogeno | Methanol | Agua | |
| Temperatura | 333 | 333 | 333 | 298,15 | 333 | K |
| Presión | 2,1E+06 | 2,1E+06 | 2,1E+06 | 2,1E+06 | 2,1E+06 | Pa |
| Flujo másico | 1,07769 | 0,136675 | 0,000119444 | 0,153378 | 0,00916667 | kg/s |
| Flujo molar | 25,6107 | 2,3533 | 0,00426382 | 4,7868 | 0,508828 | mol/s |

Tabla 5.15 Resumen de corrientes de ingreso a D-24

Estableciendo los parámetros de la columna, como relación de reflujo 1,5, presión a 2,1 MPa, se procede al cálculo de la misma, estimando corrientes de salida, número de platos mínimos, altura, diámetro, condensador y reboiler.

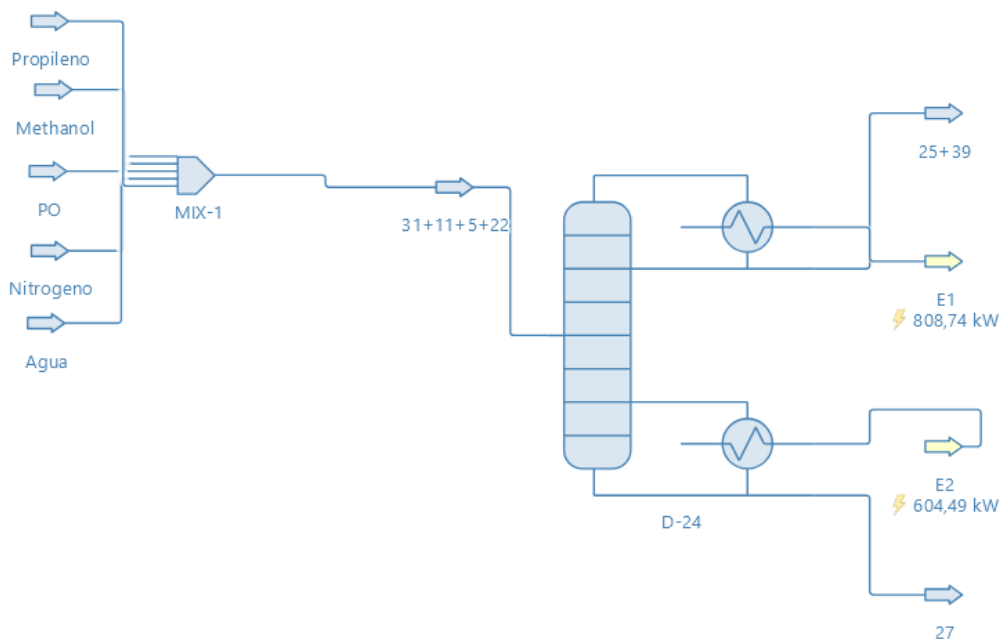


Fig 5.23 Diagrama de flujo en DWSIM D-24

| D-24 Shortcut Column | |
|-------------------------------------|--------------------------|
| Relación de reflujo | 1,5 |
| Fracción molar clave pesada | 0,01 |
| Fracción molar de la clave de luz | 0,01 |
| Presión del condensador | 2E+06 Pa |
| Presión del hervidor | 2E+06 Pa |
| Minimun Reflux Ratio | 0,186457 |
| Etapas mínimas | 4,45615 |
| Etapas de alimentación óptima | 4,39586 |
| Extracción del flujo molar líquido | 56,6897 mol/s |
| Rectificar el flujo molar líquido | 38,9884 mol/s |
| Extracción del flujo molar de vapor | 49,4179 mol/s |
| Rectificar el flujo molar de vapor | 64,9806 mol/s |
| Servicio del condensador | 808,741 kW |
| Deber de recalentador | 604,491 kW |
| Etapas reales | 6,07886 |
| Stage Height | 27 25+39 0,5 m |
| Estimated Height | 322,415 K 4,03943 m |
| Estimated Diameter | 2E+06 Pa 0,715493 m |

Fig 5.24 Diseño de la columna D-24 por DWSIM

Se muestran los resultados de las corrientes de salida de la torre:

| Tabla maestra de propiedades | | | |
|--|-------------|-------------|-------|
| Objeto | 27 | 25+39 | |
| Temperatura | 429,578 | 322,415 | K |
| Presión | 2E+06 | 2E+06 | Pa |
| Flujo másico | 0,281927 | 1,09511 | kg/s |
| Flujo molar | 7,27185 | 25,9922 | mol/s |
| Molar Fraction (Mixture) / Methanol | 0,640299 | 0,00502635 | |
| Molar Fraction (Mixture) / Propylene | 0,01 | 0,982531 | |
| Molar Fraction (Mixture) / 1,2-propylene oxide | 0,287874 | 0,01 | |
| Molar Fraction (Mixture) / Water | 0,061794 | 0,00228804 | |
| Molar Fraction (Mixture) / Nitrogen | 6,66662E-12 | 0,000164043 | |

Tabla 5.16 Tabla maestra de propiedades de salida de D-24

Al observar la tabla 5.15, se destaca que la columna logra producir una corriente de cabeza (25+39) con una fracción molar de propileno de 0,9825, lo cual se aproxima significativamente al objetivo de alta pureza planteado originalmente.

Este rendimiento se sustenta en un servicio del condensador (C- 26) de 808,74 kW y un deber del recalentador de 604,49 kW (IC-14), valores que reflejan la magnitud energética necesaria para separar componentes con volatilidades relativas desafiantes a presiones industriales.

La temperatura de salida del destilado a 322,41 K (aprox. 49 °C) confirma que el diseño es operativo con agua de enfriamiento estándar, validando la selección de la presión de 2,1 MPa como el parámetro de control fundamental para viabilizar la condensación en el tope.

En cuanto a la dimensión física del equipo, los resultados de la simulación tipo *shortcut* proponen una columna de aproximadamente 4 metros de altura con un diámetro de 0,71 metros, basada en un espaciado de bandejas de 0,5 metros.

Si bien el cálculo de la ecuación de Fenske sugiere un número mínimo de etapas teóricas de 4,45, la realidad operativa con una eficiencia de plato convencional requerirá el uso de las etapas reales estimadas para garantizar la estabilidad del perfil de concentración frente a fluctuaciones en la alimentación. El hecho de que los fondos de la columna (27) presenten una fracción molar de metanol de 0,64 y de óxido de propileno de 0,28 asegura que el producto principal de la reacción se conserve en la fase líquida para su posterior tratamiento, cumpliendo así con la doble función de la torre: recuperar el reactivo liviano y concentrar los productos intermedios.

| Componente | Alimentación (kg/h) | Destilado [kg/h] | Fondos [kg/h] |
|--------------|---------------------|------------------|---------------|
| Propileno | 3879,68 | 3868,66 (99,72%) | 11,02 |
| PO | 492,03 | 54,34 (11,04%) | 437,69 |
| Metanol | 552,16 | 15,08 (2,73%) | 537,08 |
| Agua | 32,99 | 3,88 (11,76%) | 29,11 |
| N2 | 0,43 | 0,43 (100%) | 0 |
| TOTAL [kg/h] | 4957,29 | 3942,39 | 1014,9 |

Tabla 5.17 Corrientes en D-24

5.4.6 Condensador C-26

Para completar el diseño del Condensador C-26, utilizaremos las propiedades termofísicas obtenidas de la simulación en DWSIM para la corriente de cabeza (25+39).

El objetivo principal de este equipo es retirar la carga térmica necesaria para condensar el propileno recuperado, permitiendo el reflujo hacia la columna D-24 y la obtención del producto final.

| Tabla maestra de propiedades | | |
|--|-------------|-----------|
| Objeto | 25+39 | |
| Temperatura | 322,415 | K |
| Presión | 2E+06 | Pa |
| Flujo másico | 1,09511 | kg/s |
| Flujo molar | 25,9922 | mol/s |
| Density (Mixture) | 455,074 | kg/m3 |
| Peso molecular (mezcla) | 42,1323 | kg/kmol |
| Entalpía específica (mezcla) | -309,271 | kJ/kg |
| Entalpía molar (mezcla) | -13030,3 | kJ/kmol |
| Conductividad térmica (mezcla) | 0,0917757 | W/[m.K] |
| Densidad (vapor) | 44,207 | kg/m3 |
| Conductividad térmica (vapor) | 0,0200608 | W/[m.K] |
| Viscosidad cinemática (vapor) | 2,39642E-07 | m2/s |
| Viscosidad dinámica (vapor) | 1,05939E-05 | Pa.s |
| Capacidad calorífica (vapor) | 2,38407 | kJ/[kg.K] |
| Relación de capacidad calorífica (vapor) | 1,52572 | |
| Viscosidad cinemática (líquido en general) | 1,52751E-07 | m2/s |
| Viscosidad dinámica (líquido en general) | 7,03191E-05 | Pa.s |
| Capacidad calorífica (líquido total) | 2,92431 | kJ/[kg.K] |
| Conductividad térmica (líquido 1) | 0,0918644 | W/[m.K] |
| Capacidad calorífica sólida (Cp) | 0 | kJ/[kg.K] |
| Molar Fraction (Mixture) / Propylene | 0,982531 | |
| Molar Fraction (Mixture) / 1,2-propylene oxide | 0,01 | |
| Molar Fraction (Mixture) / Water | 0,00228804 | |
| Molar Fraction (Mixture) / Nitrogen | 0,000164043 | |
| Presión de burbuja a temperatura de corriente | 0 | Pa |
| Presión de rocío a temperatura de la corriente | 0 | Pa |
| Temperatura de burbuja a presión de corriente | 0 | K |
| Temperatura de rocío a presión de corriente | 0 | K |
| Energía interna (vapor) | -67,5763 | kJ/kg |
| Energía libre de Gibbs (vapor) | 169,127 | kJ/kg |

Tabla 5.18 Tabla maestra de propiedades de DWSIM para C-26

A partir de los datos de la simulación, el condensador debe operar bajo las siguientes especificaciones térmicas:

$$Q = 808,74 \text{ kW}$$

Asumiendo que el agua de enfriamiento entra a una temperatura de 25 °C y sale con 35°C, el caudal necesario es:

$$m_{w \text{ enf}} = \frac{Q}{c_p \cdot \Delta T} \quad \text{Ec 5-29}$$

$$m_{w\ enf} = \frac{808740\ J.s}{4184\ J/(kg^{\circ}C).10^{\circ}C} = 19,33\ kg/s = 69,6\ m^3/h$$

Para el dimensionamiento mecánico, se utilizan los siguientes valores reportados por DWSIM evaluados a 2 MPa y temperatura de 49,27 °C:

- Viscosidad dinámica (vapor): $1,059.10^{-5}$ Pa.s
- Viscosidad dinámica (líquido): $7,032.10^{-5}$ Pa.s
- Conductividad térmica: 0,0918 W/(m.K)
- Densidad del líquido: $455,07\ kg/m^3$
- Densidad del vapor: $44,21\ kg/m^3$

El C-26 es un condensador de alta presión donde la diferencia media logarítmica es favorable para el intercambio (Ec 5.21):

$$\Delta T_{LM} = \frac{(49,27 - 35)^{\circ}C - (49,27 - 25)^{\circ}C}{\ln\left(\frac{14,27^{\circ}C}{24,27^{\circ}C}\right)} = 18,83\ ^{\circ}C$$

Para condensación de hidrocarburos livianos se asume un $U = 600\ W/(m^2K)$ (Ec 5.22):0

$$A = \frac{808740\ W}{600\ W/(m^2K).18,83\ K} = 71,58\ m^2$$

El flujo total a condensar viene dado por el flujo destilado D (1,0951 kg/s) y la relación de reflujo propuesta de 1,5

$$m_{cond} = D \times (1 + R) \quad \text{Ec 5.30}$$

$$m_{cond} = 1,0951\ kg/s (1 + 1,5) = 2,74\ kg/s$$

Se usa para su diseño tubos de 3 metros de largo y diámetro comercial de 1" BWG 14, siendo su $D_o = 0,0254\ m$ y $D_i = 0,02118\ m$. Su área superficial por cada tubo es de (Ec 5.13):

$$A_t = \pi.0,0254\ m . 3m = 0,24\ m^2$$

Para un área de $71,58\ m^2$, el número de tubos necesarios será de:

$$N_t = \frac{71,58\ m^2}{0,24\ m^2} = 298,25 \approx 300\ tubos.$$

Para analizar la turbulencia dentro de tubos, se calcula la velocidad por cada tubo

$$m = \frac{2,74\ kg/s}{300\ tubos. 44,207\ kg/m^3} = 2,063.10^{-4}\ m^3/s$$

$$v = \frac{2,063 \cdot 10^{-4} m^3 s}{\frac{\pi \cdot (0,02118 m)^2}{4}} = 0,585 m/s$$

$$Re = \frac{44,207 kg/m^3 \cdot 0,58 m/s \cdot 0,02118 s}{1,05939 \cdot 10^{-5} Pa \cdot s} = 51625$$

Se comprueba un flujo turbulento, lo cual es adecuado para la transferencia.

Este diseño asegura que la corriente de retorno (25) regrese a la columna D-24 con el subenfriamiento necesario para mantener la eficiencia de separación en los platos superiores.

| Componente | Líquido 25 (kg/h) | | | Gas 39 (kg/h) |
|----------------|-------------------|--------------|--------------|---------------|
| | Reflujo a D-24 | Destilado 35 | Destilado 32 | |
| Propileno | 5802,99 | 1934,33 | 1934,33 | 0 |
| PO | 81,51 | 27,17 | 27,17 | 0 |
| Metanol | 22,62 | 7,54 | 7,54 | 0 |
| Agua | 5,82 | 1,94 | 1,94 | 0 |
| N ₂ | 0 | 0 | 0 | 0,43 |
| Total | 5912,94 | 1970,98 | 1970,98 | 0,43 |

Tabla 5.19 Corrientes de salida de C-26

5.4.7 Intercambiador de calor IC-14

Para diseñar el reboiler IC-14 de la torre D-24, se utiliza para el balance la corriente 27, que son los fondos de la columna. Esta corriente es rica en PO y metanol, operando a una temperatura significativamente más alta que el tope.

Para su diseño, se especifica el flujo y la carga térmica, datos brindados por DWSIM.

- $Q = 604490 W$
- $Fondo (27) = 0,2819 kg/s$
- $T = 156,4 ^\circ C$ a presión ó de 2 MPa.

Para su calefacción, se requerirá vapor de servicio a 10 bar, con T° sat de $179,9^\circ\text{C}$. El $\Delta h_{vap} = 2014 \text{ kJ/kg}$, para esas condiciones.

$$m_{vap} = \frac{Q}{\lambda_{vap}} \quad \text{Ec 5.31}$$

$$m_{vap} = \frac{604490 \text{ W}}{2014 \text{ kJ/kg}} = 0,3 \text{ kg/s} = 1080 \text{ kg/h}$$

Para el diseño del intercambiador, se adoptan tubos de 1" BWG 14 con sus denominaciones comerciales de D_o y D_i utilizadas en C-26. El largo será de 3 metros.

En un reboiler para destilación, el coeficiente global de transferencia U suele ser un poco menor al del condensador debido a la formación de burbujas. Se estima un $U = 500 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

Para calcular LMTD del IC-10, se define temperatura de entrada y salida del reboiler- En un reboiler de este tipo, el fluido de proceso suele entrar como líquido saturado y salir como una mezcla líquido-vapor a la misma temperatura (ebullición), mientras que el vapor de servicio condensa a temperatura constante, por lo que

$$\Delta T1 = \Delta T2 = \Delta T_{LM} = 179,9^\circ\text{C} - 156,4^\circ\text{C} = 23,5^\circ\text{C}$$

El área requerida será de:

$$A = \frac{604490 \text{ W}}{500 \text{ W/(m}^2\text{K)} \cdot 23,5 \text{ K}} = 51,45 \text{ m}^2$$

El número de tubos se estima de la misma manera que las anteriores, siendo:

$$Nt = \frac{51,45 \text{ m}^2}{\pi \cdot 0,0254 \text{ m} \cdot 3 \text{ m}} = 214,9 \approx 215 \text{ tubos}$$

Antes de calcular el diámetro de carcasa D_s , se calcula cuánto espacio ocupan los 215 tubos. Se usa un arreglo triangular que permite mayor eficiencia para la transferencia de calor.

Para tubos de 1", el paso estándar es de $1,25 \cdot D_o = 1,25'' = 31,75 \text{ mm}$

La fórmula para calcular el diámetro del haz de tubos es:

$$D_b = D_o \left(\frac{N_{tubos}}{K_1} \right)^{\frac{1}{n_1}}, \text{ siendo } n_1 = 2,207 \text{ y } K_1 = 0,249 \quad \text{Ec 5.32}$$

$$D_b = 25,4 \text{ mm} \left(\frac{215}{0,249} \right)^{1/2,207} = 545 \text{ mm}$$

Para estimar el D_s , se adopta un criterio de 1,7 veces el D_b , lo cual el diámetro de carcasa sería:

$$D_s = N \times D_b \quad \text{Ec 5.33}$$

$$D_s = 1,7 \times 545 \text{ mm} = 924 \text{ mm} \approx 1 \text{ m}$$

Para completar el diseño del IC-14, se entiende que, al igual que en el tope, el reboiler maneja un tráfico de fluidos mayor al que simplemente sale como producto de fondo.

En la base de la torre D-24, la corriente líquida que desciende del último plato se divide: una parte se extrae como corriente 27 (producto de fondo que va hacia el intercambiador EF-13) y la otra parte ingresa al reboiler IC-14 para ser evaporada y retornar a la torre como vapor de despojo.

En un reboiler tipo Kettle o Termosifón (como el IC-14), el líquido que llega al fondo de la torre se divide:

1. Una parte sale definitivamente de la torre como producto (27).
2. La otra parte entra al reboiler para ser evaporada y volver a la torre como vapor de despojo.

Para cubrir la carga térmica de 604,49 kW, el equipo necesita procesar un flujo de recirculación. Para este tipo de mezclas, se suele utilizar una relación de recirculación 1:1 para asegurar que los tubos estén siempre mojados y no se quemé el producto.

A continuación, se presenta la tabla 5.19 de composición de esta división basada en los datos de la tabla maestra de propiedades de la corriente 27 dada por DWSIM y el balance de energía del equipo IC-10.

| Componente | Recirculación IC-14 [kg/h] | 27 a EF-13 [kg/h] | Justificación |
|----------------|----------------------------|-------------------|---|
| Propileno | 11,02 | 11,02 | Trazas de componente ligero que llegan a la base. |
| PO | 437,69 | 437,69 | Producto que sale por fondos |
| Metanol | 537,08 | 537,08 | Componente mayoritario en los fondos. |
| Agua | 29,11 | 29,11 | Concentración por baja volatilidad. |
| N ₂ | 0 | 0 | Incondensable |
| TOTAL [kg/h] | 1014,90 | 1014,90 | |

Tabla 5.20 Corrientes de IC-14

5.4.8 Evaporador flash EF-13

Para el diseño del primer evaporador flash EF-13, se analiza el comportamiento de las corrientes de entrada y la separación de fases resultante bajo las condiciones operativas de reducción de presión. Este equipo actúa como un nodo crítico de recuperación, recibiendo carga de tres puntos distintos del proceso.

Balance de masa en la entrada del EF-13

El equipo recibe tres corrientes que se combinan en su interior:

- Corriente 12: Proveniente del intercambiador IC-10, con un flujo de 15.798,73 kg/h.
- Corriente 27: Proveniente de los fondos de la columna D-24, con un flujo de 1.014,90 kg/h.
- Corriente 21: Retorno del condensador C-20 (fase recuperada del segundo flash).

| Componente | 12 [kg/h] | 27 [kg/h] | Carga inicial[kg/h] |
|------------|-----------|-----------|---------------------|
| Propileno | 1,63 | 11,02 | 12,65 |
| PO | 2.324,41 | 437,69 | 2.762,10 |
| Metanol | 11.922,68 | 537,08 | 12.459,76 |
| Agua | 1.550,01 | 29,11 | 1.579,12 |
| TOTAL | 15.798,73 | 1.014,90 | 16.813,63 |

Tabla 5.21 Corrientes de entrada de EF-13

Condiciones de operación y separación de fases

El EF-13 opera mediante una despresurización brusca desde los niveles de la columna (2,1 MPa) hasta aproximadamente 0,6 MPa.

- Fase vapor (22): se compone principalmente de propileno residual y los componentes más volátiles que flashean al reducir la presión. Esta corriente es enviada al compresor K-23 para retornar a la columna D-24. Según los datos de diseño previos, esta corriente se estima en un orden de 2 kg/h para el ingreso a la D-24, lo que implica una recuperación de livianos muy selectiva.
- Fase líquida (15): contiene el grueso del PO, metanol y agua. Esta mezcla se dirige al segundo evaporador flash (EF-16) para una desgasificación más profunda a 0,13 MPa.

Especificaciones del equipo

El diseño mecánico del EF-13 debe considerar los siguientes elementos según la descripción del proceso:

- Demister: el equipo está provisto de un eliminador de niebla (demister) en la salida superior para evitar el arrastre de gotas de PO y metanol hacia el compresor K-23.
- Control de presión: válvula de control en la entrada de la corriente 12 para efectuar la expansión Joule-Thomson necesaria para el flash.
- Configuración de entradas: el equipo debe contar con boquillas independientes o un colector para combinar las corrientes 12, 27 y el retorno 21.

El objetivo primordial del EF-13 es la recuperación progresiva. Al operar a 0,6 MPa, permite remover el propileno remanente sin necesidad de alcanzar temperaturas que degraden el PO, enviando una fase líquida (15) más estable hacia la etapa de baja presión (EF-16).

La separación en el EF-13 se rige por el balance de masa global y por componente, asumiendo que el equipo opera como un separador de una sola etapa de equilibrio:

$$F = L + V \quad \text{Ec 5.34}$$

Donde:

- F es la alimentación total (suma de corrientes 12, 27 y 21).
- V es el flujo de vapor (corriente 22).
- L es el flujo de líquido (corriente 15).

Para cada componente i, se cumple la relación de equilibrio mediante la constante K_i :

$$y_i = K_i \cdot x_i \quad \text{Ec 5.35}$$

Donde K_i depende de la presión (0,6 MPa) y la temperatura del flash. Para resolver la fracción vaporizada ($\psi = \frac{V}{F}$), se utiliza la Ecuación de Rachford-Rice:

$$\sum_{i=1}^n \frac{z_i(K_i-1)}{1+\psi(K_i-1)} = 0 \quad \text{Ec 5.36}$$

Dado que el propileno es el componente más volátil ($K_{\text{prop}} \gg \gg 1$), este se concentra en la fase gaseosa (V), mientras que el PO y el metanol permanecen mayoritariamente en la fase líquida (L).

El diámetro del evaporador se calcula para evitar el arrastre de líquido, basándose en la velocidad terminal de las gotas de acuerdo con la Ecuación de Souders-Brown:

$$v_{\text{máx}} = K_{\text{sep}} \sqrt{\frac{p_L - p_V}{p_V}} \quad \text{Ec 5.37}$$

Donde:

- $v_{\text{máx}}$ es la velocidad máxima permitida del vapor.
- $p_L = 820 \text{ kg/m}^3$ y $p_V = 13,5 \text{ kg/m}^3$
- K_{sep} es el factor de diseño (típicamente 0,107 m/s para separadores con demister).

$$v_{\text{máx}} = 0,107 \text{ m/s} \sqrt{\frac{820 - 13,5}{13,5}} = 0,827 \text{ m/s}$$

Una vez obtenida $v_{\text{máx}}$, se recomienda trabajar al 80% de la velocidad máxima y se determina el área transversal (A_v) y el diámetro (D):

$$A_v = \frac{V}{p_v v_{\text{máx}}} \Rightarrow D = \sqrt{\frac{4 A_v}{\pi}} \quad \text{Ec 5.38}$$

$$V = F \cdot \psi \quad \text{Ec 5-39}$$

Para la sección líquida, se busca un tiempo de residencia (τ) suficiente para la desgasificación y el control de nivel, generalmente entre 5 y 10 minutos:

$$V_{liq} = \frac{L}{pL} \tau \quad \text{Ec 5.40}$$

$$V_{liq} = \frac{16811,63 \text{ kg/h}}{820 \text{ kg/m}^3} \cdot 10 \text{ min} = 3,41 \text{ m}^3$$

Si definimos que el líquido ocupa el 50% del volumen total del tanque (para dejar espacio al flash y al demister):

$$V = 3,41 \text{ m}^3 \cdot 2 = 6,81 \text{ m}^3$$

Usando la fórmula de volumen de un cilindro y una relación de $H = 3D$

$$6,82 \text{ m}^3 = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 (3D)$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{6,82 \text{ m}^3 \cdot 4}{3\pi}} = 1,42 \text{ m}$$

Para verificar que no haya arrastre de líquido, la velocidad real del vapor debe ser menor a 0,8 m/s (crítica).

$$v = \frac{Q_{vol}}{\text{Área}} \quad \text{Ec 5-41}$$

$$v = \frac{2 \text{ kg/h}}{13,5 \text{ kg/m}^3 \cdot 3600 \text{ s/h} \cdot \pi \cdot (0,75\text{m})^2} = 0,0002 \text{ m/s} \Rightarrow \text{VERIFICA}$$

Además, también es importante diseñar el espesor ya que es un equipo sometido a presión, lo cual sigue la norma ASME Sección VIII.

$$e = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0.6 \cdot P} + CA \quad \text{Ec 5.42}$$

Siendo P la presión interna, R el radio del recipiente, S el esfuerzo máximo admisible del material, para acero al carbono 138 MPa, E la eficiencia de soldadura estimada en 0,85 y CA la corrosión permisible para ambiente líquido metanol/agua de 3 mm.

$$e = \frac{0.75 \text{ MPa} \cdot 750 \text{ mm}}{(138 \text{ MPa} \cdot 0.85) - 0.6 \cdot 0.75 \text{ MPa}} + 3 \text{ mm} = 7.81 \text{ mm}$$

Se propone un diámetro de 1,5 m, una altura total de 4,5 m y un espesor de 10 mm para EF-13.

| Componente | Alimentación total (12+27+21) [kg/h] | Vapor (22) a K-23 [kg/h] | Líquido (15) a EF-16 [kg/h] |
|--------------|--------------------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| Propileno | 12,65 | 2,00 (15,8%) | 10,65 |
| PO | 2.762,10 | 0,04 (0,001%) | 2.762,06 |
| Metanol | 12.459,76 | 0,12 (0,001%) | 12.459,64 |
| Agua | 1.579,12 | 0,00 | 1.579,12 |
| TOTAL [kg/h] | 16.813,63 | 2,16 | 16.811,47 |

Tabla 5.22 Corrientes de salida de EF-13

5.4.9 Evaporador flash EF-16

La función principal del evaporador flash EF-16 es la desgasificación profunda de la mezcla de reacción tras la primera etapa de expansión. Este equipo opera a baja presión para asegurar la eliminación de trazas de propileno residual antes de la etapa de pre-separación.

Balance de masa y composición de entrada

El equipo recibe la fase líquida proveniente del primer flash (corriente 15) y el vapor residual del condensador C-50 (corriente 53). La carga total se ha consolidado considerando que la corriente 53 aporta mayoritariamente incondensables y remanentes de propileno.

| Componente | Corriente 15 [kg/h] | Corriente 53 [kg/h] | Entrada total [kg/h] |
|------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| Propileno | 10,65 | 1,50 | 12,15 |
| PO | 2.762,06 | 0,50 | 2.762,56 |
| Metanol | 12.459,64 | 0,20 | 12.459,84 |
| Agua | 1.579,12 | 0,00 | 1.579,12 |
| Total | 16.811,47 | 2,20 | 16.813,67 |

Tabla 5.23 Corrientes de entrada EF-16

Condiciones de operación y separación de fases

El equipo se encuentra configurado para operar a una presión de 0,13 MPa. Esta reducción de presión promueve la vaporización del propileno contenido en la fase líquida alimentada.

- Fase vapor (18): se compone de los elementos volátiles recuperados que se dirigen al compresor K-19 para su reinsertión en el lazo de recuperación.
- Fase líquida (45): constituye el flujo desgasificado que alimenta a la columna de pre-separación D-46.

El diseño del EF-16 integra los siguientes elementos críticos para su operación estable a baja presión:

- Demister: el equipo cuenta con un eliminador de niebla de alta eficiencia en el tope para prevenir el arrastre de gotas de óxido de propileno (PO) y metanol hacia la succión del compresor K-19.
- Control de presión: el sistema opera mediante la despresurización de la corriente 15 desde los 0,6 mpa hasta la presión de consigna de 0,13 mpa.
- Configuración de entradas: el recipiente dispone de boquillas independientes para la carga principal (corriente 15) y el retorno de incondensables (corriente 53).

La separación se fundamenta en el balance global de masa, considerando las entradas del primer flash y el retorno del condensador C-50 (Ec 5.34)

$$F = L + V$$

F: alimentación total (15+53) de 16813,67 kg/h

V: flujo de gas 18 de 12,3 kg/h

L: flujo de líquido 45 de 16801,37 kg/h

Al operar a una presión de 0,13 MPa, el propileno remanente se desplaza hacia la fase vapor debido a su alta volatilidad relativa en comparación con el metanol y el PO.

El cálculo del diámetro se verifica mediante la velocidad terminal de las gotas utilizando la ecuación de Souders-Brown para evitar el arrastre hacia el compresor:

La densidad de los gases ahora cambia ya que la presión disminuye, a 2,4 kg/m³. (Ec 5.37)

$$v_{m\acute{a}x} = 0,107m/s \sqrt{\frac{820 - 2,4}{2,4}} = 1,97 m/s$$

La velocidad real del vapor con un diámetro de 1,5 m (igual diseño a EF-13 ya que la cantidad de líquidos son casi iguales) se calcula como Ec 5.41:

$$v = \frac{12,3 \text{ kg/h}}{2,4 \text{ kg/m}^3 \cdot 3600 \text{ s/h} \cdot \pi \cdot (0,75 \text{ m})^2} = 0,0008 \text{ m/s} \Rightarrow \text{VERIFICA}$$

Para calcular el espesor a 0,13 MPa como en EF-13, se procede de la siguiente manera (Ec 5.42)

$$e = \frac{0,13 \text{ MPa} \cdot 750 \text{ mm}}{(138 \text{ Mpa} \cdot 0,85) - 0,6 \cdot 0,13 \text{ MPa}} + 3 \text{ mm} = 4,79 \text{ mm}$$

Se propone un diámetro de 1,5 m, una altura total de 4,5 m y un espesor de 7 mm para EF-13.

| Componente | 15+53 [kg/h] | 18 a K-19[kg/h] | 45 a D-46 [kg/h] |
|--------------|--------------|-----------------|------------------|
| Propileno | 12,15 | 10,60 (87,2%) | 1,55 |
| PO | 2.762,56 | 0,50 | 2.762,06 |
| Metanol | 12.459,84 | 0,30 | 12.459,54 |
| Agua | 1.579,12 | 0,00 | 1.579,12 |
| TOTAL [kg/h] | 16.813,67 | 11,40 | 16.802,27 |

Tabla 5.24 Corrientes de salida EF-16

5.4.10 Compresores K-23 y K-19

Para el diseño de los compresores K-19 y K-23, se utilizarán los caudales máscicos definidos en los balances de los evaporadores flash EF-16 y EF-13. Estos equipos son esenciales para elevar la presión de los vapores recuperados y permitir su reinserción en las etapas de alta presión del proceso.

Especificaciones de diseño para los compresores

El diseño se basa en una compresión adiabática (isentrópica) para determinar la potencia requerida y la temperatura de salida de los gases.

Compresor K-19 (Recuperación de baja presión)

Este equipo recibe la fase vapor del segundo flash para elevarla al nivel de presión del primer flash.

- Entrada (Corriente 18): vapor proveniente del EF-16.
- Flujo máscico: 12,30 kg/h.
- Presión de succión (P_1): 0,13 MPa.
- Presión de descarga (P_2): 0,6 MPa.

Relación de compresión

$$r_c = \frac{P_2}{P_1} \quad \text{Ec. 5.43}$$

$$r_c = \frac{0,6}{0,13} = 4,62$$

Compresor K-23 (Retorno a columna D-24)

Este equipo comprime el vapor del primer flash para igualar la presión de operación de la torre de destilación.

- Entrada (Corriente 22): vapor proveniente del EF-13.
- Flujo másico: 11,40 kg/h.
- Presión de succión (P_1): 0,6 MPa.
- Presión de descarga (P_2): 2,1 MPa.
- Relación de compresión (r_c): $\frac{2,1}{0,6} = 3,5$

Análisis termodinámico y ecuaciones de diseño

Para ambos compresores, se asume un comportamiento de gas real para el propileno y se emplea la relación de potencias isentrópicas:

$$W_s = \frac{k}{k-1} P_1 Q_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad \text{Ec 5.44}$$

k : relación de calores específicos (C_p/C_v) para el propileno, cercano a 1,15.

Q_1 :caudal volumétrico en succión.

Temperatura de descarga (T_2)

Es crítico monitorear la temperatura de salida para evitar la polimerización del PO residual o la degradación del equipo:

$$T_2 = T_1 \cdot (r_c)^{\frac{k-1}{k}} \quad \text{Ec 5.45}$$

| Parámetro | Compresor K-19 | Compresor K-23 |
|--------------------------|--------------------|--------------------|
| Fluido principal | Propileno residual | Propileno residual |
| Caudal másico [kg/h] | 12,30 | 11,40 |
| Presión de entrada [MPa] | 0,13 | 0,60 |
| Presión de salida [MPa] | 0,60 | 2,10 |

| | | |
|-----------------|--------------------------|--------------|
| Destino del gas | Condensador C-20 y EF-13 | Columna D-24 |
|-----------------|--------------------------|--------------|

Tabla 5.25 Parámetros para los equipos de compresión

Para el cálculo de la potencia consumida y el análisis térmico de los compresores K-19 y K-23, aplicaremos las ecuaciones de termodinámica para procesos de compresión isentrópica.

Parámetros y constantes de cálculo

Para el fluido (rico en propileno), utilizaremos los siguientes valores promedio:

- Constante del gas (R): 0,1974 kJ/kg.K.
- Temperatura de succión (T_1): 40 °C (313,15 K)
- Eficiencia isentrópica (η): 0,75 (valor típico para compresores recíprocos pequeños).

Haciendo uso de las ecuaciones 5.43, 5.44 y 5.45:

$$T_2 = 313,15K \cdot (4,62)^{\frac{1,15-1}{1,15}} = 382,2 K$$

$$K_2 = 313,15K \cdot (3,5)^{\frac{1,15-1}{1,15}} = 368,7 K$$

Como se requiere que la salida sea de 40 °C, el equipo debe disipar calor durante la compresión.

$$W_s = \frac{1,15}{1,15 - 1} 0,2112 kW \left[(4,62)^{\frac{1,15-1}{1,15}} - 1 \right] = 0,36 kW$$

$$P_1 Q_1 = m \cdot R \cdot T_1 = \frac{11,4 kg/h}{3600s/h} \cdot 0,1974 kJ/kg \cdot K \cdot 313,15K = 0,1957 kW$$

$$W_s = \frac{1,15}{1,15 - 1} 0,1957 kW \left[(3,5)^{\frac{1,15-1}{1,15}} - 1 \right] = 0,27 kW$$

$$P_1 Q_1 = m \cdot R \cdot T_1 = \frac{12,3 kg/h}{3600s/h} \cdot 0,1974 kJ/kg \cdot K \cdot 313,15K = 0,2112 kW$$

Debido a que las potencias son inferiores a 1 kW, se confirma que se trata de equipos de pequeña escala (tipo piloto o mini compresores) integrados en el lazo de instrumentación y control de la planta.

Se validan los resultados anteriores con el simulador DWSIM:

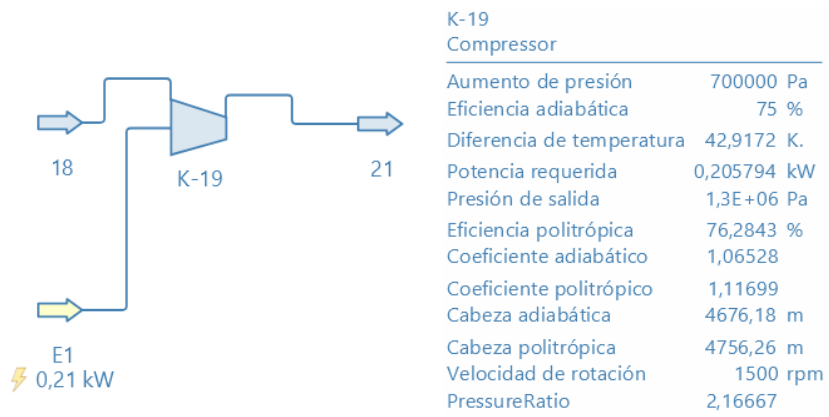


Fig. 5.25 Compresor K-19 en DWSIM

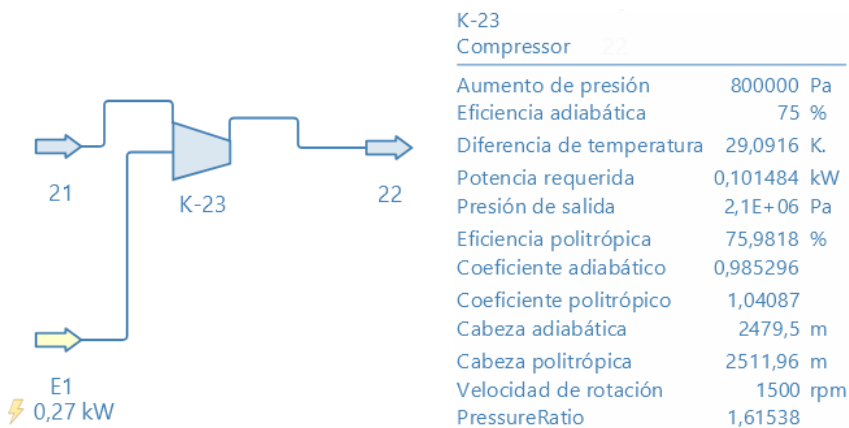


Fig. 5.26 Compresor K-23 en DWSIM

5.4.11 Columna de destilación D-33

Para el diseño de la misma, se toman en cuenta los ingresos de las siguientes corrientes:

| Componente | 32[kg/h] | 36 [kg/h] | Componente (kg/h) |
|------------|----------|-----------|-------------------|
| Propano | 0 | 210 | 210 |
| Propileno | 1934,33 | 2500 | 4434,33 |
| Metanol | 7,54 | 0 | 7,54 |
| PO | 81,51 | 0 | 81,51 |
| Agua | 1,34 | 0 | 1,34 |
| TOTAL | 2024,72 | 2710 | |

Tabla 5.26 Corrientes de entrada D-33

Para el diseño de la columna D-33, el objetivo principal es la purificación del lazo de recirculación de propileno hacia el reactor R-03, eliminando el propano (que ingresa con el alimento fresco) y los subproductos pesados.

El diseño de la columna se ajusta para que el propileno recuperado por el tope (Corriente 37) cumpla con la demanda del reactor, mientras que el purgado de incondensables (Corriente 40) elimina el propano del sistema.

| Componente | Alimentación (32+36) [kg/h] | Destilado (37) [kg/h] | Purgado (40) [kg/h] | Fondos (34) [kg/h] |
|--------------|-----------------------------|-----------------------|---------------------|--------------------|
| Propano | 210 | 10,5 | 199,5 | 0 |
| Propileno | 4434,33 | 3.997,27 | 426,06 | 11,01 |
| PO | 81,51 | 0,00 | 0,00 | 81,51 |
| Metanol | 7,54 | 0,00 | 0,00 | 7,54 |
| Agua | 1,34 | 0,01 | 0,00 | 1,33 |
| TOTAL [kg/h] | 4734,72 | 4007,78 | 625,55 | 101,39 |

Tabla 5.27 Corrientes finales de D-33

El diseño de la D-33 se centra en la separación de una mezcla compleja donde el propileno y el propano actúan como componentes clave. La alimentación total de 4734,33 kg/h integra el propileno recuperado del proceso (corriente 32) y el alimento fresco (corriente 36). El objetivo principal es eliminar el propano introducido por la corriente fresca a través de una purga gaseosa en el tope (corriente 40), logrando extraer el 95% del propano total del sistema.

Configuración de corrientes y recirculación al reactor

La columna garantiza que la corriente 37 (destilado) proporcione 3.997,27 kg/h de propileno de alta pureza. Al unirse con la corriente 35, se conforma la corriente 1 con un flujo total de 5.931,60 kg/h de propileno, cumpliendo estrictamente con los requerimientos aguas abajo para la reacción de epoxidación. Por otro lado, los fondos (corriente 34) arrastran los componentes pesados como el metanol, agua y óxido de propileno residual, con una pérdida de propileno LK (clave liviano) limitada al 1%.

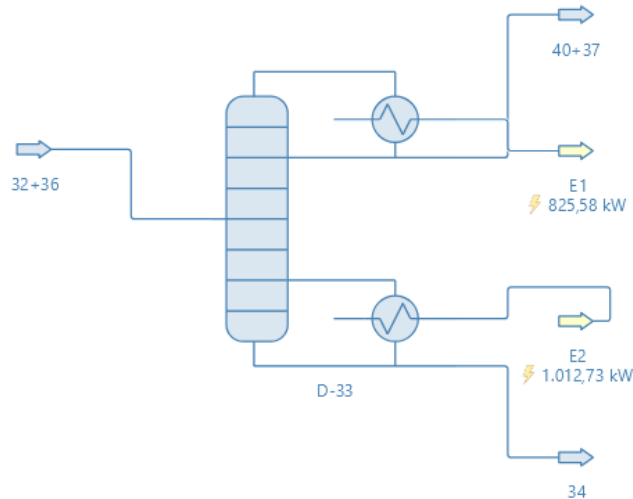


Fig. 5.25 Columna D-33 diseñada en DWSIM

| Parámetros de cálculo | |
|--------------------------------|--|
| Light Key Compound (LK) | Propylene |
| Heavy Key Compound (HK) | Water |
| LK Mole Fraction in Bottoms | 0,01 |
| HK Mole Fraction in Distillate | 0,01 |
| Relación de reflujo | 1 |
| Tipo de condensador | <input checked="" type="radio"/> Total <input type="radio"/> Partial |
| Presión del condensador | 2 MPa |
| Presión del hervidor | 2 MPa |
| Stage/Tray Height | 0,5 m |

Fig. 5.26 Parámetros de cálculo D-33

Para lograr esta separación, el condensador C-38 opera a una presión de 2,1 MPa, lo que requiere un control preciso de la temperatura para permitir el purgado de incondensables sin una pérdida excesiva de propileno. El reboiler IC-17 aporta la carga térmica necesaria para asegurar que el agua (HK - clave pesado) no supere el 1% en el destilado, protegiendo así el catalizador TS-1 del reactor R-03 de una hidratación prematura.

Los valores obtenidos reflejan una separación eficiente con un consumo energético moderado, considerando la complejidad de separar compuestos de volatilidades cercanas como el propano y el propileno.

- Eficiencia de la separación: el hecho de requerir 18 etapas mínimas para alcanzar la pureza deseada indica que la volatilidad relativa entre los componentes clave es manejable bajo las condiciones de 2,1 MPa.
- Optimización operativa: la selección de 25 etapas reales frente a las 18 mínimas sugiere una relación de etapas reales/mínimas de aproximadamente 1,4, un estándar de diseño que equilibra el costo de capital (altura de la torre) con el costo operativo (reflujo).

- Relación de reflujo: un reflujo mínimo de 0,8 es un valor relativamente bajo para este tipo de fraccionamiento de livianos, lo que implica que la torre no demandará una carga térmica excesiva en el reboiler IC-17, favoreciendo la economía del proceso.

| Parámetro | Valor estimado por DWSIM |
|---------------------------------|-------------------------------------|
| Número de platos reales | 25 |
| Diámetro (D _i) en m | 0,9 |
| Altura total (H) en m | 18,4 |
| Material de construcción | Acero al carbono (ASTM A-516 Gr 70) |

Tabla 5.28 Parámetros finales de diseño D-33

Parámetros para el cálculo del espesor

Se consideran las condiciones más exigentes para asegurar un diseño seguro y duradero:

- Presión de diseño (P): se aplica un margen de seguridad sobre la presión de operación, resultando en 2,31 MPa.
- Diámetro interno: 900 mm
- Esfuerzo máximo admisible (S): para acero al carbono ASTM A-516 Gr 70, se utiliza un valor de 138 MPa.
- Eficiencia de la soldadura (E): 0,85.
- Corrosión permisible (CA): 3 mm.

Usando la ecuación 5.42:

$$e = \frac{2,31 \text{ MPa} \cdot 450 \text{ mm}}{(138 \text{ MPa} \cdot 0,85) - 0,6 \cdot 2,31 \text{ MPa}} + 3 \text{ mm} = 11,97 \text{ mm}$$

Se estima y se sobredimensiona un espesor final de seguridad de 16 mm.

5.4.12 Reboiler IC-17

El equipo procesa la corriente de fondo de la columna D-33, rica en óxido de propileno, metanol y agua. Su función es vaporizar una fracción de este líquido para mantener el perfil de temperaturas en la torre y asegurar que el contenido de propileno en los fondos (corriente 34) no supere el 1%.

Especificaciones de carga y fluidos de servicio

Basándose en los resultados de la simulación, se definen los parámetros térmicos de operación:

- Carga térmica (Q): 1012,73 kW
- Temperatura de proceso (T): 156,4 °C a una presión de 2,1 MPa.
- Vapor de servicio: se utilizará vapor saturado a 10 bar T° 179,9 °C, con un calor de vaporización de 2.014 kJ/kg.

Usando la Ec 5.31:

$$m_{vap} = \frac{1012,73 \text{ kW}}{2014 \text{ kJ/kg}} = 1810 \text{ kg/h}$$

Diseño del área de intercambio

Siguiendo los estándares adoptados, se utilizan tubos de 1" BWG 14 con una longitud de 3 metros. Se asume un coeficiente global de transferencia U de 500 W/(m² K), adecuado para ebullición de mezclas orgánicas.

- Diferencia de temperatura en condiciones de ebullición y condensación isotérmica:

$$\Delta T1 = \Delta T2 = \Delta T_{LM} = 179,9 \text{ °C} - 156,4 \text{ °C} = 23,5 \text{ °C}$$

El área requerida será de:

$$A = \frac{1012,73 \text{ W}}{500 \text{ W/(m}^2\text{K)} \cdot 23,5 \text{ K}} = 86,19 \text{ m}^2$$

$$N_{tubos} = \frac{86,19 \text{ m}^2}{\pi \cdot 0,0254 \text{ m} \cdot 3 \text{ m}} = 359,9 \approx 360 \text{ tubos}$$

Dimensionamiento de la carcasa (D_s)

Se utiliza un arreglo triangular con un paso estándar de 31,75 mm. Haciendo uso de la Ec. 5.33:

$$D_b = 25,4 \text{ mm} \left(\frac{360}{0,249} \right)^{1/2,207} = 692 \text{ mm}$$

Para el D_s, se aplica un criterio de diseño de 1,7 veces el diámetro del haz para un reboiler tipo Kettle (Ec 5.34):

$$D_s = 1,7 \times 692 \text{ mm} = 1176,4 \text{ mm} \approx 1,2 \text{ m}$$

Resumen de corrientes y balance del equipo

Para asegurar el mojado de los tubos y evitar la degradación del producto, se adopta una relación de recirculación 1:1. La corriente de fondo que desciende de la D-33 se divide equitativamente entre el producto final (corriente 34) y el flujo que retorna a la torre

| Componente | Recirculación IC-17 [kg/h] | 34 a recuperación [kg/h] | Justificación |
|--------------|----------------------------|--------------------------|-------------------------------------|
| Propano | 0,00 | 0,00 | Eliminado en el C-38 |
| Propileno | 11,01 | 11,01 | Clave liviano (1% en fondos). |
| PO | 81,51 | 81,51 | Recuperación de subproducto pesado. |
| Metanol | 7,54 | 7,54 | Solvente recuperado. |
| Agua | 1,33 | 1,33 | Concentración en la base. |
| TOTAL [kg/h] | 101,39 | 101,39 | |

Tabla 5.29 Corrientes de IC-17

El IC-17 se define como un intercambiador de 360 tubos alojados en una carcasa de 1,2 metros de diámetro. Su diseño permite manejar la carga térmica de 1012,73 kW requerida para la purificación de propileno, garantizando que la corriente de recirculación hacia el reactor mantenga los niveles de pureza validados en DWSIM.

5.4.13 Condensador C-38

Para el diseño técnico del condensador C-38, utilizaremos la carga térmica obtenida en la simulación y seguiremos la metodología aplicada al condensador C-26. Este equipo es responsable de condensar el vapor de cabeza de la columna D-33, permitiendo el reflujo necesario para la separación propano/propileno y proporcionando la corriente de alimentación al reactor.

El equipo opera a alta presión (2,1 MPa) para condensar la mezcla de hidrocarburos ligeros. Su función es crítica, ya que define la pureza del propileno que se recircula al R-03 y la eficiencia de la purga de propano.

Especificaciones térmicas y caudal de servicio

De acuerdo con los datos de simulación para la columna D-33, se establecen los siguientes parámetros:

- Carga térmica (Q): 825,58 kW.
- Agua de enfriamiento: se asume entrada a 25 °C y salida a 35 °C.

El caudal de agua necesario es (Ec 5.29):

$$m_{w\ enf} = \frac{825580\ J.s}{4184\ J/(kg^{\circ}C).10^{\circ}C} = 19,73\ kg/s = 71,03\ m^3/h$$

Para el dimensionamiento mecánico, se utilizan los siguientes valores reportados por DWSIM evaluados a 2 MPa y temperatura de 35°C:

- Viscosidad dinámica (vapor): $1,059.10^{-5}$ Pa. s
- Viscosidad dinámica (líquido): $7,032.10^{-5}$ Pa. s
- Conductividad térmica: 0,0918 W/ (m.K)
- Densidad del líquido: 455,07 kg/m³
- Densidad del vapor: 44,21 kg/m³

El C-26 es un condensador de alta presión donde la diferencia media logarítmica es favorable para el intercambio (Ec 5.21):

$$\Delta T_{LM} = \frac{(49,27 - 35)^{\circ}C - (49,27 - 25)^{\circ}C}{\ln\left(\frac{14,27^{\circ}C}{24,27^{\circ}C}\right)} = 18,83^{\circ}C$$

Para condensación de hidrocarburos livianos se asume un $U = 600\ W/(m^2K)$ (Ec 5.22):

$$A = \frac{825580\ W}{600\ W/(m^2K).18,83\ K} = 73,07\ m^2$$

Se usa para su diseño tubos de 3 metros de largo y diámetro comercial de 1" BWG 14, siendo su $D_o = 0,0254\ m$ y $D_i = 0,02118\ m$. Su área superficial por cada tubo es de (Ec 5.13):

$$A_t = \pi.0,0254\ m . 3m = 0,24\ m^2.$$

Para un área de 73,07 m², el número de tubos necesarios será de:

$$N_t = \frac{73,07\ m^2}{0,24\ m^2} = 304,4 \approx 305\ tubos$$

Este diseño asegura que la corriente de retorno (25) regrese a la columna D-24 con el subenfriamiento necesario para mantener la eficiencia de separación en los platos superiores.

| Componente | Reflujo [kg/h] | 37 [kg/h] | 40 [kg/h] |
|--------------|----------------|-----------|-----------|
| Propano | 8,40 | 10,50 | 199,50 |
| Propileno | 3.197,81 | 3.997,27 | 426,06 |
| Agua | 0,01 | 0,01 | 0,00 |
| TOTAL [kg/h] | 3.206,22 | 4.007,78 | 625,56 |

Tabla 5.30 Corrientes de C-38

El condensador C-38 se define como un equipo de 305 tubos que garantiza el subenfriamiento necesario para manejar un reflujo de 3206,22 kg/h. Este diseño asegura que la corriente 40 purgue efectivamente el propano del sistema, *manteniendo la pureza del propileno en la corriente 37 para su óptimo desempeño en el reactor R-03.*

5.4.14 Columna de absorción CA-41

Esta columna consiste en la absorción de propileno (recuperación) con metanol, para enviar esa corriente (43) al reactor de epoxidación. Por cabeza saldrá incondensables e impurezas, como N₂ y propano. En la misma ingresan las siguientes corrientes: 31, 39, 40 y 42, y salen 44 (purga) y 43 (a R-03).

Se propone para el diseño la siguiente salida de las corrientes en las columnas, para realizar el cálculo de la cantidad de platos teóricos y el diámetro de la columna:

| Componente | Entrada a CA-41 (kg/h) | | | | Salida de CA-41 (kg/h) | | TOTAL (kg/h) |
|----------------|------------------------|------|--------|-------|------------------------|-------|--------------|
| | 31 | 39 | 40 | 42 | 43 | 44 | |
| Propileno | 198,84 | 0 | 426,06 | 0 | 600 | 24,9 | 624,9 |
| Propano | 0 | 0 | 199,5 | 0 | 0,5 | 199 | 199,5 |
| PO | 2,16 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0,16 | 2,16 |
| N ₂ | 857,77 | 0,43 | 0 | 0 | 0 | 858,2 | 858,2 |
| Metanol | 1,83 | 0 | 0 | 10000 | 10000 | 1,83 | 10001,83 |

| | | | | | | | |
|------|---|---|---|----|---|---|----|
| Agua | 0 | 0 | 0 | 10 | 9 | 1 | 10 |
|------|---|---|---|----|---|---|----|

Tabla 5.31 Corrientes de entrada y salida CA-41

Para el diseño técnico de la Columna de absorción CA-41, se aplica el método de Kremser para soluciones diluidas, integrando los flujos de entrada de los sistemas de recuperación de gases y las especificaciones de absorción en metanol recuperado. Este equipo es vital para cerrar el lazo de solvente y minimizar las pérdidas de propileno hacia el venteo.

$$N = \frac{\log \left[\frac{y_b - y_b^*}{y_a - y_a^*} \right]}{\log \left[\frac{y_b - y_a}{y_b^* - y_a^*} \right]} \quad \text{Ec 5.46}$$

La columna opera a 2,0 MPa, recibiendo corrientes gaseosas ricas en nitrógeno e hidrocarburos livianos para recuperar el propileno mediante contacto a contracorriente con metanol.

Balance de masa y corrientes de entrada

La alimentación gaseosa total se compone de la sumatoria de las corrientes 31, 39 y 40. El absorbente es metanol puro proveniente de etapas posteriores (corriente 42).

Utilizando los pesos moleculares de los componentes (propileno: 42,08; propano: 44,10; N₂: 28,01; metanol: 32,04), se transforman los datos de balance:

Flujos molares de entrada L_a (corriente 42)

- Metanol: $\frac{10000 \text{ kg/h}}{32,04 \text{ kg/kmol}} = 312,11 \text{ kmol/h}$
- Agua: $\frac{10 \text{ kg/h}}{18 \text{ kg/kmol}} = 0,56 \text{ kmol/h}$

Entonces, L_a=312,67 kmol/h y x_b = 0

Flujos molares de entrada V_b (corriente 31+39+40)

- Metanol: $\frac{1,83 \text{ kg/h}}{32,04 \text{ kg/kmol}} = 0,057 \text{ kmol/h}$
- Propileno: $\frac{624,9 \text{ kg/h}}{42,08 \text{ kg/kmol}} = 14,85 \text{ kmol/h}$
- Propano: $\frac{199,5 \text{ kg/h}}{44,1 \text{ kg/kmol}} = 4,52 \text{ kmol/h}$
- Nitrógeno: $\frac{852,2 \text{ kg/h}}{28,01 \text{ kg/kmol}} = 30,43 \text{ kmol/h}$
- PO: $\frac{2,16 \text{ kg/h}}{58,08 \text{ kg/kmol}} = 0,037 \text{ kmol/h}$

Entonces, V_b=49,894 kmol/h e y_b = $\frac{14,85 \text{ kmol/h}}{49,894 \text{ kmol/h}} = 0,2976$

Flujos molares de salida L_b (corriente 43)

- Metanol: $\frac{1000 \text{ kg/h}}{32,04 \text{ kg/kmol}} = 312,11 \text{ kmol/h}$
- Propileno: $\frac{600 \text{ kg/h}}{42,08 \text{ kg/kmol}} = 14,26 \text{ kmol/h}$
- Propano: $\frac{0,5 \text{ kg/h}}{44,1 \text{ kg/kmol}} = 0,011 \text{ kmol/h}$
- PO: $\frac{2 \text{ kg/h}}{58,08 \text{ kg/kmol}} = 0,034 \text{ kmol/h}$

Entonces, $L_b = 326,415 \text{ kmol/h}$ y $x_b = \frac{14,26 \text{ kmol/h}}{326,415 \text{ kmol/h}} = 0,0437$

Flujos molares de salida V_a (corriente 44)

- Metanol: $\frac{1,83 \text{ kg/h}}{32,04 \text{ kg/kmol}} = 0,057 \text{ kmol/h}$
- Propileno: $\frac{24,9 \text{ kg/h}}{42,08 \text{ kg/kmol}} = 0,59 \text{ kmol/h}$
- Propano: $\frac{199 \text{ kg/h}}{44,1 \text{ kg/kmol}} = 4,51 \text{ kmol/h}$
- PO: $\frac{0,16 \text{ kg/h}}{58,08 \text{ kg/kmol}} \approx 0 \text{ kmol/h}$
- Nitrógeno: $\frac{852,2 \text{ kg/h}}{28,01 \text{ kg/kmol}} = 30,43 \text{ kmol/h}$

Entonces, $V_a = 35,587 \text{ kmol/h}$ e $y_a = \frac{0,59 \text{ kmol/h}}{35,587 \text{ kmol/h}} = 0,0166$

Utilizando el parámetro de equilibrio $K = 1,9$ y los valores molares derivados de las corrientes, las condiciones de equilibrio son:

- $y_a^* = K \cdot x_a = 1,9 \times 0 = 0$
- $y_b^* = K \cdot x_b = 1,9 \times 0,0437 = 0,083$

Por lo tanto, la resolución numérica de Kremser quedaría como (Ec 5.46):

$$N = \frac{\log \left[\frac{0,2976 - 0,083}{0,0166 - 0} \right]}{\log \left[\frac{0,2976 - 0,0166}{0,083 - 0} \right]} = 2,1 \approx 3 \text{ etapas teóricas}$$

Con respecto a la relación de flujo (L/G), la torre opera con un exceso de solvente (312,67 kmol/h de metanol frente a 49,9 kmol/h de gas), lo que garantiza una fuerza impulsora elevada y una recuperación eficiente del propileno. Además, la eficiencia de recuperación con este

diseño, permite capturar el 96% $\left(\frac{600 \text{ kg/h}}{624,9 \text{ kg/h}} \times 100\right)$ del propileno que ingresa al sistema de venteo, reintegrando al reactor a través de la corriente 43.

Para el cálculo del diámetro de la Columna de absorción CA-41, se aplica la metodología de McCabe-Smith pág. 570. Este procedimiento se basa en determinar la velocidad de inundación del gas para luego operar a un margen de seguridad del 50%.

- Caudal de gas a tratar (G): 1.684,43 kg/h (corrientes 31+39+40).
- Relación líquido/gas (G_x/G_y): con 10.001,83 kg/h de líquido y 1.684,43 kg/h de gas, la relación es 5,93.
- Densidad del gas (ρ_y): a 2,0 MPa y considerando el peso molecular medio de la mezcla (33,6 g/mol), se estima en 27,2 kg/m³.
- Densidad del líquido (ρ_x): para el metanol, se toma 791 kg/m³.
- Relleno seleccionado: anillos Raschig de porcelana de 1", con $a_v=190 \text{ m}^2/\text{m}^3$ y $\varepsilon=0,73$.

| Tipo | Material | Dimensiones en pulgadas | Densidad media global, kg/m ³ de volumen de torre | Área media, a_v , por unidad de volumen de la torre m ² /m ³ | Porosidad ε |
|----------------------------|-----------|-------------------------|--|--|-------------------------|
| Rellenos colocados al azar | | | | | |
| Anillos Raschig | Acero | ½ x ½ | 1230 | 420 | 0,84 |
| | | 1 x 1 | 1170 | 187 | 0,85 |
| | Porcelana | ½ x ½ | 800 | 400 | 0,64 |
| | | 1 x 1 | 640 | 190 | 0,73 |
| Anillos Lessing | Porcelana | 2 x 2 | 590 | 92 | 0,74 |
| | | 1 x 1 | 800 | 226 | 0,66 |
| | | 2 x 2 | 780 | 105 | 0,68 |
| Monturas Berl | Porcelana | ½ * | 870 | 466 | 0,63 |
| | | 1 * | 720 | 249 | 0,69 |
| | | 1 ½ * | 610 | 144 | 0,75 |
| Monturas Intalox | Porcelana | ½ * | 540 | 623 | 0,78 |
| | | 1 * | 540 | 256 | 0,78 |
| | | 1 ½ * | 480 | 197 | 0,81 |

Tabla 5.32 Tipos de relleno con propiedades físicas

Fuente: (McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriott, P. , 2007)

Primero, se calcula el valor de la abscisa para ingresar al gráfico de correlación de inundación:

$$\text{Abscisa} = \frac{G_x}{G_y} \sqrt{\frac{\rho_y}{\rho_x}} \quad \text{Ec 5.47}$$

$$\text{Abscisa} = 5,93 \sqrt{\frac{27,2}{791}} = 1,1$$

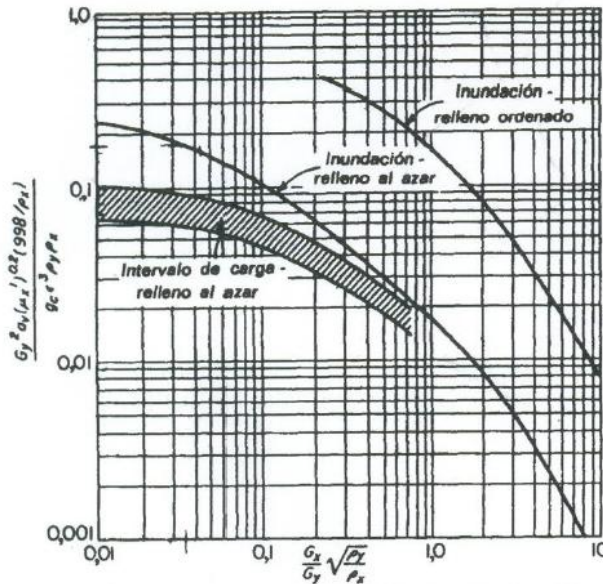


Fig 5.29 Velocidades de carga e inundación en torres de relleno

Fuente: (McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriott, P. , 2007)

Con este valor en el gráfico de velocidades de carga e inundación, se obtiene el valor de la ordenada para la curva de inundación (aproximadamente 0,015).

Aplicando la ecuación para despejar la velocidad másica de inundación:

$$G_y = \sqrt{\frac{0,015 g_c \epsilon^3 \rho_x \rho_y}{a_v(\mu)^{0,2} \frac{998}{\rho_x}}} \quad \text{Ec 5.48}$$

$$G_y = \sqrt{\frac{0,015 \cdot 1,271 \cdot 1 \text{kgm}/(\text{kgf h}^2) \cdot 0,73^3 \cdot 791 \text{ kg}/\text{m}^3 \cdot 27,2 \text{kg}/\text{m}^3}{190 \text{ m}^2/\text{m}^3 \cdot (0,6 \text{ cP})^{0,2} \cdot \frac{998}{791}}} = 6850 \text{ kg}/\text{h} \cdot \text{m}^2$$

Si la velocidad real es la mitad de la velocidad de inundación, el área S de la sección transversal de la torre es:

$$S = \frac{\text{Caudal de gas}}{\text{velocidad de inundación}} \quad \text{Ec 5.49}$$

$$S = \frac{1684,43 \text{ kg}/\text{h}}{\frac{6850 \text{ kg}/\text{hm}^2}{2}} = 0,492 \text{ m}^2$$

Finalmente, el diámetros será de:

$$D = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} = \sqrt{\frac{0,492 \text{ m}^2}{0,7854}} = 0,791 \text{ m} \approx 0,8 \text{ m}$$

El equipo requiere 3 etapas teóricas para procesar la carga gaseosa y recuperar el propileno con la eficiencia proyectada. Dado el bajo número de etapas, se recomienda una configuración de 5 platos reales o un lecho de relleno estructurado de 3 metros para garantizar el contacto necesario entre las fases. El diámetro final será de 80 cm, con anillos Raschig de 1" de porcelana.

5.4.15 Columna de destilación D-46

La columna D-46 constituye la primera etapa de fraccionamiento en la sección de purificación del proceso. Su función principal es el tratamiento de la corriente líquida desgaseificada proveniente del sistema de expansión flash (corriente 45) para separar los componentes valiosos de los subproductos acuosos.

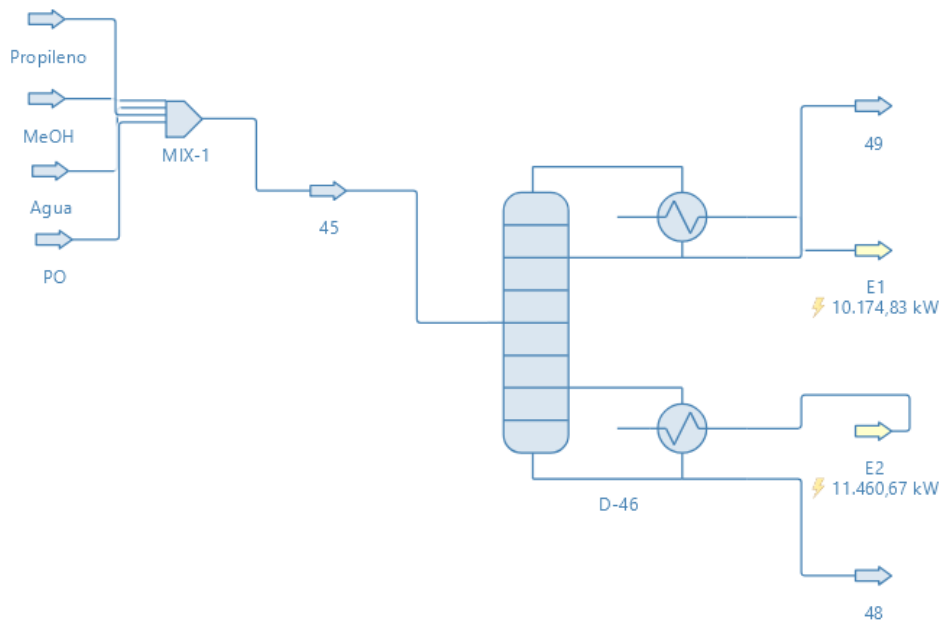


Fig. 5.30 Diagrama de flujo en DWSIM D-46

Balace de masa y criterios de separación

El diseño se basa en una separación por destilación donde se ha definido al óxido de propileno como el componente clave liviano (LK) y al agua como el componente clave pesado (HK). El objetivo es recuperar la mayor parte del producto en el destilado, minimizando su pérdida en los fondos de la torre.

- Alimentación (45): El equipo procesa un flujo másico de 16.802,3 kg/h que ingresa a una presión de 0,3 MPa y una temperatura de 20,15 °C.

- Destilado (49): Se obtiene una corriente de 9.935,31 kg/h que recupera el 99,9% del óxido de propileno alimentado junto con una fracción importante de metanol.
- Fondos (48): Se evacua un flujo de 6.867,59 kg/h, compuesto mayoritariamente por agua (1.530,02 kg/h) y metanol, con una concentración de óxido de propileno reducida a niveles despreciables.

Parámetros operativos y servicios auxiliares

La operación del equipo se mantiene a una presión constante de 0,3 MPa. Según los resultados del modelo de columna corta (*Shortcut Column*), los requerimientos energéticos y operativos son los siguientes:

- Etapas de contacto: Se determinó un requerimiento de 3,81 etapas mínimas, lo cual establece un diseño de 4 etapas reales para la columna.
- Relación de reflujo: Se ha adoptado una relación de reflujo igual a 3 para garantizar el cumplimiento de las especificaciones de pureza en el destilado.
- Cargas térmicas: El condensador (C-50) requiere una potencia de enfriamiento de 10.174,83 kW, mientras que el hervidor (IC-68) demanda una carga de calefacción de 11.460,67 kW.

| Tabla maestra de propiedades | | | | |
|---|-------------|-------------|-------------|-----------|
| Objeto | 49 | 48 | 45 | |
| Temperatura | 84,8481 | 101,036 | 20,1537 | C |
| Presión | 0,3 | 0,3 | 0,3 | MPa |
| Flujo másico | 9935,31 | 6867,59 | 16802,3 | kg/h |
| Flujo molar | 272591 | 251527 | 524101 | mol/h |
| Density (Mixture) | 693,39 | 489,22 | 824,881 | kg/m3 |
| Peso molecular (mezcla) | 36,4477 | 27,3036 | 32,0592 | kg/kmol |
| Entalpía específica (mezcla) | -844,002 | -1229,5 | -1277,1 | kJ/kg |
| Densidad (líquido 1) | 732,985 | 778,15 | 824,881 | kg/m3 |
| Conductividad térmica (líquido 1) | 0,173899 | 0,233565 | 0,21557 | W/(m.K) |
| Viscosidad cinemática (líquido 1) | 3,62165E-07 | 3,3023E-07 | 7,61823E-07 | m2/s |
| Viscosidad dinámica (líquido 1) | 0,000265462 | 0,000256968 | 0,000628413 | Pa.s |
| Capacidad calorífica (líquido 1) | 3,57565 | 4,34046 | 3,87123 | kJ/(kg.K) |
| Mass Flow (Mixture) / Methanol | 7122,43 | 5337,56 | 12459,5 | kg/h |
| Mass Flow (Mixture) / Propylene | 1,5501 | 1,70345E-11 | 1,55 | kg/h |
| Mass Flow (Mixture) / 1,2-propylene oxide | 2762,22 | 0,0146082 | 2762,06 | kg/h |
| Mass Flow (Mixture) / Water | 49,1081 | 1530,02 | 1579,12 | kg/h |

Tabla 5.33 Tabla maestra de propiedades D-46

Dimensionamiento mecánico estimado

A partir de las propiedades termofísicas de las mezclas y los caudales molares de vapor calculados, se han proyectado las dimensiones físicas del equipo:

- Diámetro interno: El diseño arroja un diámetro estimado de 2,36 metros para evitar fenómenos de inundación y permitir el tráfico de fluidos.
- Altura de la torre: Considerando un espaciamento entre platos de 0,5 metros, la sección de contacto se estima en 2,95 metros, a lo que se deberán adicionar los espacios de desvinculación en el tope y acumulación en el fondo.

| D-46 Shortcut Column | |
|-------------------------------------|-------------------|
| Relación de reflujo | 3 |
| Fracción molar clave pesada | 0,01 |
| Fracción molar de la clave de luz | 1E-06 |
| Presión del condensador | 0,3 MPa |
| Presión del hervidor | 0,3 MPa |
| Minimun Reflux Ratio | -0,821172 |
| Etapas mínimas | 3,81134 |
| Etapas de alimentación óptima | 3,03599 |
| Extracción del flujo molar líquido | 1,4664E+06 mol/h |
| Rectificar el flujo molar líquido | 817774 mol/h |
| Extracción del flujo molar de vapor | 1,21487E+06 mol/h |
| Rectificar el flujo molar de vapor | 1,09036E+06 mol/h |
| Servicio del condensador | 10174,8 kW |
| Deber de recalentador | 11460,7 kW |
| Etapas reales | 3,90549 |
| Stage Height | 0,5 m |
| Estimated Height | 2,95274 m |
| Estimated Diameter | 2,3627 m |

Fig. 5.31 Parámetros de diseño D-46

| Componente | 45 [kg/h] | 49 [kg/h] | 48 [kg/h] |
|--------------|-----------|-----------|-----------|
| Propileno | 1,55 | 1,55 | 0,00 |
| PO | 2.762,06 | 2.761,86 | 0,20 |
| Metanol | 12.459,50 | 4.287,55 | 8.172,36 |
| Agua | 1.579,12 | 33,01 | 1.546,11 |
| TOTAL [kg/h] | 16.802,30 | 7.084,22 | 9.718,68 |

Tabla 5.34 Corrientes de entrada y salida D-46

La columna D-46 actúa como la primera etapa de fraccionamiento, procesando 16.802,3 kg/h para separar el óxido de propileno del agua y el metanol mediante un diseño de 4 etapas reales.

Con una relación de reflujo de 3, el equipo logra recuperar el 99,9% del producto en el destilado, limitando la pérdida en los fondos a solo 0,20 kg/h de PO.

El dimensionamiento proyecta una torre de 2,36 metros de diámetro y 2,95 metros de altura de contacto, operando con una alta demanda energética de 10,17 MW en el condensador y 11,46 MW en el hervidor para asegurar la eficiencia de la separación. Se determinaron 3,81 etapas mínimas, resultando en una configuración de 4 etapas reales.

5.4.16 Condensador C-5

Para el diseño técnico del condensador C-50, se utiliza la carga térmica obtenida en la simulación. Este equipo es responsable de condensar el vapor de cabeza de la columna D-46, permitiendo el reflujo necesario para la separación propano/propileno y proporcionando la corriente de alimentación al reactor.

El equipo opera a baja presión (0,3 MPa) para condensar la mezcla de óxido de propileno. Su función es crítica, ya que define la pureza del óxido de propileno que se genera y la eficiencia de la purga de propileno

Especificaciones térmicas y caudal de servicio

De acuerdo con los datos de simulación para la columna D-33, se establecen los siguientes parámetros:

- Carga térmica (Q): 10174,83 kW.
- Agua de enfriamiento: se asume entrada a 25 °C y salida a 35 °C.

Caudal de agua necesario (Ec. 5.29):

$$m_{w\ enf} = \frac{10174830\ J.s}{4184\ J/(kg^{\circ}C).10^{\circ}C} = 243,18\ kg/s = 875,463\ m^3/h$$

Para el dimensionamiento mecánico, se utilizan los siguientes valores reportados por DWSIM evaluados a 0,3 MPa y temperatura de 84,85°C:

- Viscosidad dinámica (vapor): $2,65.10^{-4}$ Pa.s
- Conductividad térmica: 0,17 W/(m.K)
- Densidad del líquido: 732,99 kg/m³

El C-50 es un condensador de baja presión donde la diferencia media logarítmica es favorable para el intercambio (Ec. 5.21):

$$\Delta T_{LM} = \frac{(84,85 - 35)^{\circ}C - (84,85 - 25)^{\circ}C}{\ln\left(\frac{49,35^{\circ}C}{59,35^{\circ}C}\right)} = 54,2^{\circ}C$$

Para condensación se asume un $U = 800\ W/(m^2K)$ (Ec 5.22):

$$a = \frac{10174830\ W}{800\ w/(m^2K).54,2\ K} = 234,66\ m^2$$

Se usa para su diseño tubos de 5 metros de largo y diámetro comercial de 2" BWG 14, siendo su $D_o = 0,0508\ m$ y $D_i = 0,04658\ m$. Su área superficial por cada tubo es de:

$$A_t = \pi \cdot 0,0508 \text{ m} \cdot 5 \text{ m} = 0,797 \text{ m}^2$$

Para un área de 234,66 m², el número de tubos necesarios será de:

$$N_t = \frac{234,66 \text{ m}^2}{0,797 \text{ m}^2} = 294,4 \approx 295 \text{ tubos.}$$

Para determinar el número de pasos, se usa la siguiente secuencia:

$$N_{pasos} = \frac{m}{\rho v A_{tubo}}, A_{tubo} = \frac{Di^2}{4}$$

$$A_{tubo} = \frac{\pi(0,04658 \text{ m})^2}{4} = 0,001702 \text{ m}^2$$

$$Q = \frac{7084,22 \text{ kg/h}}{733 \text{ kg/m}^3} = 9,66 \text{ m}^3/\text{h} = 0,002683 \text{ m}^3/\text{s}$$

Se proponen 2 pasos, por lo cual:

$$N_{tubos \text{ por paso}} = 393/2 \approx 196 \text{ tubos}$$

$$v = \frac{0,002683 \text{ m}^3/\text{s}}{196 \times 0,001702 \text{ m}^2} = 0,008 \text{ m/s (muy baja)}$$

Se propone 1 solo paso con 295 tubos 2" BWG 14.

| Componente | Destilado 47 (kg/h) | |
|--------------|---------------------|-----|
| | 49 | 53 |
| Propileno | 0,05 | 1,5 |
| PO | 2761,36 | 0,5 |
| Metanol | 4287,35 | 0,2 |
| Agua | 33,01 | 0 |
| TOTAL [kg/h] | 7081,77 | 2,2 |

Tabla 5.35 Corrientes de C-50

5.4.17 Reboiler IC-68

El equipo procesa la corriente de fondo de la columna D-46, rica en metanol y agua. Su función es vaporizar una fracción de este líquido para mantener el perfil de temperaturas en la torre y asegurar que el contenido de PO en los fondos (corriente 48) no supere el 0,01%.

Especificaciones de carga y fluidos de servicio

Basándose en los resultados de la simulación, se definen los parámetros térmicos de operación:

- Carga térmica (Q): 11460,67 kW
- Temperatura de proceso (T): 101 °C a una presión de 0,3 MPa.
- Vapor de servicio: se utilizará vapor saturado a 2 bar T° 133,69 °C, con un calor de vaporización de 2163,3 kJ/kg (Ec 5.31):

$$M_{vap} = \frac{11460670 \text{ kW}}{2163 \text{ kJ/kg}} = 5298,5 \text{ kg/h}$$

Diseño del área de intercambio

Siguiendo los estándares adoptados, se utilizan tubos de 2" BWG 14 con una longitud de 5 metros. Se asume un coeficiente global de transferencia U de 700 W/(m² K), adecuado para ebullición de mezclas orgánicas.

- Diferencia de temperatura en condiciones de ebullición y condensación isotérmica:

$$\Delta T1 = \Delta T2 = \Delta T_{LM} = 133,7 \text{ °C} - 101 \text{ °C} = 22,7 \text{ °C}.$$

El área requerida será de:

$$A = \frac{11460670 \text{ W}}{700 \text{ W/(m}^2\text{K)} \cdot 22,7 \text{ K}} = 721,25 \text{ m}^2$$

$$N_{tubos} = \frac{721,25 \text{ m}^2}{\pi \cdot 0,0508 \text{ m} \cdot 5 \text{ m}} = 904,6 \approx 905 \text{ tubos}$$

Un reboiler tipo kettle o thermosiphon con más de 900 tubos:

- requiere cascos muy grandes (difíciles de fabricar y transportar),
- aumenta el riesgo de vibración si se diseñan pasos bajos,
- baja demasiado la velocidad en los tubos → fouling seguro,
- complica la distribución del flujo,
- se vuelve pesado y costoso,
- puede superar los límites de placas tubulares (espesor, dilatación).

Se recomiendan tres reboilers en paralelo, por lo cual cada uno tendrá 302 tubos.

Dimensionamiento de la carcasa (D_s)

Se utiliza un arreglo triangular con un paso estándar de 31,75 mm.

$$D_b = 50,8 \text{ mm} \left(\frac{302}{0,249} \right)^{1/2,207} = 1268 \text{ mm}$$

Para el D_s, se aplica un criterio de diseño de 1,7 veces el diámetro del haz para un reboiler tipo Kettle:

$$D_s = 1,7 \times 1268 \text{ mm} = 2155,74 \text{ mm} \approx 2,2 \text{ m}$$

El IC-68 se define como tres intercambiadores de 302 cada uno tubos alojados en una carcasa de 2,2 metros de diámetro. Su diseño permite manejar la carga térmica de 11460,67 kW requerida para la purificación del PO, garantizando que la corriente de fondo está casi libre del producto principal.

5.4.18 Columna de stripping St-51

Dadas las corrientes y el diseño de esta planta para la capacidad instalada, no será necesario ni conveniente hacer una torre de stripping para el despojamiento de propileno, ya que sólo llegan 1,55 kg/h por los equipos anteriores.

Por lo tanto, la corriente 47 se divide en 53 (a EF-16) y 49 (directamente a la columna de destilación D-55).

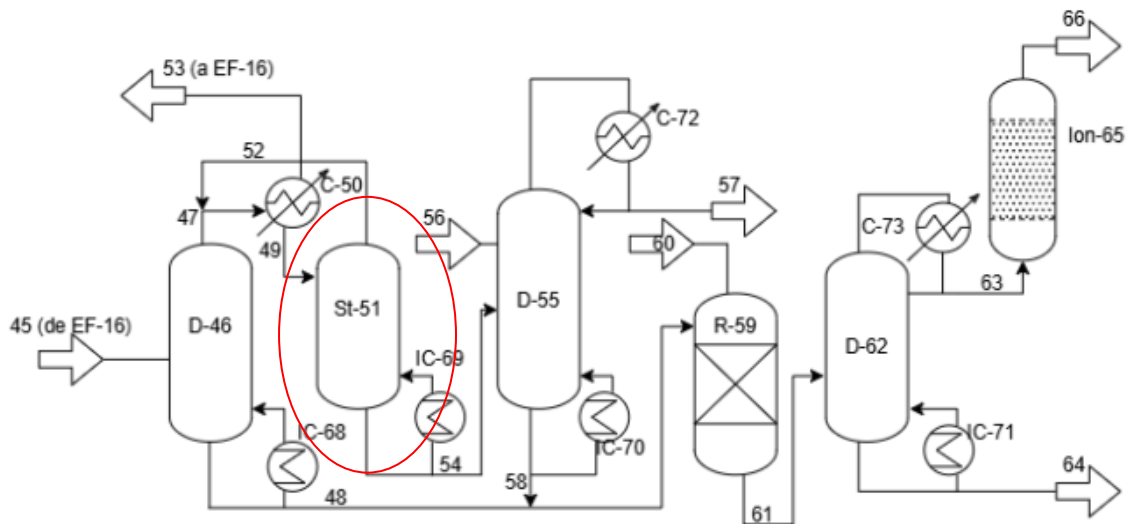


Fig. 5.32 St-51 en diagrama de flujo

5.4.19 Columna de destilación extractiva D-55

La corriente de destilado 49 de D-46 se envía a la columna de óxido de propileno (D-55), donde se somete a una destilación extractiva utilizando una propilenglicol (56).

Una columna de destilación extractiva es una operación de destilación realizada en presencia de un solvente de alto punto de ebullición, miscible y no azeotrópico, que modifica selectivamente las interacciones intermoleculares del sistema, permitiendo que los componentes ganen una diferencia de volatilidad suficiente para ser separados.

1. El solvente extractivo (56) se alimenta por encima del punto de entrada de la alimentación.
2. El solvente interactúa preferentemente con uno de los componentes, como el metanol.
3. Esa interacción reduce la volatilidad de ese componente en la mezcla.
4. El componente que queda menos afectado se vuelve relativamente más volátil → sube y se obtiene como producto de cabeza (óxido de propileno purificado).

- En el fondo queda el solvente + el componente pesado, que luego se separan fácilmente porque el solvente tiene un punto de ebullición mucho más alto y no forma azeótropos.

La columna se diseña para obtener óxido de propileno purificado (57) como producto de cabeza, con una pureza superior al 99,9 % en peso, adecuado para grado polímero.

La clave es que se inyecta un solvente no volátil dentro de la columna, el cual altera la volatilidad relativa de los componentes, facilitando que uno de ellos se purifique en la cabeza. Esto es exactamente lo que hace la hidrazina para obtener óxido de propileno al 99,9 %.

Para el diseño técnico de la Columna de destilación extractiva D-55, se han utilizado los resultados de la simulación en DWSIM empleando polietilenglicol (PEG) como solvente extractivo.

Este proceso permite superar la limitación de volatilidad entre el óxido de propileno (PO) y el metanol, asegurando una purificación de grado polímero.

Diseño de la columna de destilación extractiva D-55

La columna D-55 procesa la corriente de destilado bruto proveniente de la etapa de pre-separación (corriente 49). Debido a que el óxido de propileno y el metanol presentan volatilidades relativas cercanas, se introduce una corriente de polietilenglicol (PEG) como solvente extractivo para facilitar la separación.

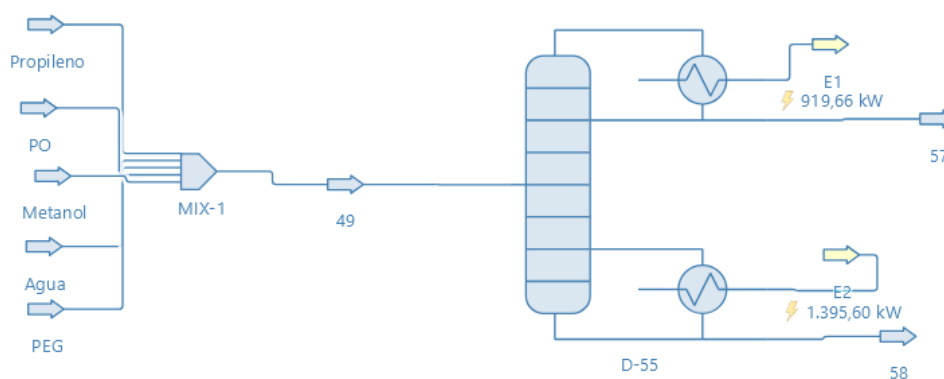


Fig. 5.33 Diagrama de flujo en DWSIM D-55

Balance de masa y especificaciones de pureza

El equipo opera bajo un esquema de destilación extractiva donde el solvente interactúa selectivamente con el metanol, aumentando la volatilidad relativa del óxido de propileno hacia el tope de la torre.

- Alimentación (49): Ingresar un flujo de 10.681,8 kg/h, compuesto principalmente por óxido de propileno y metanol.
- Destilado purificado (57): Se obtiene un producto de cabeza de 2.766,33 kg/h con una pureza de óxido de propileno del 99,44% en masa. El flujo residual de metanol en esta corriente se reduce a 15,33 kg/h, cumpliendo con los estándares de calidad requeridos.

- Fondos (58): Se evacúa una corriente de 7.915,62 kg/h que transporta la totalidad del solvente PEG junto con el metanol capturado (4.272,02 kg/h). La pérdida de producto en los fondos es mínima, registrando solo 10,61 kg/h de PO.

Parámetros operativos y requerimientos energéticos

La simulación se ha realizado bajo el modelo de columna corta (*Shortcut Column*), estableciendo las condiciones necesarias para la estabilidad del proceso:

- Etapas de diseño: Se han determinado 4,23 etapas mínimas, resultando en una configuración de 6 etapas reales para la columna.
- Relación de reflujo: Se ha fijado una relación de reflujo de 1,5, optimizando el balance entre la pureza del destilado y el consumo de servicios.
- Cargas térmicas: El condensador (E1) opera con una carga de 919,66 kW, mientras que el hervidor (E2) demanda 1.395,60 kW para la vaporización de los componentes ligeros.

| Tabla maestra de propiedades | | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------------|
| Objeto | 58 | 57 | 49 | |
| Temperatura | 72,0669 | 35,0571 | 12,0361 | C |
| Presión | 0,101325 | 0,101325 | 0,101325 | MPa |
| Flujo másico | 7915,62 | 2766,33 | 10681,8 | kg/h |
| Flujo molar | 182653 | 47843,4 | 230494 | mol/h |
| Density (Mixture) | 720,185 | 139,181 | 850,687 | kg/m ³ |
| Peso molecular (mezcla) | 43,3369 | 57,8205 | 46,343 | kg/kmol |
| Conductividad térmica (mezcla) | 0,193713 | 0,16165 | 0,196583 | W/[m.K] |
| Conductividad térmica (líquido en general) | 0,193749 | 0,163716 | 0,196583 | W/[m.K] |
| Viscosidad dinámica (líquido en general) | 0,00166565 | 0,000266278 | 0,0205936 | Pa.s |
| Capacidad calorífica (líquido total) | 3,75229 | 2,21118 | 3,31257 | kJ/[kg.K] |
| Mass Fraction (Mixture) / Methanol | 0,539695 | 0,00554161 | 0,401371 | |
| Mass Flow (Mixture) / Methanol | 4272,02 | 15,3299 | 4287,35 | kg/h |
| Mass Fraction (Mixture) / Water | 0,00416837 | 5,34316E-06 | 0,00309031 | |
| Mass Flow (Mixture) / Water | 32,9952 | 0,014781 | 33,01 | kg/h |
| Mass Fraction (Mixture) / Propylene | 5,4979E-15 | 1,80757E-05 | 4,68087E-06 | |
| Mass Flow (Mixture) / Propylene | 4,35193E-11 | 0,0500034 | 0,05 | kg/h |
| Mass Fraction (Mixture) / 1,2-propylene oxide | 0,00134015 | 0,994435 | 0,258511 | |
| Mass Flow (Mixture) / 1,2-propylene oxide | 10,6081 | 2750,94 | 2761,36 | kg/h |
| Mass Fraction (Mixture) / 1,2-propylene glycol | 0,454797 | 2,85213E-18 | 0,337023 | |
| Mass Flow (Mixture) / 1,2-propylene glycol | 3600 | 7,88993E-15 | 3600 | kg/h |

Tabla 5.36 Tabla maestra de propiedades en D-55

Dimensionamiento mecánico proyectado

A partir de los flujos molares de vapor (147887 mol/h) y líquido calculados por el simulador, se han estimado las dimensiones físicas para la construcción del equipo:

- Diámetro interno: se proyecta un diámetro de 1,20 metros, dimensiones adecuadas para manejar el tráfico de fluidos sin alcanzar el punto de inundación.
- Altura de la torre: con un espaciamiento entre platos (*Stage Height*) de 0,5 metros, la sección de contacto alcanza los 3,91 metros.

| D-55 Shortcut Column | |
|-------------------------------------|---------------|
| Relación de reflujo | 1,5 |
| Fración molar clave pesada | 0,01 |
| Fración molar de la clave de luz | 0,001 |
| Presión del condensador | 0,101325 MPa |
| Presión del hervidor | 0,101325 MPa |
| Mínimum Reflux Ratio | 0,203135 |
| Etapas mínimas | 4,22751 |
| Etapas de alimentación óptima | 2,88913 |
| Extracción del flujo molar líquido | 330540 mol/h |
| Rectificar el flujo molar líquido | 71765,2 mol/h |
| Extracción del flujo molar de vapor | 147887 mol/h |
| Rectificar el flujo molar de vapor | 119609 mol/h |
| Servicio del condensador | 919,66 kW |
| Deber de recalentador | 1395,6 kW |
| Etapas reales | 5,81545 |
| Stage Height | 0,5 m |
| Estimated Height | 3,90772 m |
| Estimated Diameter | 1,2039 m |

Fig. 5.34 Parámetros de diseño D-55

| Componente | 49+56 [kg/h] | 57 [kg/h] | 58 [kg/h] | Justificación |
|--------------|--------------|-----------|-----------|---|
| PEG | 3.600,00 | 0,00 | 3.600,00 | Solvente no volátil recuperado. |
| Metanol | 4.287,35 | 15,33 | 4.272,02 | Retenido selectivamente en fase líquida por la acción del solvente. |
| PO | 2.761,36 | 2.750,94 | 10,61 | Producto de cabeza con pureza superior al 99,4%. |
| Propileno | 0,05 | 0,05 | 0,00 | Eliminación de trazas residuales por el tope de la torre. |
| Agua | 33,01 | 0,01 | 32,99 | Componente pesado arrastrado hacia la corriente de fondos. |
| TOTAL [kg/h] | 10.681,80 | 2.766,33 | 7.915,62 | Flujos validados según simulación en DWSIM. |

Tabla 5.37 Corrientes finales D-55

5.4.20 Condensador C-72

Para el diseño técnico del condensador C-72, asociado a la columna de destilación extractiva D-55, se utiliza la carga térmica y las propiedades termofísicas obtenidas en la simulación de DWSIM. Este equipo es el encargado de condensar el vapor de cabeza compuesto por óxido de propileno de alta pureza, permitiendo el reflujo necesario para alcanzar la calidad de grado polímero.

Diseño del condensador C-72

El equipo opera a una presión de 0,11 MPa (presión atmosférica con ligera sobrepresión de columna) para condensar la mezcla de óxido de propileno purificado. Su función es determinante para asegurar que la corriente de producto final (57) cumpla con las especificaciones técnicas.

Especificaciones térmicas y caudal de servicio

De acuerdo con los datos de simulación para la columna D-55, se establecen los siguientes parámetros:

- Carga térmica (Q): 919,66 kW.
- Agua de enfriamiento: Se asume entrada a 25 °C y salida a 35 °C.

Caudal de agua necesario (m_{enf}):

$$m_{w\ enf} = \frac{919660\ J.s}{4184\ J/(kg^{\circ}C).10^{\circ}C} = 21,98\ kg/s = 79,13\ m^3/h$$

Para el dimensionamiento mecánico, se utilizan los valores reportados por DWSIM a la temperatura de condensación de 37,85 °C (punto de burbuja del PO a esa presión):

$$\Delta T_1 = 37,85 - 35 = 2,85\ ^{\circ}C$$

$$\Delta T_2 = 37,85 - 25 = 12,85\ ^{\circ}C$$

$$\Delta T_{LM} = \frac{(12,85)^{\circ}C - (2,85)^{\circ}C}{\ln\left(\frac{12,85^{\circ}C}{2,85^{\circ}C}\right)} = 6,64\ ^{\circ}C$$

Considerando la condensación de un componente orgánico puro con agua, se asume un coeficiente global de transferencia $U = 800\ W/m^2K$:

$$A = \frac{919660W}{800\ W/(m^2K).6,64\ K} = 173,12\ m^2$$

Dimensionamiento mecánico

Se utilizan para su diseño tubos de 5 metros de largo y diámetro comercial de 1" BWG 14.

$$N_{tubos} = \frac{173,12 \text{ m}^2}{\pi \cdot 5 \text{ m} \cdot 0,0254 \text{ m}} = 433,8 \approx 434 \text{ tubos}$$

Verificación de velocidad en tubos

- Caudal volumétrico: el flujo destilado total es de 2766,33 kg/h, siendo el volumétrico de 3,33 m³/h.

Para un solo paso de tubos, la velocidad tiende a ser muy pequeña, por lo cual se recomienda colocar 3 condensadores en serie para amortiguar este efecto, con 145 tubos cada uno.

5.4.21 Reboiler IC-70

El rehervidor IC-70 debe proveer el calor necesario para la operación de la columna D-55, utilizada en una separación extractiva donde el solvente PEG captura selectivamente el metanol, permitiendo que el óxido de propileno ascienda hacia el tope con una pureza superior al 99,4%.

El fondo de la torre está compuesto principalmente por PEG (3.600 kg/h) y metanol (4.272 kg/h), mezclados con una pequeña cantidad de agua y trazas residuales de PO. La corriente sale de la columna a aproximadamente 72 °C y requiere la provisión de calor para generar el vapor que regresa a la columna y sostiene el perfil interno de la operación.

La simulación en DWSIM define un deber térmico para el rehervidor de 1395,6 kW. La utilidad disponible es vapor saturado a 2 bar, cuya temperatura de condensación es de 133,7 °C y su calor latente es de 2163 kJ/kg. La diferencia térmica entre la condensación del vapor y la ebullición del fondo de torre es amplia, alrededor de 61–62 °C, y permite lograr buenos coeficientes de transferencia incluso considerando la presencia de PEG, un fluido más viscoso que aumenta la resistencia térmica del lado del proceso.

$$m_{vap} = \frac{1395600 \text{ kW}}{2163 \text{ kJ/kg}} = 645,21 \text{ kg/h}$$

La mayor parte del calor en este tipo de equipos se transfiere en condiciones de ebullición en piscina (*pool boiling*), lo cual siempre es recomendable cuando el fondo contiene componentes muy viscosos o con tendencia al ensuciamiento. Por esta razón, para el IC-70 resulta lógico adoptar nuevamente un reboiler tipo kettle, ya que permite una superficie mojada amplia, menor pérdida de carga y un acceso más sencillo para inspección.

En este diseño, el vapor de servicio se hace condensar dentro de los tubos, manteniendo el fluido de proceso del lado de la carcasa, lo cual evita que el PEG entre en contacto con superficies estrechas donde podría depositarse y facilitar fouling.

Debido a la viscosidad del PEG, se considera un coeficiente global de transferencia térmica algo más conservador que en el IC-68. Mientras que mezclar orgánicos livianos permite operar en torno a 700 W/m²·K, aquí es prudente trabajar con un rango de 400 a 600 W/m²·K.

Aun así, la diferencia de temperatura disponible es suficientemente grande para que el área requerida siga siendo pequeña. Con estos valores, el área necesaria para transferir los 1,396 MW cae entre 38 m² (U=600) y 56,54 m² (U=400). Para asegurar confiabilidad operativa,

resistencia al ensuciamiento y flexibilidad, se propone instalar aproximadamente 70 m² de superficie, incorporando un margen razonable sin sobredimensionar el equipo.

$$\Delta T_1 = \Delta T_2 = \Delta T_{LM} = 133,7^\circ C - 72^\circ C = 61,7^\circ C$$

El área requerida será de:

$$A = \frac{1395600 W}{400 W/(m^2 K) \cdot 61,7 K} = 56,54 m^2$$

Siguiendo la filosofía adoptada en el IC-68, el arreglo de tubos recomendado es nuevamente 2" BWG 14 y longitud de 5 m. Cada tubo aporta alrededor de 0,797 m² de superficie, por lo que instalar alrededor de 90 a 100 tubos cubre perfectamente el área requerida con margen. Tomar un número redondo como 96 tubos facilita el diseño del cabezal y el patrón de perforado de la placa tubular.

$$N_{tubos} = \frac{70 m^2}{\pi \cdot 0,0508 m \cdot 5m} = 87,7 \approx 88 tubos$$

Con esta cantidad, el haz alcanza un diámetro aproximado de 1,14 m, calculado mediante la correlación estándar para disposición triangular. Para mantener el comportamiento hidráulico adecuado del kettle, el diámetro externo de la carcasa debería ser alrededor de 1,3 a 1,4 metros, lo que asegura un volumen líquido suficiente por encima del haz y una circulación estable entre la columna y el rehervidor.

$$D_b = 50,8 mm \left(\frac{96}{0,249} \right)^{1/2,207} = 754 mm$$

$$D_s = 1,7 \times 754 mm = 1281,8 mm \approx 1,3 m$$

En este tipo de configuración, la circulación natural funciona sin bombas: el líquido del fondo cae hacia el kettle, allí se calienta, una fracción se vaporiza y regresa a la torre por la boquilla superior. El diseño debe contemplar un nivel de líquido que cubra holgadamente el haz tubular y que permita formar la mezcla bifásica sin arrastre excesivo. Para ello, suele preverse un demister interno que evita que gotas de PEG asciendan junto con el vapor. También deben considerarse boquillas de drenaje, venteo y una adecuada trampa de vapor del lado del servicio para evacuar el condensado sin permitir el ingreso de aire.

En términos mecánicos, el equipo puede construirse en acero inoxidable 304 o 316, según disponibilidad y compatibilidad con la calidad del condensado. El PEG y el metanol no representan un riesgo de corrosión significativo, aunque siempre se recomienda verificar la composición del agua de condensado para asegurar que no existan cloruros elevados. Dado que la limpieza ocasional será necesaria, conviene utilizar un diseño con haz extraíble para permitir inspección interna y mantenimiento programado.

5.4.22 Reactor de hidrogenación R-59

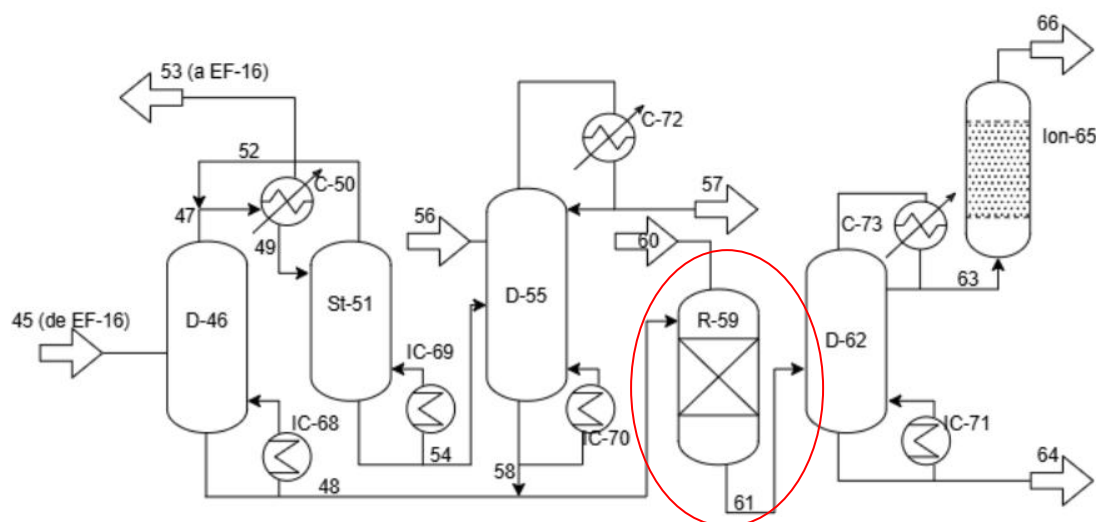


Fig. 5.35 Reactor R-59 en diagrama de flujo

En el esquema original de la planta, el reactor R-59 tenía como objetivo la descomposición catalítica de los residuos de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) no reaccionado para evitar riesgos de inestabilidad térmica en las etapas de recuperación de solvente. No obstante, tras el análisis de los balances de masa y energía obtenidos en la simulación, se ha determinado que la inclusión de este equipo no resulta necesaria por las siguientes razones:

- Conversión completa del reactivo clave: los datos de operación del reactor principal de epoxidación R-03 indican que se ha alcanzado casi un consumo del 100% del peróxido de hidrógeno alimentado. Al no detectarse trazas de este reactivo en la corriente de alimentación a la sección de purificación (corriente 45), la función del reactor de acabado queda sin sustento operativo (por la capacidad de la planta no se justifica).
- Eficiencia de la separación en D-46 y D-55: el análisis de las corrientes de fondos de la columna de pre-separación (D-46) y de la columna extractiva (D-55) confirma la ausencia de peróxidos residuales, concentrando únicamente metanol, agua y solvente extractivo (PEG).
- Optimización de costos de inversión y operación (CAPEX/OPEX): la eliminación del reactor R-59 permite una reducción significativa en el gasto de capital, al prescindir de un recipiente de alta presión y su correspondiente carga de catalizador. Asimismo, se eliminan los costos operativos asociados al mantenimiento y control de la temperatura en esta etapa adicional de reacción.

5.4.23 Columna de destilación D-62

La columna D-62 tiene como objetivo el fraccionamiento de la mezcla de fondos proveniente de las columnas D-46 y D-55. Al haberse verificado la conversión total del peróxido de hidrógeno en el reactor principal, las corrientes 48 y 58 se unifican en la corriente 61 para alimentar directamente este equipo, eliminando la necesidad de una etapa de hidrogenación intermedia.

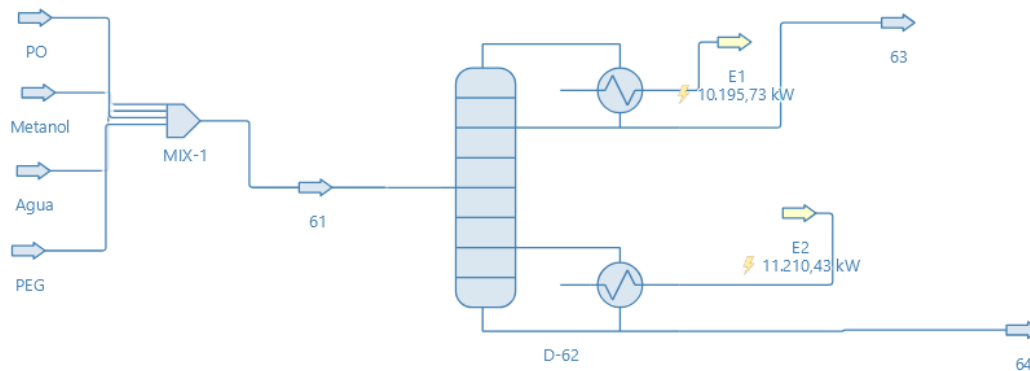


Fig. 5.36 Diagrama de flujo en DWSIM D-62

Balance de masa y objetivos de separación

El diseño de la columna se ha configurado para separar el metanol (clave liviano) del agua y el polietilenglicol (claves pesados).

- Alimentación (61): El equipo procesa un flujo másico total de 17.634,3 kg/h. Esta corriente está compuesta principalmente por metanol (12.444,4 kg/h), agua (1.579,1 kg/h) y PEG (3.600 kg/h).
- Destilado (63): Se obtiene una corriente de cabeza de 12.483,3 kg/h con una pureza de metanol del 99,3% en masa. Este flujo se recircula al reactor de epoxidación como solvente recuperado.
- Fondos (64): Se evacúan 5.151,05 kg/h, concentrando la totalidad del polietilenglicol (3.600 kg/h) y el agua (1.508,63 kg/h). La pérdida de metanol en esta corriente es mínima (42,4 kg/h), lo que representa una eficiencia de recuperación superior al 99,6%.

| Tabla maestra de propiedades | | | |
|--|-------------|-------------|------------|
| Objeto | 64 | 63 | 61 |
| Temperatura | 102,09 | 64,7315 | 19,7484 |
| Presión | 0,101325 | 0,101325 | 0,101325 |
| Flujo másico | 5151,05 | 12483,3 | 17634,3 |
| Flujo molar | 132376 | 391153 | 523528 |
| Flujo volumétrico | 8,69977 | 64,0338 | 20,9884 |
| Density (Mixture) | 592,09 | 194,948 | 840,192 |
| Peso molecular (mezcla) | 38,9122 | 31,9141 | 33,6836 |
| Entalpía específica (mezcla) | -1232,15 | -1120,66 | -1360,38 |
| Conductividad térmica (líquido en general) | 0,283019 | 0,192323 | 0,219906 |
| Viscosidad dinámica (líquido en general) | 0,00106319 | 0,000344003 | 0,00589291 |
| Capacidad calorífica (líquido total) | 4,01214 | 4,04789 | 4,03167 |
| Mass Fraction (Mixture) / 1,2-propylene oxide | 8,11503E-17 | 0,000865961 | 0,00061301 |
| Mass Flow (Mixture) / 1,2-propylene oxide | 4,18009E-13 | 10,81 | 10,81 |
| Mass Fraction (Mixture) / Methanol | 0,0082344 | 0,993489 | 0,705692 |
| Mass Flow (Mixture) / Methanol | 42,4158 | 12402 | 12444,4 |
| Mass Fraction (Mixture) / Water | 0,292879 | 0,00564493 | 0,0895471 |
| Mass Flow (Mixture) / Water | 1508,63 | 70,4673 | 1579,1 |
| Mass Fraction (Mixture) / 1,2-propylene glycol | 0,698887 | 4,99258E-23 | 0,204148 |
| Mass Flow (Mixture) / 1,2-propylene glycol | 3600 | 6,23237E-19 | 3600 |

Tabla 5.38 Tabla maestra de propiedades D-62

Parámetros operativos y servicios auxiliares

La columna opera a presión atmosférica (0,101 MPa) para facilitar la separación térmica de los componentes. Según los resultados de la simulación en DWSIM:

Etapas de contacto: Se han determinado 7,05 etapas mínimas, lo que resulta en un diseño de 10 etapas reales para asegurar el cumplimiento de las purezas.

Relación de reflujo: Se ha adoptado una relación de reflujo de 1,5, optimizando el compromiso entre la calidad del metanol recuperado y el gasto energético.

Cargas térmicas: El condensador (E1) requiere una potencia de 10.195,7 kW, mientras que el hervidor (E2) demanda 11.210,4 kW para la operación en régimen permanente.

Dimensionamiento mecánico estimado

A partir del tráfico de vapores internos calculado por el simulador, se han proyectado las dimensiones físicas del equipo:

- Diámetro interno: se estima un diámetro de 2,68 metros, necesario para manejar el flujo molar de vapor de $1,05 \cdot 10^6$ mol/h sin riesgo de inundación.
- Altura de la torre: considerando un espaciamiento entre platos de 0,5 metros, la sección de contacto estimada es de 6,08 metros.

| D-62 Shortcut Column | |
|-------------------------------------|-------------------|
| Relación de reflujo | 1,5 |
| Fración molar clave pesada | 0,01 |
| Fración molar de la clave de luz | 0,01 |
| Presión del condensador | 0,101325 MPa |
| Presión del hervidor | 0,101325 MPa |
| Minimum Reflux Ratio | 0,398107 |
| Etapas mínimas | 7,05579 |
| Etapas de alimentación óptima | 6,55449 |
| Extracción del flujo molar líquido | 1,19173E+06 mol/h |
| Rectificar el flujo molar líquido | 586729 mol/h |
| Extracción del flujo molar de vapor | 1,05935E+06 mol/h |
| Rectificar el flujo molar de vapor | 977882 mol/h |
| Servicio del condensador | 10195,7 kW |
| Deber de recalentador | 11210,4 kW |
| Etapas reales | 10,1668 |
| Stage Height | 0,5 m |
| Estimated Height | 6,08341 m |
| Estimated Diameter | 2,6806 m |

Fig. 5.37 Parámetros de diseño D-62

| Componente | 61 [kg/h] | 63 [kg/h] | 64[kg/h] | Justificación del reparto |
|------------|-----------|-----------|----------|---|
| Metanol | 12.444,40 | 12.402,00 | 42,41 | Recuperación del 99,6% del solvente para el lazo de reacción. |
| Agua | 1.579,10 | 70,47 | 1.508,63 | Concentración mayoritaria en fondos como subproducto acuoso. |

| | | | | |
|--------------------|-----------|-----------|----------|---|
| PEG | 3.600,00 | 0,00 | 3.600,00 | Recuperación íntegra del solvente extractivo para su reuso. |
| Óxido de propileno | 10,81 | 10,81 | 0,00 | Arrastre de trazas remanentes hacia la corriente de cabeza. |
| TOTAL [kg/h] | 17.634,31 | 12.483,28 | 5.151,04 | Balances validados según simulación en DWSIM. |

Tabla 5.39 Corrientes en D-62

5.4.24 Condensador C-73

Para completar el diseño del Condensador C-73, se utilizan las propiedades termofísicas obtenidas de la simulación en DWSIM para la corriente de cabeza de la columna de recuperación de metanol D-62.

El objetivo principal de este equipo es retirar la carga térmica necesaria para condensar el metanol recuperado, permitiendo el reflujo hacia la columna y la obtención de solvente con pureza superior al 99,9% para su recirculación al proceso.

Especificaciones térmicas y caudal de servicio

A partir de los datos de la simulación para la columna D-62, el condensador debe operar bajo las siguientes especificaciones:

- Carga térmica: 10195,7 kW
- Agua de enfriamiento: Se asume entrada a 25 °C y salida a 35°C.
- Caudal de agua necesario $m_{w\ enf}$:

$$m_{w\ enf} = \frac{10195700 \text{ J.s}}{4184 \text{ J}/(\text{kg}^\circ\text{C}).10^\circ\text{C}} = 243,68 \text{ kg/s} = 877,26 \text{ m}^3/\text{h}$$

Dimensionamiento mecánico

Se utilizan los valores reportados por DWSIM evaluados a 0,1013 MPa y una temperatura de condensación de 64,73 °C:

- Viscosidad dinámica (líquido): 0,000344 Pa.s
- Conductividad térmica: 0,1923 W/ (m.K)
- Densidad del líquido: 194,95 kg/m³

El C-73 es un condensador de baja presión donde la diferencia media logarítmica es favorable para el intercambio:

$$\Delta T_{LM} = \frac{(64,73 - 35)^\circ\text{C} - (64,73 - 25)^\circ\text{C}}{\ln\left(\frac{29,73^\circ\text{C}}{39,73^\circ\text{C}}\right)} = 34,55^\circ\text{C}$$

Para condensación de alcoholes se asume un coeficiente global de transferencia $U = 800 \text{ W/m}^2\text{K}$:

$$A = \frac{10195700 \text{ W}}{800 \text{ W/(m}^2\text{K)} \cdot 34,55\text{K}} = 368,87 \text{ m}^2$$

Configuración de tubos

El flujo total a condensar m_{cond} está determinado por el destilado D (12483,3 kg/h) y la relación de reflujo $R=1,5$:

$$m_{\text{cond}} = 12483,3 \text{ kg/h}(1 + 1,5) = 31208,25 \text{ kg/h}$$

Se seleccionan tubos de 5 metros de largo y diámetro comercial de 2" BWG 14 ($D_o=0,0508 \text{ m}$).

$$A_{\text{tubos}} = \pi \cdot 0,0508 \text{ m} \cdot 5 \text{ m} = 0,797 \text{ m}^2$$

$$N_{\text{tubos}} = \frac{368,87 \text{ m}^2}{0,797 \text{ m}^2} \approx 463 \text{ tubos}$$

Este diseño asegura que el metanol recuperado regrese a la columna D-62 con el subenfriamiento necesario para mantener la eficiencia de separación, garantizando una corriente de recirculación con mínima presencia de agua (0,0056 en fracción molar).

| Componente | Destilado 63 (kg/h) | Reflujo a D-62 (kg/h) | Total condensado (kg/h) |
|------------|---------------------|-----------------------|-------------------------|
| Metanol | 12.402,00 | 18.603,00 | 31.005,00 |
| Agua | 70,47 | 105,71 | 176,18 |
| PO | 10,81 | 16,21 | 27,02 |
| TOTAL | 12483,28 | 18724,92 | 31208,20 |

Tabla 5.40 Corrientes en C-73

5.4.25 Reboiler IC-71

Para completar la ingeniería de detalle de la columna D-62, se procede con el diseño del Hervidor (Reboiler) IC-71.

Este equipo es el encargado de suministrar la carga térmica necesaria para vaporizar el metanol y permitir su ascenso por la torre, operando en condiciones de alta demanda energética debido al volumen de solvente a recuperar.

El hervidor opera en la base de la columna, tratando la mezcla de fondos (64) compuesta principalmente por agua y el solvente extractivo PEG.

Especificaciones térmicas y caudal de servicio

A partir de los resultados de la simulación en DWSIM para la columna D-62, se definen los parámetros de transferencia:

- Carga térmica : 11.210,43 kW.
- Fluido de servicio: Se utiliza vapor de agua saturado a 3 bar ($T_{\text{sat}} = 179,9 \text{ }^\circ\text{C}$) como medio de calefacción.
- Caudal de vapor necesario: Considerando un calor latente de vaporización de e 2015 kJ/kg:

$$m_{\text{vap}} = \frac{11210430 \text{ kW}}{2015 \text{ kJ/kg}} = 20028 \text{ kg/h}$$

Utilizando la temperatura de los fondos de la columna (102,09 °C) y la del vapor de servicio:

$$\Delta T1 = \Delta T2 = \Delta T_{LM} = 179,9 \text{ }^\circ\text{C} - 102,9 \text{ }^\circ\text{C} = 77,81 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Cálculo del área de intercambio (A)

Para un hervidor de tipo termosifón o inundado que maneja mezclas acuosas y solventes pesados, se asume un coeficiente global de transferencia $U=1000 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

$$A = \frac{11210430 \text{ W}}{10000 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) \cdot 77,81 \text{ K}} = 144,07 \text{ m}^2$$

Dimensionamiento mecánico

Se proponen tubos de 5 metros de largo y diámetro comercial de 1,5” BWG 14 $D_o=0,0381 \text{ m}$.

- Área superficial por tubo:

$$A_{\text{tubo}} = \pi \cdot 0,0381 \text{ m} \cdot 5 \text{ m} = 0,598 \text{ m}^2$$

Número de tubos necesarios:

$$N_{\text{tubos}} = \frac{144,07 \text{ m}^2}{0,598 \text{ m}^2} = 240,9 \approx 241 \text{ tubos}$$

El diámetro de carcasa queda determinado como:

$$D_b = 38,1 \text{ mm} \left(\frac{241}{0,249} \right)^{1/2,207} = 858,64 \text{ mm}$$

$$D_s = 1,7 \times 858,64 \text{ mm} = 1459,68 \text{ mm} \approx 1,5 \text{ m}$$

El hervidor IC-71 se ha diseñado como un equipo crítico para la sostenibilidad del proceso, permitiendo la vaporización y recuperación del 99,6% del metanol alimentado mediante el suministro de una carga térmica de 11.210,43 kW.

El dimensionamiento mecánico, basado en un intercambio eficiente con vapor saturado a 179,9 °C y un área de transferencia de 144,07 m², requiere la instalación de 241 tubos de 1,5” BWG 14 en una carcasa de 1,5 metros de diámetro. Esta configuración de tipo termosifón asegura la recirculación del solvente hacia el reactor R-03 con una pureza del 99,35%, optimizando el consumo de materias primas y garantizando que el polietilenglicol (PEG) y el agua de proceso se concentren adecuadamente en la corriente de fondos para su gestión posterior.

5.4.26 Intercambiador iónico Ión-65

Para concluir la ingeniería de detalle de la sección de purificación, se procede al diseño del intercambiador catiónico Ion-65. Este equipo es fundamental para asegurar la calidad del metanol de reciclo, eliminando trazas de aminas orgánicas que podrían envenenar el catalizador TS-1 del reactor principal.

El Ion-65 opera como un lecho fijo de resina de intercambio catiónico fuerte (en forma H⁺).

Su función es capturar aminas residuales mediante una reacción de sustitución, garantizando que el metanol purificado (66) cumpla con las especificaciones de grado reactivo para su retorno al proceso.

Balance de masa y cierre del lazo de metanol

De acuerdo a la simulación en DWSIM, la corriente 63 suministra el metanol recuperado:

- Flujo de metanol en 63: 12402 kg/h
- Destino 1 de la corriente de salida 66 (absorción 42 en CA-41): Se requieren 10000 kg/h de metanol purificado como absorbente.
- Destino 2 (corriente 67 que entra a R-03): El remanente disponible es de 2.402 kg/h.

Dado que el diseño del reactor R-03 requiere un total de 12.476,7 kg/h de metanol, y el reciclo neto tras la absorción es de 12402,0 kg/h, se debe adicionar una corriente de metanol de reposición (*Make-up*) de 65,7 kg/h para completar la carga del reactor y mantener el estado estacionario.

Parámetros de diseño del lecho

Para el dimensionamiento se utiliza una resina tipo Amberlyst 15 o similar.

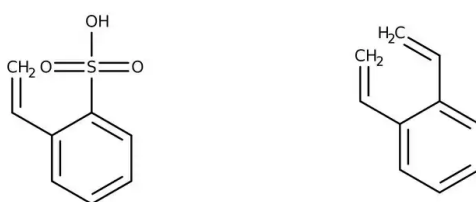


Fig. 5.38 Estructura química de la resina Amberlyst 15

El caudal de operación sería de 12402 kg/h, alrededor de 15,6 m³/h considerando la densidad del metanol como 830 kg/m³. La velocidad espacial se asume en un valor típico de 5 h⁻¹ para asegurar el tiempo de residencia necesario para el intercambio de trazas de aminos. Por ende, el volumen de resina se calcula como:

$$V_{res} = \frac{Q_{vol}}{\tau} \quad \text{Ec 5.50}$$

$$V_{res} = \frac{15,6 \text{ m}^3/\text{h}}{5 \text{ h}^{-1}} = 3,12 \text{ m}^3$$

Dimensionamiento mecánico

Se proyecta un recipiente cilíndrico vertical de acero inoxidable:

- Relación L/D sugerida: 3:1 para optimizar la distribución del flujo y evitar caminos preferenciales.
- Diámetro (D): Para un volumen de lecho de 3,12 m³:

$$V = \frac{\pi D^2}{4} \cdot 3D \quad \text{Ec 5.51}$$

$$3,12 \text{ m}^3 = 2,35 D^3 \rightarrow D \simeq 1,1 \text{ m}$$

Por ende, la altura del lecho H será de 3,3 m con una altura total del equipo de 4,5 m para incluir el espacio para expansión del lecho durante el retrolavado y colección.

El intercambiador Ion-65 garantiza la eliminación de aminos orgánicas, permitiendo que la corriente 66 sea apta para su uso como absorbente en la columna de absorción y como reciclo principal. Este equipo cierra el ciclo de solventes, minimizando el consumo de metanol fresco y protegiendo la vida útil del catalizador de epoxidación, lo que resulta en una operación económicamente viable y técnicamente robusta.

CAPÍTULO VI: INGENIERÍA DE PROCESOS

6.1 Diseño y distribución de la planta

6.1.1 Introducción

Una etapa fundamental dentro del diseño de una planta industrial es la adecuada distribución de las distintas áreas que la componen. Dicha organización no solo responde a criterios operativos, sino también a aspectos vinculados con la seguridad industrial, la eficiencia del proceso productivo, la circulación del personal, la gestión ambiental y el cumplimiento de la normativa vigente.

En el presente capítulo se analizan y definen las áreas funcionales necesarias para el correcto funcionamiento de una planta productora de óxido de propileno mediante el proceso HPPO con una capacidad de diseño de 23.000 toneladas anuales. El proceso se basa en la oxidación directa del propileno utilizando peróxido de hidrógeno en presencia de un catalizador heterogéneo, seguida de etapas de separación y purificación del producto, tal como se describe en el diagrama de flujo del proceso correspondiente.

Las áreas consideradas incluyen sectores de producción, almacenamiento de materias primas y producto final, servicios auxiliares, laboratorio de control de calidad, sala de control, mantenimiento, administración y edificios auxiliares. La disposición de estas áreas se define buscando optimizar el uso del espacio disponible, minimizar los desplazamientos innecesarios de materiales y personal, y garantizar una operación continua, segura y eficiente.

Para la definición de la distribución general se tiene en cuenta el recorrido de las materias primas y del producto final a lo largo del proceso, priorizando trayectos cortos y directos entre las distintas etapas. De esta manera, se logra una mayor economía de movimientos y tiempos, lo que contribuye a mejorar la eficiencia operativa y la rentabilidad global del proyecto. Asimismo, el diseño contempla la posibilidad de futuras ampliaciones o adaptaciones del sistema productivo.

6.1.2 Áreas características de la planta

6.1.2.1 Ingreso a la planta – Área de recepción

El ingreso a la planta se realiza a través de un acceso principal que conduce a una garita de recepción y control de accesos. Este sector cumple la función de supervisar y registrar el ingreso y egreso del personal, vehículos y visitas, actuando como punto de control del predio industrial.

Dado que su función es principalmente administrativa y de seguridad, no requiere una gran superficie. Se proyecta una oficina compacta de aproximadamente 35 m², suficiente para alojar al personal responsable del control de accesos y los sistemas básicos de registro.

6.1.2.2 Área de carga y descarga

Se proyecta un área específica destinada a las operaciones de carga y descarga de materias primas y producto final, diseñada para permitir maniobras seguras de camiones cisterna y minimizar interferencias operativas.

El sector contempla áreas diferenciadas para:

- descarga de materias primas (principalmente peróxido de hidrógeno, metanol e insumos auxiliares),
- carga del óxido de propileno producido,
- una oficina de control desde la cual se supervisan las operaciones logísticas y el cumplimiento de los procedimientos de seguridad.

La separación física entre las operaciones de ingreso y egreso reduce los riesgos asociados a la manipulación de sustancias químicas. La superficie total asignada a este sector es del orden de 335 m², incluyendo zonas de maniobra, áreas techadas y la oficina de control.

6.1.2.3 Área de almacenamiento

Las materias primas y el producto final se almacenan en una zona especialmente diseñada, considerando los requerimientos operativos y de seguridad del proceso HPPO. La capacidad de almacenamiento fue definida en función de los caudales de proceso, adoptando configuraciones que permiten mantener un stock estratégico y asegurar la continuidad operativa.

El propileno se maneja mediante un sistema de recepción y regulación acorde a su naturaleza gaseosa, siendo almacenado en fase líquida en dos tanques esféricos presurizados de 500 m³ cada uno. Por otro lado, el peróxido de hidrógeno se almacena en dos tanques cilíndricos verticales atmosféricos de 50 m³ cada uno, construidos en materiales compatibles con su carácter oxidante. En el caso del metanol, se dispone de dos tanques cilíndricos verticales atmosféricos de 250 m³ cada uno, adecuados para líquidos inflamables y dimensionados considerando su recirculación parcial en el proceso.

El óxido de propileno producido se almacena en dos tanques cilíndricos verticales de 200 m³ cada uno, diseñados para operar con sistemas de inertización, manteniendo un stock operativo que asegura la continuidad del proceso y permite regular el despacho del producto.

Considerando pasillos técnicos, distancias de seguridad, sistemas de contención de derrames y accesos para inspección y mantenimiento, la superficie total destinada al almacenamiento se estima en aproximadamente 1.620 m², constituyendo el sector de mayor superficie dentro de la planta.

6.1.2.4 Área de producción

El área de producción alberga los equipos donde se desarrollan las distintas etapas del proceso HPPO, incluyendo reactores, intercambiadores de calor, columnas de separación y purificación, bombas y equipos auxiliares, de acuerdo con el diagrama de flujo del proceso.

La disposición de los equipos sigue la secuencia lógica del proceso, con el objetivo de optimizar el flujo de materiales y reducir recorridos internos. Se prevén espacios adecuados entre equipos para permitir la operación segura, el acceso del personal y la realización de tareas de mantenimiento.

En función de estas consideraciones, se asigna al área de producción una superficie aproximada de 620 m², valor considerado adecuado para una planta de la capacidad proyectada.

6.1.2.5 Sala de control

La sala de control es el sector desde el cual se realiza el monitoreo y la supervisión continua del proceso productivo. Desde este espacio se controlan las principales variables operativas, tales como temperatura, presión, caudales y niveles, mediante sistemas de instrumentación y control.

Se proyecta una superficie aproximada de 45 m², suficiente para alojar los paneles de control, sistemas de adquisición de datos y estaciones de trabajo del personal técnico. Su ubicación se define próxima al área de producción, pero físicamente separada de la misma por razones de seguridad.

6.1.2.6 Área de servicios auxiliares

El área de servicios auxiliares incluye los equipos que brindan soporte al proceso principal, tales como sistemas de generación de vapor, agua de enfriamiento, aire comprimido, bombas auxiliares y sistemas eléctricos.

Debido al porte de estos equipos y a los requerimientos de acceso y mantenimiento, se asigna a este sector una superficie aproximada de 335 m², permitiendo una disposición segura y funcional, con adecuada ventilación y accesibilidad.

6.1.2.7 Laboratorio

El laboratorio se destina al control de calidad del proceso y del producto final. En este sector se realizan análisis rutinarios que permiten verificar el cumplimiento de las especificaciones del óxido de propileno y el correcto funcionamiento del proceso.

Se proyecta un espacio de aproximadamente 60 m², adecuado para el equipamiento analítico, zonas de trabajo y almacenamiento seguro de insumos.

6.1.2.8 Área de mantenimiento

El área de mantenimiento cumple un rol clave en la confiabilidad y disponibilidad de los equipos de planta. En este sector se realizan tareas preventivas y correctivas, así como el almacenamiento de herramientas y repuestos críticos.

Se prevé una superficie cubierta del orden de 90 m², permitiendo albergar un banco de trabajo, estanterías y un área administrativa básica. Su ubicación facilita el acceso rápido a los sectores productivos sin interferir con el tránsito operativo.

6.1.2.9 Área de administración

El área administrativa se ubica en un edificio independiente del área operativa, con el objetivo de garantizar condiciones adecuadas de trabajo y reducir la exposición del personal administrativo a riesgos industriales.

Se asigna a este sector una superficie aproximada de 150 m², que incluye oficinas administrativas, sala de reuniones y espacios de apoyo.

6.1.2.10 Edificios auxiliares

Dentro de los edificios auxiliares se incluyen el comedor, vestuarios, sanitarios, estacionamiento interno y un área de seguridad y emergencias.

El comedor y la cocina ocupan aproximadamente 120 m², mientras que los vestuarios y sanitarios principales representan alrededor de 110 m², complementados por un núcleo sanitario secundario de 35 m². El área de seguridad y emergencias dispone de 50 m², y el estacionamiento interno sectorizado ocupa alrededor de 90 m².

6.1.11 Infraestructura requerida

El terreno seleccionado para la implantación de la planta de producción de óxido de propileno mediante el proceso HPPO se encuentra ubicado en la Zona Petroquímica de Ensenada y cuenta con una superficie total aproximada de 80.124 m² (8 hectáreas). Las dimensiones del predio resultan ampliamente adecuadas para el desarrollo del proyecto, permitiendo la correcta implantación de las instalaciones productivas, administrativas y de servicios, así como la reserva de superficies destinadas a futuras ampliaciones de capacidad e incorporación de nuevos equipos.

Desde el punto de vista de la infraestructura básica, el predio dispone de acceso directo por Camino Vergara, facilitando la circulación interna y externa de camiones cisterna y vehículos de gran porte. Asimismo, se encuentra dotado de servicios industriales esenciales, tales como suministro de energía eléctrica, gas natural, agua industrial y potable, y sistemas de desagües pluviales e industriales, propios de su inserción dentro de un polo petroquímico consolidado.

La distribución de superficies presentada corresponde exclusivamente a las áreas cubiertas y operativas, cuya superficie total estimada es de aproximadamente 3.660 m². No se incluyen en este valor los espacios libres destinados a circulación interna, calles perimetrales, zonas de seguridad, áreas verdes ni distancias de separación entre sectores, las cuales se visualizan en el layout general de la planta y resultan fundamentales para garantizar condiciones adecuadas de seguridad industrial, logística interna y cumplimiento de la normativa vigente.

| Área | Subárea | Superficie (m2) | Superficie Total (m2) |
|------------------------------|---|-----------------|-----------------------|
| Ingreso a la Planta | Área de recepción y control de accesos | 35 | 35 |
| | Ingreso de materias primas (propileno y H2O2) | 150 | 300 |
| Área de Carga y Descarga | Egreso de producto (óxido de propileno) | 120 | |
| | Oficina de control de carga y descarga | 30 | |
| Área de Almacenamiento | Tanques de almacenamiento de materias primas | 700 | 1620 |
| | Sistema de recepción/regulación de propileno | 220 | |
| | Área de seguridad, contención y pasillos técnicos | 140 | |
| | Tanques de almacenamiento de óxido de propileno | 560 | |
| | Área de producción (reactores, columnas, etc.) | 620 | |
| Área de Producción y Control | Sala de control | 45 | 1150 |
| | Área de servicios auxiliares | 335 | |
| | Área de mantenimiento | 90 | |
| | Laboratorio de control de calidad | 60 | |
| Administración | Área administrativa | 150 | 150 |
| | Comedor | 120 | 405 |
| Edificios Auxiliares | Vestuarios y sanitarios principales | 110 | |
| | Núcleo sanitario secundario | 35 | |
| | Playa de estacionamiento | 90 | |
| | Área de seguridad y emergencias | 50 | |
| TOTAL GENERAL | | | 3660 |

Tabla 6.1 Infraestructura de la planta

Fuente: Elaboración propia

6.1.12 Layout de la planta

El layout de la planta constituye una representación gráfica de la distribución física de las distintas áreas funcionales dentro del predio industrial seleccionado. Su diseño tiene como objetivo principal garantizar una operación continua, segura y eficiente del proceso de producción de óxido de propileno mediante la tecnología HPPO, optimizando el flujo de materiales, la circulación del personal y el acceso a los equipos para operación y mantenimiento.

La disposición general de la planta se define considerando que el proceso productivo es continuo, por lo que resulta fundamental minimizar los recorridos de las corrientes de proceso, reducir interferencias entre áreas operativas y administrativas, y asegurar una adecuada separación entre sectores de riesgo y zonas de permanencia de personal.

El layout se organiza siguiendo el diagrama de flujo del proceso HPPO, disponiendo los equipos principales en el mismo orden en que se desarrollan las distintas etapas del proceso: recepción de materias primas, almacenamiento, reacción, separación y purificación, y despacho del producto final. Esta disposición permite reducir pérdidas de carga, simplificar el trazado de cañerías y facilitar el control operativo del sistema.

En el sector central del predio se ubica el área de producción, donde se concentran los equipos principales del proceso, tales como reactores, columnas de separación, intercambiadores de calor y sistemas auxiliares directamente vinculados a la operación. Esta área se encuentra próxima a la sala de control, permitiendo una supervisión eficiente de las variables críticas del proceso.

Adyacente al área de producción se dispone el sector de servicios auxiliares, que incluye instalaciones como calderas, sistemas de generación de vapor, aire comprimido, agua de enfriamiento y otros servicios necesarios para el funcionamiento de la planta. La cercanía de este sector a la zona productiva reduce la longitud de las líneas de servicio y mejora la eficiencia energética.

El área de almacenamiento de materias primas y producto final se ubica en un sector diferenciado del predio, con accesos directos a la zona de carga y descarga. Esta disposición permite una operación logística ordenada y segura, separando el tránsito de camiones de las áreas administrativas y de circulación del personal.

Las áreas administrativas, junto con los edificios auxiliares como comedor, vestuarios, sanitarios y servicios de seguridad y emergencias, se localizan en un sector independiente, alejado de las zonas de mayor riesgo operativo, cumpliendo con los criterios de seguridad industrial y confort laboral.

Finalmente, el layout contempla amplias vías de circulación interna, espacios libres para maniobras de camiones y una reserva de terreno destinada a futuras ampliaciones, lo que otorga flexibilidad al diseño y permite adaptaciones ante eventuales incrementos de capacidad productiva.

La Figura 6.1 presenta el layout general de la planta, donde se visualiza la disposición de las distintas áreas funcionales y su relación espacial dentro del predio.



Fig. 6.1 Layout general de la planta

Fuente: Elaboración propia

6.2 Diseño y selección de equipos

En el presente proyecto, la selección de equipos se llevó a cabo considerando los requerimientos operativos y las condiciones de proceso definidas a partir de los balances de materia y energía, así como de los criterios de diseño de cada operación unitaria. Se priorizó la elección de tecnologías ampliamente utilizadas en la industria petroquímica, tales como columnas de destilación, torres de absorción, intercambiadores de calor y sistemas de separación, garantizando su viabilidad técnica y operativa. Asimismo, se tomó como referencia información proveniente de catálogos industriales y proveedores comerciales, lo que permitió validar dimensiones, materiales de construcción y rangos de operación, adaptando cada equipo a las necesidades específicas del proceso. De esta manera, se asegura una integración coherente entre el diseño teórico y su posible implementación a escala industrial.

6.2.1 Stripper ST-8

| DATOS TÉCNICOS | |
|----------------|---|
| EQUIPO | Stripper ST-8 |
| MODELO | Columna de stripping industrial personalizada |
| MARCA | JINTA |
| COSTO (U\$D) | 300.000 |

Tabla 6.2 Datos técnicos Columna Stripper ST-8

Fuente: (Alibaba, 2026)

El costo incluye casco de columna, relleno (Raschig rings), redistribuidor de líquido, demister superior y conexiones principales.

6.2.2 Reactor R-03

| DATOS TÉCNICOS | |
|----------------|---|
| EQUIPO | Reactor E-03 |
| MODELO | Reactor de lecho fijo multitubular (Shell & Tube PFR) |
| MARCA | Energía Xinzhi (Customized) |
| COSTO (U\$D) | 80.000 |

Tabla 6.3 Datos técnicos Reactor R-03

Fuente: Stainless Steel Batch Chemical Reactor Vessel Mixing Tank

El precio base del equipo se estima a partir de catálogos comerciales de reactores de torre personalizados (20.000 – 45.000 USD para la estructura de coraza y tubos en acero inoxidable 316L).

Se considera un costo total de 80.000 USD, el cual contempla la configuración industrial específica para reacciones exotérmicas, el sistema de distribución de flujo, conexiones de alta presión, instrumentación básica de control de temperatura (TIC) y la carga inicial del catalizador de zeolita TS-1.

6.2.3 Columna de destilación D-24

| DATOS TÉCNICOS | |
|----------------|--|
| EQUIPO | Columna de destilación D-24 |
| MODELO | Industrial Distillation Column (custom Ø0.7 m) |
| MARCA | JINTA |
| COSTO (USD) | 45.000 |

Tabla 6.4 Datos técnicos Columna de destilación D-24

Fuente: (Alibaba, 2026)

Configuración:

- 10 Platos
- condensador
- reboiler
- demister

6.2.4 Evaporador Flash EF-13

| DATOS TÉCNICOS | |
|----------------|-------------------------------|
| EQUIPO | Flash drum EF-13 |
| MODELO | S-1202 vapor-liquid separator |

| | |
|-------------|------------------|
| MARCA | fabricante chino |
| COSTO (USD) | 18000 |

Tabla 6.5 Datos técnicos Evaporador Flash EF-13

Fuente: (Yangzhou Tongyang, 2026)

El equipo EF-13 se seleccionó como un separador vertical vapor-líquido tipo flash drum conforme a diseño ASME, capaz de operar en el rango de presión de 0,1–1,6 MPa. Este tipo de recipiente permite la separación gravitacional de las fases generadas por la expansión de presión, incorporando un demister para evitar el arrastre de gotas líquidas hacia el compresor de recirculación

6.2.5 Evaporador Flash EF-16

| DATOS TÉCNICOS | |
|----------------|-------------------------------|
| EQUIPO | Flash drum EF-16 |
| MODELO | S-1202 vapor-liquid separator |
| MARCA | fabricante chino |
| COSTO (USD) | 18000 |

Tabla 6.6 Datos Técnicos Evaporador Flash EF-16

Fuente: (Yangzhou Tongyang, 2026)

El equipo EF-16 se seleccionó como un separador vertical vapor-líquido tipo flash drum conforme a diseño ASME, capaz de operar en el rango de presión de 0,1–1,6 MPa. Este tipo de recipiente permite la separación gravitacional de las fases generadas por la expansión de presión, incorporando un demister para evitar el arrastre de gotas líquidas hacia el compresor de recirculación

6.2.6 Compresores K-19 Y K-23

| DATOS TÉCNICOS | |
|----------------|------------------------|
| EQUIPO | Compresor de propileno |

| | |
|--------------|-------------|
| MODELO | GV-20/5-200 |
| MARCA | Sollant |
| COSTO (U\$D) | 28000 |

Tabla 6.7 Datos Técnicos Compresores K-19 y K-23

Fuente: (Shanghai Sollant Energy Saving Technology Co., Ltd., 2026)

Se selecciona un compresor de diafragma libre de aceite, adecuado para la compresión segura de gases de proceso. Este tipo de equipo presenta excelente hermeticidad, evitando fugas de gases inflamables o reactivos. Como referencia industrial se toma el compresor de diafragma serie GV, con caudales entre 5 y 70 Nm³/h y presiones de hasta 35 MPa.

6.2.7 Columna de destilación D-33

| DATOS TÉCNICOS | |
|----------------|--|
| EQUIPO | Columna de destilación D-33 |
| MODELO | Industrial Distillation Column (custom Ø0.7 m) |
| MARCA | JINTA |
| COSTO (U\$D) | 45.000 |

Tabla 6.8 Datos Técnicos Columna de destilación D-33

Fuente: (Alibaba, 2026)

Configuración:

- 10 Platos
- condensador
- reboiler
- demister

6.2.8 Columna de destilación D-46

| DATOS TÉCNICOS |
|----------------|
|----------------|

| | |
|--------------|--|
| EQUIPO | Columna de destilación D-46 |
| MODELO | Industrial Distillation Column (custom Ø0.7 m) |
| MARCA | JINTA |
| COSTO (U\$D) | 45.000 |

Tabla 6.9 Datos Técnicos Columna de destilación D-46

Fuente: (Alibaba, 2026)

La columna de destilación seleccionada corresponde a un equipo industrial estándar utilizado en procesos petroquímicos, cuyas especificaciones de presión (0,1–20 bar), temperatura (hasta 300 °C) y volumen de operación (0,1–800 m³) cubren ampliamente las condiciones requeridas para la columna D-46 del proceso.

6.2.9 Columna de absorción CA-41

| DATOS TÉCNICOS | |
|----------------|-----------------------------------|
| EQUIPO | Columna de absorción CA-41 |
| MODELO | Packed Absorption Column (custom) |
| MARCA | Tongyang / Custom |
| COSTO (U\$D) | 25000 |

Tabla 6.10 Datos Técnicos Columna de Absorción CA-41

Fuente: (Yangzhou Tongyang, 2026)

La CA-41 es una columna de absorción empacada diseñada para la recuperación de propileno mediante contacto en contracorriente con metanol. Opera en régimen continuo y a alta presión, utilizando internals tipo packing (anillos Raschig o equivalente) para maximizar la transferencia de masa gas-líquido. Si bien equipos industriales similares emplean soluciones alcalinas o resinas para la remoción química de impurezas, en este caso se utiliza metanol como solvente físico, por lo que la selección del packing y la adecuada distribución del líquido resultan claves para garantizar la eficiencia de absorción (~96%). La columna incluye distribuidores de líquido, soporte de relleno y separador de niebla en cabeza

6.2.10 Columna de Stripping D-55

| DATOS TÉCNICOS | |
|----------------|---|
| EQUIPO | Stripper D-55 |
| MODELO | Columna de stripping industrial personalizada |
| MARCA | JINTA |
| COSTO (U\$D) | 300.000 |

Tabla 6.11 Datos Técnicos Columna Stripper D-55

Fuente: (Alibaba, 2026)

Las columnas de stripping y destilación del proceso se seleccionaron a partir de un mismo diseño industrial de torre de separación vertical fabricada bajo normas ASME. Este tipo de equipo permite su utilización tanto en operaciones de destilación, stripping o absorción, variando únicamente sus dimensiones y el número de etapas internas de acuerdo con los requerimientos de cada operación.

6.2.11 Columna de destilación D-62

| DATOS TÉCNICOS | |
|----------------|--|
| EQUIPO | Columna de destilación D-62 |
| MODELO | Industrial Distillation Column (custom design) |
| MARCA | JINTA |
| COSTO (U\$D) | 45.000 |

Tabla 6.12 Datos Técnicos Columna de destilación D-46

Fuente: (Alibaba, 2026)

6.2.12 Condensador C-26

| DATOS TÉCNICOS | |
|----------------|--|
|----------------|--|

| | |
|--------------|-----------------------------------|
| EQUIPO | Condensador C-26 |
| MODELO | Industrial Shell & Tube Condenser |
| MARCA | Tongyang |
| COSTO (U\$D) | 18000 |

Tabla 6.13 Datos Técnicos Condensador C-26

Fuente: (Yangzhou Tongyang, 2026)

El equipo debe operar con un área aproximada de 72 m², tubos de 1” y una longitud cercana a 3 m, permitiendo el paso del vapor por la carcasa y del agua de enfriamiento por el interior de los tubos. Su diseño debe soportar presiones cercanas a 2 MPa y garantizar una transferencia térmica eficiente para retirar la carga de aproximadamente 808 kW

6.2.13 Intercambiador de Calor IC-10

| DATOS TÉCNICOS | |
|----------------|-----------------------------------|
| EQUIPO | Intercambiador IC-10 |
| MODELO | Industrial Shell & Tube Condenser |
| MARCA | Tongyang |
| COSTO (U\$D) | 12000 |

Tabla 6.14 Datos Técnicos Intercambiador de Calor IC-10

Fuente: (Yangzhou Tongyang, 2026)

El equipo debe contar con un área aproximada de 9 m², tubos de ¾” de diámetro y 3 m de longitud, utilizando vapor saturado a aproximadamente 130 °C como fluido calefactor. La configuración debe asegurar flujo turbulento dentro de los tubos para favorecer la transferencia térmica y permitir la generación de la fracción de vapor requerida antes de la etapa de separación.

6.2.14 Condensador C-29

| DATOS TÉCNICOS | |
|----------------|--|
|----------------|--|

| | |
|--------------|-----------------------------------|
| EQUIPO | Condensador C-29 |
| MODELO | Industrial Shell & Tube Condenser |
| MARCA | Tongyang |
| COSTO (U\$D) | 13000 |

Tabla 6.15 Datos Técnicos Condensador C-29

Fuente: (Yangzhou Tongyang, 2026)

El equipo debe disponer de un área de intercambio cercana a 11 m², tubos de ¾” y 3 m de longitud, con agua de enfriamiento circulando por los tubos y la mezcla gaseosa por la carcasa. La configuración permite retirar aproximadamente 23,8 kW de carga térmica y condensar selectivamente metanol, óxido de propileno y agua mientras el nitrógeno permanece mayoritariamente en fase gaseosa.

6.2.15 Intercambiador de calor IC-14

| DATOS TÉCNICOS | |
|----------------|-----------------------------------|
| EQUIPO | Reboiler IC-14 |
| MODELO | Industrial Shell & Tube Condenser |
| MARCA | Tongyang |
| COSTO (U\$D) | 16000 |

Tabla 6.16 Datos Técnicos Intercambiador de Calor IC-14

Fuente: (Yangzhou Tongyang, 2026)

El equipo debe contar con un área de intercambio cercana a 51 m², tubos de 1” y longitud aproximada de 3 m, utilizando vapor de servicio a 10 bar como fluido calefactor. El vapor condensa en la carcasa mientras que la corriente de proceso circula por los tubos, generando la vaporización parcial necesaria para mantener el equilibrio de separación en la base de la columna.

6.2.16 Intercambiador de Calor IC-17

| DATOS TÉCNICOS | |
|----------------|--|
|----------------|--|

| | |
|-------------|-----------------------------------|
| EQUIPO | Reboiler IC-17 |
| MODELO | Industrial Shell & Tube Condenser |
| MARCA | Tongyang |
| COSTO (USD) | 20000 |

Tabla 6.17 Datos Técnicos Intercambiador de Calor IC-17

Fuente: (Yangzhou Tongyang, 2026)

El equipo debe contar con un área aproximada de 86 m² y tubos de 1” de diámetro con una longitud de 3 m. Utiliza vapor de servicio a 10 bar como fluido calefactor, el cual condensa en la carcasa mientras la corriente de proceso circula por los tubos, permitiendo generar el vapor de recirculación necesario para mantener el perfil térmico de la columna.

6.2.17 Condensador C-38

| DATOS TÉCNICOS | |
|----------------|-----------------------------------|
| EQUIPO | Condensador C-38 |
| MODELO | Industrial Shell & Tube Condenser |
| MARCA | Tongyang |
| COSTO (USD) | 18000 |

Tabla 6.18 Datos Técnicos Condensador C-38

Fuente: (Yangzhou Tongyang, 2026)

El equipo debe disponer de un área cercana a 73 m² con tubos de 1” y 3 m de longitud, operando con agua de enfriamiento que circula por el interior de los tubos mientras la mezcla de hidrocarburos fluye por la carcasa. Esta configuración permite remover la carga térmica del sistema y asegurar el reflujo necesario para la separación propano-propileno.

6.2.18 Condensador C-50

| DATOS TÉCNICOS | |
|----------------|-----------------------------------|
| EQUIPO | Condensador C-50 |
| MODELO | Industrial Shell & Tube Condenser |

| | |
|--------------|----------|
| MARCA | Tongyang |
| COSTO (U\$D) | 35000 |

Tabla 6.19 Datos Técnicos Condensador C-50

Fuente: (Yangzhou Tongyang, 2026)

El equipo debe disponer de un área aproximada de 235 m² con tubos de 2” de diámetro y 5 m de longitud, operando con agua de enfriamiento que circula por el interior de los tubos mientras la mezcla de proceso fluye por la carcasa. Esta configuración permite remover la carga térmica de aproximadamente 10 MW y generar el reflujó necesario para mantener la separación de óxido de propileno en la columna.

6.2.19 Intercambiador de Calor IC-68

| DATOS TÉCNICOS | |
|----------------|-----------------------------------|
| EQUIPO | Reboiler IC-68 |
| MODELO | Industrial Shell & Tube Condenser |
| MARCA | Tongyang |
| COSTO (U\$D) | 32000 c/u |

Tabla 6.20 Datos Técnicos Intercambiador de Calor IC-68

Fuente: (Yangzhou Tongyang, 2026)

El IC-68 corresponde a un sistema de tres reboilers tipo carcasa y tubos instalados en paralelo para suministrar el calor requerido al fondo de la columna D-46. Cada unidad posee un área aproximada de 240 m² con tubos de 2” y 5 m de longitud, utilizando vapor saturado a 2 bar como fluido calefactor. Esta configuración permite distribuir la carga térmica total del sistema (11,46 MW), mejorar la estabilidad operativa y evitar problemas mecánicos asociados a intercambiadores de gran tamaño.

6.2.20 Condensador C-72

| DATOS TÉCNICOS | |
|----------------|------------------|
| EQUIPO | Condensador C-72 |

| | |
|--------------|-----------------------------------|
| MODELO | Industrial Shell & Tube Condenser |
| MARCA | Tongyang |
| COSTO (U\$D) | 15000 c/u |

Tabla 6.21 Datos Técnicos Condensador C-72

Fuente: (Yangzhou Tongyang, 2026)

El C-72 corresponde a un sistema de tres condensadores tipo carcasa y tubos instalados en serie para condensar el vapor de óxido de propileno proveniente del tope de la columna D-55. Cada unidad posee aproximadamente 58 m² de área de transferencia con tubos de 1” de diámetro y 5 m de longitud. El agua de enfriamiento circula por el interior de los tubos mientras el vapor de proceso fluye por la carcasa, permitiendo retirar la carga térmica total de 919 kW y generar el reflujo necesario para alcanzar la pureza de grado polímero.

6.2.21 Intercambiador de Calor IC-70

| DATOS TÉCNICOS | |
|----------------|-----------------------------------|
| EQUIPO | Reboiler IC-70 |
| MODELO | Industrial Shell & Tube Condenser |
| MARCA | Tongyang |
| COSTO (U\$D) | 17000 |

Tabla 6.22 Datos Técnicos Intercambiador de Calor IC-70

Fuente: (Yangzhou Tongyang, 2026)

El IC-70 es un reboiler tipo kettle utilizado para suministrar el calor requerido al fondo de la columna extractiva D-55. El equipo posee un área aproximada de 70 m² con tubos de 2” de diámetro y 5 m de longitud, donde el vapor de servicio a 2 bar condensa en el interior de los tubos mientras la mezcla de proceso (PEG, metanol y agua) hierve en la carcasa. Esta configuración es adecuada para fluidos viscosos como el PEG, ya que facilita la circulación natural, reduce pérdidas de carga y minimiza problemas de incrustación.

6.2.22 Intercambiador de Calor IC-71

| DATOS TÉCNICOS | |
|----------------|--|
|----------------|--|

| | |
|-------------|-----------------------------------|
| EQUIPO | Reboiler IC-71 |
| MODELO | Industrial Shell & Tube Condenser |
| MARCA | Tongyang |
| COSTO (USD) | 30000 |

Tabla 6.23 Datos Técnicos Intercambiador de Calor IC-71

Fuente: (Yangzhou Tongyang, 2026)

El equipo cuenta con un área de intercambio cercana a 144 m², utilizando tubos de 1,5” de diámetro y 5 m de longitud, donde el vapor de servicio condensa en el interior de los tubos mientras la mezcla de proceso circula por la carcasa mediante convección natural. Esta configuración permite manejar altas cargas térmicas y fluidos con mayor viscosidad, asegurando una vaporización eficiente del metanol y el adecuado funcionamiento de la columna.

6.2.23 Condensador C-73

| DATOS TÉCNICOS | |
|----------------|-----------------------------------|
| EQUIPO | Condensador C-73 |
| MODELO | Industrial Shell & Tube Condenser |
| MARCA | Tongyang |
| COSTO (USD) | 40000 |

Tabla 6.24 Datos Técnicos Condensador C-73

Fuente: (Yangzhou Tongyang, 2026)

El equipo dispone de un área aproximada de 369 m², utilizando tubos de 2” de diámetro y 5 m de longitud. El agua de enfriamiento circula por el interior de los tubos mientras el vapor de metanol fluye por la carcasa, permitiendo remover una carga térmica del orden de 10 MW y generar el reflujo necesario para alcanzar una pureza superior al 99,9% en la recuperación del solvente.

6.2.24 Intercambiador iónico Ion -65

| DATOS TÉCNICOS | |
|----------------|---|
| EQUIPO | Intercambiado iónico ion-65 |
| MODELO | Custom Fixed Bed Ion Exchange Column |
| MARCA | Diseño a medida (Purolite / Dow / Lanxess – resina) |
| TIPO DE RESINA | Amberlyst 15 (catiónica fuerte, H ⁺) |
| COSTO (U\$D) | 25000 |

Tabla 6.25 Datos técnicos Intercambiador Iónico Ión-65

Fuente: (Alibaba, 2026)

El Ion-65 es una columna de lecho fijo diseñada a medida para la purificación de metanol mediante intercambio iónico selectivo. El equipo utiliza resina catiónica fuerte en forma H⁺ y está construido en acero inoxidable, operando con flujo descendente y contemplando espacio libre para expansión del lecho durante retrolavado. Su diseño permite la remoción eficiente de trazas de aminas orgánicas, garantizando la calidad del metanol de reciclaje y la protección del catalizador del proceso

CAPÍTULO VII: INGENIERÍA DE GESTIÓN

7.1 Introducción

La ingeniería de gestión constituye un componente fundamental dentro del diseño integral del proyecto industrial, ya que define la forma en que la planta será administrada, dirigida y operada desde el punto de vista organizacional. No sólo se trata de producir técnicamente, sino de establecer una estructura que permita coordinar personas, recursos y funciones de manera eficiente, segura y sostenible en el tiempo.

En una industria de proceso continuo, como la proyectada para la producción de óxido de propileno, la gestión adquiere especial relevancia debido a la necesidad de:

- Operación ininterrumpida durante las 24 horas del día.
- Coordinación permanente entre producción, mantenimiento y logística.
- Control riguroso de variables operativas, seguridad de procesos y manejo de sustancias químicas.
- Toma de decisiones rápida ante desvíos o contingencias.

Por este motivo, resulta imprescindible definir una estructura organizacional clara, con líneas de autoridad bien establecidas, responsabilidades delimitadas y adecuada especialización del personal. Una correcta organización permite:

- Optimizar el uso de los recursos humanos y materiales.
- Reducir tiempos muertos y fallas operativas.
- Garantizar la continuidad productiva.
- Mejorar la seguridad industrial y la confiabilidad del proceso.

En este capítulo se desarrollan los aspectos vinculados a la organización de la empresa que operará la planta, incluyendo la estructura organizacional, los principios de organización adoptados, los recursos humanos requeridos, las características legales de la entidad y la definición de cargos y funciones. Todo ello conforma la base administrativa que permitirá sostener técnica y económicamente el funcionamiento del proyecto.

7.2 Estructura organizacional

La estructura organizacional define la forma en que se distribuyen las funciones, responsabilidades y niveles de autoridad dentro de la empresa que operará la planta de óxido de propileno. Dado que se trata de una instalación de proceso químico continuo, la organización debe priorizar la claridad jerárquica, la coordinación interáreas y la especialización técnica.

Se adopta una estructura funcional, modelo ampliamente utilizado en industrias de proceso, donde las actividades se agrupan según su naturaleza (producción, mantenimiento, administración, etc.), permitiendo una gestión técnica eficiente y un adecuado control operativo.

Esta estructura favorece:

- La especialización del personal en funciones específicas.
- Una cadena de mando definida, reduciendo ambigüedades en la toma de decisiones.
- Mejor supervisión de procesos críticos.
- Integración entre áreas operativas y administrativas.

La organización se compone de un nivel estratégico, un nivel táctico y un nivel operativo, que interactúan de manera coordinada para garantizar el cumplimiento de los objetivos productivos, económicos y de seguridad.

7.2.1 Principios de organización

El diseño organizacional se basa en principios clásicos de administración industrial, adaptados a las particularidades de una planta química:

División del trabajo

Las tareas se distribuyen según la especialidad técnica de cada área, permitiendo mayor eficiencia, reducción de errores y mejora en la calidad de las operaciones.

Jerarquía y unidad de mando

Cada trabajador depende de un único superior directo, evitando conflictos de autoridad y facilitando la comunicación interna.

Especialización funcional

Las funciones productivas, de mantenimiento, administrativas y de apoyo se encuentran claramente diferenciadas, lo que permite un manejo técnico más preciso de cada sector.

Coordinación interdepartamental

Si bien cada área tiene funciones específicas, la operación continua exige una comunicación permanente entre producción, mantenimiento y logística para evitar interrupciones.

Delegación de autoridad con responsabilidad

Los mandos medios poseen autoridad operativa dentro de su área, pero responden por los resultados obtenidos, fomentando eficiencia y control.

Flexibilidad organizacional

La estructura permite adaptarse a aumentos de producción, incorporación de nuevas tecnologías o ampliaciones de planta, sin requerir una reorganización completa. (Koontz, 2012)

7.2.2 Recursos humanos

El recurso humano constituye un factor clave para la operación segura y eficiente de la planta. Dada la naturaleza del proceso, se requiere personal con formación técnica y experiencia en operación de procesos químicos continuos.

Los recursos humanos se dividen en:

1. Personal directivo y de gestión

- Gerente de Planta
- Responsable Administrativo–Financiero
- Responsable de Producción

Encargados de la planificación estratégica, control económico y supervisión general de las operaciones.

2. Personal técnico

- Ingenieros de proceso
- Ingenieros de mantenimiento
- Técnicos de laboratorio / control de calidad

Responsables del control de variables de proceso, optimización operativa, mantenimiento de equipos y aseguramiento de la calidad del producto.

3. Personal operativo

- Operadores de planta (sistema de turnos rotativos)
- Operadores de servicios auxiliares
- Personal de mantenimiento mecánico y eléctrico

Encargados de la operación directa de los equipos, monitoreo de parámetros y ejecución de tareas de mantenimiento.

4. Personal de apoyo

- Logística y almacenes
- Seguridad y vigilancia
- Administración

Este grupo asegura el funcionamiento integral de la planta más allá del proceso productivo.

La dotación final de personal se ajustará en función del tamaño definitivo de la planta, el nivel de automatización del proceso y el régimen operativo establecido.

7.3 Características de la organización

Este apartado describe la forma jurídica, la identidad empresarial y el rol que cumplirá la organización dentro del proyecto industrial. No se enfoca en lo técnico del proceso, sino en cómo existe legalmente la empresa que operará la planta.

7.3.1 Constitución legal

Para la instalación y operación de la planta productora de óxido de propileno se adopta la figura de Sociedad Anónima (S.A.), por considerarse la forma jurídica más adecuada para un emprendimiento industrial de escala media, con requerimientos significativos de capital, continuidad operativa y proyección de crecimiento.

Para justificar esta elección, se realiza una comparación con la alternativa habitual en proyectos industriales: la Sociedad de Responsabilidad Limitada (S.R.L.).

| | Sociedad Anónima | Sociedad de Responsabilidad Limitada |
|---|---|--|
| Denominación | Puede incluir el nombre de una o más personas de existencia visible Debe contener la expresión "Sociedad Anónima" o las siglas "SA" | Puede incluir el nombre de uno o más socios Debe contener la indicación "Sociedad de Responsabilidad Limitada" o las siglas "SRL" |
| Clases de socios y responsabilidades | Accionistas Limitan su responsabilidad a las acciones que suscriban No tiene límite de accionistas | Socios Limitan su responsabilidad a las cuotas que suscriban Límite máximo de socios: 50 |
| Constitución | Por instrumento público y acto único, o suscripción pública | Por instrumento público o instrumento privado |
| Administración y Representación | Ejercida por el directorio La duración en el cargo de los directores no puede exceder de 3 ejercicios, salvo en el caso que sean designados por el Consejo de vigilancia, en cuyo puede extenderse a 5 años | Ejercida por uno o más gerentes La duración en su cargo es por tiempo determinado o indeterminado |
| Gobierno | Asamblea de Accionistas | Reunión de socios, siendo válidas las resoluciones que se adopten por voto de los socios comunicándose a la gerencia conforme al artículo 159 de la Ley 19.550 |
| Fiscalización | Sindicatura individual o colegiada (Comisión fiscalizadora o consejo de vigilancia) En las sociedades del artículo 299 LSC (excepto inciso 2), debe ser plural Pueden prescindir las sociedades no incluidas en el artículo 299 de la LSC | <u>Optativa</u> : sindicatura o consejo de vigilancia (estipulado en contrato) <u>Obligatoria</u> : sociedades que superen el capital estipulado en el artículo 299 inciso 2 de la Ley 19.550 |

Fig. 7.1 Diferencias entre SA y SRL

Fuente: (iProfecional, 2025))

Si bien la S.R.L. presenta ventajas administrativas para emprendimientos pequeños, la naturaleza del presente proyecto, industria química con inversión elevada, operación continua y riesgo industria, requiere una estructura societaria que:

Facilite la incorporación de capital para futuras ampliaciones.

- Brinde mayor respaldo institucional frente a proveedores estratégicos e instituciones financieras.
- Permita una gestión profesionalizada y escalable.
- Sea coherente con un proyecto que puede crecer o asociarse con otras empresas.

Por estos motivos, la Sociedad Anónima resulta la figura más apropiada.

- Registro impositivo.
- Habilitaciones municipales e industriales.
- Normativas ambientales y de seguridad aplicables a la actividad química.

Esta estructura permite un crecimiento ordenado del proyecto y asegura un marco legal adecuado para su operación.

7.3.2 Razón social

ARGENPOX S.A. es una empresa dedicada a la producción de óxido de propileno (PO), orientada a abastecer principalmente al mercado nacional y regional, contribuyendo al desarrollo de la industria química y petroquímica. Su actividad se enfoca en la provisión de una materia prima estratégica utilizada en la fabricación de polioles para poliuretanos, glicoles, éteres glicólicos y tensioactivos especiales, productos con amplia aplicación en sectores como construcción, automotriz, envases, recubrimientos, textiles y productos de limpieza.



Fig. 7.2 Logo empresarial

Fuente: Elaboración Propia

La empresa tiene como misión posicionarse como un proveedor confiable de óxido de propileno en la región, ofreciendo un producto de alta calidad, promoviendo la sustitución de importaciones y fortaleciendo la cadena de valor petroquímica local. Asimismo, se proyecta operar bajo criterios de eficiencia productiva, seguridad industrial y responsabilidad ambiental.

| Datos sociales, tributarios y comerciales | |
|---|--|
| Razón Social | ARGENPOX SA |
| País | Argentina |
| Actividad Principal | Producción de óxido de propileno (PO) |
| CUIT | XX-XXXXXXXX-X |
| Actividad Principal AFIP | Fabricación de sustancias químicas básicas |
| Perfil de Comercialización | Venta directa a industrias químicas, petroquímicas y fabricantes de polioles, glicoles y tensioactivos |
| Año de inicio de actividades | 2026 |
| Cantidad estimada de empleados | (Se definirá según estructura organizacional) |
| Domicilio Industrial | Ruta Provincial N.º 215, Ensenada, Provincia de Buenos Aires |
| Teléfono | +5492604341661 +5492625649755 |
| Facturación estimada | A determinar en el estudio económico-financiero |

Tabla 7.1 Datos Sociales, Tributarios y Comerciales

Fuente: Elaboración propia

7.4 Organigrama

El organigrama propuesto para la planta productora de óxido de propileno responde a una estructura funcional y jerárquica, adecuada para una instalación industrial de operación continua y escala media.

La organización se estructura en tres niveles claramente diferenciados: dirección estratégica, gestión técnica-operativa y ejecución operativa, lo que permite una adecuada distribución de responsabilidades y una comunicación eficiente entre las distintas áreas.

En el nivel superior se encuentra la Gerencia General, responsable de la toma de decisiones estratégicas, planificación a largo plazo, gestión financiera global y relaciones institucionales. Esta posición centraliza la coordinación entre las distintas áreas funcionales y garantiza la alineación de los objetivos operativos con los lineamientos económicos y comerciales del proyecto.

En el segundo nivel se ubican las áreas funcionales principales:

- Jefatura de Producción, responsable de la operación del proceso, control de variables críticas, cumplimiento del programa de producción y coordinación del personal operativo. Dentro de esta área se incluyen los supervisores de turno, operadores de planta y el laboratorista, quien realiza el control de calidad de materias primas, seguimiento del proceso y análisis del producto final.
- Jefatura de Mantenimiento, encargada de asegurar la disponibilidad y confiabilidad de los equipos, instalaciones e instrumentos, mediante tareas preventivas y correctivas, minimizando paradas no programadas.
- Jefatura de Seguridad, Salud y Medio Ambiente (SSMA), cuya función es garantizar el cumplimiento de la normativa vigente, la prevención de riesgos laborales y la gestión ambiental, aspectos fundamentales en la industria química.
- Administración y Finanzas, área responsable de la gestión contable, tributaria, financiera y administrativa, incluyendo la gestión de personal y asesoramiento legal.
- Compras y Abastecimiento, encargada de la adquisición de materias primas estratégicas, negociación con proveedores y coordinación logística, aspecto clave dado el carácter crítico del propileno y el peróxido de hidrógeno en el proceso productivo.

Finalmente, el nivel operativo está compuesto por el personal técnico y operadores, quienes ejecutan directamente las actividades productivas bajo supervisión, asegurando la continuidad del proceso.

La estructura adoptada permite mantener un equilibrio entre eficiencia operativa y simplicidad organizacional, evitando una sobredimensión innecesaria, pero garantizando la cobertura de todas las funciones críticas requeridas para la operación segura y rentable de la planta.

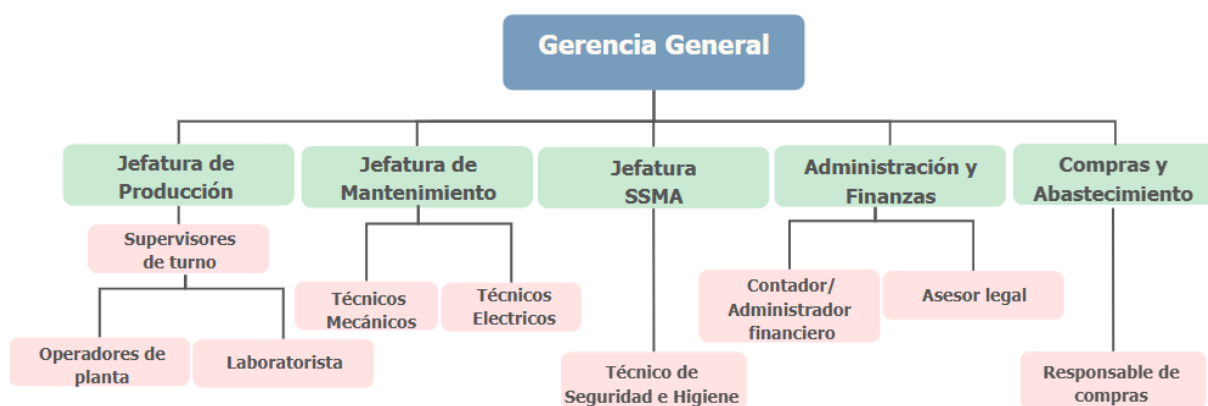


Fig. 7.3 Organigrama

Fuente: Elaboración propia

7.5 Fichas de Función

Con el objetivo de definir con claridad las responsabilidades y alcances de cada puesto dentro de la estructura organizacional propuesta, se elaboran las correspondientes fichas de función.

Estas fichas permiten establecer de manera sistemática la dependencia jerárquica, el objetivo del cargo, las principales responsabilidades y los requisitos mínimos de formación y experiencia requeridos. De este modo, se garantiza una adecuada delimitación de tareas, evitando superposiciones y asegurando una correcta coordinación entre las distintas áreas funcionales.

La definición formal de los puestos resulta fundamental en una planta de proceso continuo, donde la correcta asignación de responsabilidades impacta directamente en la eficiencia operativa, la seguridad industrial y el cumplimiento de los estándares de calidad.

Asimismo, estas fichas constituyen una herramienta base para la futura gestión de recursos humanos, procesos de selección, capacitación y evaluación de desempeño, contribuyendo a la profesionalización de la organización. (Chiavenato, 2006)

A continuación, se presentan las fichas correspondientes a cada uno de los cargos definidos en el organigrama.

| FICHAS DE FUNCIÓN-ARGENPOX SA | |
|--------------------------------------|---|
| Área | Dirección |
| Sector | Gerencia General |
| Función | Coordinar, dirigir y supervisar el funcionamiento integral de la empresa. |
| Supervisar a | Gerentes de: Operaciones, Administrativo-Financiera y Comercial y Calidad |
| Reportar a | Junta Directiva / Accionistas |
| Categoría | Fuera CCT |
| DEBERES | |

Definir políticas generales y estrategias de crecimiento.
 Aprobar planes de producción y presupuestos.
 Supervisar la gestión financiera.
 Representar a la empresa ante organismos y proveedores estratégicos.
 Evaluar inversiones y ampliaciones futuras.

PERFIL DEL PUESTO

Formación universitaria completa, preferentemente en Ingeniería, Administración o Economía.
 Experiencia mínima de 10 años en cargos directivos industriales.
 Habilidades de liderazgo, comunicación y toma de decisiones estratégicas

Tabla 7.1 Ficha de función del Gerente General

FICHAS DE FUNCIÓN-ARGENPOX SA

| | |
|---------------------|--|
| Área | Dirección |
| Sector | Gerencia de Producción |
| Función | Liderar la producción de la planta, gestionando los recursos productivos, técnicos y humanos |
| Supervisar a | Jefes de Producción, Mantenimiento, Seguridad Industrial y Logística. |
| Reportar a | Gerente General |
| Categoría | Fuera CCT |

DEBERES

Monitorear el desempeño operativo.
 Realizar el seguimiento de los indicadores clave de desempeño (KPIs).
 Elaborar informes detallados y periódicos sobre el rendimiento del área para presentarlos a la alta dirección.
 Promover un entorno de trabajo colaborativo y multidisciplinario.
 Facilitar la comunicación entre las áreas de la organización y con los respectivos jefes.
 Contribuir con el cumplimiento de los objetivos globales de la empresa.
 Supervisar y gestionar el presupuesto asignado al área.

PERFIL DEL PUESTO

Título universitario en Ingenierías Orientadas a Procesos o en Administración de Empresas con al menos 7 años de experiencia en puestos similares.
 Capacidad para dirigir y coordinar equipos de trabajo multidisciplinarios.
 Habilidad para promover un ambiente de trabajo colaborativo y eficiente.
 Habilidades excepcionales en comunicación verbal y escrita, con una destacada capacidad de oratoria y manejo de relaciones interpersonales.
 Capacidad para tomar decisiones rápidas y efectivas en situaciones de alta presión.

Tabla 7.2 Ficha de función del Gerente de Producción

| FICHAS DE FUNCIÓN-ARGENPOX SA | |
|--|---|
| Área | Administración |
| Sector | Dirección Administrativa |
| Función | Gestionar los recursos económicos, financieros y contables de la empresa. |
| Supervisar a | Contador, RRHH, Asesor legal, Tesorería. |
| Reportar a | Gerente General |
| Categoría | Fuera CCT |
| DEBERES | |
| Elaborar presupuestos y controlar costos operativos. Supervisar la contabilidad general y estados financieros. Gestionar pagos a proveedores y cobranzas. Administrar liquidación de sueldos y cargas sociales. Evaluar necesidades de financiamiento. Coordinar con asesoría legal y contable externa. | |
| PERFIL DEL PUESTO | |
| Lic. Administración, Economía o Contador Público. Experiencia mínima de 5 años. Alta capacidad analítica y visión estratégica. | |

Tabla 7.3 Ficha de función del Jefe de Finanzas

| FICHAS DE FUNCIÓN-ARGENPOX SA | |
|---|--|
| Área | Administración |
| Sector | Finanzas |
| Función | Gestionar balances, impuestos y auditorías |
| Supervisar a | - |
| Reportar a | Gerente de Administración |
| Categoría | A2 |
| DEBERES | |
| <p>Registrar operaciones contables. Preparar balances y reportes mensuales. Gestionar facturación y documentación fiscal. Controlar flujo de caja. Colaborar en auditorías.</p> | |
| PERFIL DEL PUESTO | |
| Contador Público | |

Tabla 7.4 Ficha de función del Contador

Fuente: Elaboración Propia

| FICHAS DE FUNCIÓN-ARGENPOX SA | |
|--------------------------------------|-------------------------------------|
| Área | Administración |
| Sector | Legales |
| Función | Asesorar jurídicamente a la empresa |

| | |
|--|---------------------------|
| Supervisar a | - |
| Reportar a | Gerente de Administración |
| Categoría | A2 |
| DEBERES | |
| <p>Redactar y revisar contratos con proveedores y clientes. Asesorar en normativa ambiental y de seguridad. Gestionar aspectos societarios. Intervenir en conflictos legales.</p> | |
| PERFIL DEL PUESTO | |
| Abogado con experiencia en derecho laboral y ambiental | |

Tabla 7.5 Ficha de función del Asesor Legal

| | |
|--------------------------------------|--|
| FICHAS DE FUNCIÓN-ARGENPOX SA | |
| Área | Compras y Abastecimiento |
| Sector | Compras |
| Función | Gestionar compras y contratos de insumos y servicios |
| Supervisar a | Comprador técnico |
| Reportar a | Gerente General |
| Categoría | A |
| DEBERES | |

| |
|---|
| <p>Negociar contratos de suministro de propileno y peróxido de hidrógeno. Gestionar importaciones y logística. Evaluar proveedores. Controlar inventarios críticos. Coordinar con Producción para planificación de compras.</p> |
| PERFIL DEL PUESTO |
| <p>Lic. en Comercio Exterior, Administración o Ingeniería. Experiencia en compras industriales. Conocimiento en logística e importaciones.</p> |

Tabla 7.6 Ficha de función del Jefe de compras

| FICHAS DE FUNCIÓN-ARGENPOX SA | |
|--|--------------------------|
| Área | Compras y Abastecimiento |
| Sector | Departamento de Compras |
| Función | Comprador Técnico |
| Supervisar a | - |
| Reportar a | Gerente General |
| Categoría | A2 |
| DEBERES | |
| <p>Gestionar las compras de insumos, repuestos y servicios técnicos específicos solicitados por los distintos sectores. Buscar, evaluar y seleccionar proveedores según criterios de calidad, precio y cumplimiento. Emitir órdenes de compra y realizar seguimiento hasta la recepción del bien o servicio. Controlar la documentación asociada (presupuestos, remitos, facturas) y coordinar con finanzas para los pagos. Colaborar en la actualización de precios y condiciones contractuales</p> | |
| PERFIL DEL PUESTO | |

Formación técnica o terciaria en Administración, Logística o afines.
Experiencia previa en compras industriales o técnicas

Tabla 7.7 Ficha de función del Comprador Técnico

| FICHAS DE FUNCIÓN-ARGENPOX SA | |
|--|---|
| Área | Producción |
| Sector | Área Técnica de Operación |
| Función | Supervisar el proceso productivo de OP, garantizando eficiencia, calidad y seguridad. |
| Supervisar a | Supervisores de Turno, Técnicos de Operación. |
| Reportar a | Gerente de Producción |
| Categoría | Fuera CCT |
| DEBERES | |
| <p>Controlar indicadores clave de producción Resolver desvíos operativos. Coordinar con mantenimiento y calidad</p> | |
| PERFIL DEL PUESTO | |
| <p>Ing. Químico o afín. Experiencia de al menos 3 años en procesos químicos continuos. Orientado a resultados y gestión de equipos</p> | |

Tabla 7.8 Ficha de función del Jefe de Producción

| FICHAS DE FUNCIÓN-ARGENPOX SA | |
|--------------------------------------|-------------|
| Área | Producción |
| Sector | Laboratorio |

| | |
|--|--|
| Función | Analizar la calidad del producto final |
| Supervisar a | - |
| Reportar a | Jefe de Planta |
| Categoría | Fuera CCT |
| DEBERES | |
| Analizar pureza del propileno y concentración de H ₂ O ₂ . Controlar especificaciones del óxido de propileno. Elaborar informes técnicos. Detectar desviaciones de calidad. | |
| PERFIL DEL PUESTO | |
| Técnico químico o Lic. en Química. Manejo de técnicas analíticas. | |

Tabla 7.9 Ficha de función del Laboratorista

| | |
|--------------------------------------|---|
| FICHAS DE FUNCIÓN-ARGENPOX SA | |
| Área | Producción |
| Sector | Mantenimiento |
| Función | Planificar y supervisar las tareas de mantenimiento preventivo y correctivo |
| Supervisar a | Técnicos Mecánicos, Electricistas |
| Reportar a | Gerencia General |
| Categoría | Fuera CCT |
| DEBERES | |

| |
|---|
| <p>Elaborar el plan anual de mantenimiento. Coordinar intervenciones programadas y paradas técnicas. Supervisar técnicos mecánicos, eléctricos e instrumentistas. Minimizar tiempos de parada no programada. Gestionar repuestos críticos. Coordinar con Producción durante arranques y paradas.</p> |
| PERFIL DEL PUESTO |
| <p>Ing. Mecánico/Electromecánico. Experiencia comprobable en plantas industriales. Perfil resolutivo y orientado a la mejora continua.</p> |

Tabla 7.10 Ficha de función del Jefe de Mantenimiento

| FICHAS DE FUNCIÓN-ARGENPOX SA | |
|---|---|
| Área | Producción |
| Sector | Operación en línea |
| Función | Operar equipos e instalaciones del proceso productivo conforme a los procedimientos establecidos. |
| Supervisar a | - |
| Reportar a | Jefe de Producción |
| Categoría | A1 |
| DEBERES | |
| <p>Realizar controles rutinarios de presión, temperatura y caudal. Operar válvulas, bombas y reactores según instrucciones. Registrar datos operativos.</p> | |
| PERFIL DEL PUESTO | |
| <p>Secundario completo técnico (químico o electromecánico). Experiencia en plantas de procesos es valorada.</p> | |

Tabla 7.11 Ficha de función del Operador

| FICHAS DE FUNCIÓN-ARGENPOX SA | |
|---|--|
| Área | Producción |
| Sector | Ingeniería |
| Función | Optimizar procesos y apoyar en proyectos de mejora |
| Supervisar a | - |
| Reportar a | Jefe de Producción |
| Categoría | B1 |
| DEBERES | |
| Modelado de procesos, balances de masa y energía, eficiencia energética | |
| PERFIL DEL PUESTO | |
| Ingeniero químico o de procesos. Experiencia en plantas de procesos es valorada. | |

Tabla 7.12 Ficha de función del Jefe de Ingeniería

| FICHAS DE FUNCIÓN-ARGENPOX SA | |
|--------------------------------------|---|
| Área | Producción |
| Sector | Mantenimiento |
| Función | Ejecutar tareas de mantenimiento preventivo y correctivo en los equipos mecánicos de la planta. |
| Supervisar a | - |

| | |
|--|-----------------------|
| Reportar a | Jefe de Mantenimiento |
| Categoría | A1 |
| DEBERES | |
| Mantenimiento de bombas, compresores e intercambiadores. Reemplazo de piezas desgastadas. Inspección de equipos bajo presión. Participación en paradas programadas. | |
| PERFIL DEL PUESTO | |
| Técnico mecánico o electromecánico. Experiencia en plantas industriales. | |

Tabla 7.13 Ficha de función del Técnico de Mantenimiento

| | |
|---|---|
| FICHAS DE FUNCIÓN-ARGENPOX SA | |
| Área | Producción |
| Sector | Mantenimiento |
| Función | Realizar tareas de mantenimiento eléctrico en instalaciones y maquinaria. |
| Supervisar a | - |
| Reportar a | Jefe de Mantenimiento |
| Categoría | A1 |
| DEBERES | |
| Mantenimiento y reparación de tableros, motores y sistemas de control. Detección de fallas y prevención de riesgos eléctricos. Verificación de instalaciones según normativa eléctrica. | |
| PERFIL DEL PUESTO | |

Técnico electricista con conocimientos en automatización industrial.
Experiencia en media y baja tensión.
Conocimiento de normas de seguridad eléctrica.

Tabla 7.14 Ficha de función del Técnico de Electricista

Fuente: Elaboración Propia

| FICHAS DE FUNCIÓN-ARGENPOX SA | |
|--|--|
| Área | Seguridad, Salud y Medio Ambiente |
| Sector | Seguridad Industrial |
| Función | Garantizar el cumplimiento de la normativa vigente en materia de seguridad industrial, higiene laboral y protección ambiental. |
| Supervisar a | Técnicos en Seguridad e Higiene |
| Reportar a | Gerente General |
| Categoría | Fuera CCT |
| DEBERES | |
| Implementar programas de prevención de riesgos. Supervisar cumplimiento de protocolos de seguridad. Gestionar residuos industriales. Coordinar auditorías ambientales. Capacitar al personal en seguridad. | |
| PERFIL DEL PUESTO | |
| Ingeniero/a en Seguridad, Higiene o afín. Conocimiento en normativa ambiental y seguridad industrial. Experiencia en industria química. | |

Tabla 7.15 Ficha de función del Jefe de SSMA

FICHAS DE FUNCIÓN-ARGENPOX SA

| | |
|---|---|
| Área | Seguridad, Salud y Medio Ambiente |
| Sector | Planta |
| Función | Asegurar el cumplimiento de las normativas de seguridad industrial y salud ocupacional. |
| Supervisar a | - |
| Reportar a | Responsable de Seguridad e Higiene |
| Categoría | A2 |
| DEBERES | |
| <p>Verificar uso de EPP. Asistir en capacitaciones y simulacros. Inspeccionar condiciones de trabajo y levantar reportes.</p> | |
| PERFIL DEL PUESTO | |
| <p>Técnico en Seguridad e Higiene con matrícula habilitante. Experiencia en industria química.</p> | |

Tabla 7.16 Ficha de función del Técnico de S y H

| | |
|--------------------------------------|---|
| FICHAS DE FUNCIÓN-ARGENPOX SA | |
| Área | Seguridad, Salud y Medio Ambiente |
| Sector | Planta |
| Función | Supervisar el cumplimiento ambiental de la planta y promover prácticas sostenibles. |
| Supervisar a | - |
| Reportar a | Responsable de Seguridad e Higiene y Ambiente |

| | |
|---|----|
| Categoría | A2 |
| DEBERES | |
| Gestionar residuos y efluentes. Controlar emisiones. Preparar informes ambientales regulatorios | |
| PERFIL DEL PUESTO | |
| Técnico ambiental, químico o similar Experiencia en normativas ISO 14001. | |

Tabla 7.17 Ficha de función del Técnico de Ambiente

| | |
|--|-----------------------------|
| FICHAS DE FUNCIÓN-ARGENPOX SA | |
| Área | Servicios Generales |
| Sector | Planta y Oficinas |
| Función | Mantener limpieza e higiene |
| Supervisar a | - |
| Reportar a | Gerente General |
| Categoría | CCT |
| DEBERES | |
| Limpieza de áreas comunes, retiro de residuos | |
| PERFIL DEL PUESTO | |
| Primario completo, experiencia previa valorada | |

Tabla 7.18 Ficha de función de Limpieza

| FICHAS DE FUNCIÓN-ARGENPOX SA | |
|---|--|
| Área | Servicios Generales |
| Sector | Seguridad |
| Función | Controlar accesos y monitoreo de seguridad |
| Supervisar a | - |
| Reportar a | Gerente General |
| Categoría | CCT |
| DEBERES | |
| Verificar ingreso/egreso, control por cámaras, reportes | |
| PERFIL DEL PUESTO | |
| Secundario completo, formación en vigilancia | |

Tabla 7.19 Ficha de función del Seguridad

7.6 Descripción y análisis de cargos

Los cargos definidos para la planta industrial fueron clasificados conforme a las categorías establecidas en el Convenio Colectivo de Trabajo N.º 564/09, correspondiente al sector de la Industria Química y Petroquímica de la República Argentina. (FATIQuP.)

El mencionado convenio regula las condiciones laborales del personal comprendido en la actividad, incluyendo aspectos vinculados a la categorización profesional, escalas salariales, jornada de trabajo y derechos laborales. Su aplicación resulta adecuada para el presente proyecto, dado que la empresa se encuadra dentro de la actividad química industrial de proceso continuo.

La selección del CCT 564/09 se fundamenta en su vigencia actual y en la especificidad técnica de sus categorías, las cuales contemplan distintos niveles de complejidad operativa y responsabilidad dentro de plantas químicas y petroquímicas. Esto permite una correcta asignación jerárquica y funcional de los puestos definidos en el organigrama.

| Cargo | Categoría CCT 564/09 |
|---|--|
| Operador de Planta | Categoría B |
| Operador Senior / Panelista | Categoría A |
| Jefe de Producción | Categoría A1 |
| Laboratorista | Categoría B |
| Responsable de Mantenimiento | Categoría A |
| Técnico de Mantenimiento | Categoría B |
| Jefe de Planta | Fuera de Convenio |
| Responsable de Compras | Fuera de Convenio |
| Responsable de Administración y Finanzas | Fuera de Convenio |
| Contador Externo | Profesional independiente (No encuadrado en CCT) |
| Responsable de SSMA (Seguridad, Salud y Medio Ambiente) | Fuera de Convenio |
| Asesor Legal | Fuera de Convenio |
| Técnico Ambiental | Categoría A |
| Personal de Limpieza | CCT |
| Personal de Seguridad (Vigilancia interna) | Categoría C* |

Tabla 7.20 Categorización de cargos

Fuente: Elaboración propia

La asignación de categorías se realizó considerando los siguientes criterios técnicos:

- Nivel de responsabilidad sobre el proceso productivo.
- Grado de autonomía en la toma de decisiones operativas.
- Complejidad técnica de las tareas desarrolladas.

- Participación en actividades de supervisión y conducción de personal.
- Riesgo operativo asociado al puesto.

En función de estos parámetros, el personal directamente involucrado en la operación y control del proceso fue encuadrado dentro de las categorías B, A y A1 según su nivel de competencia y responsabilidad, mientras que los cargos jerárquicos y administrativos fueron considerados fuera del alcance del convenio colectivo, en virtud de su carácter estratégico y de dirección.

7.7 Planificación y turnos de trabajo

A continuación, se presenta la planificación de los puestos de trabajo y la dotación necesaria para la operación de la planta industrial bajo un régimen de producción continua.

Dado que el proceso de obtención de óxido de propileno opera de manera ininterrumpida durante las 24 horas del día, se adopta un esquema de trabajo basado en tres turnos rotativos de 8 horas cada uno, garantizando la continuidad operativa, la estabilidad del proceso y el cumplimiento de las condiciones de seguridad industrial.

El régimen de trabajo se organiza de la siguiente manera:

- Personal operativo (Producción, Mantenimiento y Laboratorio de turno):
Régimen continuo 24/7 bajo esquema de tres turnos rotativos:

- Turno Mañana: 06:00 – 14:00
- Turno Tarde: 14:00 – 22:00
- Turno Noche: 22:00 – 06:00

La dotación por turno se dimensiona de manera tal que permita cubrir las necesidades mínimas de operación segura, considerando además relevos, francos y cobertura ante contingencias.

- Personal jerárquico técnico (Jefaturas y Supervisión):
Jornada laboral de lunes a viernes, 8 horas diarias, con disponibilidad ante situaciones extraordinarias o paradas programadas.

- Personal administrativo y comercial:
Jornada laboral de lunes a viernes, 8 horas diarias, bajo régimen convencional.

- Personal de apoyo (SSMA, Técnico Ambiental, Asesor Legal, Seguridad, Limpieza):
Régimen acorde a la criticidad de sus funciones, combinando presencia en horario diurno con esquemas rotativos o servicios tercerizados según corresponda.

El dimensionamiento final del personal surge del análisis técnico de los requerimientos operativos por turno, asegurando la cobertura permanente de las áreas críticas y el cumplimiento de las normativas laborales vigentes.

| Puesto | Puestos a cubrir | Turnos | Trabajadores necesarios |
|--|------------------|--------|-------------------------|
| Gerencia General | | | |
| Gerente General | 1 | 1 | 1 |
| Departamento de Operaciones | | | |
| Gerente de Operaciones | 1 | 1 | 1 |
| Jefe de Producción (S.T) | 1 | 3 | 3 |
| Operarios | 5 | 3 | 15 |
| Departamento de Mantenimiento y SSMA | | | |
| Jefe de Mantenimiento | 1 | 1 | 1 |
| Técnicos de mantenimiento | 1 | 3 | 3 |
| Jefe de Calidad | 1 | 1 | 1 |
| Inspector / Laboratorista | 1 | 3 | 3 |
| Técnico de Seguridad y Higiene | 1 | 1 | 1 |
| Gerencia Administración, Finanzas y Comercial | | | |
| Gerente Comercial | 1 | 1 | 1 |
| Ventas | 2 | 1 | 2 |
| Compras | 1 | 1 | 1 |
| Administración / Contabilidad | 2 | 1 | 2 |
| Asesor Legal | 1 | 1 | 1 |
| Seguridad y Limpieza | | | |
| Seguridad | 1 | 3 | 3 |
| Limpieza | 2 | 1 | 2 |
| TOTAL GENERAL | | | 41 |

Tabla 7.21 Categorización de Cargos

Fuente: Elaboración Propia

7.8 Conclusión

El presente capítulo permitió establecer la estructura organizacional y el esquema de gestión necesarios para el correcto funcionamiento de la planta industrial proyectada de óxido de propileno.

En primer lugar, se definió una estructura organizativa de tipo funcional, adecuada para emprendimientos industriales de proceso continuo, donde la clara delimitación de responsabilidades y líneas de autoridad resulta fundamental para garantizar eficiencia operativa, control técnico y adecuada toma de decisiones. La organización contempla áreas estratégicas diferenciadas: Dirección, Producción, Mantenimiento, Laboratorio y Control de Calidad, Administración y Finanzas, Compras y Logística, y Seguridad, Salud y Medio Ambiente (SSMA).

Asimismo, se determinó una dotación de personal acorde al régimen operativo continuo de 24 horas diarias, estructurado en tres turnos rotativos de 8 horas, contemplando además personal técnico especializado, supervisión operativa y soporte administrativo. La planificación de puestos consideró criterios de eficiencia operativa, cumplimiento normativo y sustentabilidad organizacional.

Se estableció también la categorización del personal bajo el Convenio Colectivo de Trabajo N.º 564/09, correspondiente a la industria química y petroquímica, asegurando coherencia con el marco legal vigente en la República Argentina y proporcionando una base sólida para el posterior análisis de costos laborales.

La estructura definida permite:

- Garantizar continuidad operativa en régimen 24/7.
- Asegurar control técnico del proceso y de la calidad del producto.
- Cumplir con exigencias normativas en materia de seguridad y medio ambiente.
- Mantener un esquema administrativo eficiente y profesional.

En síntesis, la organización propuesta resulta técnicamente adecuada para una planta industrial de 23.000 t/año, asegurando coherencia entre el tamaño productivo, la estructura de gestión y los recursos humanos asignados.

El esquema organizacional adoptado constituye una base sólida para el desarrollo del análisis económico-financiero del proyecto, el cual será abordado en el capítulo correspondiente.

CAPÍTULO VIII: ASPECTOS AMBIENTALES

8.1 Introducción

La gestión de los aspectos ambientales constituye un elemento central en el diseño y operación de plantas industriales modernas, especialmente en procesos petroquímicos como la producción de óxido de propileno mediante la tecnología HPPO. En este tipo de procesos, donde intervienen sustancias inflamables, oxidantes y compuestos orgánicos volátiles, resulta fundamental garantizar un equilibrio entre la eficiencia productiva y la protección del ambiente.

La experiencia en el desarrollo de proyectos industriales demuestra que una gestión ambiental inadecuada puede derivar en impactos negativos significativos sobre el entorno, así como en conflictos sociales que afecten la viabilidad del emprendimiento. Por el contrario, la correcta implementación de políticas ambientales, junto con el cumplimiento de la normativa vigente, permite asegurar una operación sustentable y socialmente aceptada.

Se entiende por *impacto ambiental* a toda alteración del ambiente, ya sea positiva o negativa, generada por las actividades del proyecto. En el caso del proceso HPPO, estos impactos pueden estar asociados principalmente a emisiones gaseosas, efluentes líquidos, generación de residuos y consumo de recursos naturales.

La Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) constituye una herramienta clave para identificar, predecir y valorar estos efectos, permitiendo adoptar medidas preventivas y correctivas desde etapas tempranas del proyecto. Esto resulta particularmente relevante en procesos como el analizado, donde la manipulación de peróxido de hidrógeno, metanol y propileno implica riesgos ambientales específicos.

En este capítulo se presenta un análisis preliminar de los impactos ambientales asociados a la planta de producción de óxido de propileno, considerando las etapas de construcción, operación y eventual cierre. Este estudio servirá como base para futuros análisis más detallados en instancias de ingeniería de detalle y evaluación de factibilidad.

8.2 Marco legal

El desarrollo del proyecto se encuentra regulado por un conjunto de normativas ambientales de carácter nacional y provincial, orientadas a la protección del ambiente, la prevención de la contaminación y el uso sostenible de los recursos naturales.

8.2.1 Legislación nacional

A nivel nacional, las principales normativas aplicables al proyecto son:

Ley General del Ambiente N.º 25.675

Establece los principios rectores de la política ambiental en Argentina, tales como el principio precautorio, preventivo y de sustentabilidad. Obliga a la realización de una Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) para proyectos con potencial impacto significativo, como es el caso de plantas petroquímicas.

Ley N.º 24.051 – Residuos Peligrosos

Regula la generación, transporte, tratamiento y disposición final de residuos peligrosos. En el proceso HPPO, se incluyen dentro de esta categoría:

- Residuos con peróxidos residuales
- Solventes contaminados (metanol)
- Catalizadores agotados (TS-1)

Ley N.º 25.688 – Gestión Ambiental de Aguas

Establece los presupuestos mínimos para la preservación y uso racional del recurso hídrico. Exige tratamiento previo de efluentes líquidos antes de su descarga.

Ley N.º 20.284 – Protección del aire

Regula las emisiones atmosféricas, incluyendo:

- Compuestos orgánicos volátiles (COVs)
- Óxidos de nitrógeno (NO_x)
- Monóxido y dióxido de carbono

Ley N.º 26.331 – Bosques nativos

Aplica indirectamente en la evaluación del uso del suelo y localización del proyecto.

8.2.2 Legislación provincial

Dado que la planta de producción de óxido de propileno se localizará en la zona petroquímica de Ensenada, provincia de Buenos Aires, el proyecto deberá cumplir con la normativa ambiental vigente en dicha jurisdicción, la cual se caracteriza por un marco regulatorio estricto debido a la alta concentración de actividades industriales.

Las principales disposiciones aplicables son:

Ley N.º 11.723 – Ley Integral del Medio Ambiente

Constituye la norma marco en materia ambiental a nivel provincial. Establece los principios de política ambiental, el ordenamiento territorial y la obligatoriedad de someter a Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) a todo proyecto susceptible de degradar el ambiente. La autoridad de aplicación es el Ministerio de Ambiente de la Provincia de Buenos Aires.

Ley N.º 5.965 – Protección a las Fuentes de Provisión y a los Cursos y Cuerpos Receptores de Agua y a la Atmósfera

Regula la prevención de la contaminación del aire y del agua en el ámbito provincial. Establece límites de emisión para efluentes líquidos y gaseosos, siendo particularmente relevante para el presente proyecto debido a la posible emisión de compuestos orgánicos volátiles (COVs), gases de combustión y efluentes con contenido de solventes y compuestos oxigenados.

Decreto N.º 3.395/96 y modificatorios

Reglamenta el funcionamiento de establecimientos industriales en la provincia, incluyendo la clasificación de industrias según su nivel de complejidad ambiental (NCA). La planta HPPO será considerada de alta complejidad ambiental, por lo que deberá cumplir con exigencias estrictas en materia de control de emisiones, tratamiento de efluentes y gestión de riesgos.

Resolución OPDS N.º 43/2010 (y complementarias)

Establece los requisitos para la categorización industrial y el procedimiento de obtención del Certificado de Aptitud Ambiental (CAA), obligatorio para la habilitación del establecimiento.

Ley N.º 11.459 – Radicación Industrial

Regula la instalación de industrias en la provincia, clasificándolas en categorías según su impacto ambiental.

La planta deberá obtener la correspondiente habilitación industrial y cumplir con las condiciones de seguridad, higiene y protección ambiental exigidas.

Normativa sobre residuos peligrosos (adhesión a Ley Nacional N.º 24.051)

La provincia adhiere al régimen nacional de residuos peligrosos, exigiendo:

- Registro como generador de residuos peligrosos
- Gestión mediante operadores habilitados
- Trazabilidad de residuos

En el caso del proceso HPPO, se incluyen residuos como:

- Solventes contaminados (metanol)
- Catalizador agotado (TS-1)
- Corrientes con trazas de peróxido

Autoridad del Agua (ADA) – Normativa hídrica provincial

Regula el uso del recurso hídrico y la descarga de efluentes líquidos. Se requiere:

- Permiso de vuelco
- Cumplimiento de parámetros fisicoquímicos (DBO, DQO, pH, etc.)
- Control de contaminantes específicos

8.3 Descripción de los factores ambientales

El análisis de los factores ambientales del área de emplazamiento resulta fundamental para evaluar la interacción entre la planta de producción de óxido de propileno y su entorno. En este caso, el proyecto se ubica en la zona petroquímica de Ensenada, provincia de Buenos Aires, un área altamente industrializada con infraestructura consolidada y condiciones ambientales ya influenciadas por actividades antrópicas.

El estudio considera el medio físico, biótico, socioeconómico y perceptual, permitiendo identificar las principales variables ambientales que podrían verse afectadas por el proyecto.

8.3.1 Medio físico

8.3.1.1 Aire

Calidad fisicoquímica del aire

La región de Ensenada, ubicada dentro del polo petroquímico del Gran La Plata, presenta una situación ambiental compleja en lo que respecta a la calidad del aire. La alta concentración de actividades industriales, particularmente refinerías, plantas petroquímicas, terminales portuarias y tránsito pesado asociado, genera una carga significativa de emisiones gaseosas a la atmósfera.

Entre los principales contaminantes presentes se encuentran el dióxido de azufre (SO₂), los óxidos de nitrógeno (NO_x), el monóxido de carbono (CO), los compuestos orgánicos volátiles (COVs) y el ozono troposférico (O₃), todos ellos con potencial impacto negativo sobre la salud humana y el ambiente.

Diversos estudios ambientales en la región del Gran La Plata han evidenciado que, si bien los niveles promedio pueden encontrarse dentro de los límites normativos en determinadas condiciones, existen episodios de concentración elevada de contaminantes, especialmente durante condiciones meteorológicas desfavorables como estabilidad atmosférica o baja dispersión de vientos. Esto indica que la calidad del aire no puede considerarse óptima de manera sostenida.

Niveles de material particulado (PM)

El material particulado en suspensión constituye uno de los parámetros de mayor relevancia ambiental debido a su impacto directo sobre la salud respiratoria.

En zonas industriales como Ensenada, las fuentes principales de material particulado incluyen procesos industriales, combustión de hidrocarburos, movimiento de suelos, tránsito pesado y actividades portuarias. Las fracciones más finas (PM₁₀ y PM_{2.5}) representan un riesgo significativo, ya que pueden penetrar en el sistema respiratorio y alcanzar los alvéolos pulmonares.

Estas partículas no solo afectan la visibilidad y generan deposición sobre superficies, sino que también están asociadas a enfermedades respiratorias y cardiovasculares, especialmente en poblaciones vulnerables.

Nivel sonoro

El entorno industrial de Ensenada se caracteriza por la presencia de múltiples fuentes de ruido, tanto fijas como móviles. Entre ellas se destacan el funcionamiento continuo de maquinaria industrial, compresores, bombas, antorchas, así como el tránsito de camiones y operaciones portuarias.

Los niveles sonoros en áreas industriales pueden ubicarse típicamente entre 65 y 75 dB en horario diurno, disminuyendo levemente durante la noche. Si bien estos valores son compatibles con zonas industriales, resulta necesario implementar medidas de mitigación — como aislamiento acústico, mantenimiento de equipos y barreras sonoras— para minimizar el impacto sobre áreas urbanas cercanas, como la ciudad de La Plata y zonas residenciales aledañas.

Clima de la región

El área del proyecto se encuentra dentro de la región climática templada húmeda pampeana. Este tipo de clima se caracteriza por presentar estaciones bien definidas, elevada humedad relativa y precipitaciones distribuidas a lo largo del año.

De acuerdo con datos del Servicio Meteorológico Nacional, la zona presenta una temperatura media anual de aproximadamente 17,9 °C, con una humedad relativa promedio del 77% y precipitaciones anuales cercanas a los 1.080 mm.

Según la clasificación climática de Thornthwaite, el clima puede considerarse húmedo y microtermal, con valores de evapotranspiración superiores a 570 mm/año.



Fig. 8.1 Tipos y variedades de climas

Fuente: (Cadenas, Estudio de Impacto Ambiental, 2022, págs. 37-67)

Temperatura

La temperatura media anual en el área de Ensenada es de aproximadamente 17,9 °C. El mes más cálido es enero, con una temperatura media de 24,5 °C, mientras que el mes más frío es julio, con valores cercanos a los 11 °C.

En cuanto a extremos térmicos, se han registrado temperaturas máximas históricas de hasta 39,6 °C y mínimas de -4,8 °C, lo que evidencia una amplitud térmica moderada característica del clima templado.

| Período | Temperatura (°C) | | |
|---------|------------------|-------|--------------|
| | Máxima media | Media | Minima media |
| Ene | 28 | 24,5 | 21 |
| Feb | 27 | 23,5 | 20 |
| Mar | 25 | 22 | 19 |
| Abr | 22 | 18,5 | 15 |
| May | 18 | 15 | 12 |
| Jun | 15 | 12 | 9 |
| Jul | 14 | 11 | 8 |
| Ago | 16 | 13 | 10 |
| Sep | 18 | 14,5 | 11 |
| Oct | 21 | 17,5 | 14 |
| Nov | 24 | 20,5 | 17 |
| Dic | 27 | 23 | 19 |

Tabla 8.1 Registro de temperaturas anual

Fuente: (Cadenas, Estudio de Impacto Ambiental, 2022)

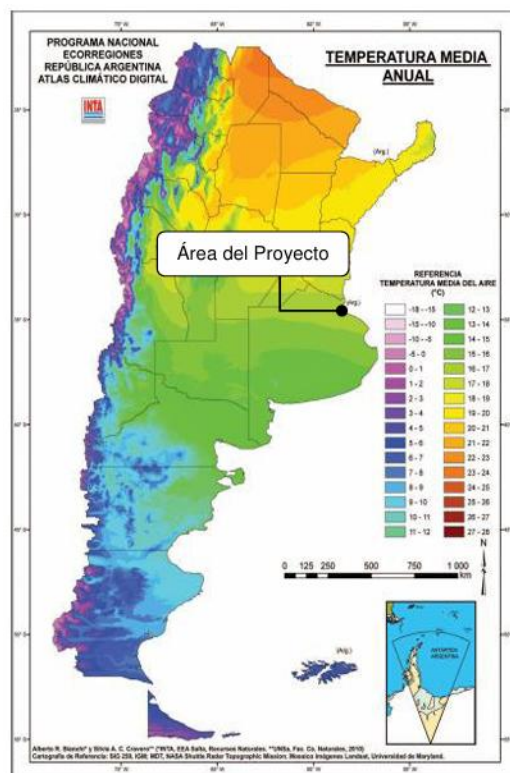


Fig. 8.2 Ecorregiones climáticas de Argentina

Fuente: (Cadenas, Estudio de Impacto Ambiental, 2022)

Precipitaciones

El promedio anual de precipitaciones es de aproximadamente 1.080 mm. La distribución de las lluvias es relativamente homogénea, aunque se observa una mayor concentración durante los meses cálidos.

Los meses más lluviosos corresponden a marzo (127,6 mm) y enero (117,4 mm), mientras que los períodos más secos se presentan en invierno, particularmente en junio (48,7 mm) y julio (52,8 mm).

La estación húmeda se extiende desde octubre hasta marzo, coincidiendo con temperaturas más elevadas y eventos de precipitación de tipo convectivo, frecuentemente asociados a tormentas intensas.

| | | | | | | |
|---------------------------------------|--------------|----------------|-------------------|----------------|------------------|------------------|
| Precipitación media anual (mm) | Enero | Febrero | Marzo | Abril | Mayo | Junio |
| | 117,4 | 107,7 | 127,6 | 105,6 | 84,4 | 48,7 |
| | Julio | Agosto | Septiembre | Octubre | Noviembre | Diciembre |
| | 52,8 | 56,3 | 61,7 | 110,4 | 103,7 | 105,2 |

Tabla 8.2 Precipitación media mensual

Fuente: (Cadenas, Estudio de Impacto Ambiental, 2022)

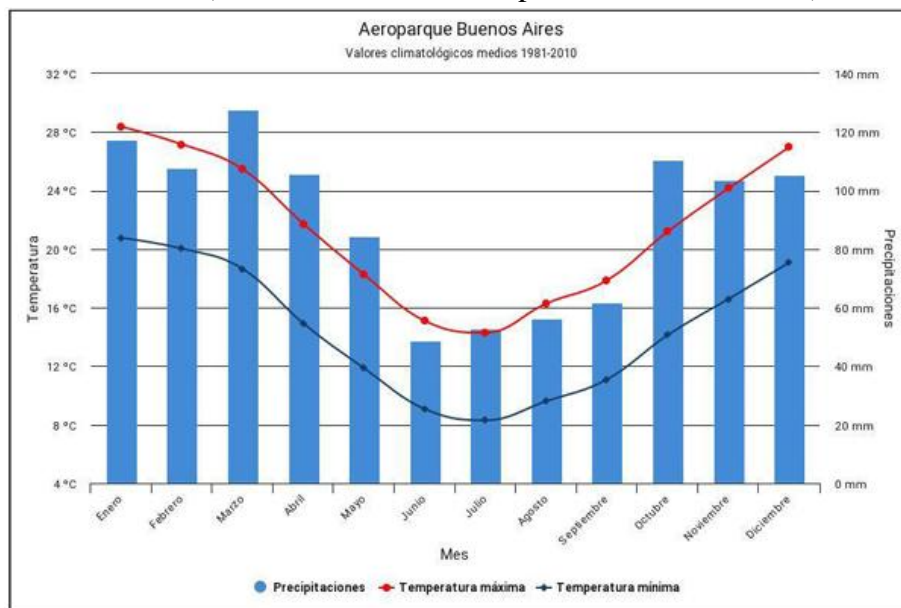


Fig. 8.3 Gráfico por meses de precipitación y temperatura

Fuente: (Cadenas, Estudio de Impacto Ambiental, 2022)

Humedad y vientos

La humedad relativa promedio de la región es elevada, en torno al 77%, lo que influye tanto en el confort térmico como en procesos industriales sensibles a la humedad. En cuanto al régimen de vientos, predominan aquellos provenientes del este, con contribuciones del este-noreste y este-sureste. Las velocidades medias se mantienen generalmente por debajo de los 28 km/h, lo que puede limitar la dispersión de contaminantes en determinadas condiciones atmosféricas.

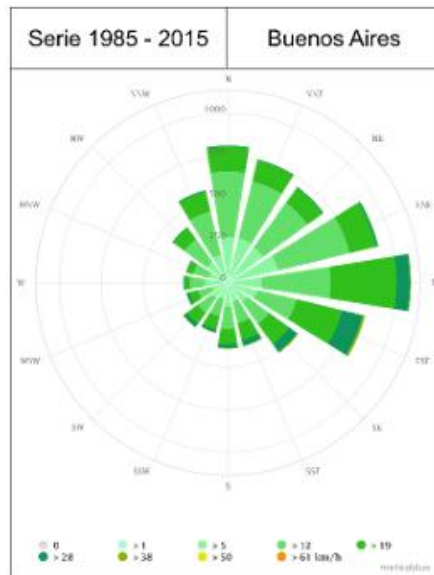


Fig. 8.4 Velocidad promedio de los vientos en la zona

Fuente: (Cadenas, Estudio de Impacto Ambiental, 2022)

Suelos

Los suelos presentes en el área de estudio, ubicada en la zona de Ensenada y su entorno costero-industrial, se han desarrollado principalmente a partir de depósitos loésicos pampeanos, presentando en general texturas limosas con significativo contenido mineralógico.

A escala regional, estos suelos se clasifican dentro del orden de los Argiudoles, destacándose tanto los Argiudoles típicos como los Argiudoles vérticos, de acuerdo con la clasificación del sistema Soil Taxonomy.

En particular, en sectores correspondientes a la planicie estuárica vinculada al Río de la Plata, se identifican dos tipos principales de suelos:

- Molisoles simples, asociados a antiguos cordones de conchilla, con mejores condiciones de drenaje.
- Vertisoles, caracterizados por un elevado contenido de arcillas expansivas.

Estos últimos presentan un comportamiento geotécnico relevante, ya que las variaciones de humedad generan procesos de expansión y contracción, lo que puede provocar desplazamientos diferenciales y fisuración en estructuras e infraestructuras, aspecto clave a considerar en el diseño y operación de instalaciones industriales.

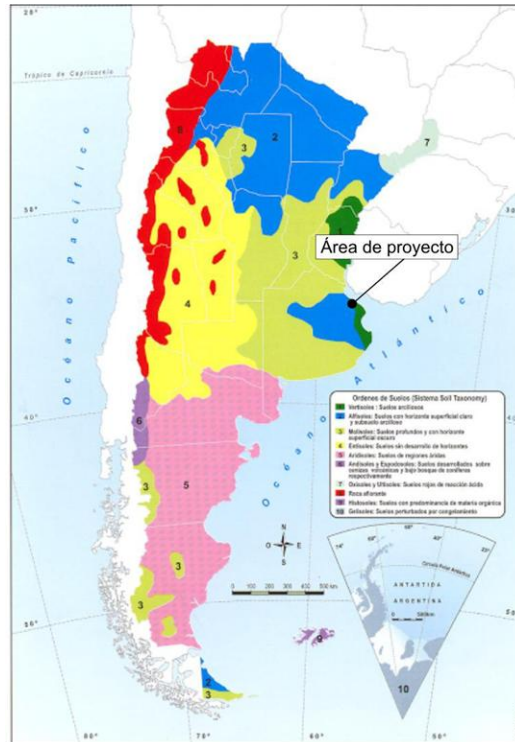


Fig. 8.5 Tipos de suelo de Argentina y su ubicación

Fuente: (Cadenas, Estudio de Impacto Ambiental, 2022)

Neotectónica

Desde el punto de vista tectónico, el área de estudio se emplaza dentro de la región oriental de la República Argentina, caracterizada por un elevado grado de estabilidad geológica. De acuerdo con la zonificación sísmica nacional elaborada por el INPRES, la zona de Ensenada presenta muy baja peligrosidad sísmica, con escasa probabilidad de ocurrencia de eventos sísmicos significativos.

Este contexto resulta favorable para el emplazamiento de instalaciones industriales, reduciendo los requerimientos estructurales asociados a sollicitaciones sísmicas.

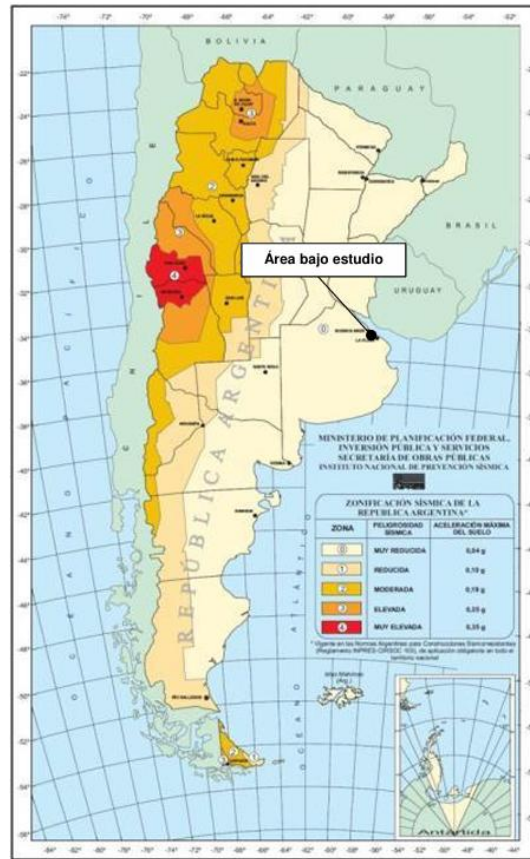


Fig. 8.6 Zonas sísmicas de Argentina

Fuente: (Cadenas, Estudio de Impacto Ambiental, 2022)

Hidrología superficial

El área del proyecto se encuentra inserta dentro de la cuenca hidrográfica del Río de la Plata, uno de los sistemas fluviales más importantes de Sudamérica.

A nivel local, la región presenta una red de drenaje compuesta por diversos arroyos y cursos de agua de llanura, típicos de ambientes pampeanos y estuáricos, los cuales cumplen un rol fundamental en el escurrimiento superficial y la regulación hídrica. Asimismo, la cercanía al estuario condiciona la dinámica hidrológica mediante procesos de sudestadas, crecidas y variaciones en el nivel del agua.

El área también se encuentra vinculada a sistemas de humedales característicos de la llanura pampeana, los cuales actúan como reguladores hidrológicos naturales, favoreciendo la retención de excedentes hídricos y la amortiguación de eventos extremos.

8.3.2 Medio biótico

El área de estudio se encuentra comprendida dentro de la ecorregión Pampa, también denominada Pradera Pampeana, caracterizada originalmente por extensos pastizales naturales. Sin embargo, en el entorno específico de la zona petroquímica de Ensenada, el medio natural ha sido fuertemente modificado por la actividad antrópica, especialmente por el desarrollo industrial, urbano y portuario. Como consecuencia, la flora y fauna nativa se encuentran significativamente reducidas o alteradas.

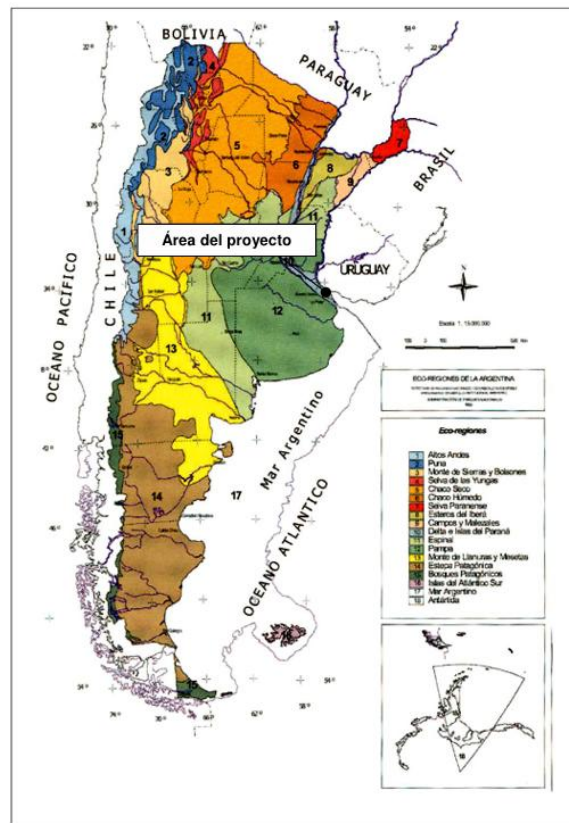


Fig. 8.8 Biomas de la Argentina

Fuente: (Cadenas, Estudio de Impacto Ambiental, 2022)

Flora

La vegetación original corresponde a la Provincia Fitogeográfica Pampeana, dentro del Dominio Chaqueño, donde predominaban comunidades de gramíneas.

En la actualidad, el área presenta un alto grado de antropización, observándose:

- Vegetación urbana implantada (especies ornamentales).
- Comunidades vegetales modificadas en espacios periindustriales.

- Sectores de vegetación ribereña asociados al Río de la Plata.

En zonas cercanas a la costa, pueden encontrarse comunidades típicas de ambientes húmedos, como pajonales, matorrales y vegetación palustre, adaptadas a condiciones de alta humedad y suelos anegables.

Fauna

La fauna local ha experimentado una fuerte transformación debido a la urbanización e industrialización sostenida en el tiempo, lo que ha generado procesos de fragmentación de hábitats.

En este contexto, predominan especies adaptadas a ambientes antrópicos, especialmente:

- **Roedores comensales**, como:
 - *Rattus rattus* (rata negra)
 - *Rattus norvegicus* (rata parda)
 - *Mus musculus* (laucha doméstica)

Asimismo, es común la presencia de aves urbanas y periurbanas, así como especies oportunistas que se adaptan a condiciones modificadas por la actividad humana.

8.3.3 Medio socioeconómico

Educación

El análisis del nivel educativo en el partido de La Plata evidencia, en términos generales, una situación relativamente favorable respecto al promedio de la Provincia de Buenos Aires, aunque con marcadas desigualdades territoriales entre los distintos centros comunales.

En relación con la alfabetización, la tasa de analfabetismo en La Plata (1,2%) resulta inferior a la provincial (1,6%). No obstante, al interior del partido se observan diferencias significativas: mientras que el Casco Urbano presenta niveles mínimos (0,3%), en zonas como Melchor Romero la tasa asciende al 5,7%, evidenciando condiciones socioeducativas más desfavorables.

En cuanto a la asistencia educativa, el 62% de la población mayor a tres años asistió previamente a algún establecimiento educativo, el 35% se encontraba asistiendo al momento del relevamiento, y un 3% nunca accedió al sistema educativo. Dentro de la población que asiste, predomina la participación en niveles iniciales (47%), seguida del nivel secundario (24%) y, en menor medida, el nivel superior (29%).

El análisis territorial muestra que en varios centros comunales —particularmente Melchor Romero, El Peligro y Abasto— se registran mayores porcentajes de población que nunca asistió

a instituciones educativas. En contraposición, zonas como el Casco Urbano, Gonnet, City Bell y Ringuelet presentan mejores indicadores educativos y mayor proporción de estudiantes en niveles terciarios y universitarios.

Respecto al nivel educativo alcanzado, el 40% de la población mayor a tres años ha completado algún nivel educativo. Dentro de este grupo, un 8% posee estudios universitarios completos y un 4% estudios terciarios finalizados. La distribución espacial de estos niveles evidencia una concentración en las áreas con mejores condiciones socioeconómicas.

Un indicador clave es el promedio de años de escolaridad, donde La Plata alcanza los 8,9 años, superando el promedio provincial (7,5 años). Sin embargo, nuevamente se observan contrastes internos: el Casco Urbano alcanza 11,2 años promedio, mientras que zonas como El Peligro y Melchor Romero no superan los 6 años, lo que indica dificultades en la finalización del nivel primario.

La cobertura de salud constituye un indicador fundamental de la calidad de vida de la población. En este sentido, el partido de La Plata presenta una situación favorable en comparación con el promedio provincial.

El 63% de la población cuenta con algún tipo de cobertura médica (obra social, plan privado o mutual), superando el 51% registrado a nivel provincial. Este valor también resulta superior al de otras regiones, como el Gran Buenos Aires.

Sin embargo, al igual que en el ámbito educativo, se evidencian desigualdades territoriales. Los centros comunales con mayor cobertura coinciden con aquellos de mayor nivel educativo, tales como el Casco Urbano (80%), Gonnet, City Bell y Ringuelet. En contraste, las zonas con menor cobertura —como El Peligro (23%), Melchor Romero (32%) y Lisandro Olmos— presentan condiciones socioeconómicas más vulnerables.

Mercado laboral

La población económicamente activa (PEA) del partido de La Plata representaba en 2001 el 58% de la población mayor de 14 años, valor similar al promedio provincial. No obstante, la composición interna muestra un mejor desempeño relativo, dado que el 77% de la PEA se encontraba ocupada, frente al 67% en la provincia.

En términos de ocupación total, el 45% de la población mayor de 14 años se encontraba empleada, superando tanto el promedio provincial (39%) como el de otras regiones urbanas. Esto indica una mayor capacidad de absorción laboral del mercado local.

Por otra parte, la población inactiva representa el 42% del total. Este porcentaje es superado en algunos centros comunales como el Casco Urbano —debido a la concentración de estudiantes y población envejecida—, así como en Melchor Romero y Lisandro Olmos.

En relación con la estructura ocupacional, se observa una particularidad distintiva del partido: una fuerte presencia del empleo público, que alcanza niveles similares al empleo privado. Esta situación se explica por el rol de La Plata como capital administrativa de la provincia.

Asimismo, el análisis del tamaño de los establecimientos muestra un predominio de unidades productivas pequeñas. El 52% de los ocupados trabaja en establecimientos de hasta cinco personas, proporción que se incrementa en zonas más vulnerables, donde supera el 60%.

En cuanto a los sectores de actividad, los principales generadores de empleo son:

- Educación y salud (19%)
- Comercio, hoteles y restaurantes (18%)
- Administración pública (18%)

Estos tres sectores concentran más de la mitad del empleo total del partido, lo que evidencia una estructura productiva fuertemente orientada a servicios.

Durante el período 2001–2006, el empleo en el aglomerado Gran La Plata experimentó un crecimiento del 13,5%, alcanzando su nivel máximo en 2006. Si bien este incremento fue inferior al registrado a nivel provincial, se mantuvo una tendencia positiva sostenida.

Los principales impulsores de este crecimiento fueron:

- Administración pública: incremento del 25%
- Comercio y actividades afines: incremento del 18%

En cuanto a la desocupación, se observa una tendencia decreciente entre 2003 y 2006, en línea con el comportamiento nacional. No obstante, los niveles de desempleo en el Gran La Plata se mantienen por encima del promedio de otros aglomerados urbanos, lo que indica la persistencia de ciertas limitaciones estructurales en el mercado laboral.

Infraestructura

La ciudad de La Plata se destaca por su ubicación estratégica dentro de la región del Gran Buenos Aires y su proximidad directa al Río de la Plata, lo que la posiciona como un nodo logístico clave para actividades industriales y comerciales. En particular, el área de influencia del Puerto La Plata presenta una infraestructura de transporte consolidada que favorece tanto el ingreso de materias primas como la salida de productos terminados.

La red vial vinculada al proyecto se caracteriza por su alta conectividad con los principales corredores productivos del país. Tal como se observa en la Figura 3.6, las principales vías de

acceso permiten una articulación eficiente entre el puerto, el área metropolitana y el interior del país.

- Autopista Buenos Aires – La Plata: constituye el principal eje de conexión con la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, facilitando el transporte de cargas y pasajeros. Es fundamental para la logística portuaria y el acceso rápido a centros de consumo.
- Autopista Presidente Perón: actúa como vía de circunvalación, permitiendo desviar el tránsito pesado y mejorar la conexión entre distintos corredores sin necesidad de ingresar a zonas urbanas congestionadas.
- Rutas Provinciales y accesos secundarios: complementan la conectividad, permitiendo la vinculación con zonas productivas locales y regionales.

Gracias a esta infraestructura, el área presenta condiciones favorables para el desarrollo de actividades industriales, con acceso directo a puertos, centros urbanos y redes logísticas de gran escala.

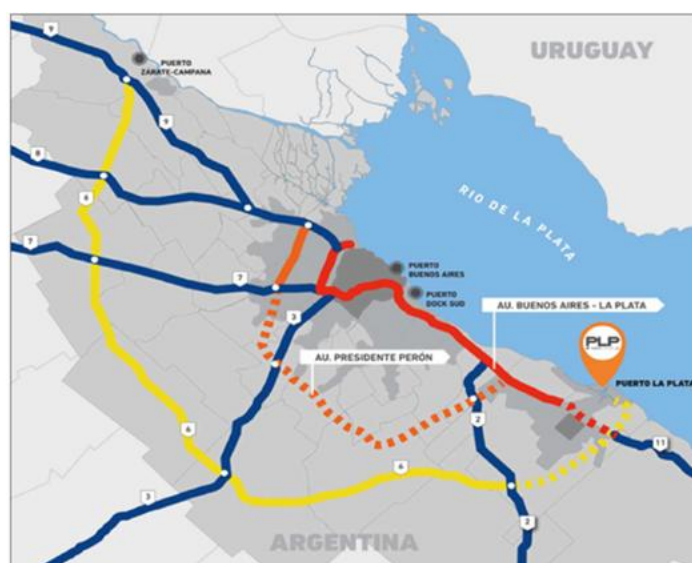


Fig. 8.9 Red vial de La Plata

Fuente: (Puerto La Plata, 2024)

Red ferroviaria

El sistema ferroviario constituye un complemento estratégico para el transporte de cargas, especialmente en operaciones vinculadas al comercio exterior y al movimiento de grandes volúmenes.

La región de La Plata se encuentra integrada a la red ferroviaria nacional mediante ramales que conectan directamente con el sistema portuario, permitiendo el transporte eficiente de insumos industriales, combustibles y productos a granel.

En particular, la conexión ferroviaria con el Puerto La Plata posibilita la reducción de costos logísticos y mejora la competitividad del sistema productivo, al ofrecer una alternativa al transporte carretero.

La coexistencia de infraestructura vial y ferroviaria, sumada a la cercanía con el puerto, configura un sistema logístico integrado que resulta altamente favorable para la localización de proyectos industriales.

Red eléctrica

El suministro de energía en la región de La Plata, Ensenada y su zona industrial está a cargo de la empresa EDELAP (Empresa Distribuidora de Energía La Plata S.A.), la cual gestiona una red de alta, media y baja tensión vinculada al Sistema Argentino de Interconexión (SADI).

En el área industrial y el Polo Petroquímico se garantiza:

- Acceso a energía eléctrica trifásica en media tensión (13.2 kV), con capacidad para alimentar plantas de procesamiento químico, refinerías y maquinaria pesada.
- Proximidad a Subestaciones de Transformación (como la SE Puerto y SE Ensenada), que aseguran la estabilidad de la carga y permiten el escalonamiento de potencia según los requerimientos de grandes consumidores.
- Infraestructura de alta confiabilidad, que incluye líneas aéreas reforzadas y tramos de cableado subterráneo en áreas críticas para minimizar interrupciones por factores climáticos.

Red de gas

La provisión de gas natural en el nodo industrial La Plata-Ensenada está asegurada por la distribuidora Camuzzi Gas Pampeana. Esta zona es estratégica debido a su cercanía con importantes puntos de recepción del sistema de transporte nacional (TGS).

- Disponibilidad de suministro en Alta Presión (AP) y Media Presión (MP), diseñada específicamente para satisfacer la demanda de procesos térmicos de gran escala, como los utilizados en la destilería de YPF y plantas adyacentes.
- Conexión directa con estaciones de regulación de presión (City Gates), lo que garantiza caudales constantes y seguros bajo las normativas vigentes del Enargas.
- Infraestructura de ramales industriales dedicada, que facilita la expansión de conexiones para nuevas plantas o pymes dentro del sector industrial planificado de la región.

La robustez de esta infraestructura energética en el eje La Plata-Ensenada es un pilar fundamental para la competitividad industrial, permitiendo el uso de gas natural como insumo

energético eficiente, reduciendo la huella de carbono en comparación con el uso de combustibles líquidos pesados.

8.4 Evaluación de Impacto Ambiental

La Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) constituye una herramienta fundamental para identificar, prevenir y mitigar los efectos negativos que un proyecto industrial puede generar sobre el entorno. En el caso del presente proyecto, correspondiente a la instalación de una planta de producción de estireno en el área de influencia del Puerto La Plata, resulta indispensable analizar las interacciones entre las actividades productivas y el medio ambiente, considerando las características propias de la región.

8.4.1 Problemática ambiental asociada al proyecto

El proyecto contempla la instalación de una planta de producción de estireno mediante la deshidrogenación catalítica de etilbenceno, localizada en una zona estratégica vinculada al sistema portuario e industrial de La Plata. Esta localización presenta ventajas en términos de infraestructura, logística y disponibilidad de servicios, además de situarse en un entorno con tradición industrial, lo cual favorece su viabilidad operativa y social.

No obstante, el proceso productivo involucra el manejo de sustancias inflamables y potencialmente contaminantes, así como el uso intensivo de energía y recursos hídricos, lo que implica la generación de impactos ambientales que deben ser gestionados adecuadamente.

Efluentes gaseosos

Las principales emisiones atmosféricas se originan en la unidad de reacción de deshidrogenación, donde el etilbenceno es transformado en estireno a elevadas temperaturas. Durante este proceso pueden generarse:

- Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs)
- Óxidos de nitrógeno (NO_x)
- Monóxido de carbono (CO)
- Dióxido de carbono (CO₂)

Para minimizar estos impactos, se prevé la implementación de sistemas de control de emisiones, tales como:

- Lavadores de gases (scrubbers)
- Sistemas de oxidación catalítica o térmica
- Monitoreo continuo de emisiones

Estas tecnologías permitirán reducir la carga contaminante antes de su liberación a la atmósfera, cumpliendo con la normativa ambiental vigente.

Efluentes líquidos

Los efluentes líquidos se generarán principalmente a partir de:

- Limpieza de equipos
- Purgas de sistemas de enfriamiento
- Operaciones auxiliares
- Eventuales derrames

Estos efluentes pueden contener hidrocarburos, solventes, aceites, grasas y trazas de catalizadores.

Se prevé un sistema integral de gestión que incluye:

- Recolección en sistemas de contención primaria
- Tratamiento mediante procesos físico-químicos (separación, neutralización, decantación)
- Posible derivación a operadores habilitados para tratamiento externo

El objetivo es garantizar que los vertidos cumplan con los estándares regulatorios antes de su disposición final.

Residuos sólidos

Los residuos sólidos generados incluyen:

- Catalizadores agotados
- Materiales contaminados (absorbentes, trapos, filtros)
- Residuos de mantenimiento
- Residuos asimilables a urbanos

La gestión de estos residuos se realizará mediante:

- Clasificación en origen
- Almacenamiento seguro
- Transporte y disposición final a través de operadores autorizados

Se priorizarán prácticas de minimización, reutilización y reciclaje cuando sea técnicamente viable.

8.4.2 Actividades del proyecto en sus distintas fases

La evaluación ambiental se estructura considerando las tres etapas principales del ciclo de vida del proyecto:

a. Fase de construcción

Durante esta etapa se desarrollarán las siguientes actividades:

- Movimiento de suelos, nivelación y acondicionamiento del terreno
- Construcción de fundaciones, estructuras metálicas y tanques de almacenamiento
- Instalación de equipos de proceso, cañerías y sistemas de control
- Desarrollo de infraestructura auxiliar (accesos, servicios, drenajes)
- Gestión de residuos de obra

Los impactos asociados incluyen emisiones de polvo, ruido, generación de residuos y alteración temporal del suelo.

b. Fase de operación

Corresponde a la etapa de funcionamiento de la planta e incluye:

- Recepción, almacenamiento y manejo de materias primas
- Proceso de producción de estireno (reacción, separación y purificación)
- Almacenamiento y despacho del producto final
- Tratamiento de efluentes gaseosos y líquidos
- Monitoreo ambiental continuo y control de variables de proceso

En esta fase se concentran los principales impactos ambientales, por lo que se implementarán sistemas de control, mitigación y monitoreo permanente.

c. Fase de cierre o abandono

Al finalizar la vida útil del proyecto se contemplan las siguientes acciones:

- Limpieza y descontaminación de equipos e instalaciones
- Gestión y disposición final de residuos remanentes

- Desmantelamiento de estructuras
- Restauración del sitio

El objetivo es minimizar los impactos residuales y garantizar condiciones ambientales adecuadas para futuros usos del terreno.

8.4.3 Metodología para la identificación y valoración de impactos ambientales

Para la evaluación de los impactos ambientales del proyecto, se implementó una metodología estructurada que comenzó con la identificación de los factores ambientales potencialmente afectados por las distintas actividades más relevantes del proyecto. Esta etapa inicial nos permitió establecer una base clara de los elementos del entorno que podrían experimentar cambios significativos. Los factores y subfactores contemplados por medios son:

| Medio | Factor | Subfactor |
|-----------------------------|------------------------|-----------------------|
| Medio Físico | Aire | Calidad fisicoquímica |
| | | Nivel de PM |
| | | Nivel sonoro |
| | Agua | Agua superficial |
| | | Agua subterránea |
| | Suelo | Calidad fisicoquímica |
| Medio Biótico | Fauna | Autóctona |
| | Flora | Introducida |
| Medio Socioeconómico | Sociedad | Educación |
| | | Calidad de vida |
| | Infraestructura | Redes eléctricas |
| | | Redes de Gas |
| | | Redes viales |
| | Economía | Nivel de empleo |
| Regional | | |

Tabla 8.3 Factores y subfactores por medio

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, se procedió a vincular las acciones del proyecto con los factores identificados, a través de la construcción de una matriz de identificación de impactos, lo que permitió detectar de forma sistemática los impactos ambientales que podrían generarse a lo largo del ciclo de vida del proyecto, en los casos donde un subfactor no se ve afectado por una acción determinada del proyecto corresponderá poner N.C. (No Corresponde) en la matriz. Una vez identificados estos impactos, se avanzó con su valoración cualitativa, utilizando una matriz de Leopold adaptada, la cual permite evaluar cada impacto según criterios preestablecidos, sean estos positivos o negativos, basados en su magnitud, importancia, extensión, duración, entre otros, durante las fases de construcción, operación y cierre de un proyecto.

INTENSIDAD

Se refiere al grado de destrucción o de mejora que el impacto genera sobre el entorno, pudiendo ser esta:

- Baja
- Media
- Alta
- Muy Alta

EXTENSIÓN

Se refiere al área de influencia del impacto ambiental en relación con el entorno del proyecto.

- Puntual: el impacto se encuentra en el sitio de las operaciones.
- Parcial: el impacto se encuentra dentro del área de influencia directa de las operaciones.
- Extenso: el área de influencia del impacto no rebasa los límites del área de influencia de las operaciones.
- Total: el impacto ocurrido se extiende por toda el área de influencia de la operación.

MOMENTO

Se refiere al plazo de manifestación o tiempo que demora el impacto en afectar al entorno.

- Inmediato: el entorno se ve afectado inmediatamente con la acción
- Medio plazo: se evidencian efectos pasado el tiempo de haber generado la acción
- Largo plazo: se presentan los efectos en entorno mucho tiempo después de haber generado la acción.

PERSISTENCIA

Representa la permanencia del efecto ocasionado por el impacto.

- Fugaz: el periodo de recuperabilidad toma menos de un año.
- Temporal: cuando el periodo de recuperabilidad se encuentra entre un año y tres años

- Permanente: se considera así cuando al entorno le toma entre tres y doce años restituir la situación inicial.

| INDICADORES | | | | | | |
|-------------|---------------------|------------|--|----------|--------------------------------|---------|
| NATURALEZA | | INTENSIDAD | | | EXTENSIÓN (Área de Influencia) | |
| | Impacto Beneficioso | Baja | | Baja | Pu | Puntual |
| | Impacto Perjudicial | Media | | Media | Pa | Parcial |
| | | Alta | | Alta | E | Extenso |
| | | Muy Alta | | Muy Alta | To | Total |

| MOMENTO (Plazo de Manifestación) | | PERSISTENCIA (Permanencia del Efecto) | |
|----------------------------------|-------------|---------------------------------------|------------|
| LP | Largo Plazo | F | Fugaz |
| MP | Medio Plazo | Te | Temporal |
| I | Inmediato | Pe | Permanente |

Tabla 8.4 Criterios e indicadores

Fuente: Elaboración propia

8.4.3.1 Matriz de identificación de los impactos generados

| Acciones | Factores | Subfactores | Construcción | | | | |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------|---|----------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| | | | Movimiento de suelos | Construcción e instalación | Montaje de Equipos | Gestión de Obra | |
| Factores | | | A1 | A2 | A3 | A4 | |
| Medio Físico | Aire | Calidad Físicoquímica | F1 | Emisión de polvo y material particulado | N.C | Emisiones menores por maquinaria | N.C |
| | | Nivel de PM | F2 | Generación de polvo | N.C | N.C | N.C |
| | | Nivel Sonoro | F3 | Aumento de ruido por maquinaria | Aumento de ruido | Aumento de ruido | N.C |
| | Agua | Superficial | F4 | N.C | N.C | N.C | Posible contaminación por escorrentía |
| | | Subterránea | F5 | Reducción de infiltración | Impermeabilización parcial | N.C | Posible contaminación por derrames |
| Suelo | Calidad Físicoquímica | F6 | Alteración por compactación | Alteración del terreno | N.C | Posible contaminación por residuos | |
| Medio Biótico | Flora | Introducida | F7 | Remoción de cobertura vegetal | N.C | N.C | N.C |
| | Fauna | Autóctona | F8 | Alteración de hábitat | Desplazamiento de fauna | N.C | N.C |
| Medio Socioeconómico | Sociedad | Calidad de vida | F9 | Molestias por ruido y polvo | Molestias por tránsito | Molestias por Ruido | Molestias por residuos |
| | Infraestructura | Redes Viales | F10 | Aumento del tránsito pesado | Aumento del tránsito | Aumento del tránsito | N.C |
| | Economía | Nivel de Empleo | F11 | Generación de empleo temporal | Empleo en construcción | Empleo técnico | Empleo indirecto |
| Medio porcentual | Paisaje | Visual | F12 | Alteración temporal del paisaje | Presencia de estructuras | Impacto visual | N.C |

| Acciones | Factores | Subfactores | | Construcción | | | |
|----------------------|-----------------|-----------------------|------------------|------------------------------|---|------------------------------|---------------------------|
| | | | | Recepción MP | Producción (reacción) | Tratamiento efluentes | Almacenamiento y despacho |
| | | | | A5 | A6 | A7 | A8 |
| Medio Físico | Aire | Calidad Físicoquímica | F1 | N.C | Emisión de COVs, NOx, CO, CO ₂ | N.C | Emisiones fugitivas |
| | | Nivel de PM | F2 | N.C | N.C | N.C | N.C |
| | | Nivel Sonoro | F3 | Ruido operativo | Ruido de equipos | Ruido de planta | Ruido por logística |
| | Agua | Superficial | F4 | Posibles derrames | Contaminación por purgas | Posible falla en tratamiento | Riesgo por derrames |
| | | Subterránea | F5 | Filtraciones accidentales | Pérdidas en equipos | Efluentes mal tratados | Contaminación por fugas |
| | Suelo | Calidad Físicoquímica | F6 | Derrames accidentales | Contaminación por hidrocarburos | Residuos mal gestionados | Fugas de almacenamiento |
| Medio Biótico | Flora | Introducida | F7 | N.C | Posible afectación por emisiones | Posible afectación | N.C |
| | Fauna | Autóctona | F8 | Alteración menor | Afectación por emisiones | Afectación por efluentes | N.C |
| Medio Socioeconómico | Sociedad | Calidad de vida | F9 | Riesgo bajo | Riesgo por exposición a contaminantes | Riesgo controlado | Riesgo por accidentes |
| | Infraestructura | Energía | F10 | Alto consumo energético | Alto consumo energético | Consumo energético | N.C |
| | | Gas | F11 | Consumo de gas de proceso | Alto consumo en reacción | N.C | N.C |
| | | Vial | F12 | Aumento del tránsito | N.C | N.C | Aumento de tránsito |
| Economía | Nivel de Empleo | F13 | Empleo operativo | Empleo técnico especializado | Empleo en gestión ambiental | Empleo logístico | |
| Medio porcentual | Paisaje | Visual | F14 | N.C | Impacto por estructuras industriales | N.C | N.C |

| Acciones | Factores | Subfactores | | Construcción | | |
|----------------------|-----------------|-----------------------|-----|---|--|--|
| | | | | Limpeza y descontaminación de equipos y tanques | Disposición de residuos remanentes | Desmantelamiento y restauración del sitio |
| | | | | A9 | A10 | A11 |
| Medio Físico | Aire | Calidad Físicoquímica | F1 | N.C | Posible emisión de gases sin manejo adecuado | N.C |
| | | Nivel de PM | F2 | N.C | N.C | Emisión de polvo por demolición |
| | | Nivel Sonoro | F3 | N.C | N.C | Incremento de decibels por maquinaria |
| | Agua | Superficial | F4 | Posible contaminación por lavado de equipos | Posible contaminación sin disposición incorrecta | N.C. |
| | | Subterránea | F5 | Posible infiltración de contaminantes | Posible contaminación por mala disposición | N.C |
| | Suelo | Calidad Físicoquímica | F6 | Posible contaminación por derrames | Contaminación sin disposición adecuada | N.C |
| Medio Biótico | Flora | Introducida | F7 | N.C | Posible afectación indirecta | Mejora por restauración del sitio |
| | Fauna | Autóctona | F8 | N.C | Posible afectación por residuos | Mejora progresiva del hábitat |
| Medio Socioeconómico | Sociedad | Educación | F9 | N.C | N.C | N.C |
| | | Calidad de Vida | F10 | N.C | Posible afectación si hay mala gestión | Mejora por eliminación de actividad industrial |
| | Infraestructura | Redes eléctricas | F11 | Consumo para tareas de limpieza | N.C | Disminución del consumo |
| | | Redes de gas | F12 | N.C | N.C | Disminución del consumo |
| | | Redes viales | F13 | Tránsito de maquinaria liviana | Tránsito por retiro de residuos | Tránsito por desmontaje |
| | Economía | Nivel de Empleo | F14 | Empleo temporal (limpieza técnica) | Empleo en gestión de residuos | Reducción del empleo permanente |
| Medio porcentual | Paisaje | Regional | F15 | Impacto positivo temporal | Impacto menor | Disminución de actividad económica |
| | | Visual | F16 | N.C | N.C | Mejora visual por eliminación de instalaciones |

Tabla 8.5 Matriz de identificación de impactos

Fuente: Elaboración propia

8.4.3.2 Matriz de valoración de los impactos generados

| Acciones | Factores | Subfactores | Construcción | | | | | | | | | | | |
|----------------------|-----------------|-----------------------|----------------------|----------------------------|--------------------|-----------------|--------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|--|------------------------------------|---|----------|
| | | | Movimiento de suelos | Construcción e instalación | Montaje de Equipos | Gestión de Obra | Recepción MP | Producción (reacción) | Tratamiento efluentes | Almacenamiento y despacho | Limpieza y descontaminación de equipos y tanques | Disposición de residuos remanentes | Desmantelamiento y restauración del sitio | |
| | | | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 | A7 | A8 | A9 | A10 | A11 | |
| Medio Físico | Aire | Calidad Físicoquímica | F1 | Pu-I-F | Pu-I-F | Pu-I-F | | Pa-MP-Pe | Pa-MP-Pe | | | | Pa-MP-Pe | |
| | | Nivel de PM | F2 | Pa-I-F | | | | | | | | | | Pa-I-F |
| | | Nivel Sonoro | F3 | Pa-I-F | Pa-I-F | Pa-I-F | | Pu-I-Pe | Pu-I-Pe | Pu-I-Pe | | | | Pa-I-F |
| | Agua | Superficial | F4 | | | | | Pa-MP-Pe | Pa-MP-Pe | E-MP-Pe | E-MP-Pe | Pa-MP-Pe | Pa-MP-Pe | |
| | | Subterránea | F5 | Pu-I-Pe | Pu-I-Pe | | | Pa-MP-Pe | Pa-MP-Pe | E-MP-Pe | E-MP-Pe | E-MP-Pe | E-MP-Pe | |
| | Suelo | Calidad Físicoquímica | F6 | Pu-I-Pe | Pu-I-Pe | | Pu-I-Te | Pu-I-Te | Pu-I-Te | E-I-Pe | Pu-I-Te | | Pu-MP-Pe | Pu-I-Pe |
| Medio Biótico | Flora | Introducida | F7 | Pu-I-Pe | | | | | | E-MP-Pe | | | | Pu-MP-Pe |
| | Fauna | Autóctona | F8 | Pu-I-Pe | Pu-MP-Pe | | | Pu-I-Pe | Pu-I-Pe | E-MP-Pe | | | Pu-MP-Pe | Pu-MP-Pe |
| Medio Socioeconómico | Sociedad | Educación | F9 | To-I-Pe | | | | To-I-Pe | To-I-Pe | To-I-Pe | To-I-Pe | | | |
| | | Calidad de vida | F10 | Pa-I-Te | Pa-I-Te | Pa-I-Pe | Pa-I-Pe | Pa-I-Pe | Pa-I-Pe | Pa-MP-Pe | Pu-I-Pe | | Pa-MP-Pe | Pa-I-Pe |
| | Infraestructura | Redes Eléctricas | F11 | | Pu-I-F | | | Pu-I-Pe | Pu-I-Pe | Pu-I-Pe | | Pu-I-Pe | | Pu-I-Pe |
| | | Redes de Gas | F12 | | | | | Pu-I-Pe | Pu-I-Pe | | | | | Pu-I-Pe |
| Medio porcentual | Economía | Redes Viales | F13 | E-I-Te | Pa-I-F | E-I-Te | | E-I-Pe | E-I-Pe | | | | | E-I-Pe |
| | | Nivel de Empleo | F14 | To-I-Te | To-I-Te | To-I-Te | To-I-Te | To-I-Pe | To-I-Pe | To-I-Pe | To-I-Pe | To-I-Te | To-I-Te | To-I-Te |
| | | Regional | F15 | To-I-Pe | To-I-Pe | To-I-Pe | | To-I-Pe | To-I-Pe | To-I-Pe | To-I-Pe | To-I-Pe | To-I-Pe | To-I-Pe |
| Paisaje | Visual | F16 | | Pa-I-Pe | | | Pa-I-Pe | | | | | | Pu-I-Pe | |

Tabla 8.6 Matriz de valoración

Fuente: Elaboración propia

8.4.3.3 Medidas de prevención y mitigación

| Impacto | | Actividad y Subfactor | Medida Propuesta |
|----------------|---|---|---|
| A6, F1 | Contaminación por emisión de COVs y gases | Producción, separación y almacenamiento de productos – Calidad del aire | Producción, separación y almacenamiento de productos – Calidad del aire |
| A1, F2 | Generación de material particulado | Movimiento de suelos – Nivel de PM | Humectar caminos, cubrir camiones y limitar velocidades para reducir dispersión de polvo |
| A11, F2 | Emisión de polvo por desmantelamiento | Demolición de estructuras – Nivel de PM | Aplicar riego periódico, barreras físicas y gestión controlada de residuos de demolición. |
| A1–A3, F3 | Incremento del nivel sonoro | Construcción – Nivel sonoro | Uso de silenciadores, mantenimiento de maquinaria y restricción horaria de actividades. |
| A5, F4 | Posible contaminación por derrames | Recepción y almacenamiento – Agua superficial | Construcción de diques de contención, drenajes cerrados y sistemas de retención de hidrocarburos. |
| A7, F4 | Contaminación por efluentes industriales | Tratamiento de efluentes – Agua superficial | Implementar planta de tratamiento con control de pH, DQO, hidrocarburos y monitoreo continuo antes del vertido. |
| A5–A6, F5 | Contaminación por infiltración | Manejo de sustancias – Agua subterránea | Impermeabilización de suelos con geomembranas y monitoreo de napas mediante pozos piezométricos. |
| A9–A10, F4/F5 | Contaminación en fase de cierre | Limpieza y disposición de residuos | Gestión mediante operadores habilitados y control de vertidos accidentales. |
| A1–A2, F6 | Alteración del suelo por compactación | Alteración del suelo por compactación | Planificación de obras, minimización de áreas intervenidas y restauración posterior. |
| A6, F6 | Contaminación por pérdidas de productos | Operación – Suelo | Uso de pisos impermeables, bandejas de contención y sistemas de detección de fugas. |
| A7, F6 | Contaminación por efluentes mal tratados | Tratamiento de efluentes – Suelo | Control estricto del sistema de tratamiento y mantenimiento preventivo. |
| A11, F6 | Alteración por desmantelamiento | Cierre – Suelo | Remediación del suelo y restauración del terreno a condiciones originales. |
| A1, F7 | Pérdida de vegetación | Construcción – Flora | Minimizar desmonte, reforestación compensatoria con especies nativas. |
| A1–A2, F8 | Desplazamiento de fauna | Construcción – Fauna | Construcción – Fauna |
| A7, F8 | Afectación por efluentes | Operación – Fauna | Barreras de protección y control de calidad de efluentes. |
| A11, F7–F8 | Recuperación del ecosistema | Cierre – Flora y fauna | Restauración ecológica del sitio y monitoreo de recuperación biológica. |
| A1–A3, F10 | Molestias por ruido y tránsito | Construcción – Calidad de vida | Plan de gestión de tránsito, comunicación con la comunidad y control de horarios. |
| A5–A6, F10 | Riesgo por fugas | Operación – Calidad de vida | Sistemas de detección temprana, planes de emergencia y capacitación del personal. |
| A7, F10 | Impacto por efluentes | Operación – Calidad de vida | Monitoreo ambiental continuo y difusión de resultados a la comunidad. |
| A5–A7, F13 | Aumento del tráfico | Logística – Redes viales | Planificación de rutas, señalización y coordinación logística. |
| A2–A6, F11–F12 | Mayor demanda energética | Operación – Redes eléctricas y gas | Optimización energética, uso eficiente de recursos y mantenimiento de redes. |
| A1–A11, F14 | Generación de empleo | Todas las fases – Nivel de empleo | Priorizar contratación local y capacitación técnica. |
| A5–A7, F15 | Impacto económico regional | Operación – Economía | Desarrollo de proveedores locales y fortalecimiento de la cadena logística. |
| A2–A6, F16 | Impacto visual de infraestructura | Construcción/Operación – Paisaje | Diseño integrado al entorno, barreras visuales y ordenamiento del predio. |
| A11, F16 | Mejora del paisaje | Cierre – Paisaje | Restauración del sitio y eliminación de estructuras industriales. |

Tabla 8.7 Medidas de prevención y mitigación

Fuente: Elaboración propia

8.4.4 Selección de equipos para el tratamiento de efluentes

En función de los impactos ambientales identificados previamente y de las características del proceso productivo, se seleccionaron los principales equipos destinados al tratamiento de efluentes gaseosos y líquidos, así como a la prevención de contingencias operativas. La elección de los mismos responde a criterios de eficiencia, viabilidad técnica y adecuación a la normativa ambiental vigente.

8.4.4.1 Lavador de gases (scrubber)

El lavador de gases, específicamente del tipo húmedo en torre de lavado, constituye una de las principales unidades de tratamiento de efluentes gaseosos.

Su función es la remoción de contaminantes presentes en las corrientes gaseosas generadas en el proceso, particularmente compuestos orgánicos volátiles (COVs), gases ácidos y material particulado fino. El principio de operación se basa en el contacto íntimo entre el gas contaminado y un líquido absorbente, permitiendo la transferencia de masa y la captura de los contaminantes.

Este equipo se encuentra directamente vinculado con las emisiones provenientes de los reactores y sistemas de calentamiento, siendo una medida fundamental para la mitigación del impacto atmosférico del proyecto.

8.4.4.2 Oxidador térmico o catalítico

Como etapa complementaria al tratamiento de gases, se considera la incorporación de un sistema de oxidación térmica o catalítica, con el objetivo de lograr una depuración más eficiente de los efluentes gaseosos.

Su función principal es la oxidación de los compuestos orgánicos volátiles, transformándolos en dióxido de carbono (CO_2) y vapor de agua (H_2O). Entre las alternativas tecnológicas disponibles, se destacan los oxidadores térmicos regenerativos (RTO) y los oxidadores catalíticos.

La inclusión de este equipo permite alcanzar eficiencias de remoción superiores al 95%, lo que resulta clave para asegurar el cumplimiento de los estándares ambientales y reforzar la sustentabilidad del proyecto.

8.4.4.3 Planta de tratamiento físico-químico de efluentes líquidos

Para el tratamiento de los efluentes líquidos generados en la planta, se propone la implementación de un sistema de tratamiento físico-químico.

Este sistema estará compuesto por distintas unidades operativas, entre las que se incluyen: tanque de igualación, separador de hidrocarburos tipo API, sistema de coagulación-floculación y un sedimentador.

La función global de esta planta es la remoción de contaminantes presentes en los efluentes, tales como aceites, grasas, sólidos suspendidos y compuestos orgánicos. Estos efluentes provienen principalmente de operaciones de limpieza de equipos, purgas de sistemas y eventuales derrames.

Su implementación resulta esencial para evitar la contaminación de cuerpos de agua y garantizar una adecuada gestión de los residuos líquidos generados en el proceso.

8.4.4.4 Sistema de contención y recuperación de derrames

Como medida preventiva y de mitigación ante posibles contingencias, se incorpora un sistema de contención y recuperación de derrames.

Este sistema estará conformado por diques de contención, tanques de almacenamiento de emergencia y un sistema de drenaje controlado. Su objetivo es evitar la dispersión de sustancias peligrosas hacia el suelo o cuerpos de agua superficiales y subterráneos.

La correcta implementación de este sistema permite reducir significativamente el riesgo ambiental asociado al manejo de materias primas y productos, contribuyendo a una operación más segura y controlada.

8.4.5 Conclusión

El desarrollo del presente capítulo permitió analizar de manera integral los principales aspectos ambientales asociados al proyecto, identificando las interacciones más relevantes entre las actividades del proceso productivo y el entorno. A partir de la caracterización de las distintas etapas —construcción, operación y cierre— se logró reconocer los potenciales impactos sobre los componentes ambientales, tales como aire, agua y suelo, así como también sobre la seguridad operativa.

En este sentido, se evidenció que los impactos de mayor significancia se encuentran vinculados principalmente a la fase de operación, debido a la generación de efluentes gaseosos con presencia de compuestos orgánicos volátiles, la producción de efluentes líquidos con contenido de hidrocarburos y la generación de residuos sólidos industriales. Asimismo, se identificaron riesgos asociados a eventuales derrames y al manejo de sustancias peligrosas, los cuales requieren especial atención en términos de prevención y control.

No obstante, mediante la aplicación de herramientas como la matriz de identificación y valoración de impactos, junto con la definición de medidas de prevención y mitigación, se concluye que los efectos negativos pueden ser adecuadamente gestionados. La incorporación de tecnologías específicas para el tratamiento de efluentes, tales como sistemas de lavado de gases, oxidación térmica o catalítica, tratamiento físico-químico de líquidos y sistemas de contención de derrames, permite reducir significativamente la magnitud y extensión de los impactos identificados.

En consecuencia, el proyecto resulta ambientalmente viable, siempre que se garantice la correcta implementación, operación y monitoreo de las medidas propuestas, así como el cumplimiento de la normativa ambiental vigente. De esta manera, se asegura un equilibrio entre el desarrollo industrial y la protección del ambiente, promoviendo un enfoque de producción más sustentable.

CAPÍTULO IX: ASPECTOS JURÍDICOS

9.1 Introducción

Este capítulo desarrolla los aspectos jurídicos, regulatorios e institucionales aplicables a la implantación y operación de la planta de óxido de propileno (OP) mediante tecnología HPPO, localizada en el Polo Petroquímico Ensenada–La Plata (Provincia de Buenos Aires). Se integra con la selección de localización, proceso y tamaño definidos en el Proyecto Final.

La planta se emplaza en Ensenada sobre un lote industrial de aproximadamente 8 ha, con zonificación industrial compatible, a 4 km del Complejo Industrial La Plata (YPF), y con acceso logístico al Puerto La Plata para el abastecimiento de H_2O_2 y despacho de producto. Estas premisas surgen del Capítulo de Localización del Proyecto Final y fundamentan la aplicabilidad del marco regulatorio bonaerense y municipal correspondiente.

El objetivo es doble:

- (i) identificar las normas de presupuestos mínimos y jurisdiccionales (nación–provincia–municipio) que gobiernan el emprendimiento;
- (ii) definir el camino de tramitación, permisos y habilitaciones necesarios para alcanzar la condición operativa ("en cumplimiento") con criterios de seguridad jurídica y ambiental.

9.2 Marco legal

9.2.1 Legislación nacional

Aspectos medioambientales

Conforme al artículo 41 de la Constitución Nacional y la Ley General del Ambiente N.º 25.675, toda actividad con potencial impacto debe someterse a evaluación de impacto ambiental, prevención y recomposición; además, rigen regímenes específicos para residuos peligrosos (Ley 24.051 y Dec. 831/93), residuos industriales (Ley 25.612), protección del recurso hídrico (Ley 25.688), y condiciones de higiene y seguridad (Ley 19.587 y Dec. 351/79).

El artículo 41 de la Constitución es la piedra basal. Reconoce a todas las personas el derecho a un ambiente sano y, sobre todo, establece dos obligaciones con efectos directos sobre las empresas: (i) la prevención de daños (las autoridades deben proteger, conservar y usar racionalmente los recursos); y (ii) la recomposición prioritaria del daño ambiental cuando éste se produzca. Además, define el federalismo ambiental: la Nación dicta presupuestos mínimos; las provincias los complementan sin disminuir ese piso de protección. Finalmente, prohíbe el ingreso al país de residuos peligrosos y radiactivos. Para una planta química, esto se traduce en la necesidad de operar con estándares de prevención robustos y planes de recomposición y contingencia que, si bien se implementan según normas específicas, tienen anclaje constitucional.

La Ley General de Ambientes 25.675 fija los presupuestos mínimos de la política ambiental nacional y detalla: objetivos (preservar y mejorar la calidad ambiental; uso racional de recursos; prevención de efectos nocivos; información pública; participación ciudadana; educación; y recomposición), y principios (congruencia, prevención, precautorio, equidad intergeneracional,

progresividad/no regresión, entre otros). Para empresas, lo más operativo es que la LGA enumera instrumentos de política y gestión (p. ej. Evaluación de Impacto Ambiental – EIA, ordenamiento ambiental del territorio, sistemas de información, participación pública, seguro ambiental/fondo de restauración), que luego se aplican en leyes y reglamentos específicos nacionales y provinciales (en tu caso, además, por la normativa de PBA). En síntesis: toda actividad con potencial impacto debe someterse a EIA y garantizar prevención y recomposición, bajo el enfoque precautorio y de acceso a la información. La LGA es el paraguas que justifica el EIA/DIA a nivel provincial, los planes de gestión ambiental (PGA), los monitoreos y el seguro ambiental cuando corresponda; además, da fundamento al principio precautorio.

La Ley 24.051 regula generación, manipulación, transporte, tratamiento y disposición final de residuos peligrosos cuando: (a) se operan en jurisdicción federal; (b) hay tránsito interjurisdiccional (entre provincias o de/ hacia la Nación); o (c) el residuo puede impactar más allá de una jurisdicción local (esto último ocurre con frecuencia en cadenas logísticas). La ley define residuo peligroso (por listas y características del Anexo I y II) y prohíbe la importación de residuos. Exige la inscripción en el Registro Nacional de Generadores y Operadores para generadores, transportistas y tratadores, y la utilización del manifiesto de seguimiento.

El Decreto 831/93 es clave porque reglamenta la ley y aporta los anexos técnicos: glosario, clases de cuerpos receptores, tablas y estándares de calidad para constituyentes peligrosos, identificación de residuos peligrosos, y límites para barros (parámetros físicos y químicos). Es habitual que los usos de estas tablas figuren como “figuras” en informes, porque contienen límites numéricos y categorías.

Ley 25.612 – Gestión Integral de Residuos Industriales y de Actividades de Servicio

Esta ley de presupuestos mínimos se focaliza en los residuos de origen industrial y de servicios (no necesariamente peligrosos, aunque también puede solaparse con 24.051). Establece definiciones (residuo industrial; gestión integral), niveles de riesgo, y un sistema de gestión que abarca generación, manejo, almacenamiento, transporte, tratamiento y disposición final, con obligaciones de registros, manifiestos, requisitos para plantas de tratamiento y transportistas, y responsabilidades civil y administrativa. Para empresas, lo importante es que estructura la gestión integral bajo el enfoque de minimización en origen y trazabilidad; la autoridad de aplicación y detalles operativos se complementan con las jurisdicciones provinciales (en PBA tendrás, además, la Ley 11.720/Dec. 806).

La 25.688 fija los presupuestos mínimos para preservación, aprovechamiento y uso racional de las aguas (superficiales, subterráneas y, en su definición, también “atmosféricas”). Reconoce a la cuenca hídrica como unidad de gestión indivisible y crea Comités de Cuencas para casos interjurisdiccionales. Define “utilización de las aguas” de modo amplio (captación, desvío, vertidos, introducción de sustancias, acciones que alteren propiedades físicas/químicas/biológicas, etc.) y establece que toda utilización requiere permiso de la autoridad competente. En la práctica, la calidad de efluentes y autorización de vuelco se tramitan ante autoridades provinciales (en PBA, ADA – Código de Aguas 12.257), pero la 25.688 funciona como piso y refuerza la obligación de contar con permisos y respetar normas de calidad.

Aspectos de seguridad e higiene

La Ley 19.587 (y su Decreto 351/79) establecen el régimen general de H&S: condiciones constructivas, ventilación, iluminación, ruidos, contaminantes químicos, protecciones, servicios de medicina del trabajo e higiene y seguridad, programas de capacitación, y criterios de administración de la prevención. El Dec. 351/79 aprueba anexos técnicos extensos (hoy actualizados por resoluciones de SRT) y faculta a la Superintendencia de Riesgos del Trabajo (SRT) a dictar normas complementarias. Para empresas con sustancias peligrosas (p. ej., H₂O₂ 70%, metanol, OP, propileno), estas reglas se interrelacionan con clasificación de áreas, protección contra incendios y explosiones, equipos a presión, gestión de cambios y plan de emergencias.

Aspectos laborales

El marco normativo laboral en la República Argentina busca garantizar condiciones de trabajo dignas, la protección de la integridad psicofísica de los trabajadores y la prevención de accidentes y enfermedades profesionales. Para una planta de producción de óxido de propileno, rigen principalmente:

Ley de Contrato de Trabajo (Ley N.º 20.744)

Es el cuerpo normativo básico que regula las relaciones laborales en el sector privado. Establece los derechos y deberes de las partes, modalidades contractuales, régimen de remuneraciones, licencias, y la prohibición de discriminación. En el contexto industrial, destaca el deber de seguridad del empleador (Art. 75), que obliga a adoptar las medidas que según el tipo de trabajo, la experiencia y la técnica sean necesarias para tutelar la integridad del personal.

Ley de Riesgos del Trabajo (Ley N.º 24.557 y complementarias)

Tiene como objetivos principales la prevención de accidentes de trabajo y enfermedades profesionales, así como la reparación de los daños derivados de los mismos.

- Obligaciones de la empresa: La planta debe estar afiliada a una Aseguradora de Riesgos del Trabajo (ART) y cumplir con el Plan de Mejoramiento que esta proponga.
- Exámenes médicos: Obligatoriedad de realizar exámenes preocupacionales, periódicos y de egreso, con especial énfasis en el monitoreo de trabajadores expuestos a agentes químicos como metanol o propileno.

Ley de Asociaciones Sindicales (Ley N.º 23.551)

Regula la organización y el funcionamiento de los sindicatos. Dada la actividad de la planta, los trabajadores se encuentran amparados por el Convenio Colectivo de Trabajo (CCT) correspondiente al sector químico y petroquímico (generalmente el de la Federación de Sindicatos de Trabajadores de Industrias Químicas y Petroquímicas - FESTIQyP), que fija escalas salariales y condiciones de trabajo específicas para la industria.

| Norma nacional | Objetivo | ¿A quién aplica? | Qué pide a la empresa | Instrumentos |
|----------------|---|----------------------------|--|----------------------|
| CN Art. 41 | Derecho a ambiente sano, recomposición, | Toda actividad con impacto | Prevenir y, si hay daño, recomponer; no ingreso de residuos peligrosos/radiactivos | Marco constitucional |

| | | | | |
|--------------------------|--|---|--|---|
| | presupuestos mínimos | | | |
| Ley 25.675 (LGA) | Presupuestos mínimos; principios; EIA; información | Actividades con impacto | EIA/DIA, PGA, monitoreo; seguro ambiental cuando corresponda | EIA, ordenamiento, info pública |
| Ley 24.051 + Dec. 831/93 | Gestión de residuos peligrosos | Generadores, transportistas, operadores | Inscripción en Registro, manifiestos, transporte y destino habilitado | Anexos técnicos (listas, límites, barros) |
| Ley 25.612 | Gestión integral de residuos industriales | Todo generador industrial | Minimización, segregación, registros, manifiestos, tratamiento/disposición | Niveles de riesgo, trazabilidad |
| Ley 25.688 | Presupuestos mínimos agua | Usuarios de agua/vertidos | Permisos de uso/vuelco; respeto de normas de calidad | Enfoque de cuenca; comités |
| Ley 19.587 + Dec. 351/79 | Higiene y Seguridad laboral | Todo establecimiento | Condiciones edilicias, controles de agentes, servicios H&S, capacitación | Anexos técnicos; SRT complementa |
| Ley 20.744 (LCT) | Regular la relación laboral empleador-empleado | Todo empleador privado | Cumplir deber de seguridad, pago de salarios, aportes y contribuciones | Contrato individual, CCT |
| Ley 24.557 (LRT) | Prevenir accidentes y reparar daños laborales | Empleadores y trabajadores | Afiliación a ART, denuncia de accidentes, cumplimiento de planes de prevención | SRT, ART, Listado de enfermedades profesionales |
| Ley 23.551 | Regular la actividad gremial y representación | Sindicatos y empresas | Respetar libertad sindical, encuadramiento convencional y cuotas sindicales | Convenio Colectivo de Trabajo (CCT) |

Tabla 9.1. Síntesis del marco regulatorio nacional

9.2.2 Legislación regional/provincial

La Provincia de Buenos Aires cuenta con un andamiaje jurídico-ambiental robusto que regula la radicación industrial, la evaluación ambiental, la gestión del agua, la manipulación de

residuos especiales y el poder de policía ambiental, estableciendo exigencias precisas para todo establecimiento industrial que pretenda instalarse u operar dentro del territorio provincial.

En primer lugar, la Ley 11.459 de Radicación Industrial, junto con su Decreto Reglamentario 1741/96, establece el régimen que regula la localización, categorización y funcionamiento de establecimientos industriales. Esta norma exige que toda industria realice su categorización en función de su nivel de complejidad ambiental, riesgo, emisiones, volumen de producción y tecnologías involucradas, determinando si corresponde la Categoría 1, 2 o 3. La ley obliga a obtener el Certificado de Aptitud Ambiental (CAA), prerrequisito indispensable para obtener la habilitación municipal. El procedimiento incluye la presentación de documentación técnica, estudios de impacto y cumplimiento de normas sectoriales, y define con claridad las competencias provinciales y municipales, así como las etapas del proceso de evaluación. Este sistema de categorización permite graduar los requisitos de control e inspección, asignando mayor rigurosidad a establecimientos de alto riesgo.

En paralelo, la Ley 11.723, llamada Ley General del Ambiente bonaerense, funciona como el marco ambiental general de la provincia. Establece principios rectores, instrumentos de política ambiental y procedimientos obligatorios, entre ellos la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) y la consecuente Declaración de Impacto Ambiental (DIA), que deben obtener los proyectos capaces de degradar el ambiente. Esta ley incorpora la participación ciudadana, exigiendo instancias de consulta y audiencias públicas cuando corresponda, y organiza el Sistema Provincial Ambiental bajo un modelo descentralizado alineado con las pautas constitucionales. La obtención de la DIA es un requisito previo para la construcción o ampliación de proyectos industriales y se integra luego al trámite del CAA establecido por la Ley 11.459. (PBA, 2026)

En materia hídrica, la Ley 12.257, conocida como Código de Aguas, y su normativa reglamentaria crean la Autoridad del Agua (ADA) como organismo con competencia sobre el uso, manejo y protección del recurso hídrico. El Código regula los permisos de uso de agua, la captación, los vertidos y la fiscalización de los efluentes líquidos industriales, estableciendo la obligatoriedad de contar con Permiso de Vuelco y de cumplir con parámetros de calidad específicos según la naturaleza del efluente y la categoría del cuerpo receptor. La ADA supervisa y controla el cumplimiento técnico, exige monitoreos periódicos y puede imponer sanciones y adecuaciones, operando bajo el principio de uso racional y prevención del daño al recurso. (Ministerio de Salud de la Provincia de Buenos Aires, 2026)

Otro componente central es la Ley 11.720, complementada por el Decreto 806/97, que regula los residuos especiales, categoría que incluye a los residuos peligrosos generados por actividades industriales y de servicios. Este régimen establece obligaciones estrictas para los generadores, operadores y transportistas, incluyendo la inscripción en registros, la utilización de manifiestos, el acondicionamiento seguro, el uso de transportistas habilitados y la disposición final en plantas autorizadas. La autoridad exige trazabilidad completa del residuo desde su generación hasta su tratamiento o disposición final, alineándose con estándares nacionales pero bajo fiscalización provincial directa. (Ministerio de Salud y Desarrollo Social de la Nación., 2026)

Finalmente, la autoridad ambiental provincial es el Ministerio de Ambiente de la Provincia de Buenos Aires, organismo que sucede institucionalmente al Organismo Provincial para el Desarrollo Sostenible (OPDS). Su estructura, aprobada por Decreto 89/2022 y consolidada en la Ley 15.309, le otorga poder de policía ambiental y competencia en la aplicación de la Ley 11.723, en coordinación con ADA, municipios y otros entes sectoriales. Este Ministerio es

responsable de la emisión de la DIA, de los controles ambientales, de la gestión normativa y de los sistemas de monitoreo, fiscalización y sanción ambiental.

| Norma | Objeto central | Exigencias principales | Autoridad competente |
|------------------------------|---|---|--|
| Ley 11.459 y Dec. 1741/96 | Radicación y control de establecimientos industriales | Categorización industrial (1, 2, 3), obtención del CAA, requisito previo a la habilitación municipal; procedimientos ambientales y controles | Ministerio de Ambiente (ex OPDS) + Municipio |
| Ley 11.723 | Marco general de política ambiental provincial | EIA obligatoria y obtención de la DIA para proyectos capaces de degradar el ambiente; participación ciudadana; lineamientos para la gestión ambiental | Ministerio de Ambiente PBA |
| Ley 12.257 (Código de Aguas) | Gestión, uso y preservación de aguas provinciales | Permisos de uso/derivación; Permiso de Vuelco; cumplimiento de parámetros de calidad; monitoreos e inspecciones | ADA – Autoridad del Agua |
| Ley 11.720 y Dec. 806/97 | Gestión de residuos especiales (peligrosos) | Registro de generadores, operadores y transportistas; manifiestos; tratamiento y disposición en plantas autorizadas | Ministerio de Ambiente PBA |
| Decreto 89/2022 y Ley 15.309 | Organización institucional del Ministerio de Ambiente | Poder de policía ambiental; aplicación de Ley 11.723; coordinación provincial-municipal | Ministerio de Ambiente PBA |

Tabla 9.2. Marco regulatorio de la Provincia de Buenos Aires

9.2.3 Legislación municipal

El Municipio de Ensenada posee un rol central en la instancia final de habilitación de establecimientos industriales, ya que es la autoridad que evalúa la compatibilidad urbanística, las condiciones de seguridad e higiene, la documentación técnica del establecimiento y el cumplimiento del Código de Ordenamiento Urbano (COU) actualizado al año 2023. Este código establece delimitaciones de zonas y usos permitidos —industriales, portuarios, logísticos, residenciales y mixtos— y determina qué clases de industrias pueden instalarse en función del impacto ambiental permitido en cada área. De esta manera, aun cuando una

empresa obtenga el Certificado de Aptitud Ambiental (CAA) bajo el régimen de la Ley 11.459, sólo podrá habilitarse si el emplazamiento es urbanísticamente compatible y cumple las normas edilicias, de infraestructura, de accesibilidad y de servicios previstas por el COU local.

El proceso municipal también comprende la Habilitación Comercial e Industrial, que requiere la presentación de documentación técnica y legal complementaria: planos aprobados, instalaciones eléctricas certificadas, plan de protección contra incendios, certificados de seguridad del establecimiento, planos de prevención y evacuación, constancias de cumplimiento de la Ley de Seguridad e Higiene, y acreditación del cumplimiento de normas provinciales específicas como la DIA y el CAA. En la práctica, el municipio controla que la infraestructura del establecimiento —redes de incendio, ventilación, almacenamiento seguro de sustancias químicas y áreas clasificadas— cumpla la normativa vigente, ya sea local, provincial o nacional, antes de emitir la habilitación final.

Además de estas exigencias, Ensenada realiza inspecciones vinculadas a ruidos, vibraciones, tránsito pesado, impacto sobre el entorno inmediato y uso del espacio público, lo que deriva en la necesidad de contar con planes de gestión del tránsito interno, señalización, control de accesos, y medidas para evitar afectaciones a la comunidad. En establecimientos industriales mayores, el municipio puede requerir información sobre planes de emergencia internos, coordinación con defensa civil local, accesibilidad para unidades de respuesta, y compatibilidad con planes regionales de contingencia, especialmente dada la localización portuaria y el historial industrial del distrito.

En algunos casos, también intervienen áreas municipales encargadas de control bromatológico, salubridad ambiental, obras particulares y seguridad industrial, lo que obliga a que el establecimiento mantenga actualizado un legajo técnico con certificados profesionales, verificaciones periódicas y planes de mantenimiento. El municipio exige además el cumplimiento de normativas impositivas y tributarias locales, como la Tasa de Inspección de Seguridad e Higiene, cuyo pago se vincula a las actividades habilitadas y la fiscalización permanente.

9.3 Tramitación ambiental y habilitatoria - Hoja de ruta

1 Categorización industrial preliminar (Ley 11.459): determinación de 1^a, 2^a o 3^a categoría, según rubro, magnitud y riesgo; para un complejo petroquímico HPPO se prevé 3^a categoría, con CAA emitido por la autoridad provincial.

2 Estudio de Impacto Ambiental (EIA) y Declaración de Impacto Ambiental (DIA) – Ley 11.723: alcance, línea de base, identificación y valoración de impactos, plan de gestión ambiental (PGA), programa de monitoreo, plan de contingencias (incl. H₂O₂ y OP), audiencia/participación si corresponde; emisión de DIA por el Ministerio de Ambiente.

3. Permisos hídricos y de vuelco – ADA (Ley 12.257): (i) disponibilidad/uso de agua (si hubiera captación), (ii) permiso de vuelco a red/curso receptor con cumplimiento de parámetros, (iii) declaración de efluentes y plan de tratamiento.

4 Registro de Generadores de Residuos Especiales (Ley 11.720 – Dec. 806/97): inscripción como generador; contratación de operadores y transportistas habilitados; plan de minimización y almacenamiento transitorio conforme anexo VI.

5 Certificado de Aptitud Ambiental (CAA) – Ley 11.459: presentación del proyecto (EIA + documentación técnica), auditoría y otorgamiento; condición necesaria para la habilitación municipal.

6 Habilitación municipal de establecimiento industrial – Ensenada: compatibilidad urbanística (COU), seguridad e higiene, tasas por inspección, y alta del establecimiento; obtención de matrícula municipal y habilitación definitiva.

7 Controles de operación: monitoreo de efluentes/ emisiones, reportes periódicos a ADA y Ministerio de Ambiente; auditorías de seguridad de proceso; actualización del PGA y plan de emergencias.

9.4 Marco impositivo

El marco impositivo aplicable a un establecimiento industrial radicado en Ensenada (Provincia de Buenos Aires) comprende tributos nacionales, provinciales y municipales, cada uno administrado por organismos distintos y con obligaciones específicas que requieren inscripción, presentación de declaraciones juradas, cumplimiento periódico y fiscalización. Este esquema tributario influye en la estructura de costos, en la cadena de abastecimiento, en operaciones de comercio exterior y en las obligaciones administrativas de la empresa.

9.4.1 Impuestos nacionales

Los impuestos nacionales son administrados por la Administración Federal de Ingresos Públicos (AFIP) e impactan en prácticamente todas las operaciones de la empresa.

Impuesto a las Ganancias

Grava las ganancias netas obtenidas por las sociedades por sus actividades industriales, comerciales o de servicios. La empresa debe determinar su ganancia neta ajustada por amortizaciones, valuación de inventarios, deducciones permitidas, ajustes por inflación impositiva y otros mecanismos de determinación. Afecta directamente la rentabilidad anual del proyecto industrial.

| Ganancia neta imponible | Pago fijo | % sobre excedente |
|---------------------------------------|------------------|-------------------|
| \$0 – \$133.514.185,74 | \$0 | 25% |
| \$133.514.185,74 – \$1.335.141.857,38 | \$33.378.546,43 | 30% |
| Más de \$1.335.141.857,38 | \$393.866.847,93 | 35% |

Tabla 9.3 Pagos por ganancias

Ejemplo: Ganancia neta = \$500.000.000

→ Supera el primer tramo pero no el segundo.

Impuesto = \$33.378.546,43 + 30% × (\$500.000.000 – \$133.514.185,74)

= \$33.378.546,43 + 30% × \$366.485.814,26

= \$33.378.546,43 + \$109.945.744,28

= \$143.324.290,71

Impuesto al Valor Agregado (IVA)

Grava la venta de bienes, prestación de servicios y las importaciones. Es un impuesto neutro, ya que la empresa debita el IVA en sus ventas y acredita el IVA de compras, insumos y gastos asociados a la actividad. Tiene relevancia operativa diaria por la necesidad de emitir comprobantes electrónicos válidos, registrar créditos fiscales, administrar percepciones y retenciones, y gestionar saldos técnicos, frecuentes en industrias. Actualmente el 21% del valor final.

Impuesto PAIS y tributos asociados al comercio exterior

Afecta principalmente operaciones en moneda extranjera y ciertos pagos al exterior. En industrias que importan insumos, equipos o servicios técnicos del exterior, esta carga puede ser significativa. Dependiendo de la operación, pueden aplicarse tasas adicionales asociadas a consumos y adquisición de divisas.

Impuesto a los débitos y créditos bancarios (“Impuesto al cheque”)

Grava todos los movimientos en cuentas bancarias. Aunque es un impuesto de recaudación sencilla, tiene impacto operativo y suele aplicarse como gasto financiero. Parte del impuesto puede computarse como pago a cuenta de Ganancias.

La alícuota general es 0,6% por cada crédito y 0,6% por cada débito (1,2% total).

Ejemplo: transferencia bancaria de \$1.000.000

| Movimiento | Tasa | Monto impuesto |
|------------|------|----------------|
| Débito | 0,6% | \$6.000 |
| Crédito | 0,6% | \$6.000 |
| Total | 1,2% | \$12.000 |

Tabla 9.4 Impuestos por débitos y créditos bancarios

Derechos de importación y exportación

Las industrias que importan materias primas, insumos químicos, equipamiento o repuestos están sujetas a Derechos de Importación, más otras tasas complementarias (estadística, comprobación, servicios aduaneros).

En caso de exportaciones (derivados, productos químicos, subproductos), pueden aplicar Derechos de Exportación (retenciones) así como reintegros según la posición arancelaria.

Promedio general de Argentina: 22% sobre el valor CIF.

Ejemplo: CIF = USD 50.000

Derecho de importación (22%) = USD 11.000

9.4.2 Impuestos regionales/provinciales

La Provincia de Buenos Aires posee un sistema impositivo administrado por la Agencia de Recaudación de la Provincia de Buenos Aires (ARBA).

Impuesto sobre los Ingresos Brutos (IIBB)

Es el tributo provincial más relevante. Grava el ingreso bruto derivado de la actividad industrial.

Si la actividad de la empresa está alcanzada por el régimen de Convenio Multilateral, los ingresos se distribuyen entre distintas jurisdicciones donde la empresa opere. En el caso de industrias radicadas en Buenos Aires, pueden existir alícuotas reducidas para actividades manufactureras o regímenes de promoción.

La Ley Impositiva PBA fija para producción industrial una alícuota del 1%.

Ejemplo: Ventas industriales = \$200.000.000

Ingresos Brutos = 1% × 200.000.000 = \$2.000.000

Impuesto de sellos

Grava los actos jurídicos realizados dentro de la provincia, como contratos de suministro, alquileres, acuerdos comerciales o cesiones. Su alícuota varía según el tipo de instrumento y las partes involucradas.

| Tipo de contrato | Alícuota |
|--------------------|----------|
| Locación comercial | 1,% |
| Cesión de derechos | 12% |
| Garantías/aval | 12% |

| | |
|-------------------------------|-----|
| Compraventa de bienes muebles | 12% |
|-------------------------------|-----|

Tabla 9.5 Alícuotas por contratos

Ejemplo: Contrato de locación industrial → \$10.000.000 anuales

Sellos = 1,2% × 10.000.000 = \$120.000

Impuesto inmobiliario

Grava la propiedad de los inmuebles rurales y urbanos, administrado también por ARBA. Toda planta industrial debe tributar por el terreno, construcciones y mejoras declaradas, y mantener actualizada la información catastral.

ARBA fija valores por m² para calcular la base imponible. Ejemplo (Formulario 903): Valor m² categoría A = \$25.000

Ejemplo: Nave industrial de 2.000 m² (Cat. 903A)

Valuación = 2.000 × 25.000 = \$50.000.000

Impuesto final se calcula aplicando coeficientes establecidos por ARBA.

9.4.3 Impuestos municipales en Ensenada

El Municipio de Ensenada percibe tributos específicos vinculados a la prestación de servicios locales y al control industrial-comercial.

Tasa por servicios generales

Cubre servicios municipales como barrido, alumbrado, mantenimiento urbano, recolección y disposición de residuos domiciliarios (no industriales), entre otros. Su cálculo se basa en la superficie o valuación fiscal del inmueble. Según reportes municipales, la cuota mensual ronda los \$10.500–\$15.000 tras ajustes 2023-2024. (Informe Político, 2026)

Tasa por Inspección, Seguridad e Higiene (TISH)

Es la tasa más relevante a nivel municipal para establecimientos industriales. Grava la actividad económica en función de los ingresos brutos declarados por la empresa y financia los servicios de control, inspección, seguridad, higiene, habilitación, fiscalización y verificaciones técnicas. Su cumplimiento requiere declaración periódica e inspecciones municipales que verifican condiciones edilicias, ambientales, de ordenamiento urbano y de seguridad industrial.

Las Ordenanzas Fiscales e Impositivas (2023-2025) establecen montos y ajustes. La información publicada indica que para 2024-2025, las tasas aumentaron hasta 129%, dejando cuotas mensuales promedio entre \$10.500 y \$15.000 para contribuyentes comunes.

Otras tasas municipales

Pueden existir adicionales, como:

- derechos por habilitación o renovación de habilitación,
- derechos de construcción,
- tasas por publicidad/propaganda,
- contribuciones por ocupación del espacio público o uso del tránsito pesado, dependiendo de la infraestructura industrial y del uso urbano del predio.

9.4.4 Trámites e inscripciones impositivas

Para operar formalmente, una empresa industrial debe completar un conjunto de altas, inscripciones y registros fiscales, tanto nacionales como provinciales y municipales. Entre los más relevantes:

Inscripciones nacionales (ARCA)

- CUIT del establecimiento y alta de actividades económicas (Codificación ARCA – Formulario 460).
- Alta en IVA, ganancias y empleador.
- Adhesión a regímenes de pago, facturación electrónica y presentación de DDJJ.
- Inscripciones específicas para importadores y exportadores, de corresponder.
- Altas en regímenes informativos (participaciones societarias, proveedores, compras/ventas).

Inscripciones provinciales (ARBA)

- Inscripción en Ingresos Brutos, ya sea régimen local PBA o Convenio Multilateral.
- Alta en el Impuesto Inmobiliario para el padrón correspondiente.
- Cumplimiento de regímenes de retención, percepción y recaudación bancaria (ARBA – *SIRCRES*).

Ámbito municipal (Municipio de Ensenada)

- Habilitación comercial e industrial, presentada tras obtener el Certificado de Aptitud Ambiental (CAA) y la compatibilidad urbanística.
- Alta en la Tasa de Inspección, Seguridad e Higiene.
- Presentación anual o periódica de documentación técnica de seguridad, planos, cargas de mantenimiento, libro de inspecciones, etc.

| Trámite | Gastos asociados típicos | Notas / Base |
|---------|--------------------------|--------------|
|---------|--------------------------|--------------|

| | | |
|---|--|---|
| AFIP – CUIT + alta de actividades (IVA, Ganancias, Empleador) | \$250.000 – \$600.000 (constitución/ajustes societarios, certificaciones notariales digitales, armado registral y altas) | El CUIT se obtiene online y es gratuito; las altas impositivas no tienen tasa. Costos privados según complejidad y tipo social. |
| AFIP – Adhesión a facturación electrónica y DDJJ | \$100.000 – \$300.000 (parametrización de sistema, pruebas, capacitación y manuales) | Alta sin tasa; costo privado por implementación interna/ERP y capacitación. |
| AFIP – Registro de Importadores/Exportadores | \$300.000 – \$1.200.000 (gestión con despachante + póliza de caución; prima usual 1–3% del monto garantizado) | Trámite sin arancel, pero exige solvencia o caución; gestión y póliza tienen costo privado. |
| ARBA – Inscripción en Ingresos Brutos (local/CM) | \$80.000 – \$200.000 (altas, parametrización de padrones, régimen de recaudación bancaria SIRCREB) | Inscripción online sin tasa; administración de padrones y retenciones bancarias tiene costo interno. |
| ARBA – Alta en Impuesto Inmobiliario (empadronamiento) | \$100.000 – \$400.000 (gestión catastral, croquis/plano, relevamientos) | No hay tasa de “alta”; sí costos técnicos si hay que actualizar datos catastrales. |
| Ensenada – Habilitación comercial/industrial | Ejemplos con tasa supuesta (solo para dimensionar): <ul style="list-style-type: none"> • Activo fijo \$100 M → \$100.000 (0,10%) • Activo fijo \$1.000 M → \$1.000.000 (0,10%) • Activo fijo \$5.000 M → \$5.000.000 (0,10%) | El derecho de habilitación lo define la Ordenanza y se calcula en función del activo fijo declarado. La web municipal confirma que varía por activo fijo; por eso te muestro escenarios con 0,10% como hipótesis ilustrativa (confirmar tasa vigente al momento del trámite). |
| Ensenada – Alta en Tasa de Inspección, Seguridad e Higiene (TISH) | \$150.000 – \$500.000 (armado de legajo: planos, memoria de seguridad, señalética, emergencias; sin contar obras) | El alta no tiene tasa; la TISH luego se liquida por DDJJ. Calendario y modalidades figuran en el decreto anual de vencimientos. |

| | | |
|--|--|--|
| Ensenada – Presentación periódica de documentación técnica | \$100.000 – \$300.000/año (act. planos, ensayos, certificados de equipos, extinción, calibraciones, libro de inspecciones) | Costo de mantenimiento documental y verificaciones periódicas (sin incluir inversiones/obras). |
|--|--|--|

Tabla 9.6. Estimación de costos administrativos y tasas de tramitación

Fuentes: (Argentina.gob.ar, 2026) (Administración Federal de Ingresos Públicos (AFIP)., 2026) (Agencia de Recaudación de la Provincia de Buenos Aires (ARBA), 2026) (Municipalidad de Ensenada, 2026)

CAPÍTULO X: ASPECTOS NORMATIVOS Y DE CALIDAD

10.1 Introducción

La industria petroquímica moderna exige niveles de excelencia que trascienden la mera eficiencia productiva. Para la planta de producción de óxido de propileno de 23.000 t/año, el cumplimiento normativo y la gestión de la calidad no representan sólo un requisito legal, sino una ventaja competitiva estratégica que asegura la inserción del producto en mercados de alto valor agregado, como la fabricación de polioles para poliuretanos y propilenglicol de grado USP.

Este capítulo detalla el marco regulatorio y los estándares que rigen tanto el diseño de las instalaciones como la pureza del producto final. La adopción de un Sistema de Gestión Integrado (SGI) permitirá unificar los criterios de calidad, seguridad y medio ambiente, garantizando la trazabilidad total del proceso desde la recepción de las materias primas (propileno y peróxido de hidrógeno) hasta la expedición del producto terminado.

El enfoque del proyecto se centra en la "Calidad desde el Diseño", donde cada parámetro de control en el reactor y las columnas de purificación está orientado a minimizar subproductos y cumplir con las especificaciones técnicas internacionales. De este modo, la planta no solo busca la certificación de sus procesos, sino la consolidación de una cultura de mejora continua que mitigue variabilidades y potencie la seguridad operativa de la unidad HPPO.

10.2 Normas a certificar

La planta se diseñará y operará bajo un Sistema de Gestión Integrado (SGI), certificando las siguientes normas para asegurar la estandarización global de sus procesos.

1.2.1 Normas internacionales (ISO)

110.2.2.1 ISO 9001

Principios de la gestión de la calidad (Organización Internacional de Normalización, 2015)

La implementación del SGC en la planta no es solo un cumplimiento normativo, sino que se basa en los siete pilares que rigen la norma:

1. Enfoque al cliente: para satisfacer sus requisitos y esforzarse en exceder sus expectativas.
2. Liderazgo: los directivos deben crear condiciones para que las personas se impliquen en el logro de los objetivos de la calidad.
3. Compromiso de las personas: personal competente y empoderado en toda la organización.
4. Enfoque a procesos: para lograr resultados coherentes y previsibles.
5. Mejora: enfoque continuo en la mejora del desempeño.
6. Toma de decisiones basada en la evidencia: análisis de datos operativos (temperatura, pureza, LEL).

7. Gestión de las relaciones: con proveedores críticos como los de H₂O₂ y catalizadores.

Requisitos normativos aplicados (ISO 9001:2015)

Para la planta HPPO, se seleccionan y aplican los siguientes artículos críticos de forma textual:

Contexto y partes interesadas (Art. 4.1): "La organización debe determinar las cuestiones externas e internas que son pertinentes para su propósito y su dirección estratégica". Es vital para identificar riesgos de mercado del óxido de propileno y la volatilidad del precio del propileno en Argentina.

Enfoque a procesos (Art. 4.4.1): "La organización debe establecer, implementar, mantener y mejorar continuamente un sistema de gestión de la calidad, incluidos los procesos necesarios y sus interacciones". Sirve para diagramar la interacción entre la reacción química, la separación de subproductos y el almacenamiento final.

Liderazgo y Política (Art. 5.1.1): "La alta dirección debe demostrar liderazgo y compromiso... asegurándose de que se establezcan la política de la calidad y los objetivos de la calidad". La gerencia debe garantizar que la seguridad de procesos y la calidad del producto sean compatibles con la estrategia de la planta.

Riesgos y Oportunidades (Art. 6.1.1): "...determinar los riesgos y oportunidades que es necesario abordar con el fin de: a) asegurar que el sistema de gestión de la calidad pueda lograr sus resultados previstos". El pensamiento basado en riesgos permite poner en marcha controles preventivos para minimizar efectos negativos en la reacción de epoxidación.

Objetivos de la Calidad (Art. 6.2.1): "La organización debe establecer objetivos de calidad a) ser coherentes con la política de calidad b) ser medibles; c) tener en cuenta los requisitos aplicables d) ser pertinentes para la conformidad de productos e) ser objeto de seguimiento". Define KPIs específicos, como alcanzar una pureza de óxido de propileno del 99,9%.

Infraestructura (Art. 7.1.3): "La organización debe determinar, proporcionar y mantener la infraestructura necesaria para la operación de sus procesos". Incluye el mantenimiento de reactores, columnas de destilación y sistemas de control distribuido.

Conocimientos de la Organización (Art. 7.1.6): "La organización debe determinar los conocimientos necesarios para la operación de sus procesos y para lograr la conformidad de los productos". Evita la pérdida de conocimiento crítico sobre la desactivación del catalizador por rotación de personal.

Competencia (Art. 7.2): "La organización debe: a) determinar la competencia necesaria de las personas que realizan... un trabajo que afecta al desempeño y eficacia del sistema de gestión de la calidad". Garantiza que los operadores de planta posean la formación técnica específica en tecnología HPPO.

Información Documentada (Art. 7.5.1): "El sistema de gestión de la calidad de la organización debe incluir: a) la información documentada requerida por esta Norma Internacional". Obliga a mantener manuales de operación y protocolos de seguridad actualizados y protegidos.

Control operacional (Art. 8.1): "La organización debe planificar, implementar y controlar los procesos... necesarios para cumplir los requisitos para la provisión de productos". Establece los criterios de aceptación en línea para las variables de proceso.

Requisitos del producto (Art. 8.2.2): "...asegurarse de que: a) los requisitos para los productos y servicios se definen, incluyendo: 1) cualquier requisito legal y reglamentario aplicable". Asegura que el producto final cumpla con las normas técnicas para su uso en la industria de poliuretanos.

Suministros externos (Art. 8.4.1): "La organización debe asegurarse de que los procesos, productos y servicios suministrados externamente son conformes a los requisitos". Se deben aplicar criterios de evaluación para el proveedor de peróxido de hidrógeno, dada su peligrosidad y criticidad.

Identificación y trazabilidad (Art. 8.5.2): "La organización debe utilizar los medios apropiados para identificar las salidas... para asegurar la conformidad de los productos". Cada lote de óxido de propileno debe ser rastreable desde el tanque de almacenamiento hasta el cliente final.

Seguimiento y medición (Art. 9.1.1): "La organización debe determinar: a) qué necesita seguimiento y medición; b) los métodos de seguimiento para asegurar resultados válidos. La organización debe evaluar el desempeño y eficacia del sistema de gestión de calidad". Define la frecuencia de análisis de laboratorio para validar la calidad del proceso.

Mejora continua (Art. 10.3): "La organización debe mejorar continuamente la idoneidad, adecuación y eficacia del sistema de gestión de la calidad". Utiliza los resultados de auditorías para optimizar el rendimiento del catalizador y reducir residuos químicos.

10.2.2.2 ISO 14001

Para la planta HPPO, se seleccionan y aplican los siguientes artículos críticos de forma textual: (Organización Internacional de Normalización, 2015)

Conocimiento de la organización y de su contexto (Art. 4.1)

"La organización debe determinar las cuestiones externas e internas que son pertinentes para su propósito y que afectan a su capacidad para lograr los resultados previstos de su sistema de gestión ambiental". Este análisis permite identificar condiciones ambientales como la calidad del aire, del agua y la disponibilidad de recursos naturales que pueden afectar el propósito de la planta o verse afectadas por los aspectos ambientales del proceso.

Comprensión de las necesidades y expectativas de las partes interesadas (Art. 4.2)

"La organización debe determinar: a) las partes interesadas que son pertinentes al sistema de gestión ambiental; b) las necesidades y expectativas pertinentes (es decir, requisitos) de estas partes interesadas; c) cuáles de estas necesidades y expectativas se convierten en obligaciones de cumplimiento". Para este proyecto, se considerarán los requisitos de entes reguladores, empleados y comunidades locales que se transforman en obligaciones una vez que la organización decide cumplirlos.

Política ambiental (Art. 5.2)

"La alta dirección debe establecer, implementar y mantener una política ambiental que, dentro del alcance definido de su sistema de gestión ambiental: a) sea adecuada al propósito y al contexto de la organización, incluida la naturaleza, magnitud e impactos ambientales de sus actividades, productos y servicios". Esta política establece la orientación a largo plazo e incluye compromisos para la protección del medio ambiente, la prevención de la contaminación y la mejora continua del desempeño ambiental.

Aspectos ambientales significativos (Art. 6.1.2)

"La organización debe determinar aquellos aspectos que tengan o puedan tener un impacto significativo sobre el medio ambiente, es decir, aspectos ambientales significativos". Para la planta HPPO, se identificarán las emisiones al aire, vertidos al agua y generación de residuos, considerando las etapas del ciclo de vida que pueden estar bajo el control o influencia de la organización.

Obligaciones de cumplimiento (Art. 6.1.3)

"La organización debe: a) identificar y tener acceso a las obligaciones de cumplimiento relacionadas con sus aspectos ambientales; b) determinar cómo se aplican estas obligaciones de cumplimiento a la organización". Esto incluye leyes, reglamentaciones, permisos y licencias expedidas por organismos de reglamentación que son de cumplimiento obligatorio para la industria petroquímica.

Objetivos ambientales (Art. 6.2.1)

"La organización debe establecer los objetivos ambientales en las funciones y niveles pertinentes, teniendo en cuenta los aspectos ambientales significativos de la organización y sus obligaciones de cumplimiento". Los objetivos deben ser coherentes con la política ambiental y, en la medida de lo posible, ser medibles para permitir el seguimiento de los resultados previstos.

Competencia (Art. 7.2)

"La organización debe: a) determinar la competencia necesaria de las personas que realizan, bajo su control, un trabajo que afecta a su desempeño ambiental; b) asegurarse de que estas personas sean competentes, basándose en la educación, formación o experiencia adecuadas". Es vital asegurar que el personal que responde ante situaciones de emergencia o que controla procesos con potencial de impacto significativo sea competente.

Toma de conciencia (Art. 7.3)

"Las personas que realizan el trabajo bajo el control de la organización deben tomar conciencia de: a) la política ambiental; b) los aspectos ambientales significativos y los impactos reales o potenciales relacionados, asociados con su trabajo". Esto implica que los trabajadores conozcan su rol específico y cómo su desempeño contribuye al cumplimiento de los compromisos ambientales de la planta.

Comunicación (Art. 7.4.1)

"La organización debe planificar e implementar un proceso para las comunicaciones internas y externas pertinentes al sistema de gestión ambiental, que incluya: a) qué comunicar; b)

cuándo comunicar; c) a quién comunicar; d) cómo comunicar". La comunicación debe ser veraz, exacta, fiable y basada en hechos para no conducir a engaño a las partes interesadas.

Información documentada (Art. 7.5.1)

"El sistema de gestión ambiental de la organización debe incluir: a) la información documentada requerida por esta Norma Internacional; b) la información documentada que la organización ha determinado que es necesaria para la eficacia del sistema de gestión ambiental". La extensión de esta documentación dependerá de la complejidad de los procesos de producción y de la competencia de las personas.

Planificación y control operacional (Art. 8.1)

"La organización debe planificar, implementar y controlar los procesos necesarios para cumplir los requisitos del sistema de gestión ambiental... mediante: a) el establecimiento de criterios para los procesos". Estos controles pueden incluir soluciones de ingeniería y procedimientos documentados para prevenir desviaciones de la política y los objetivos ambientales.

Preparación y respuesta ante emergencias (Art. 8.2)

"La organización debe establecer e implementar un procedimiento que especifique cómo responder a las situaciones potenciales de emergencia ambiental y a los accidentes potenciales". La planta debe emprender acciones para reducir las consecuencias de los accidentes, poniéndolas a prueba periódicamente para validar su eficacia.

Seguimiento, medición, análisis y evaluación (Art. 9.1.1)

"La organización debe determinar: a) a qué es necesario hacer seguimiento y qué es necesario medir... 4) el progreso con relación a los objetivos ambientales de la organización, mediante el uso de indicadores". Los resultados deben ser fiables y trazables para permitir una evaluación real del desempeño ambiental de la unidad.

Auditoría interna (Art. 9.2.1)

"La organización debe llevar a cabo auditorías internas a intervalos planificados para proporcionar información acerca de si el sistema de gestión ambiental cumple los propios requisitos de la organización... y los requisitos de esta Norma Internacional". Los auditores deben actuar libres de sesgo y conflicto de intereses, basando sus hallazgos en evidencias objetivas.

Mejora continua (Art. 10.2)

"La organización debe mejorar continuamente la idoneidad, adecuación y eficacia del sistema de gestión ambiental, para mejorar el desempeño ambiental". Este proceso recurrente busca optimizar los elementos del sistema para alcanzar mejores resultados en la protección del entorno natural.

10.2.1.3 ISO 45001

Para asegurar la integridad física y mental de los trabajadores en la planta de óxido de propileno, el sistema de gestión se regirá bajo la norma ISO 45001:2018. Este estándar internacional permite proporcionar lugares de trabajo seguros y saludables, previniendo lesiones y el deterioro de la salud relacionados con el trabajo. (Organización Internacional de Normalización, 2018)

Entendimiento de la organización y su contexto (Art. 4.1)

"La organización debe determinar los factores externos e internos que son pertinentes para su propósito y que afectan a su capacidad para alcanzar los resultados previstos de su sistema de administración/gestión de SyST". En la planta HPPO, esto implica analizar factores como la ubicación geográfica en Argentina, el clima local y la infraestructura tecnológica para gestionar los riesgos de explosión o fugas químicas.

Entendimiento de las necesidades y expectativas de los trabajadores y otras partes interesadas (Art. 4.2)

"La organización debe determinar: a) las otras partes interesadas, además de los trabajadores, que son pertinentes al sistema de administración/gestión de SyST; b) las necesidades y expectativas pertinentes... de los trabajadores y de otras partes interesadas". Es crucial considerar a los contratistas de mantenimiento, vecinos de la planta y autoridades regulatorias como la SRT, integrando sus requerimientos de seguridad en la planificación operativa.

Liderazgo y compromiso (Art. 5.1)

"La alta dirección debe demostrar liderazgo y compromiso con respecto al sistema de administración/gestión de SyST: a) asumiendo la total responsabilidad y rendición de cuentas para la prevención de las lesiones y el deterioro de la salud relacionados con el trabajo". El liderazgo se manifiesta asegurando que los recursos para equipos de protección personal y sistemas de detección LEL estén disponibles, además de proteger a los trabajadores de represalias al informar incidentes.

Política de SyST (Art. 5.2)

"La alta dirección debe establecer, implementar y mantener una política de SyST que: a) incluya un compromiso para proporcionar condiciones de trabajo seguras y saludables para la prevención de lesiones y deterioro de la salud relacionados con el trabajo". Esta política debe ser comunicada a todo el personal y estar disponible para las partes interesadas, sirviendo como marco para los objetivos de seguridad de la planta.

Consulta y participación de los trabajadores (Art. 5.4)

"La organización debe establecer, implementar y mantener un proceso para consulta y participación de trabajadores en todos los niveles y funciones aplicables... en el desarrollo,

planeación, implementación, evaluaciones de desempeño y acciones para mejoramiento del sistema". Se debe enfatizar la participación de trabajadores no directivos en la identificación de peligros y en la determinación de medidas de control para las tareas críticas.

Acciones para abordar riesgos y oportunidades (Art. 6.1.1)

"Al planear el sistema de administración/gestión de SyST, la organización debe considerar los factores referidos en el apartado 4.1... y determinar los riesgos y oportunidades que es necesario abordar". Este análisis preventivo es vital para asegurar que la unidad HPPO logre sus resultados de seguridad y reduzca el potencial de eventos catastróficos.

Identificación de peligros (Art. 6.1.2.1)

"La organización debe establecer, implementar y mantener un(os) proceso(s) de identificación continua y proactiva de los peligros". Los procesos deben considerar situaciones rutinarias y no rutinarias, incluyendo la infraestructura, sustancias químicas peligrosas como el propileno y el H₂O₂ y factores humanos asociados a la operación.

Determinación de los requerimientos legales y otros requerimientos (Art. 6.1.3)

"La organización debe establecer, implementar y mantener un(os) proceso(s) para: a) determinar y tener acceso a los requerimientos legales y otros requerimientos actualizados que sean aplicables a sus peligros". Esto garantiza que la planta opere bajo el marco de la Ley 19.587 de Higiene y Seguridad de Argentina y sus decretos reglamentarios.

Objetivos de SyST (Art. 6.2.1)

"La organización debe establecer objetivos de SyST para las funciones y niveles pertinentes para mantener y mejorar continuamente el sistema... y el desempeño de SyST". Los objetivos deben ser medibles (donde sea posible) y coherentes con la política de seguridad, como reducir a cero los incidentes con tiempo perdido (LTIR).

Competencia (Art. 7.2)

"La organización debe: a) determinar la competencia necesaria de los trabajadores que afecta o puede afectar a su desempeño de SyST; b) asegurarse de que los trabajadores sean competentes... basándose en la educación, formación o experiencia apropiadas". Se debe validar que los operadores del reactor y brigadistas posean la formación técnica específica para responder ante emergencias químicas.

Comunicación (Art. 7.4.1)

"La organización debe establecer, implementar y mantener un(os) proceso(s) necesario para comunicaciones internas y externas relevantes al sistema... incluyendo la determinación de qué, cuándo, a quién y cómo comunicar". La comunicación debe contemplar aspectos de diversidad

y asegurar que la información transmitida sea fiable y coherente con los datos de seguridad de la planta.

Eliminar peligros y reducir riesgos para SyST (Art. 8.1.2)

"La organización debe establecer, implementar y mantener un(os) proceso(s) para la eliminación de peligros y reducción de riesgos en SyST usando la siguiente jerarquía de controles: a) eliminación; b) sustitución; c) controles de ingeniería; d) controles administrativos; e) uso de EPP adecuado". Se priorizará el diseño de procesos seguros antes de la dependencia en protecciones personales.

Preparación y respuesta para emergencias (Art. 8.2)

"La organización debe establecer, implementar y mantener un(os) proceso(s) necesario para prepararse y responder a situaciones de emergencia potenciales". Esto incluye realizar pruebas periódicas de la capacidad de respuesta, como simulacros de derrames químicos, y asegurar la coordinación con servicios médicos externos.

Seguimiento, medición, análisis y evaluación del desempeño (Art. 9.1.1)

"La organización debe determinar qué necesita seguimiento y medición, los métodos y cuándo realizar el seguimiento". Es fundamental monitorear el grado de cumplimiento legal y la efectividad de los controles operacionales mediante indicadores de accidentabilidad.

Mejora continua (Art. 10.3)

"La organización debe mejorar continuamente la conveniencia, adecuación y efectividad del sistema de administración/gestión de SyST para mejorar el desempeño de SyST". Este proceso recurrente fomenta una cultura de seguridad que se adapta a las nuevas tecnologías y mejores prácticas de la industria petroquímica

10.2.2 Normas nacionales (IRAM)

En concordancia con el Sistema de Gestión Integrado, la planta adopta las normas IRAM para estandarizar criterios técnicos que garantizan la seguridad operativa y la calidad de los insumos y productos.

Seguridad y señalización industrial

Para la prevención de riesgos en las áreas de reacción y destilación, se aplican los siguientes estándares:

- IRAM 10005 (Partes I y II): establece los colores y señales de seguridad para la identificación de cañerías y riesgos específicos en la planta. (Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM))
- IRAM 3517: rige la dotación, control y mantenimiento de los sistemas de extinción (matafuegos), esencial para la protección de las unidades de proceso que manejan sustancias inflamables como el propileno.

Almacenamiento y recipientes a presión

Dado que el proceso opera con equipos críticos como el reactor R-03 y columnas de alta presión, se siguen las pautas de:

- IRAM 2526: relativa al diseño y fabricación de recipientes a presión, complementando los códigos ASME internacionales para asegurar la integridad mecánica de la unidad de epoxidación.

Calidad del producto y metodologías analíticas

Para certificar que el óxido de propileno alcanza el grado de pureza requerido para la fabricación de polioles, se emplean métodos normalizados de ensayo:

- IRAM 21322: Determinación de la pureza y subproductos en compuestos orgánicos mediante cromatografía de gases, asegurando la trazabilidad del producto final.

10.2.3 Normas internacionales

Para expandir el marco normativo internacional de la planta de óxido de propileno, es fundamental integrar los estándares de la ASTM International (American Society for Testing and Materials), los cuales dictan las pautas críticas para el control de calidad de los hidrocarburos y la integridad de los materiales de construcción.

En el caso del propileno de grado refinería o polímero que alimenta el reactor R-03, la norma ASTM D2163 resulta esencial, ya que estandariza la determinación de la pureza y las trazas de impurezas mediante cromatografía de gases, asegurando que contaminantes como el azufre no comprometan la selectividad del catalizador de zeolita.

Asimismo, para el producto final, la aplicación de la norma ASTM E203 permite medir con precisión el contenido de humedad mediante la técnica de Karl Fischer, un parámetro vital para el óxido de propileno destinado a la síntesis de poliuretanos, donde la presencia de agua debe ser mínima para evitar reacciones secundarias no deseadas.

Más allá de la caracterización de los fluidos, las normas ASME (American Society of Mechanical Engineers) rigen el diseño estructural de las unidades de separación como la D-46 y el sistema de recuperación de metanol D-62.

El código ASME Sección VIII proporciona las fórmulas de cálculo para los espesores de pared y los cabezales de las columnas de destilación, garantizando que los equipos soporten las presiones operativas de 0,3 MPa sin riesgo de falla mecánica o fatiga térmica. Esta normativa se complementa con los estándares de la API (American Petroleum Institute), específicamente la API 610 para la selección de las bombas centrífugas que manejan el reciclo de metanol purificado en el equipo Ion-65, asegurando una operación continua y segura bajo las exigentes condiciones de una unidad petroquímica de flujo constante.

10.3 Control de calidad

El control de calidad en la planta de óxido de propileno se define como un conjunto sistemático de acciones de muestreo, documentación y validación técnica que garantiza que cada lote producido cumpla estrictamente con los estándares de pureza del 99,8% requeridos por el mercado. Para asegurar esta excelencia, se adopta un modelo de gestión basado en la norma ISO 9000, el cual fomenta la toma de decisiones basada en la evidencia y el enfoque a procesos, permitiendo que la calidad sea una responsabilidad compartida que se extiende desde la recepción de insumos hasta el despacho final. Esta estructura operativa no solo busca la satisfacción del cliente, sino que también protege la reputación de la organización y optimiza la eficiencia del proceso HPPO al minimizar las desviaciones y el reprocesamiento.

La implementación de este plan de control involucra la supervisión constante de variables críticas en tres etapas fundamentales: la verificación de materias primas, el monitoreo del proceso en línea y la certificación del producto elaborado. En cada nivel, el uso de registros normalizados y técnicas analíticas estandarizadas, como la cromatografía de gases y la valoración de Karl Fischer, permite detectar cualquier anomalía de forma temprana. De esta manera, el sistema funciona como un mecanismo preventivo donde, ante cualquier desviación de los valores ideales en equipos clave como el reactor o las columnas de destilación, se activan de inmediato protocolos de acción correctiva para asegurar la integridad de la producción.

10.3.1 Parámetros y plan de control

10.3.1.1 Plan de control de calidad de las materias primas

El control de las materias primas constituye la primera barrera de seguridad y calidad del proceso. Cada lote recibido debe contar con el certificado de análisis del proveedor, el cual es verificado por el analista de laboratorio mediante las técnicas estandarizadas que se detallan a continuación.

En caso de que cualquier variable no se encuentre dentro de los rangos establecidos, se procede al rechazo inmediato del lote para evitar la desactivación del catalizador o la generación de subproductos fuera de especificación.

| Variable | Materia prima | Valor ideal | Responsable | Registro | Técnica | AC/AP |
|----------|---------------|-------------|-------------------------|----------|---------|---------------|
| | Propileno | > 99% | Analista de laboratorio | R-01-P | T-01 | Rechazar lote |

| | | | | | | |
|---|-----------------------|--|-------------------------|---------|--------|---------------|
| Concentración (%p/p) | Peróxido de hidrógeno | 70% | Analista de laboratorio | R-02-PH | T-01 | Rechazar lote |
| | Metanol | 99% | Analista de laboratorio | R-03-M | T-01 | Rechazar lote |
| Contenido de agua (%p/p) | Metanol | máx. 1% | Analista de laboratorio | R-03-M | T-04 | Rechazar lote |
| Densidad (kg/m³, 25 °C) | Propileno | 438,11 | Analista de laboratorio | R-01-P | T-05 | Rechazar lote |
| | Peróxido de hidrógeno | 1223,70 | Analista de laboratorio | R-02-PH | T-05 | Rechazar lote |
| | Metanol | 830 | Analista de laboratorio | R-03-M | T-05 | Rechazar lote |
| Apariencia | Metanol | Claro y libre de materia en suspensión | Analista de laboratorio | R-03-M | Visual | Rechazar lote |
| Catalizador | TS-1 | Estado físico de zeolitas | Analista de laboratorio | R-04-C | Visual | Rechazar lote |

Tabla 10.1 Plan de control de MPs

10.3.1.2 Plan de control de calidad del proceso

En la siguiente tabla se especifican los controles que se llevan a cabo en el proceso y las especificaciones a cumplimentar para la planta de Óxido De Propileno. El monitoreo constante de estas variables asegura la estabilidad operativa de la unidad HPPO, permitiendo que el sistema de control automático reduzca el margen de error y aumente la productividad global.

| Equipo | Corriente | Variable | Rango normal | Frecuencia (h) | Responsable | Registro | AC/AP |
|----------------------|------------------------|------------------|--------------|----------------|--------------------------|----------|--------------------------------|
| Reactor R-03 | Alimentación (1, 2, 4) | Presión (MPa) | 2,4 | Continua | Operario Sala de Control | R-10 | Verificar variables operativas |
| | Lecho Catalítico | Temperatura (°C) | 50 - 60 | Continua | Sistema DCS | R-11 | Ajustar Refrigeración |
| Stripper St-8 | Gas De Stripping (7) | Presión (MPa) | 2,2 - 2,4 | 4 | Operario Sala de Control | R-12 | Revisar Flujo De Nitrógeno |
| Intercambiador IC-10 | Mezcla De Reacción (9) | Temperatura (°C) | 60 - 90 | 4 | Operario Sala de Control | R-13 | Regular Caudal De Vapor |
| Evaporador EF-13 | Fase Vapor (22) | Presión (MPa) | 0,6 | 4 | Operario Sala de Control | R-14 | Controlar Compresión |

| | | | | | | | |
|------------------|-------------------------|---------------------|----------|----------|--------------------------|------|-----------------------------|
| Evaporador EF-16 | Fase Líquida (45) | Presión (MPa) | 0,13 | 4 | Operario Sala de Control | R-15 | Revisar Registros De Vacío |
| Columna D-24 | Cabeza de columna (25) | Pureza PO (% Molar) | > 99,0 | 2 | Analista de Laboratorio | R-16 | Ajustar Relación De Reflujo |
| Columna D-46 | Fondos de columna (48) | Presión (MPa) | 0,3 | 2 | Operario Sala de Control | R-17 | Verificar Hervidor IC-68 |
| Columna D-55 | Cabeza de columna (57) | Pureza PO (% p/p) | > 99,9 | Continua | Sistema DCS | R-18 | Dar Aviso A Superior |
| Reactor R-59 | Mezcla hidrogenada (61) | Temperatura (°C) | 50 - 120 | Continua | Operario Sala de Control | R-19 | Ajustar Flujo De Hidrógeno |
| Columna D-62 | Cabeza de metanol (63) | Temperatura (°C) | 64,7 | 1 | Operario Sala de Control | R-20 | Controlar Condensador C-73 |

Tabla 10.2 Plan de control de proceso

10.3.1.3 Plan de control de calidad del producto final

En esta última instancia del plan de control, se especifican los parámetros y valores de aceptación que debe cumplir el Óxido de propileno (corriente 57) antes de ser habilitado para su almacenamiento y posterior comercialización. El cumplimiento de estas especificaciones garantiza que el producto posea el grado de pureza necesario para aplicaciones de alta exigencia, como la industria de poliuretanos.

| Producto | Variable | Valor ideal | Frecuencia (h) | Registro | Técnica | AC/AP |
|--------------------|--------------------------------------|------------------|----------------|----------|---------|---------------|
| Óxido de propileno | Apariencia | Líquido incoloro | 4 | R-01-PO | Visual | Rechazar lote |
| | Concentración (%p/p) | 99,8 | 4 | R-01-PO | T-04 | Rechazar lote |
| | Densidad (kg/m ³ , 25 °C) | 823,26 | 4 | R-01-PO | T-05 | Rechazar lote |
| | Contenido de agua (ppm) | Máx. 100 | 4 | R-01-PO | T-04 | Rechazar lote |

Tabla 10.3 Plan de control de producto final

10.3.2 Registros

Los registros son documentos esenciales que permiten la trazabilidad y el control histórico de las materias primas, las variables de proceso y la conformidad del producto final. A continuación, se presentan los modelos de planillas a utilizar en cada etapa.

| Registro: R – 01 – P | | | | |
|-------------------------------|----------------------------|--------------|-------------|--------------------|
| Fecha | | | | |
| Materia prima | Propileno | | | |
| Proveedor | | | | |
| Variable de control | Valor de referencia | Valor | Lote | Responsable |
| Concentración (% p/p) | > 99 | | | |
| Densidad (kg/m ³) | 438,11 | | | |

Tabla 10.4 Planilla registro de propileno

Fuente: Elaboración propia

| Registro: R – 02 – PH | | | | |
|-------------------------------|------------------------------|--------------|-------------|--------------------|
| Fecha | | | | |
| Materia prima | Peróxido de hidrógeno | | | |
| Proveedor | | | | |
| Variable de control | Valor de referencia | Valor | Lote | Responsable |
| Concentración (% p/p) | 70 | | | |
| Densidad (kg/m ³) | 1223,70 | | | |

Tabla 10.5 Planilla registro de PH

Fuente: Elaboración propia

| Registro: R – 03 – M | | | | |
|-----------------------------|----------------------------|--------------|-------------|--------------------|
| Fecha | | | | |
| Materia prima | Metanol | | | |
| Proveedor | | | | |
| Variable de control | Valor de referencia | Valor | Lote | Responsable |
| Concentración (% p/p) | 99 | | | |

| | | | | |
|-------------------------------|-----------------|--|--|--|
| Densidad (kg/m ³) | 830 | | | |
| Contenido de agua (%) | <1% | | | |
| Apariencia | Claro y límpido | | | |

Tabla 10.6 Planilla registro de metanol

Fuente: Elaboración propia

| Registro: R – 04 – C | | | | |
|----------------------------|--------------------------------------|--------------|-------------|--------------------|
| Fecha | | | | |
| Materia prima | TS-1 | | | |
| Proveedor | | | | |
| Variable de control | Valor de referencia | Valor | Lote | Responsable |
| Apariencia | Sólido granulado Límpido amarillo | | | |

Tabla 10.7 Planilla registro de TS-1

Fuente: Elaboración propia

| Registro: R – XX | | | |
|----------------------------|--------------------|--------------|--------------------|
| Fecha | | | |
| Equipo | | | |
| Corriente | | | |
| Variable de control | Valor ideal | Valor | Responsable |
| Temperatura (°C) | | | |
| Presión (MPa) | | | |
| Caudal (kg/h) | | | |
| Porcentaje molar (%) | | | |

Tabla 10.8 Planilla registro de proceso

Fuente: Elaboración propia

| Registro: R – 01 – PO | | | |
|-------------------------------|---------------------|-------|-------------|
| Fecha | | | |
| Producto | Óxido de propileno | | |
| Lote de producción | | | |
| Variable de control | Valor de referencia | Valor | Responsable |
| Concentración (% p/p) | 99,8 | | |
| Densidad (kg/m ³) | 823,26 | | |
| Apariencia | Líquido incoloro | | |

Tabla 10.9 Planilla registro de producto final

Fuente: Elaboración propia

10.3.3 Técnicas de análisis

T-01: Cromatografía de gases

Esta técnica se utiliza para determinar la concentración de propileno (T-01), peróxido de hidrógeno (T-02) y metanol (T-03). El proceso consiste en vaporizar la muestra e inyectarla en una columna cromatográfica, donde los componentes se separan mediante una fase móvil gaseosa y una fase estacionaria líquida.

- Instrumentación: requiere un inyector, una columna (empaquetada o capilar), un horno para control térmico y un detector (generalmente de ionización de llama).
- Procedimiento: la muestra atraviesa la columna y cada componente emerge en un tiempo de retención específico, permitiendo su cuantificación mediante la integración de los picos en el registro de datos.

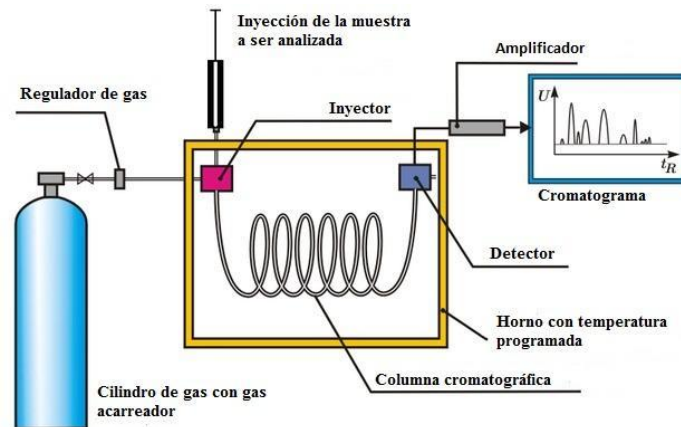


Fig. 10.1 Esquema de un cromatógrafo

T-04 Valoración de reactivo de Karl Fischer (ASTM D1364)

Es el método estándar para la determinación de agua en el metanol de alimentación y el óxido de propileno final. Se basa en la reducción química del yodo por el dióxido de azufre en presencia de agua.

- Reactivos: utiliza una solución de yodo, piridina y dióxido de azufre disuelta en 2-metoxietanol anhidro.
- Equipamiento: consta de un recipiente de titulación sellado, electrodos de platino para detección del punto final y una bureta de precisión.



Fig. 10.2 Titulador Karl Fisher

- Cálculo: el contenido de agua se obtiene mediante la ecuación:

$$\% \frac{p}{p} H_2O = \frac{V.W}{10.S} \quad \text{Ec 10.1}$$

T-05 Determinación de densidad digital (ASTM D4052)

Se aplica para controlar la densidad del propileno, peróxido de hidrógeno y metanol. La técnica utiliza un tubo de vidrio en forma de U que oscila a una frecuencia dependiente de la masa de la muestra.

- Procedimiento: se introducen aproximadamente 0,7 ml de muestra líquida en el tubo seco mediante una jeringa, evitando la formación de burbujas que alterarían la lectura.
- Equipo: requiere un densímetro digital con baño termostático para asegurar mediciones constantes a 20 °C o 25 °C.



Fig. 10.3 Densímetro digital

10.3.4 Indicadores de calidad

La gestión de la calidad en la producción de óxido de propileno trasciende la simple verificación de especificaciones; se constituye como un sistema de inteligencia operacional que permite evaluar el desempeño global de la planta en tiempo real.

Para una unidad de 23.000 t/año, los indicadores de calidad (KPIs) actúan como centinelas que vinculan las variables físicas medidas en los equipos, como las presiones de 2,4 MPa en el reactor R-03, con los resultados analíticos obtenidos en laboratorio bajo normas ASTM y ISO. Estos indicadores permiten cuantificar la eficacia de la estrategia de "Calidad desde el diseño", asegurando que cualquier desviación en la conversión de los reactivos o en la selectividad del catalizador de silicalita de titanio sea detectada antes de que afecte la integridad del producto final.

El despliegue de estos indicadores se organiza en una jerarquía que abarca desde la eficiencia química del proceso hasta la conformidad comercial del despacho. En el nivel operativo, el seguimiento de la pureza en corrientes intermedias permite optimizar el consumo específico de metanol y energía en las columnas de destilación D-46, D-55 y D-62.

En el nivel de gestión, el análisis de las acciones correctivas y preventivas (AC/AP) derivadas de los registros R-01 a R-20 proporciona una métrica clara sobre la robustez del sistema de gestión de calidad adoptado. D

e este modo, los indicadores no solo garantizan el cumplimiento de la pureza del 99,82% en el óxido de propileno, sino que también impulsan la reducción de costos operativos y la minimización del impacto ambiental por subproductos.

A continuación, se consolidan los objetivos numéricos específicos que regirán el desempeño de la planta durante su periodo inicial de operación:

| Indicador | Meta | Frecuencia de reporte | Fuente de datos |
|---------------------------|-------------|------------------------------|---------------------------------|
| Pureza del OP | > 99,8% | Diario | Registro R-01-PO |
| Conversión de H_2O_2 | > 98% | Mensual | Balance de masa (DWSIM vs Real) |
| Lotes rechazados | < 1% | Trimestral | Informe de AC/AP |
| Humedad en producto final | < 100 ppm | Diario | Técnica T-04 (Karl Fischer) |

Tabla 10.10 Indicadores de calidad iniciales

CAPÍTULO XI: HIGIENE Y SEGURIDAD INDUSTRIAL

11.1 Introducción

La higiene y seguridad representan un campo multidisciplinario de orden técnico que tiene por objeto fundamental la protección de la vida, la preservación de la salud y el bienestar de los trabajadores. Según lo establece la ley 19.587/72 y su decreto reglamentario 351/79, toda industria dentro del territorio nacional debe garantizar condiciones de seguridad que mitiguen los riesgos de la actividad.

Bajo este marco, es fundamental distinguir entre los pilares de la prevención:

- Seguridad industrial: centrada en la prevención de accidentes de trabajo (acontecimientos súbitos y violentos) mediante el control de factores que pueden generar daños a la propiedad, pérdidas de tiempo y lesiones.
- Higiene industrial: ciencia dedicada a identificar y controlar agentes físicos, químicos y biológicos para prevenir enfermedades profesionales derivadas de la exposición sistemática.

Gestión de peligros y riesgos en la planta

Para una gestión eficaz, se define al peligro como la fuente con potencial de causar daño, mientras que el riesgo es la probabilidad de que dicho daño ocurra. En una instalación industrial, el riesgo es mínimo si las máquinas y procesos operan correctamente, pero aumenta ante condiciones deficientes o usos incorrectos.

La operación y el mantenimiento de una planta de óxido de propileno implican peligros inherentes: sustancias extremadamente inflamables (OP, propileno, metanol), oxidantes fuertes (H_2O_2), atmósferas potencialmente explosivas, riesgos de polimerización y reacciones exotérmicas.

El objetivo de este capítulo es establecer las condiciones de trabajo, el sistema de gestión y los controles de ingeniería y administrativos que aseguren la integridad psicofísica del personal, la seguridad del proceso y el cumplimiento normativo (ley 19.587 y decreto 351/79 y sus anexos técnicos). (Crowl, D. A., & Louvar, J. F., 2019)

Jerarquía de control de riesgos

Para gestionar los peligros identificados en el proceso de producción de óxido de propileno, se aplica una jerarquía de controles que prioriza las medidas más efectivas para reducir o eliminar el riesgo. Esta progresión visual, representada en forma de pirámide invertida, establece el siguiente orden de actuación:

- Eliminación: consiste en quitar físicamente el peligro del entorno de trabajo, siendo la medida más eficaz.
- Sustitución: implica reemplazar el peligro por uno menor, como podría ser el uso de un solvente menos inflamable si el proceso lo permitiera.

- Controles técnicos: se basan en aislar a la gente del peligro mediante el diseño de ingeniería, por ejemplo, sistemas de venteo, venteos de emergencia o instrumentación de seguridad en los reactores.
- Controles administrativos: cambian la forma en que la gente trabaja a través de procedimientos, capacitaciones y señalización.
- EPP: es el último escalón y el menos eficaz, ya que protege al trabajador mediante barreras físicas (guantes, máscaras, trajes químicos) pero no elimina la fuente del riesgo.



Fig. 11.1 Triángulo de la jerarquía de control de riesgos

Fuente (National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), 2026)

11.2 Condiciones generales de trabajo y construcción

El diseño y la edificación de la planta se rigen por las normas de urbanismo vigentes, garantizando que cada área permita el desarrollo de actividades de forma segura y confortable. Las especificaciones técnicas de la estructura incluyen:

- Suelos y revestimientos: los pisos deben ser sólidos, impermeables y no resbaladizos. En sectores donde se manipulen sustancias tóxicas o corrosivas, el revestimiento será resistente a ataques químicos y contará con sistemas de drenaje específicos para proteger al personal y facilitar la limpieza profunda.
- Mantenimiento de superficies: tanto paredes interiores como cielorrasos y aberturas deben conservarse en perfecto estado de higiene. La pintura y el acabado se seleccionarán según la naturaleza de las labores, asegurando durabilidad frente a las condiciones del proceso.
- Circulación y accesibilidad: los pasillos y vías de tránsito deben permanecer libres de obstáculos para permitir el desplazamiento fluido y seguro del personal, especialmente en situaciones de emergencia. Las dimensiones de estos espacios deben ser suficientes para el movimiento simultáneo de trabajadores y maquinaria de carga sin riesgo de colisiones.

- Trabajos a la intemperie: para las tareas que deban realizarse en áreas descubiertas, se dispondrán de protecciones adecuadas para resguardar a los operarios de las inclemencias climáticas.
- Servicios sanitarios: cada sector de la planta dispondrá de agua potable para consumo humano y las instalaciones necesarias para el aseo personal y necesidades básicas de higiene, mantenidas bajo estrictas condiciones de orden.

Capacitación y formación del personal

Como pilar de la prevención de riesgos, se confeccionará un programa de capacitación integral y obligatorio para todo el personal de la planta. Este plan de formación abordará los siguientes ejes estratégicos: (Asfahl, C. R., & Rieske, D. W. , 2010)

1. Identificación de riesgos: conocimiento profundo de los peligros específicos del proceso (inflamables, oxidantes, reacciones exotérmicas) y su posible impacto en la salud.
2. Primeros auxilios y emergencias: formación en técnicas de socorrismo y protocolos de evacuación ante desastres naturales o incidentes mayores en el proceso.
3. Buenas prácticas y gestión del cambio: capacitación sobre procedimientos operativos seguros, buenas prácticas industriales y la adaptación segura ante cambios en los puestos de trabajo o nuevas tecnologías.

11.2.1 Provisión de agua

La planta contará con sistemas de provisión de agua diseñados bajo estrictos criterios de salubridad y seguridad, asegurando el cumplimiento de las exigencias del decreto 351/79 y garantizando la respuesta inmediata ante emergencias químicas. (Asfahl, C. R., & Rieske, D. W. , 2010)

Agua para consumo y uso sanitario

Se garantizará la disponibilidad permanente de agua potable para todo el personal mediante la instalación de bebederos estratégicamente distribuidos y agua de servicios para sanitarios y vestuarios. La red de consumo humano estará estrictamente segregada de la red de agua de proceso y servicios industriales para evitar cualquier tipo de contaminación cruzada. Se realizarán análisis bacteriológicos y físico-químicos periódicos para certificar que el suministro se mantenga dentro de los parámetros establecidos por la normativa vigente.

Sistemas de emergencia y descontaminación

Dada la naturaleza de las sustancias manipuladas en el proceso HPPO (especialmente el peróxido de hidrógeno, el metanol y el óxido de propileno), la seguridad del personal depende de una respuesta rápida ante salpicaduras o contactos accidentales. Por ello, el sistema de agua incluye:

- Duchas de emergencia y lavajos: se dispondrán estaciones de descontaminación a una distancia no mayor a 10 segundos de recorrido (aproximadamente 15 metros) desde los puntos de riesgo crítico.
- Ubicación estratégica: los equipos se instalarán en las áreas de carga/descarga, cercanías de reactores y laboratorios, asegurando que el camino esté libre de obstáculos.

- Mantenimiento y pruebas: se establece un protocolo de mantenimiento y pruebas periódicas para asegurar la presión adecuada, la potabilidad del agua estancada en las cañerías y el correcto funcionamiento de las válvulas de apertura rápida.

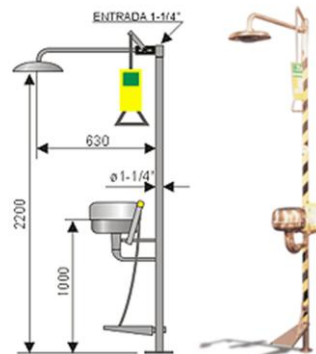


Fig. 11.2 Representación esquemática de las duchas de emergencia y lavaojos

11.2.2 Instalaciones sanitarias y vestuarios

Las instalaciones destinadas al aseo y cambio de indumentaria del personal se han diseñado bajo criterios de funcionalidad y prevención de la contaminación cruzada, cumpliendo con las exigencias de habitabilidad y proporcionalidad vigentes.

Diseño y gestión de vestuarios

Los vestuarios serán separados por género o individuales, garantizando la privacidad y comodidad de los trabajadores. Para evitar el contacto entre la vestimenta civil y la indumentaria de planta, se proveerán lockers dobles o individuales que permitan la separación física de la ropa de calle y la de trabajo.

Dada la manipulación de sustancias químicas en el proceso, se establecerán áreas específicas de higiene destinadas al retiro seguro de EPP contaminado. Estas zonas funcionarán como transición hacia las duchas, asegurando que cualquier agente agresor sea removido antes de que el personal se retire de la planta, minimizando así el riesgo de exposición fuera del área operativa. (Asfahl, C. R., & Rieske, D. W. , 2010)

Instalaciones sanitarias

Se mantendrán servicios sanitarios con ventilación natural o mecánica adecuada para garantizar la renovación de aire y evitar la acumulación de humedad. La cantidad de artefactos (inodoros, lavabos y duchas) será proporcional a la dotación máxima de personal por turno, de acuerdo con las tablas de cálculo establecidas en el decreto 351/79. Todos los locales se mantendrán en perfectas condiciones de higiene, orden y limpieza, contando con los elementos necesarios para el aseo personal.



Fig. 11.3 Ilustración de los vestuarios e instalaciones sanitarias

11.2.3 Iluminación y color

Según lo establecido por ley, la iluminación en los puestos de trabajo de la planta de óxido de propileno debe cumplir con los siguientes requisitos mínimos para garantizar la seguridad y eficacia de las tareas:

- Composición espectral: la luz debe ser adecuada a la tarea a realizar, de modo que permita observar o reproducir los colores en la medida que sea necesario.
- Efecto estroboscópico: se debe evitar este efecto en los lugares de trabajo para prevenir accidentes con maquinaria rotativa.
- Adecuación: la iluminancia debe ser adecuada a la tarea a efectuar.
- Deslumbramientos: las fuentes de iluminación no deben producir deslumbramientos directos o reflejados.

Se asegurará una iluminancia conforme a los rangos del Decreto 351/79 y normas complementarias, abarcando tareas de proceso, laboratorio, mantenimiento y exteriores. El nivel de iluminación se mide a la altura donde se ejecute la tarea; en zonas de uso general, a 85 cm del suelo, y en vías de circulación, a nivel del suelo.

Niveles de iluminación requeridos

Los niveles de iluminancia deben encuadrarse dentro de lo establecido por la ley para la industria química, según se detalla a continuación:

| Sector | Tarea / Área | LUX |
|-------------------------|---|-----|
| Planta de procesamiento | Circulación general | 100 |
| | Iluminación general sobre escaleras y pasarelas | 200 |
| | Iluminación sobre plano vertical | 200 |

| | | |
|---------------------------------|---|-----|
| Sobre aparatos | Iluminación sobre mesas y pupitres | 400 |
| Laboratorio de ensayo y control | Iluminación general | 400 |
| | Iluminación sobre el plano de lectura de aparatos | 600 |

Tabla 11.1 Nivel de LUX según cada tarea/área

11.2.4 Ruidos y vibraciones

En el marco de la higiene industrial, los agentes físicos como el ruido y las vibraciones requieren un sistema de gestión proactivo para prevenir enfermedades profesionales como la hipoacusia inducida por ruido. (Asfahl, C. R., & Rieske, D. W. , 2010)

Gestión del riesgo sonoro

Se gestionarán niveles sonoros continuos equivalentes conforme a anexos del 351/79 y guías SRT: mediciones iniciales y rutinarias para asegurar que no se superen los límites legales establecidos. Para este monitoreo se utiliza un decibelímetro integrador, determinando por zona de trabajo si los niveles hallados exceden el máximo permitido.

Siguiendo la jerarquía de controles, el plan de acción se divide según el nivel de riesgo detectado:

- Niveles inferiores a 85 db: se realizarán tareas de vigilancia que constaten la constancia de ese valor en el tiempo y nuevos relevamientos ante la incorporación de nuevos equipos, sistemas de ventilación o falta de mantenimiento.
- Niveles superiores a 85 db: se debe reducir el ruido al mínimo posible desde la fuente que lo produce (control técnico). Esto incluye la instalación de barreras acústicas y enclavamientos.
- Protección administrativa y personal: en caso de persistir el riesgo, se colocarán carteles indicativos de uso obligatorio de protección auditiva y se proveerá al personal de los EPP correspondientes.

Monitoreo de vibraciones

Dado que la planta cuenta con maquinaria de alta potencia, se realizará el monitoreo de vibraciones en equipos rotativos (bombas, compresores). Este control se integrará con el mantenimiento predictivo, permitiendo no solo proteger la integridad de los activos, sino también minimizar la transmisión de vibraciones a los trabajadores que operan o mantienen dichas unidades.

11.2.5 Ventilación

El sistema de ventilación en los locales de trabajo tiene como objetivo principal mantener condiciones ambientales que no perjudiquen la salud del trabajador, asegurando la renovación de aire necesaria para evitar atmósferas viciadas o peligrosas.

Gestión de atmósferas y caudales

Siempre que sea posible, se priorizará la ventilación natural por ser la más conveniente desde el punto de vista de higiene. Sin embargo, en función del volumen del local y el número de personas, la ley establece caudales mínimos de aire para garantizar la salubridad:

| Volumen del local (m ³ por persona) | Caudal de aire necesario (m ³ por hora por persona) |
|---|---|
| 3 | 65 |
| 6 | 43 |
| 9 | 31 |
| 12 | 23 |
| 15 | 18 |

Tabla 11.2 Caudal de aire necesario para ventilación por personas

Control de agentes específicos y seguridad del proceso

Dada la manipulación de sustancias críticas como el óxido de propileno y el metanol, se dispondrán sistemas de ventilación local (captación puntual) en los puntos de posible emisión para capturar contaminantes en la fuente. Complementariamente, se aplicarán las siguientes medidas:

Salas eléctricas y centros de control: se contará con ventilación forzada para garantizar la refrigeración de los equipos y evitar la acumulación de polvillo o gases.

Depósitos de OP: se prevén sistemas específicos de dilución de vapores y un monitoreo continuo mediante detección de límite explosivo inferior (LEL) para prevenir la formación de atmósferas potencialmente explosivas.

11.2.6 Condiciones térmicas

El control de las condiciones térmicas es fundamental en la planta para evitar el agotamiento por calor o el estrés térmico, especialmente en áreas cercanas a reactores o durante tareas de mantenimiento físico intenso.

La temperatura en los ambientes cerrados de la planta se ajustará a los rangos establecidos en el decreto 351/79, considerando el tipo de actividad realizada (desde tareas sedentarias en sala de control hasta esfuerzos físicos intensos en áreas de mantenimiento), con el fin de evitar el estrés térmico y asegurar el confort del personal.

Evaluación por índice TGBH

La normativa argentina utiliza el índice de temperatura de globo y bulbo húmedo (tgbh) para determinar si un trabajador puede estar expuesto a un ambiente determinado según su gasto energético (metabolismo).

Se aplicará la siguiente tabla de valores límite para determinar los regímenes de trabajo y descanso:

| Régimen de trabajo y descanso | Carga de trabajo leve ($M < 200$ kcal/h) | Carga de trabajo moderada (200 - 350 kcal/h) | Carga de trabajo pesada ($M > 350$ kcal/h) |
|--------------------------------------|---|--|---|
| Trabajo continuo | 30,0 °C | 26,7 °C | 25,0 °C |
| 75% trabajo - 25% descanso cada hora | 30,6 °C | 28,0 °C | 25,9 °C |
| 50% trabajo - 50% descanso cada hora | 31,4 °C | 29,4 °C | 27,9 °C |
| 25% trabajo - 75% descanso cada hora | 32,2 °C | 31,1 °C | 30,0 °C |

Tabla 11.3 Porcentaje de trabajo según carga térmica

Medidas de control

Para asegurar que el personal se mantenga dentro de estos rangos, especialmente durante la operación de la planta de óxido de propileno, se implementarán:

Aislamiento térmico: en equipos y cañerías que operen a altas temperaturas para reducir la radiación térmica hacia el ambiente.

Hidratación y rotación: provisión de agua fresca y cronogramas de descanso en áreas climatizadas cuando los valores tgbh superen los límites de trabajo continuo.

- Ventilación dirigida: uso de ventiladores o sistemas de inyección de aire fresco en puestos fijos con alta carga térmica.

11.2.7 Condiciones ergonómicas

El diseño de los puestos de trabajo en la planta de óxido de propileno se centra en la adaptación de las máquinas y procesos a la capacidad física y psicológica del trabajador, buscando minimizar la fatiga y prevenir trastornos musculoesqueléticos.

Ergonomía física y manejo de cargas

Se priorizará el diseño de estaciones de trabajo que permitan mantener posturas neutras de las articulaciones, evitando inclinaciones o giros forzados del tronco. Para lograrlo, se implementarán las siguientes medidas:

- Planos de trabajo: se ajustarán las superficies a una altura ergonómica según el tipo de tarea (precisión, ligera o pesada), reduciendo la tensión en hombros y zona lumbar.
- Asistencias mecánicas: se prohíbe el levantamiento manual de cargas superiores a 25 kg, disponiendo para ello de puentes grúa, autoelevadores o carros hidráulicos conforme a la normativa vigente.
- Rotación de tareas: se establecerán esquemas de rotación para evitar la repetición prolongada de movimientos y permitir la recuperación de los grupos musculares afectados por esfuerzos cíclicos.

Ergonomía cognitiva y sala de control

Dada la complejidad del proceso HPPO, la sala de control requiere un diseño de interfaz que facilite la toma de decisiones y reduzca la carga mental del operador:

- Interfaces HMI (Human-Machine Interface): las pantallas de control contarán con gráficos legibles, contrastes adecuados y una disposición intuitiva de los flujos de proceso para evitar errores de interpretación.
- Jerarquización de alarmas: para prevenir la fatiga por alarmas, se categorizarán los avisos según su criticidad, asegurando que el operador responda primero a los eventos que comprometan la seguridad del proceso.
- Mobiliario ergonómico: se proveerán sillas con soporte lumbar ajustable y monitores situados a la altura de los ojos para evitar tensiones cervicales durante las guardias.

11.2.8 Certificaciones médicas

En cumplimiento con el régimen de la Superintendencia de Riesgos del Trabajo (SRT) y lo establecido en el decreto 351/79, la planta contará con un servicio de medicina del trabajo encargado de velar por la aptitud física y el seguimiento preventivo del personal. El control médico se estructura en las siguientes instancias obligatorias:

- Exámenes de ingreso: se realizan de forma previa a la contratación para determinar la aptitud del postulante según los requerimientos del puesto de trabajo a ocupar.

- Exámenes periódicos: tienen como objetivo la detección precoz de posibles afecciones producidas por agentes de riesgo a los cuales el trabajador se encuentre expuesto durante el desempeño de sus tareas.
- Exámenes de egreso: se llevan a cabo al concluir la relación laboral para verificar el estado de salud del trabajador y descartar enfermedades profesionales adquiridas durante su paso por la planta.

Dada la naturaleza del proceso HPPO, el programa de vigilancia médica incluirá estudios complementarios dirigidos a los riesgos específicos identificados:

- Exposición a ruidos: se realizarán audiometrías obligatorias a todo el personal que desempeñe funciones en áreas donde los niveles sonoros alcancen o superen los 85 dB, con el fin de prevenir la hipoacusia inducida por ruido.
- Exposición a solventes y oxidantes: debido a la manipulación de metanol y óxido de propileno (solventes) y peróxido de hidrógeno (oxidante fuerte), se implementará una vigilancia epidemiológica específica. Esto incluye análisis clínicos y toxicológicos que permitan monitorear el impacto de estos agentes agresores en la salud de los operarios.



Fig. 11.4 Certificado de aptitud médica modelo

11.3 Seguridad industrial

La seguridad industrial en la planta de óxido de propileno se concibe como un sistema de gestión dinámico orientado a la prevención de accidentes y a la mejora continua de los procesos operativos.

11.3.1 Responsabilidad de la seguridad

La Alta Dirección de la planta asume la responsabilidad indelegable del sistema de Seguridad y Salud en el Trabajo (SST), el cual se encuentra alineado con los estándares de la norma ISO 45001. Esta responsabilidad implica no solo la provisión de recursos económicos y tecnológicos, sino también el liderazgo activo en la construcción de una cultura preventiva. (Organización Internacional de Normalización, 2018)

Para asegurar la ejecución y el seguimiento del sistema, se constituye el Comité de Seguridad, un órgano multidisciplinario integrado por representantes de las áreas de:

- Higiene y seguridad: responsable del asesoramiento técnico y el cumplimiento normativo.

- Operaciones: encargada de la aplicación de los procedimientos seguros en la producción de HPPO.
- Mantenimiento: responsable de la integridad mecánica de los equipos y sistemas de seguridad.
- Recursos humanos: clave en la gestión de la capacitación y el bienestar del personal.

Roles y funciones definidas

Se establece una estructura orgánica con niveles de responsabilidad específicos:

- Jefe de higiene y seguridad: profesional responsable de auditar el sistema, investigar incidentes y coordinar las políticas preventivas ante la autoridad de aplicación.
- Líderes de área: responsables de supervisar que las tareas diarias se ejecuten bajo los estándares de seguridad establecidos y de reportar cualquier condición insegura.
- Brigadas de emergencia: personal entrenado y equipado para la respuesta inmediata ante incendios, derrames de sustancias críticas (OP, H₂O₂) o fugas de gases.
- Equipos de primeros auxilios: trabajadores capacitados para brindar la asistencia inicial y estabilización de personas afectadas hasta la llegada del servicio médico.

11.3.2. Investigación de incidentes y accidentes

En la operación de una planta química, cada evento no deseado es una oportunidad de aprendizaje para evitar una catástrofe mayor. Se establece un protocolo sistemático para el análisis de causas: (Ley N° 19.587, 21 de abril de 1972.)

- Reporte inmediato: todo trabajador tiene la obligación y el derecho de reportar incidentes (eventos que no causaron daño pero pudieron hacerlo) y accidentes sin temor a represalias.
- Comisión investigadora: ante un evento, se conforma un equipo con personal de Higiene y Seguridad, el líder del área afectada y un representante de los trabajadores.
- Metodología de análisis: se utilizará el método del Árbol de Causas o los 5 Porqués para identificar no solo el error humano, sino las fallas en el sistema de gestión, el mantenimiento o el diseño.
- Plan de acción: de cada investigación derivarán acciones correctivas con responsables y fechas de cumplimiento, orientadas a eliminar la causa raíz y no solo el síntoma.

11.3.3. Indicadores de desempeño (KPIs) de seguridad

Para medir la eficacia del sistema de SST y la gestión de la Alta Dirección, se monitorearán indicadores proactivos (de prevención) y reactivos (de resultados):

Indicadores reactivos

Miden eventos que ya ocurrieron y permiten comparar el desempeño con los estándares de la industria petroquímica: (Janicak, C. A., 2015)

- Índice de Frecuencia (IF): número de accidentes con baja por cada millón de horas hombre trabajadas.

$$IF = \frac{N^{\circ} \text{ de accidentes con baja } \times 1000000}{\text{Total de horas trabajadas}} \quad \text{Ec- 11.1}$$

- Índice de Gravedad (IG): número de jornadas perdidas por cada mil horas trabajadas.

$$IG = \frac{N^{\circ} \text{ de jornadas perdidas} \times 1000}{\text{Total de horas trabajadas}} \quad \text{Ec. 11.2}$$

- Tasa de incidencia: relación entre el número de accidentados y el promedio de trabajadores expuestos.

$$TI = \frac{N^{\circ} \text{ de accidentados} \times 100}{\text{Promedio de trabajadores expuestos}} \quad \text{Ec. 11.3}$$

Indicadores proactivos

Son los más importantes para la prevención, ya que miden el esfuerzo preventivo antes de que ocurra un accidente: (Janicak, C. A., 2015)

- Cumplimiento del plan de capacitación: porcentaje de horas de formación dictadas vs. programadas.
- Eficacia de las inspecciones: número de condiciones inseguras detectadas y corregidas en el mes.
- Simulacros de emergencia: tiempo de respuesta y efectividad de las brigadas ante hipótesis de fuga de OP o incendio.
- Observaciones preventivas: cantidad de actos seguros/inseguros reportados por el personal de planta.

| Indicador | Objetivo | Frecuencia |
|--------------------|----------|------------|
| IF (Frecuencia) | < 2.0 | Mensual |
| Capacitación | > 95% | Trimestral |
| Hallazgos cerrados | 100% | Permanente |

Tabla 11.4 Objetivos de los indicadores proactivos

11.3.4 Plan de seguridad

El plan de seguridad se define como un documento vivo y dinámico que integra todas las herramientas operativas para garantizar un entorno de trabajo controlado. Su cumplimiento se fundamenta legalmente en la Ley 19.587 y el Decreto 351/79. (Ley N° 19.587, 21 de abril de 1972.) (Decreto N° 351/79., 22 de mayo de 1979)

Herramientas de gestión preventiva

- Matriz legal y de EPP: seguimiento actualizado de la normativa vigente y definición del equipo de protección personal específico para cada puesto (químico, ignífugo, auditivo).

| Ítem | EPP | Operaciones | Mantenimiento | Lab | Agentes | Marca |
|------|--|-------------|---------------|-----|---------------------------|----------------|
| 1 | Calzado de seguridad | X | X | X | Mecánico / Eléctrico | Edelbrock |
| 2 | Ropa de trabajo ignífuga (FR) | X | X | | Fuego repentino | DPG Industrial |
| 3 | Casco de seguridad con barbijo | X | X | | Caída de objetos | MSA |
| 4 | Gafas de seguridad de amplio espectro | X | X | X | Proyección de partículas | MSA |
| 5 | Protección facial | X | | X | Salpicadura de PO | 3M |
| 6 | Respirador de cara completa | X | X | X | Vapores orgánicos | 3M |
| 7 | Filtros para vapores orgánicos y gases | X | X | X | Gases y vapores orgánicos | 3M |
| 8 | Guantes de nitrilo | X | | X | Contacto químico | Ansell |
| 9 | Guantes de vaqueta | | X | | Abrasión | - |
| 10 | Protección auditiva (copa o endoaural) | X | X | | Ruido >85 dB(A) | 3M |
| 11 | Traje nivel C | X | | | Derrames | DuPont |
| 12 | Arnés de seguridad de cuerpo completo | | X | | Trabajo en altura | Steelpro |

Tabla 11.5 Matriz de EPP

- Permisos de trabajo seguro (PTS): autorización obligatoria para tareas de alto riesgo como trabajos en calor, altura, espacios confinados y gestión de energías peligrosas. Se presenta un modelo a continuación:

| 1. INFORMACIÓN GENERAL | | | | | |
|---|-------------------------------|---------------------------------|--|------------------------------------|-----------------------------|
| Fecha inicio del trabajo: | | Hora inicio: | | Fecha termino del trabajo: | |
| Empresa: | | Supervisor: | | Firma: | |
| Área: | Mina <input type="checkbox"/> | Planta <input type="checkbox"/> | Servicios <input type="checkbox"/> | Proyectos <input type="checkbox"/> | Lugar Exacto del trabajo: |
| Descripción del Trabajo: | | | | | |
| 2. GESTIÓN DOCUMENTAL PREVENTIVA EN TERRENO | | | | | |
| ¿Se realizo charla de seguridad / operacional por parte del supervisor? | Si <input type="checkbox"/> | No <input type="checkbox"/> | ¿Existe procedimiento o instructivo de trabajo seguro para la actividad? Si la respuesta es No, efectuar ARO detallado de la actividad | Si <input type="checkbox"/> | No <input type="checkbox"/> |
| ¿Se realiza ARO para la actividad? Se debe realizar siempre como complemento al procedimiento / instructivo. | Si <input type="checkbox"/> | No <input type="checkbox"/> | ¿Las herramientas y/o materiales se encuentran codificados de acuerdo al color trimestral? | Si <input type="checkbox"/> | No <input type="checkbox"/> |
| ¿Se realizo check list de herramientas y equipos? | Si <input type="checkbox"/> | No <input type="checkbox"/> | ¿El área / equipo se encuentra en condiciones para ejecutar los trabajos? | Si <input type="checkbox"/> | No <input type="checkbox"/> |

| 3. REQUERIMIENTOS BÁSICOS PARA ACTIVIDADES CRÍTICAS (Seleccionar actividad y verificar requerimientos) | | | | | |
|---|--------------------------|--------------------------|--|--------------------------|--------------------------|
| AISLACIÓN Y BLOQUEO DE ENERGÍAS: <input type="checkbox"/> Si <input type="checkbox"/> No | | | TRABAJOS EN ESPACIOS CONFINADOS: <input type="checkbox"/> Si <input type="checkbox"/> No | | |
| ¿El personal cuenta con los dispositivos de bloqueo personal? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | ¿El personal se encuentra capacitado para el trabajo en espacios confinados? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| ¿Se asegura energía cero antes de intervenir el equipo? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | ¿El personal cuenta con el examen de salud para trabajo en espacios confinados? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| ¿Se deja registro de bloqueo/desbloqueo? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | ¿Se cuenta con vigía o loro vivo? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| CONDUCCIÓN Y OPERACIÓN DE EQUIPOS: <input type="checkbox"/> Si <input type="checkbox"/> No | | | TRABAJOS DE EXCAVACIONES Y ZANJAS: <input type="checkbox"/> Si <input type="checkbox"/> No | | |
| ¿El personal se encuentra certificado con licencia interna? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | ¿Se cuenta con información de cables, líneas de comunicación, cañerías subterráneas? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| ¿El o los equipos se encuentran acreditados? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | ¿El acceso al área de excavación se encuentra segregada? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| TRABAJOS EN ALTURA FÍSICA: <input type="checkbox"/> Si <input type="checkbox"/> No | | | TRABAJOS EN CALIENTE Y LLAMA ABIERTA: <input type="checkbox"/> Si <input type="checkbox"/> No | | |
| ¿El personal se encuentra capacitado para el trabajo en altura? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | ¿El personal se encuentra certificado? (soldador calificado) | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| ¿El personal cuenta con el examen de salud para trabajo en altura física? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | ¿Se cuenta con mantas ignífugas, biombo u otro elemento para el control de la proyección de las partículas incandescentes? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| ¿Se realiza el calculo del espacio libre de caída? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | ¿Se cuenta con un sistema de protección contra incendio? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| SEGREGACIÓN Y DELIMITACIÓN DE ÁREAS: <input type="checkbox"/> Si <input type="checkbox"/> No | | | TRABAJOS CON PRESENCIA DE DIÓXIDO DE NITRÓGENO NO2: <input type="checkbox"/> Si <input type="checkbox"/> No | | |
| ¿Se cuenta con los elementos necesarios para cerrar el área de trabajo? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | ¿Cuenta con protector respiratorio con filtros multigases o gases de medio rostro o full face? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| ¿La señalización-delimitación impide que personal distinto al trabajo que se realiza, ingrese sin autorización? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | ¿Cuenta con instrumento medidor de gases para trabajar con exposición a dióxido de nitrógeno? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| OPERACIONES DE LEVANTE E IZAJES: <input type="checkbox"/> Si <input type="checkbox"/> No | | | EXPOSICIÓN A CAIDA DE ROCAS / FALLA DE TERRENO: <input type="checkbox"/> Si <input type="checkbox"/> No | | |
| ¿El personal se encuentra certificado? (operador - rigger) | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | ¿Se verifica estado de taludes? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| ¿El o los equipos se encuentran acreditados? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | ¿Se verifica presencia de grietas o cornisas en botaderos? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| ¿Se realiza check list de los elementos de izaje y equipo de levante? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | ¿Se cuenta con el plano de riesgos geotécnicos? (Mina) | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| ¿Se realiza Plan de Izaje? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | ¿Se cuenta con protocolo de entrega de bancos PEB? (Mina) | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| TRABAJOS CON SUSTANCIAS PELIGROSAS: <input type="checkbox"/> Si <input type="checkbox"/> No | | | TRABAJOS CON EXPLOSIVOS: <input type="checkbox"/> Si <input type="checkbox"/> No | | |
| ¿El personal cuenta con los EPP específicos para la tarea? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | ¿El personal se encuentra con la licencia de manipulador / programador calculista de explosivos vigente? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| ¿Se cuenta con las respectivas HDS difundidas? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | ¿Camión fabrica y polvorines (fijos / móviles) se encuentran con resoluciones vigentes? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| ¿Se cuenta con medios de contención en caso de derrame? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | ¿Señalización y segregación en área de tronadura de acuerdo a procedimiento? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| RETIRO DE PROTECCIONES DE PARTES MÓVILES: <input type="checkbox"/> Si <input type="checkbox"/> No | | | RETIRO DE BARANDAS O GRATING: <input type="checkbox"/> Si <input type="checkbox"/> No | | |
| ¿El personal es capacitado con relación a la prohibición de trabajos con exposición a partes móviles de maquinas y equipos? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | ¿Para los trabajos con exposición a caída a distinto nivel, se cuenta con el Sistema Personal para Detención de Caídas (SPDC). ? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| ¿Para la intervención de protecciones de partes móviles de maquinas / equipos, se aplico protocolo establecido? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | ¿Para el retiro de barandas y grating, se aplico protocolo establecido? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

Fig. 11.5 Modelo de permiso de trabajo

Fuente: (Permiso de trabajo Rev-02, 2026)

- Gestión de cambios (MOC): procedimiento para evaluar el impacto en la seguridad antes de realizar modificaciones en equipos, procesos o sustancias químicas.
- Auditorías e investigación: realización de auditorías internas periódicas y aplicación de la metodología de Árbol de causas para el análisis de incidentes. Se pone a continuación un ejemplo de árbol de causas por contacto químico:

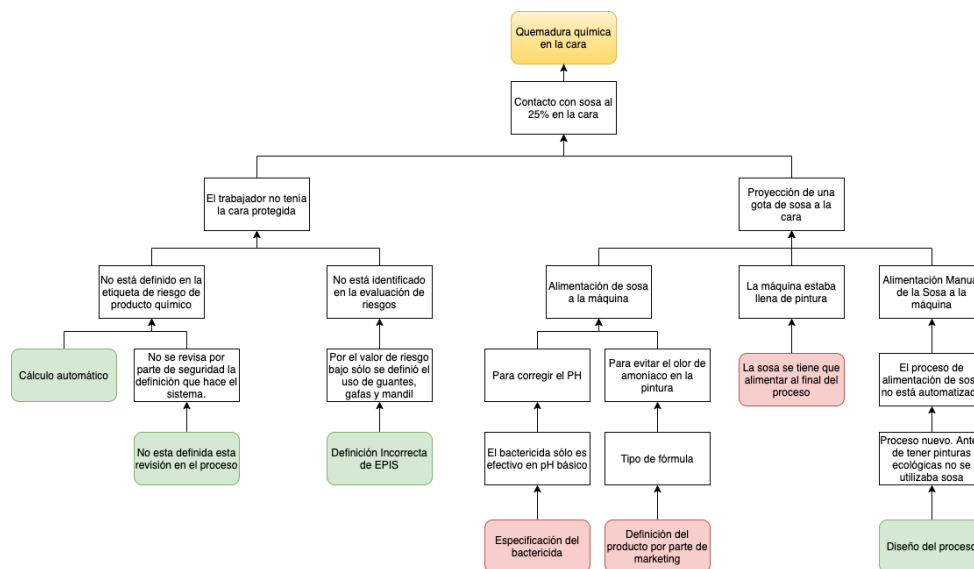


Fig. 11.6 Árbol de causas modelo

11.3.5. Plan de respuesta ante emergencias

Dada la naturaleza crítica de las sustancias manejadas (óxido de propileno, metanol y peróxido de hidrógeno), se establece un protocolo de actuación inmediata para mitigar daños al personal, las instalaciones y el medio ambiente.

Hipótesis de emergencias químicas

El plan contempla escenarios específicos según la peligrosidad inherente del proceso:

- Fuga o derrame de óxido de propileno: por su alta inflamabilidad y potencial de polimerización, se activarán sistemas de dilución de vapores y monitoreo de LEL.
- Derrame de peróxido de hidrógeno: como oxidante fuerte, requiere neutralización y lavado inmediato. Se prioriza el uso de duchas de emergencia y lavajos situados a ≤ 10 s del riesgo.
- Reacciones exotérmicas incontroladas: protocolos de parada de emergencia y venteos de seguridad.

Niveles de respuesta y brigadas

- Nivel 1 (Local): controlado por el personal del área mediante procedimientos operativos.
- Nivel 2 (Planta): intervención de la brigada de emergencia interna y activación del rol de llamadas.
- Nivel 3 (Externo): solicitud de apoyo a bomberos, servicios médicos externos y defensa civil.

Simulacros y mejora continua

Se realizarán simulacros periódicos para evaluar el tiempo de respuesta y la eficacia de los equipos de comunicación y extinción. Los resultados se volcarán en los indicadores de desempeño TRIR (Total Recordable Incident Rate) y LTIR (Lost Time Incident Rate) para identificar áreas de mejora en el entrenamiento de las brigadas. (U.S. Department of Labor. , 2026)

TRIR: mide la frecuencia de todos los incidentes registrables (muertes, casos con días perdidos, casos con tareas restringidas y tratamientos médicos más allá de primeros auxilios) por cada 100 trabajadores de tiempo completo. (Janicak, C. A., 2015)

$$TRIR = \frac{N^{\circ} \text{ de incidentes registrables} \times 200000}{\text{Total de horas trabajadas}} \quad \text{Ec 11.4}$$

LTIR: mide únicamente la frecuencia de incidentes que resultaron en tiempo perdido (días de baja médica) por cada 100 trabajadores de tiempo completo.

$$LRIR = \frac{N^{\circ} \text{ de incidentes con tiempo perdido} \times 200000}{\text{Total de horas trabajadas}} \quad \text{Ec. 11.5}$$

11.3.6. Matriz de elementos de protección personal (EPP)

La selección de los EPP se basa en el análisis de riesgos por puesto de trabajo. Todos los elementos deben contar con la certificación de sello S y ser mantenidos en condiciones óptimas de higiene. (Superintendencia de Riesgos del Trabajo, 2011)

EPP básicos (Uso obligatorio en toda el área operativa)

- Protección craneana: casco de seguridad de polietileno de alta densidad (clase B), resistente a impactos y tensión eléctrica.
- Calzado de seguridad: botines con puntera de acero o composite, con suela antideslizante y propiedades dieléctricas.
- Protección ocular: anteojos de seguridad de policarbonato con tratamiento antirraya y protección UV.
- Indumentaria: ropa de trabajo de algodón 100% o telas ignífugas (norma NFPA 2112) para evitar la acumulación de energía estática en atmósferas con propileno.

| Sector | Tarea Crítica | Riesgo Identificado | EPP Específico Sugerido |
|--------|---------------|---------------------|-------------------------|
|--------|---------------|---------------------|-------------------------|

| | | | |
|--------------------------------|---|--|--|
| Área de Reactores (HPPO) | Toma de muestras y supervisión | Contacto con sustancias corrosivas e inflamables | Guantes de nitrilo o neopreno de puño largo, antiparras estancas y máscara facial. |
| Parque de Tanques | Carga y descarga de metanol / propileno | Proyección de líquidos y vapores orgánicos | Máscara de cara completa (full-face) con filtros para vapores orgánicos y traje de protección química nivel C. |
| Mantenimiento Mecánico | Intervención en bombas y cañerías | Ruido, vibraciones y atrapamiento | Protección auditiva de copa o endoaural (SNR > 27 dB) y guantes de protección mecánica (Kevlar/vaqueta). |
| Laboratorio de Control | Análisis de pureza y titulaciones | Salpicaduras químicas y quemaduras | Guardapolvo de algodón, guantes descartables de nitrilo y protección ocular envolvente. |
| Electricidad e Instrumentación | Maniobras en MCC y tableros | Arco eléctrico y choque eléctrico | Guantes dieléctricos según tensión, careta para arco eléctrico y ropa con categoría de protección térmica (ATPV) adecuada. |

Tabla 11.6 EPP sugerido por tarea



Fig. 11.7 EPP generales para la protección integral del trabajador

Gestión y reposición

- Entrega y registro: cada entrega de EPP será documentada mediante la ficha de registro de entrega de elementos de protección personal (según resolución 299/11).

| CONSTANCIA DE ENTREGA DE ROPA DE TRABAJO Y ELEMENTOS DE PROTECCION PERSONAL | | | | | | | |
|--|----------|--------------|-------|--|-------|------------|----------------------|
| RAZÓN SOCIAL: | | | | C.U.I.T.: | | | |
| DIRECCIÓN: | | LOCALIDAD: | | CP: | | PROVINCIA: | |
| NOMBRE Y APELLIDO DEL TRABAJADOR: | | | | D.N.I.: | | | |
| DESCRIPCIÓN BREVE DEL PUESTOS DE TRABAJO EN ELLOS CUALES SE DESEMPEÑA EL TRABAJADOR: | | | | ELEMENTOS DE PROTECCIÓN PERSONAL, NECESARIOS PARA EL TRABAJADOR, SEGÚN EL PUESTO DE TRABAJO: | | | |
| Nº | PRODUCTO | TIPO/ MODELO | MARCA | POSEE CERT. | CANT. | FECHA | FIRMA DEL TRABAJADOR |
| 1 | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | |

Fig. 11.8 Ficha de registro de entrega de EPP

- Capacitación en uso: se instruirá al personal sobre el correcto ajuste, limitaciones, limpieza y criterios de descarte (por ejemplo, tras un impacto o contacto con productos químicos).
- Inspecciones: los supervisores de área realizarán verificaciones diarias para asegurar el uso efectivo y el estado de conservación de los equipos de protección.

11.3.7 Protección contra incendios

El sistema de protección contra incendios de la planta de óxido de propileno se diseña bajo un enfoque de defensa en profundidad, combinando sistemas de detección temprana, contención física y extinción automática y manual, conforme a lo establecido en el anexo vii del decreto 351/79. (Decreto N° 351/79., 22 de mayo de 1979)

Clasificación y medios de extinción

Se determinan las protecciones según la clasificación de fuegos (A-B-C-D) presentes en las distintas áreas del proceso:

- Extintores portátiles: distribución de unidades de polvo químico seco (ABC) y CO₂ (BC) para el ataque inicial de focos ígneos en tableros eléctricos, oficinas y áreas de proceso.
- Red de hidrantes: sistema de tuberías con reserva de agua propia y bombas de presurización, con nichos equipados con mangueras y lanzas de caudal variable en el perímetro de la unidad HPPO.
- Sistemas de rociadores y monitores: en áreas de alto riesgo, como los tanques de almacenamiento de propileno y metanol, se dispondrán sistemas de enfriamiento mediante lluvia de agua o monitores de espuma para el control de incendios de gran magnitud.

Detección, alarma y control de procesos

La planta contará con una red inteligente de sensores conectada a la sala de control para una respuesta inmediata:

- Detección de gases y vapores: instalación de sensores de límite explosivo inferior (LEL) para propileno, oxígeno (O₂) y monóxido de carbono (CO).
- Sistemas ESD (Emergency Shut Down): ante la detección de una condición crítica, se activarán cortes de energía y bloqueos de flujo sectorizados para aislar las unidades de proceso y mitigar la propagación del siniestro.
- Muros de contención: los tanques y reactores contarán con diques o muros de contención diseñados para confinar posibles derrames de líquidos inflamables o peróxido de hidrógeno, evitando la propagación del fuego por escurrimiento.

Capacitación y respuesta humana

El personal de planta será entrenado periódicamente en:

- Técnicas de ataque inicial: uso correcto de extintores y despliegue de líneas de mangueras.
- Protocolos de evacuación: conocimiento de las vías de escape, puntos de reunión y roles de emergencia.
- Uso de estaciones manuales: ubicación y activación de las alarmas de incendio distribuidas en el predio.

11.3.4 Instalaciones eléctricas

El diseño, la ejecución y el mantenimiento de las instalaciones eléctricas en la planta de óxido de propileno se rigen por la Ley 19.587 y el Decreto 351/79, garantizando la protección del personal y la integridad de los activos frente a riesgos de origen eléctrico o ignición.

Medidas de protección y seguridad

Se implementan sistemas de seguridad activa y pasiva en toda la red eléctrica de la planta:

- Puesta a tierra (PAT): se asegura la continuidad eléctrica y la descarga a tierra de todas las masas metálicas para evitar tensiones de contacto peligrosas.
- Protecciones de red: instalación de dispositivos diferenciales para la protección de personas y protecciones contra sobrecorriente (termomagnéticas) para el resguardo de las instalaciones.
- Mantenimiento preventivo: todas las intervenciones en el sistema eléctrico serán realizadas exclusivamente por personal calificado y autorizado, siguiendo protocolos de seguridad estrictos.

Clasificación de áreas y equipos especiales

Dada la manipulación de sustancias inflamables como óxido de propileno, propileno y metanol, se realiza una clasificación de áreas según el riesgo de formación de atmósferas explosivas:

- Control de energía estática: se dispondrán sistemas de descarga estática en las operaciones de trasvase de productos químicos.
- Vinculación y puesta a tierra: todos los tanques de almacenamiento y líneas de transporte contarán con puentes de continuidad eléctrica y conexión a tierra para disipar cargas electrostáticas que podrían actuar como fuente de ignición.

11.4 Gestión del riesgo y prevención

La gestión preventiva se sustenta en el control de las condiciones de trabajo y en el fortalecimiento de la cultura de seguridad del personal operativo.

11.4.1 Equipos de Protección Personal (EPP)

En la planta se aplica estrictamente la jerarquía de controles, donde el equipo de protección personal constituye la última barrera de defensa tras agotar las medidas de ingeniería y administrativas. Se establece una matriz por tarea que incluye:

- Protección básica: casco dieléctrico, protección ocular de alto impacto y calzado de seguridad con puntera resistente.
- Protección específica: protección facial y guantes químicos certificados para manipulación de peróxido y metanol.
- Control de agentes físicos: protección auditiva obligatoria en zonas con niveles sonoros superiores a 85 dB(A).

- Riesgos críticos: protección respiratoria con cartuchos para vapores orgánicos o sistemas de aire asistido según el nivel de riesgo, trajes anti-salpicaduras para químicos y arnés de seguridad para trabajos en altura.
- Administración: se mantendrá un registro de entrega firmado por el trabajador, junto con la evidencia del entrenamiento en su uso y el control de la vida útil del equipo.

11.4.2 Señalización

La señalética de la planta se diseña conforme a los colores y pictogramas normalizados para facilitar una identificación rápida y unívoca de las condiciones de seguridad:

- Categorización: se dispondrán señales de prohibición (rojo), obligación (azul), advertencia (amarillo) y emergencia/vías de escape (verde).



Fig. 11.9 Ejemplos de señalizaciones industriales

- Identificación de fluidos: el marcado de cañerías y servicios industriales se realizará bajo la norma IRAM 2507, permitiendo identificar rápidamente líneas de propileno, óxido de propileno y servicios auxiliares.

| Fluido / Servicio | Color de fondo | Color de banda | Ejemplo en planta |
|----------------------------|----------------|----------------|--------------------------------------|
| Combustibles inflamables | Amarillo | Negro | Propileno |
| Líquidos inflamables | Naranja | Negro | Óxido de propileno / Metanol |
| Sustancias comburentes | Blanco | Negro | Peróxido de hidrógeno |
| Agua contra incendio | Rojo | Blanco | Red de hidrantes y rociadores |
| Agua de servicio / Proceso | Verde | Blanco | Agua de enfriamiento y limpieza |
| Vapor de agua | Gris | Negro | Generación de vapor |
| Aire comprimido | Azul | Blanco | Aire de instrumentos y servicios |
| Sustancias tóxicas | Violeta | Blanco | Efluentes o subproductos específicos |

Tabla 11.7 Clasificación de fluido según colores de identificación

Gestión de señales y sistemas de emergencia

La señalización de emergencia en la planta de óxido de propileno constituye un sistema de comunicación visual crítico para la respuesta inmediata ante siniestros. Se establecen los siguientes lineamientos de balizamiento y demarcación:

- Equipos de extinción: se realizará el balizamiento específico de matafuegos e hidrantes utilizando placas de color rojo y blanco, asegurando que la cantidad de equipos sea proporcional a la carga de fuego y las clases de fuego involucradas (A, B, C o D). La ubicación de estos equipos debe garantizar una distancia de recorrido mínima para el personal operativo.
- Planos de evacuación: se expondrán planos de "fire & gas" en lugares estratégicos y visibles, detallando la ubicación de estaciones manuales de alarma, detectores LEL y las vías de escape seguras. Estos planos deben ser fácilmente interpretables y estar orientados según la posición del observador.
- Rutas de escape y salidas: las vías de circulación autorizadas deben estar libres de obstáculos, permitiendo un tránsito fluido y seguro hacia el exterior, especialmente en situaciones de visibilidad reducida.
- Puntos de reunión: se establecerá la demarcación visible de los puntos de encuentro seguros fuera del área de proceso, utilizando cartelería fotoluminiscente de color verde que facilite la concentración y el recuento del personal tras la evacuación.



Fig. 11.10 Tipos de fuego y extintores

11.4.3 Capacitaciones

Se implementará un programa anual de formación obligatoria para garantizar la competencia técnica y la seguridad de toda la dotación, asegurando que el personal pueda realizar sus actividades de forma segura y con comodidad. Este plan de formación se divide en los siguientes ejes estratégicos:

- Inducción y riesgos específicos: capacitación inicial sobre el proceso productivo y la identificación de riesgos propios del medio ambiente de trabajo, analizando su impacto en la salud y la exposición sistemática a agentes agresores.
- Trabajos de alto riesgo: formación técnica obligatoria en el sistema de permisos de trabajo (PTW), procedimientos de bloqueo y etiquetado (LOTO), seguridad en espacios confinados y criterios de protección en trabajos a la intemperie.
- Respuesta a emergencias y socorrismo: entrenamiento práctico en nociones de primeros auxilios, técnicas de uso de extintores según la clase de fuego (A, B, C o D) y ejecución de acciones de evacuación ante riesgos mayores o desastres naturales.
- Buenas prácticas y gestión del cambio: actualización continua sobre normas generales de la compañía, buenas prácticas industriales y formación específica ante cambios en los puestos de trabajo para mejorar la eficiencia del protocolo de seguridad.
- Control y validación: toda actividad de formación contará con su correspondiente registro de asistencia y una evaluación de aprendizaje para validar la efectividad de la capacitación y el cumplimiento de los objetivos de educación sanitaria.

Cronograma anual básico de capacitaciones

El siguiente calendario establece la frecuencia y los temas clave para mantener la competencia del personal. Se divide en cuatro trimestres para asegurar una cobertura integral sin interferir con la continuidad operativa de la planta.

| Trimestre | Eje temático | Temas específicos | Alcance |
|--------------|-------------------------|--|-----------------------------|
| 1° Trimestre | Fundamentos y riesgos | Inducción a la planta, riesgos químicos y uso correcto de EPP. | todo el personal |
| 2° Trimestre | Tareas críticas | Permisos de trabajo, bloqueo de energías y seguridad en espacios confinados. | mantenimiento y operaciones |
| 3° Trimestre | Respuesta a emergencias | Técnicas de uso de extintores, primeros auxilios y actuación ante derrames químicos. | brigadas y supervisores |
| 4° Trimestre | Simulacros y evaluación | Ejecución de simulacro general de evacuación y evaluación anual de desempeño en sst. | todo el personal |

Tabla 11.8 Cronograma anual básico de capacitaciones

Gestión y seguimiento del plan

Para garantizar la efectividad de este cronograma, la jefatura de higiene y seguridad aplicará las siguientes pautas de control:

- Planificación mensual: cada mes se notificará el cronograma detallado con fechas y horarios para facilitar la organización de los turnos de trabajo.
- Evaluación de aprendizaje: al finalizar cada módulo, los trabajadores realizan una evaluación escrita o práctica para validar los conocimientos adquiridos.
- Registro de firmas: se utilizarán las planillas oficiales para el registro de asistencia, las cuales formarán parte del legajo técnico de cada empleado ante auditorías de la srt.
- Actualización del plan: el cronograma se revisará semestralmente para integrar capacitaciones sobre nuevos equipos o cambios en los procedimientos operativos

11.4.4 Análisis de peligros y puntos críticos

La complejidad química del proceso de producción de óxido de propileno exige una evaluación sistemática de las desviaciones operativas para prevenir accidentes mayores, tales como explosiones, incendios o liberaciones tóxicas masivas.

Metodologías de análisis de riesgo

Se implementa un enfoque multinivel para identificar, evaluar y mitigar los riesgos industriales:

- HAZOP (Hazard and Operability Study): se realiza un análisis por nodos del proceso, evaluando desviaciones en variables críticas como flujo, presión, temperatura y

composición. Se utilizan palabras guía (más, menos, ninguno) para identificar causas, consecuencias y salvaguardas existentes.

- LOPA (Layer of Protection Analysis): se utiliza para evaluar la adecuación de las capas de protección independientes (IPL). Este método permite determinar si las barreras actuales son suficientes para reducir la frecuencia de un evento indeseado a niveles tolerables.

Seguridad funcional e instrumentada (SIL)

Para las funciones que requieren una fiabilidad superior, se define el nivel de integridad de seguridad (SIL):

- Funciones instrumentadas de seguridad (SIF): se establecen lazos automáticos para actuar ante condiciones de peligro inminente.
- Interlock de inyección de H₂O₂: sistema de corte automático que impide la alimentación de oxidante si no se detectan condiciones seguras en el reactor, evitando reacciones descontroladas.
- ESD en almacenamiento de OP: sistema de parada de emergencia (Emergency Shut Down) sectorizado para el aislamiento inmediato de los tanques de óxido de propileno ante detecciones de fuego o fuga masiva.

Gestión del cambio (MOC)

Toda modificación en los activos o en los procedimientos operativos requiere un control estricto para no introducir nuevos riesgos:

- Evaluación técnica: cualquier cambio en equipos o variables de proceso debe ser precedido por un análisis de riesgo que valide que la seguridad no se ve comprometida.
- Capacitaciones por nuevos equipos: ante la incorporación de tecnología o cambios en el layout, se dictarán módulos específicos que incluyan manuales de operación y nuevos límites de diseño para asegurar la competencia del personal.

CAPÍTULO XII: ANÁLISIS DE RIESGOS

12.1 Introducción

En este capítulo se desarrolla un análisis integral de los riesgos asociados a la operación de la planta industrial de producción de óxido de propileno mediante el proceso de epoxidación de propileno con peróxido de hidrógeno. El objetivo principal es identificar, clasificar y evaluar los distintos tipos de riesgos presentes en las diferentes áreas del proceso, incluyendo las etapas de reacción, separación, destilación, compresión y purificación de solventes.

El análisis de riesgos permite establecer una jerarquización de los eventos potencialmente peligrosos, priorizando aquellos que requieren medidas de control, prevención o mitigación. Asimismo, se proponen estrategias operativas y de diseño destinadas a reducir la probabilidad de ocurrencia de incidentes y minimizar sus consecuencias sobre el personal, las instalaciones y el medio ambiente.

Desde el punto de vista ingenieril, este análisis constituye una herramienta fundamental para garantizar la seguridad del proceso, asegurar la continuidad operativa y optimizar la confiabilidad de los equipos críticos. Además, el estudio de riesgos tiene una implicancia directa en la evaluación económica del proyecto, ya que permite anticipar situaciones que podrían afectar la disponibilidad de la planta, los costos de operación o la rentabilidad global del emprendimiento.

En este contexto, se analizan los riesgos físicos, químicos, mecánicos, eléctricos, económicos y tecnológicos asociados a la operación de la planta de producción de óxido de propileno.

12.2 Identificación de factores de riesgo

12.2.1 Riesgos físicos

Los riesgos físicos están asociados a las condiciones operativas del proceso industrial, tales como temperatura, presión, ruido o vibraciones generadas por los equipos de proceso. En la planta de producción de óxido de propileno, estos factores se presentan principalmente en los reactores, compresores, columnas de destilación e intercambiadores de calor.

12.2.1.1 Altas temperaturas

Diversas etapas del proceso operan a temperaturas elevadas, particularmente en los reactores de epoxidación y en los equipos de destilación, donde se requiere aporte térmico mediante rehervidores para la separación de los componentes de la mezcla.

El contacto accidental con superficies calientes o la exposición a corrientes de vapor puede generar quemaduras térmicas al personal de operación y mantenimiento.

Medidas de mitigación

- Aislamiento térmico de equipos, cañerías y superficies expuestas.
- Señalización de zonas con temperaturas elevadas.
- Uso obligatorio de elementos de protección personal (EPP) como guantes térmicos, ropa ignífuga y protectores faciales.
- Instalación de sensores de temperatura con sistemas de alarma y control automático.

12.2.1.2 Altas presiones

En el proceso existen equipos que operan a presiones superiores a la atmosférica, como compresores, recipientes de proceso y líneas de transporte de gases. Una falla en estos sistemas podría provocar liberaciones súbitas de presión, con riesgo de explosiones mecánicas o fugas de sustancias inflamables.

Medidas de mitigación

- Instalación de válvulas de seguridad y discos de ruptura.
- Diseño de equipos conforme a códigos internacionales (ASME).
- Inspecciones periódicas de integridad mecánica.
- Sistemas de monitoreo continuo de presión.

12.2.1.3 Ruido industrial

Equipos rotativos como compresores, bombas y ventiladores generan niveles elevados de ruido que pueden superar los 85 dB(A), lo que representa un riesgo de daño auditivo para el personal expuesto durante largos períodos.

Medidas de mitigación

- Instalación de cabinas acústicas en equipos de alta emisión sonora.
- Uso obligatorio de protección auditiva (orejeras o tapones).
- Señalización de zonas con niveles elevados de ruido.

12.2.1.4 Vibraciones

Las vibraciones generadas por compresores, bombas y motores pueden provocar fatiga estructural en las instalaciones, además de afectar la estabilidad operativa de los equipos.

Medidas de mitigación

- Instalación de soportes antivibratorios.
- Balanceo dinámico de equipos rotativos.
- Sistemas de monitoreo de vibraciones para detección temprana de fallas.

12.2.2 Riesgos químicos

Los riesgos químicos en la planta están asociados principalmente al manejo de sustancias reactivas, inflamables o potencialmente peligrosas, como el propileno, el peróxido de hidrógeno, el metanol y el óxido de propileno.

12.2.2.1 Exposición a vapores de óxido de propileno

El óxido de propileno es un compuesto volátil y altamente inflamable. La inhalación de vapores puede provocar irritación respiratoria, mareos o efectos sobre el sistema nervioso central.

Medidas de mitigación

- Sistemas de ventilación y extracción localizada.
- Detectores de gases en áreas críticas.
- Uso de respiradores con filtros para vapores orgánicos.
- Control estricto de fugas en válvulas y conexiones.

12.2.2.2 Manejo de peróxido de hidrógeno

El peróxido de hidrógeno es un agente oxidante fuerte que puede descomponerse violentamente en presencia de contaminantes o temperaturas elevadas, liberando oxígeno y calor.

Medidas de mitigación

- Almacenamiento en tanques compatibles con materiales resistentes a oxidación.
- Control estricto de temperatura y contaminación.
- Sistemas de ventilación adecuados.
- Procedimientos de manipulación segura.

12.2.2.3 Riesgo de incendio y explosión

Tanto el propileno como el óxido de propileno presentan elevada inflamabilidad. En presencia de oxígeno y una fuente de ignición pueden generarse incendios o explosiones.

Medidas de mitigación

- Clasificación de áreas eléctricas (ATEX).
- Sistemas de detección y extinción de incendios.
- Puesta a tierra de equipos para evitar descargas electrostáticas.
- Planes de emergencia y evacuación.

12.2.3 Riesgos mecánicos

Los riesgos mecánicos están relacionados con la operación de maquinaria, equipos de proceso y estructuras metálicas.

12.2.3.1 Fallos estructurales

Tanques, columnas de destilación, soportes estructurales y tuberías pueden sufrir deterioro por corrosión, fatiga o sobrecargas.

Medidas de mitigación

- Inspecciones periódicas mediante ensayos no destructivos.
- Programas de mantenimiento preventivo.
- Monitoreo del espesor de paredes en equipos críticos.

1.2.3.2 Fallas en equipos de proceso

Equipos como reactores, compresores, bombas e intercambiadores pueden sufrir desgaste, incrustaciones o fallas mecánicas.

Medidas de mitigación

- Programas de mantenimiento predictivo.
- Análisis de vibraciones y termografía.
- Capacitación del personal en operación segura.

12.2.4 Riesgos eléctricos

La planta requiere una importante infraestructura eléctrica para la operación de compresores, bombas, sistemas de control e instrumentación.

Entre los riesgos eléctricos se incluyen:

- Electrocuación del personal.
- Cortocircuitos o sobrecargas.
- Incendios por fallas eléctricas.
- Interrupciones en el suministro eléctrico.

Medidas de mitigación

- Instalación de sistemas de puesta a tierra.
- Uso de protecciones eléctricas (disyuntores, relés).
- Inspecciones periódicas de tableros eléctricos.
- Generadores de emergencia para áreas críticas.

12.2.5 Riesgos económicos

Falta de disponibilidad de materia prima

El proceso depende del suministro continuo de propileno y peróxido de hidrógeno. Interrupciones en la cadena de suministro pueden afectar la producción.

Medidas de mitigación

- Diversificación de proveedores.
- Mantenimiento de stock de seguridad.
- Contratos de suministro a largo plazo.

Variación del precio de materias primas

Las materias primas petroquímicas están sujetas a fluctuaciones en los mercados internacionales.

Medidas de mitigación

- Contratos a precio fijo o indexado.
- Estrategias de compra anticipada.

Variación en costos energéticos

El proceso requiere importantes consumos de vapor, electricidad y agua de enfriamiento.

Medidas de mitigación

- Contratos energéticos a largo plazo.
- Optimización energética del proceso.

12.2.6 Riesgos tecnológicos

Falla del reactor principal

El reactor de epoxidación constituye el equipo central del proceso. Una falla podría provocar la detención total de la planta.

Medidas de mitigación

- Monitoreo continuo de variables críticas.
- Sistema avanzado de control de procesos.
- Programas de mantenimiento preventivo.

Fallas en intercambiadores de calor

Los intercambiadores son fundamentales para el control térmico del proceso. Las fallas pueden provocar pérdida de eficiencia energética o mezclas indeseadas de corrientes.

Medidas de mitigación

- Monitoreo de presión diferencial.
- Limpieza periódica.
- Inspecciones durante paradas programadas.

12.2.7 Riesgos ambientales

La operación de la planta de producción de óxido de propileno puede generar impactos ambientales asociados a emisiones gaseosas, efluentes líquidos y generación de residuos industriales. La identificación y control de estos riesgos resulta fundamental para garantizar el cumplimiento de la normativa ambiental vigente y minimizar el impacto sobre el entorno.

12.2.7.1 Emisión de compuestos orgánicos volátiles (VOC)

Durante las etapas de reacción, separación y almacenamiento pueden generarse emisiones de compuestos orgánicos volátiles como:

- propileno
- óxido de propileno
- metanol

Estos compuestos pueden liberarse al ambiente a través de:

- venteos de equipos
- fugas en válvulas y conexiones
- operaciones de carga y descarga

Medidas de mitigación

- Instalación de sistemas de recuperación de vapores.
- Monitoreo continuo de emisiones.
- Mantenimiento preventivo de válvulas y sellos.
- Uso de sistemas de venteo controlado.

12.2.7.2 Contaminación de efluentes líquidos

El proceso puede generar efluentes que contienen:

- metanol
- trazas de peróxido de hidrógeno
- subproductos de reacción
- solventes orgánicos

Si estos efluentes no son tratados adecuadamente, podrían provocar contaminación de cursos de agua o suelos.

Medidas de mitigación

- Instalación de una planta de tratamiento de efluentes industriales.
- Neutralización química de corrientes reactivas.
- Separación de fases orgánicas.
- Monitoreo periódico de parámetros ambientales.

12.2.7.3 Derrames de sustancias químicas

Durante el almacenamiento o transporte interno de materias primas y productos pueden producirse derrames accidentales de sustancias como:

- peróxido de hidrógeno
- metanol
- óxido de propileno

Estos eventos pueden generar contaminación del suelo o infiltración en aguas subterráneas.

Medidas de mitigación

- Construcción de diques de contención en tanques de almacenamiento.
- Sistemas de drenaje industrial.
- Procedimientos de respuesta ante emergencias.
- Capacitación del personal.

12.2.7.4 Generación de residuos industriales

Durante la operación de la planta se generan distintos tipos de residuos:

- catalizadores agotados
- residuos de mantenimiento
- filtros contaminados
- lodos provenientes del tratamiento de efluentes

Estos residuos deben gestionarse adecuadamente para evitar impactos ambientales.

Medidas de mitigación

- Clasificación de residuos según normativa ambiental.
- Disposición final mediante operadores autorizados.
- Programas de minimización de residuos.
- Reciclaje o recuperación cuando sea posible.

12.3 Matriz de riesgos

A continuación, se presenta la matriz de riesgos correspondiente al proyecto de producción de óxido de propileno, donde se clasifican los principales riesgos identificados según su probabilidad de ocurrencia, su impacto sobre la operación de la planta y las medidas de mitigación propuestas.

| MATRIZ DE RIESGOS DEL PROYECTO | | | | |
|--------------------------------|---|--------------|-------------|---|
| Aspecto | Riesgo Identificado | Probabilidad | Importancia | Medida de Mitigación |
| Mecánico | Falla de equipos críticos (bombas, compresores) | Media | Alta | Plan de mantenimiento preventivo y monitoreo de vibraciones |
| Mecánico | Fallas estructurales en columnas o tanques | Baja | Alta | Instrucciones periódicas y control de corrosión |
| Mecánico | Fugas en tuberías de proceso | Media | Alta | Programa de inspección y pruebas de presión |
| Económico | Falta de disponibilidad de propileno | Media | Alta | Diversificación de proveedores y stock de seguridad |
| Económico | Variación del precio de materias primas | Baja | Media | Contratos de suministro a largo plazo |
| Económico | Variación de costos energéticos | Media | Media | Optimización energética y contratos de energía |
| Tecnológico | Falla del reactor principal | Baja | Alta | Sistema de control avanzado y mantenimiento preventivo |
| Tecnológico | Fallas en intercambiadores de calor | Baja | Media | Monitoreo de presión diferencial y limpieza programada |
| Tecnológico | Paradas del sistema de control | Baja | Alta | Sistema redundante de control e instrumentación |

| | | | | |
|-----------|---|-------|-------|---|
| Ambiental | Emisión de compuestos orgánicos volátiles | Media | Alta | Sistema de recuperación de vapores y monitoreo de emisiones |
| Ambiental | Contaminación de efluentes líquidos | Baja | Alta | Planta de tratamientos de efluentes |
| Ambiental | Derrames de sustancias químicas | Baja | Media | Diques de contención y procedimientos de emergencia |
| Ambiental | Generación de residuos peligrosos | Media | Media | Gestión adecuada de residuos industriales |

Tabla 12.1 Matriz de riesgos

Fuente Elaboración propia

CAPÍTULO XIII: EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO

13.1 Introducción

La evaluación económica constituye una etapa fundamental en el análisis de factibilidad de proyectos industriales, ya que permite determinar la viabilidad financiera de la instalación y operación de una planta productiva. En este capítulo se analizan los principales aspectos económicos asociados al proyecto de producción de óxido de propileno, considerando tanto las inversiones necesarias para la implementación de la planta como los costos de operación y los ingresos esperados a lo largo de la vida útil del proyecto.

En primer lugar, se establece la tasa de descuento utilizada para actualizar los flujos monetarios del proyecto. Posteriormente, se desarrolla la estructura de costos, donde se incluyen la inversión inicial requerida, el cronograma de inversiones, el capital de trabajo y los costos operativos, los cuales se clasifican en costos fijos y variables. A partir de estos elementos se determinan los costos totales de operación.

Asimismo, se realiza el análisis del punto de equilibrio, el cual permite identificar el nivel de producción necesario para cubrir la totalidad de los costos del proyecto. Luego se estiman los ingresos generados por la comercialización del producto, considerando el precio de venta y la capacidad productiva de la planta, lo que permite determinar la contribución marginal y la utilidad anual esperada.

Finalmente, mediante la construcción del flujo de caja del proyecto se evalúa la rentabilidad de la inversión utilizando indicadores financieros ampliamente empleados en la evaluación de proyectos, tales como el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR). Estos indicadores permiten determinar si el proyecto resulta económicamente viable bajo las condiciones planteadas.

13.2 Tasa de descuento

La tasa de descuento constituye un parámetro fundamental en la evaluación económica de proyectos, ya que permite determinar el valor presente de los flujos de fondos que se generarán en el futuro. Este concepto refleja el costo de oportunidad del capital invertido y el nivel de riesgo asociado al proyecto, permitiendo comparar valores monetarios correspondientes a distintos momentos del tiempo.

Para el análisis económico del presente proyecto se adopta el modelo CAPM (Capital Asset Pricing Model), ampliamente utilizado en la valoración de activos financieros y en la evaluación de inversiones. Este modelo permite estimar el rendimiento esperado de una inversión considerando el riesgo sistemático del proyecto en relación con el mercado.

La tasa de descuento se determina mediante la siguiente expresión:

$$r = Rf + (Rm - Rf) \cdot \beta + Rp \quad \text{Ec. 13. 1}$$

donde:

- r: tasa de descuento del proyecto.
- Rf (tasa libre de riesgo): corresponde al rendimiento de activos financieros considerados libres de riesgo. Generalmente se utiliza el rendimiento de los bonos del Tesoro de los Estados Unidos (T-Bonds) con un plazo similar a la vida útil del proyecto. Para un horizonte de evaluación de 10 años se adopta un valor de 5 %.
- Rm (rentabilidad del mercado): representa la rentabilidad promedio esperada del mercado accionario. Este valor refleja el rendimiento medio de inversiones diversificadas en la economía y se adopta un valor de 10 %.
- β (coeficiente beta): mide la sensibilidad del proyecto frente a las variaciones del mercado, es decir, el riesgo sistemático del sector industrial al cual pertenece. Para el sector de química básica se adopta un valor de $\beta = 1,15$, según valores de referencia reportados en bases de datos financieras especializadas.
- Rp (riesgo país): En el caso de Argentina, el riesgo país presenta una elevada volatilidad, registrando valores que en los últimos años han oscilado aproximadamente entre 600 y 1200 puntos básicos según el índice EMBI elaborado por J.P. Morgan. Con el fin de evitar distorsiones asociadas a valores puntuales del indicador, en el presente trabajo se adopta un valor promedio representativo de 750 puntos básicos, equivalente a 7,5 %, el cual será incorporado en el cálculo de la tasa de descuento del proyecto. (Damodaran, 2024)

A partir de estos valores se calcula la tasa de descuento correspondiente al proyecto, la cual será utilizada posteriormente para actualizar los flujos de caja y determinar los indicadores de rentabilidad del proyecto.

$$r = Rf + (Rm - Rf) \cdot \beta + Rp = 5 + (10 - 5) \cdot 1,15 + 7,5 = 18,25\%$$

A partir de los parámetros considerados y aplicando el modelo CAPM, se obtiene una tasa de descuento de 18,25 %. Este valor refleja el costo de oportunidad del capital para el proyecto, incorporando tanto el riesgo asociado al sector industrial como el riesgo propio de realizar inversiones en Argentina.

La tasa de descuento calculada será utilizada en las secciones posteriores para la actualización de los flujos de caja del proyecto y para la determinación de los indicadores de rentabilidad, tales como el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR).

13.3 Estructura de costos

La estructura de costos del proyecto comprende el conjunto de inversiones y gastos necesarios para la construcción, puesta en marcha y operación de la planta de producción de óxido de propileno. El análisis económico requiere identificar y clasificar los distintos componentes del costo con el fin de estimar adecuadamente la inversión requerida y los costos operativos asociados al proceso productivo. (Sapag Chain & Sapag Chain, 2013)

En primer lugar, se determina la inversión inicial, la cual incluye todos los costos necesarios para la instalación y puesta en marcha de la planta industrial. Posteriormente se consideran el capital de trabajo y los costos de operación, los cuales se dividen en costos fijos y costos variables. A partir de estos elementos se determinan los costos totales asociados al funcionamiento del proyecto.

13.3.1 Inversión inicial

La inversión inicial del proyecto corresponde al capital requerido para la construcción, instalación y puesta en marcha de la planta de producción de óxido de propileno antes del inicio de las operaciones productivas. Esta inversión incluye todos los recursos económicos necesarios para adquirir los bienes, desarrollar la infraestructura y realizar las actividades técnicas que permitan el funcionamiento de la planta industrial.

Con el fin de facilitar su análisis y estimación, la inversión inicial se clasifica en activos tangibles y activos intangibles.

Los activos tangibles corresponden a aquellos bienes físicos necesarios para la operación de la planta. Dentro de esta categoría se incluyen principalmente los equipos de proceso, tales como reactores, columnas de separación, intercambiadores de calor, bombas y tanques de almacenamiento, así como las instalaciones necesarias para su funcionamiento. También forman parte de los activos tangibles las obras civiles, estructuras, instalaciones eléctricas, sistemas de cañerías, instrumentación y demás elementos de infraestructura industrial. El terreno se clasifica como un activo tangible dentro de los activos fijos del proyecto. A diferencia de otros activos físicos de la planta, este bien no se considera depreciable, dado que no sufre desgaste asociado al proceso productivo.

Por otra parte, los activos intangibles comprenden aquellos gastos asociados al desarrollo, planificación y puesta en marcha del proyecto que no se materializan en bienes físicos, pero que resultan indispensables para su implementación. Entre estos se incluyen los costos de ingeniería y diseño, estudios técnicos, gastos de organización del proyecto, permisos, licencias, capacitación del personal y gastos de puesta en marcha. (Urbina, 2013)

La correcta estimación de estos componentes permite determinar la inversión necesaria para la implementación del proyecto y constituye la base para el análisis económico que se desarrollará en las secciones posteriores.

13.3.1.1 Activos tangibles

Terreno

Como resultado del estudio de localización desarrollado en capítulos anteriores, se determinó que la zona más adecuada para la instalación de la planta corresponde al área industrial de Ensenada, en la provincia de Buenos Aires. Esta localización presenta ventajas estratégicas vinculadas a la disponibilidad de infraestructura industrial, accesibilidad a servicios logísticos y proximidad a polos petroquímicos de relevancia.

Como resultado de este relevamiento, se identificó un lote con una superficie total de 81.246 m², el cual resulta adecuado para la implantación de la planta y para futuras expansiones operativas.

El valor de adquisición del terreno se estima en 2.800.000 USD, monto que se considera dentro de la inversión inicial del proyecto y que corresponde a un activo tangible no depreciable, dado que el terreno no sufre desgaste asociado al proceso productivo.

| Terreno | | |
|----------------|---------|-----|
| Costo por m2 | 34,46 | USD |
| m2 | 81246 | m2 |
| Subtotal | 2800000 | USD |
| % Tramites | 3 | % |
| Costo trámites | 84000 | USD |
| Costo Total | 2884000 | USD |

Tabla 13.1 Inversión inicial - Terrenos

Edificios e instalaciones

El costo asociado a los edificios e instalaciones edilicias de la planta se estimó a partir de valores típicos de construcción por unidad de superficie. Este método es ampliamente utilizado en evaluaciones preliminares de proyectos industriales cuando no se dispone de un diseño arquitectónico detallado.

Para el presente proyecto se consideró un costo promedio de 400 USD/m² para edificios cerrados que requieren infraestructura completa, incluyendo materiales, mano de obra, instalaciones eléctricas y terminaciones básicas. En el caso de estructuras únicamente techadas, tales como áreas de almacenamiento o sectores operativos cubiertos, se adoptó un costo estimado de 250 USD/m².

A partir de estos valores se estimó el costo de las distintas instalaciones edilicias de la planta, considerando la superficie requerida para cada una de ellas. La distribución de superficies adoptada se presenta en la siguiente tabla.

| Edificios e Instalaciones | | | | |
|------------------------------|---|-----------------|---------------------------|-----------------|
| Área | Subárea | Superficie (m2) | Precio Unitario (U\$D/m2) | Costo total USD |
| Ingreso a Planta | Área de recepción y control de accesos | 35 | 200 | 7000 |
| Área de Carga y Descarga | Ingreso de materias primas | 150 | 250 | 37500 |
| Área de Carga y Descarga | Egreso de producto | 120 | 250 | 30000 |
| Área de Carga y Descarga | Oficina de control de carga y descarga | 30 | 400 | 12000 |
| Área de Almacenamiento | Tanques de almacenamiento de materias primas | 700 | 250 | 175000 |
| Área de Almacenamiento | Sistema de recepción/regulación de propileno | 220 | 250 | 55000 |
| Área de Almacenamiento | Área de seguridad, contención y pasillos técnicos | 140 | 250 | 35000 |
| Área de Almacenamiento | Tanques de almacenamiento | 560 | 250 | 140000 |
| Área de Producción y Control | Área de producción (reactores, columnas, etc.) | 620 | 450 | 279000 |
| Área de Producción y Control | Sala de control | 45 | 400 | 18000 |
| Área de Producción y Control | Área de servicios auxiliares | 335 | 400 | 134000 |
| Área de Producción y Control | Área de mantenimiento | 90 | 400 | 36000 |
| Área de Producción y Control | Laboratorio de control de calidad | 60 | 400 | 24000 |
| Administración | Área administrativa | 150 | 400 | 60000 |
| Edificios Auxiliares | Comedor | 120 | 350 | 42000 |
| Edificios Auxiliares | Vestuarios y sanitarios principales | 110 | 350 | 38500 |
| Edificios Auxiliares | Núcleo sanitario secundario | 35 | 350 | 12250 |
| Edificios Auxiliares | Playa de estacionamiento | 90 | 100 | 9000 |
| Edificios Auxiliares | Área de seguridad y emergencias | 50 | 350 | 17500 |
| Costo Total USD | | | | 1161750 |

Tabla 13.2 Inversión inicial - Edificios e instalaciones

Fuente: Elaboración propia

Maquinaria y Equipos

Dentro de los activos tangibles del proyecto, la maquinaria y equipos de proceso constituyen el componente de mayor relevancia económica, ya que representan la base física sobre la cual se desarrolla la producción de óxido de propileno.

Este grupo incluye los principales equipos involucrados en el proceso, tales como reactores, columnas de destilación, intercambiadores de calor, bombas, compresores y tanques de almacenamiento, así como los equipos auxiliares necesarios para garantizar el funcionamiento continuo de la planta.

Para la estimación del costo asociado a la instalación de los equipos de proceso se emplea un enfoque basado en factores, derivado del método de Lang. A diferencia del método completo, en el presente trabajo se utiliza un factor parcial, considerando que los costos correspondientes a terreno y edificaciones han sido estimados de manera independiente.

Este factor permite incorporar los costos asociados a la instalación de los equipos principales, incluyendo sistemas de cañerías, instrumentación, instalaciones eléctricas y montaje.

En función de la complejidad del proceso productivo, correspondiente a una planta petroquímica con operaciones de reacción y separación, se adopta un valor de 1,8 como factor de instalación.

De esta manera, el costo total instalado de los equipos se calcula como:

$$C_{\text{instalado}} = 1,8 \cdot C_{\text{equipos}}$$

Ec. 13.2

Este valor resulta consistente con los rangos típicos reportados en la bibliografía para plantas de procesos químicos complejos.

| Maquinaria y Equipos | | | | |
|---|----------|-----------------------|-------------------|-----------------------|
| ITEM | Cantidad | Precio Unitario (USD) | Costo Total (USD) | Costo Instalado (USD) |
| Columna de Stripping | 2 | 3000000 | 6000000 | 10800000 |
| Reactor R-03 | 1 | 80000 | 80000 | 144000 |
| Columna de destilación | 4 | 45000 | 180000 | 324000 |
| Evaporador Flash | 2 | 18000 | 36000 | 64800 |
| Compresores | 2 | 28000 | 56000 | 100800 |
| Columna de absorción | 1 | 25000 | 25000 | 45000 |
| Condensador C-26 y C-38 | 2 | 18000 | 36000 | 64800 |
| Intercambiador IC-10 | 1 | 12000 | 12000 | 21600 |
| Condensador C-29 | 1 | 13000 | 13000 | 23400 |
| Reboiler IC-14 | 1 | 16000 | 16000 | 28800 |
| Reboiler IC-17 | 1 | 20000 | 20000 | 36000 |
| Condensador C-50 | 1 | 35000 | 35000 | 63000 |
| Condensador C-73 | 1 | 40000 | 40000 | 72000 |
| Condensador C-72 | 1 | 15000 | 15000 | 27000 |
| Reboiler IC-68 | 1 | 32000 | 32000 | 57600 |
| Reboiler IC-70 | 1 | 17000 | 17000 | 30600 |
| Reboiler IC-71 | 1 | 30000 | 30000 | 54000 |
| Intercambiador iónico | 1 | 25000 | 25000 | 45000 |
| T. Almacenamiento Propileno | 1 | 500000 | 500000 | 900000 |
| T. Almacenamiento Metanol | 2 | 200000 | 400000 | 720000 |
| Tanque Almacenamiento H ₂ O ₂ | 2 | 100000 | 200000 | 360000 |
| Tanque Almacenamiento PO | 2 | 400000 | 800000 | 1440000 |
| COSTO TOTAL (USD) | | | | \$ 15.422.400 |

Tabla 13.3 Inversión inicial - Equipos y maquinaria

Rodados

Dentro de los activos tangibles del proyecto se consideran los rodados, los cuales comprenden los vehículos necesarios para el desarrollo de las actividades operativas, logísticas y administrativas de la planta de producción de óxido de propileno.

Estos vehículos permiten el transporte interno de materiales, el movimiento de insumos dentro del predio industrial, así como también tareas de mantenimiento, supervisión y gestión operativa. Asimismo, pueden ser utilizados para actividades logísticas externas, tales como el traslado de personal o gestiones administrativas.

Para el presente proyecto se contempla la adquisición de una flota básica de vehículos, adecuada a las necesidades operativas de la planta.

| Rodados | | | |
|-----------------------------|-----------------|------------------------------|--------------------------|
| ITEM | Cantidad | Precio Unitario (USD) | Costo Total (USD) |
| Camioneta Utilitaria | 1 | 30000 | 30000 |
| Auto Elevador | 2 | 25000 | 50000 |
| Costos Totales(USD) | | | 80000 |

Tabla 13.4 Inversión inicial - Rodados

Fuente: Elaboración propia

Muebles y útiles

Dentro de los activos tangibles del proyecto se incluyen los muebles y útiles, los cuales comprenden el equipamiento necesario para el funcionamiento de las áreas administrativas, de control y de soporte de la planta de producción de óxido de propileno.

Estos elementos permiten el desarrollo de las actividades operativas no directamente vinculadas al proceso productivo, tales como tareas administrativas, gestión técnica, supervisión y control del proceso.

Entre los principales componentes se consideran escritorios, sillas, armarios, equipos informáticos, mobiliario de oficina y equipamiento básico para salas de control y laboratorios.

| Muebles y Utiles | | | |
|-------------------------------------|-----------------|-----------------------------|--------------------------|
| ITEM | Cantidad | Costo unitario (USD) | Costo total (USD) |
| Escritorios | 10 | 300 | 3000 |
| Sillas | 15 | 150 | 2250 |
| Computadoras | 10 | 800 | 8000 |
| Armarios | 5 | 400 | 2000 |
| Equipamiento sala de control | 1 | 10000 | 10000 |
| Mobiliario laboratorio | 1 | 8000 | 8000 |
| Total muebles y útiles (USD) | | | 33250 |

Tabla 13.5 Inversión inicial - Muebles y útiles

13.3.1.2 Activos intangibles

Los activos intangibles comprenden aquellos costos necesarios para el desarrollo, implementación y puesta en marcha del proyecto que no se materializan en bienes físicos, pero que resultan fundamentales para el correcto funcionamiento de la planta de producción de óxido de propileno.

Estos activos incluyen principalmente los gastos asociados a la ingeniería del proyecto, estudios técnicos, organización, permisos legales y actividades previas al inicio de la operación. Si bien no forman parte de la infraestructura física de la planta, su consideración es esencial dentro de la inversión inicial, ya que representan erogaciones necesarias para viabilizar el proyecto.

El monto total de estos cargos se calcula como un porcentaje de las inversiones previamente estimadas. A continuación, se detallan los conceptos considerados:

- Planeamiento e integración del proyecto: Se estima en un 0,3% del total invertido en activos fijos.
- Ingeniería del proyecto: Representa el 0,35% del costo total de los equipos de planta.
- Supervisión del proyecto: Se considera un 0,15% de la inversión total en activos fijos.
- Constitución de la empresa: Este trámite legal tiene un costo estimado de USD 4.500.
- Administración del proyecto: Se calcula como el 0,5% del valor de los activos fijos.
- Puesta en marcha de los equipos: Tiene un costo equivalente al 2% del valor total de los equipos de planta.

Estas estimaciones permiten anticipar correctamente los gastos asociados al desarrollo y la ejecución inicial del proyecto.

| Costos diferidos | | |
|---|----------|----------------------|
| ITEM | % | Costo (USD) |
| Planamiento e integración del proyecto | 0,3 | \$ 58.744 |
| Ingeniería del proyecto | 0,35 | \$ 68.535 |
| Supervision del proyecto | 0,15 | \$ 29.372 |
| Constitucion de la empresa | | \$ 4.500 |
| Administracion del Proyecto | 0,5 | \$ 97.907 |
| Puesta en marcha de los equipos | 2 | \$ 391.628 |
| Costos Totales | | \$ 650.686,20 |

Tabla 13.6 Inversión inicial - Costos diferidos

14.3.1.3 Inversión inicial total

La inversión necesaria para llevar a cabo un proyecto de esta envergadura corresponde a la suma de los costos de los activos tangibles y intangibles. Esta combinación da como resultado una inversión total estimada como se presenta a continuación.

| Inversion Necesaria | |
|---|----------------------|
| Inversion total en Activos Tangibles (USD) | \$ 19.581.400 |
| Inversion total en Activos Intangibles (USD) | \$ 650.686 |
| Inversión Total (USD) | \$ 20.232.086 |

Tabla 13.7 Inversión inicial total

13.3.2 Cronograma de inversiones

El cronograma de inversiones establece la distribución temporal de los desembolsos necesarios para la implementación del proyecto de producción de óxido de propileno.

En el presente estudio se considera un período de construcción de un año previo al inicio de la operación, durante el cual se llevan a cabo las actividades de ingeniería, adquisición de equipos, construcción, instalación y puesta en marcha de la planta.

Dado que estas actividades no se desarrollan de manera simultánea ni uniforme a lo largo del tiempo, la inversión total se distribuye dentro de dicho período con el fin de representar de manera más realista la ejecución del proyecto.

Dentro de este período, se considera el siguiente esquema de ejecución:

- Construcción e instalaciones: Se ejecutará durante los primeros seis meses, en desembolsos mensuales iguales, para asegurar la disponibilidad de las áreas críticas de producción, almacenamiento y servicios auxiliares en los tiempos previstos.
- Costos diferidos: Serán asumidos mayoritariamente en el primer mes, con excepción del costo correspondiente a la puesta en marcha de equipos, que se ejecutará en el último mes, al momento de iniciar las pruebas y calibraciones necesarias.
- Adquisición de equipos de planta: Está prevista para los últimos seis meses del año (meses 7 al 12). La compra se realizará en partes iguales mensualmente, lo que permite escalonar los pagos y organizar la logística de recepción, instalación y pruebas.
- Muebles, útiles y rodados: Estos bienes, que no requieren plazos prolongados de instalación ni montaje, se incorporarán en el último mes del año, justo antes del inicio de operaciones, para reducir costos de almacenamiento y optimizar su vida útil.

Debido a que las inversiones se efectúan en distintos momentos del año, para su análisis económico-financiero se procederá a la actualización al momento cero del proyecto, aplicando las tasas de descuento correspondientes a cada mes.

El primer paso para realizar este cálculo es determinar la tasa equivalente mensual a la tasa de descuento anual calculada para este proyecto.

$$im = (1 + r)^{1/12} - 1 = (1 + 0,1825)^{1/12} - 1 = 0,014067 \text{ o } 1,4067 \% \text{ mensual} \quad \text{Ec. 13.3}$$

Con la tasa mensual equivalente determinada, se procede a actualizar las inversiones programadas en cada mes del cronograma. De este modo, es posible calcular el valor presente de la inversión total al momento cero del proyecto, considerando el momento específico en que se realiza cada desembolso.

| Cronograma de inversiones | | Mes | | | | | | |
|--------------------------------|----------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| ITEM | Costos (USD) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Terreno | -\$ 2.884.000 | -\$ 2.884.000 | | | | | | |
| Edificio e Instalaciones | -\$ 1.161.750 | | -\$ 193.625 | -\$ 193.625 | -\$ 193.625 | -\$ 193.625 | -\$ 193.625 | -\$ 193.625 |
| Maquinaria y Equipos | -\$ 15.422.400 | | | | | | | |
| Rodados | -\$ 80.000 | | | | | | | |
| Muebles y Utiles | -\$ 33.250 | | | | | | | |
| Costos Diferidos | -\$ 259.058 | -\$ 259.058 | | | | | | |
| Puesta en Marcha | -\$ 391.628 | | | | | | | |
| Total mensual | | -\$ 3.143.058 | -\$ 193.625 | -\$ 193.625 | -\$ 193.625 | -\$ 193.625 | -\$ 193.625 | -\$ 193.625 |
| Valor Actualizado | | -\$ 3.143.058 | -\$ 190.939 | -\$ 188.290 | -\$ 185.678 | -\$ 183.103 | -\$ 180.563 | -\$ 178.058 |
| INVERSION INICIAL (USD) | | -\$ 18.186.245 | | | | | | |

| Mes | | | | | |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| | | | | | |
| -\$ 2.570.400 | -\$ 2.570.400 | -\$ 2.570.400 | -\$ 2.570.400 | -\$ 2.570.400 | -\$ 2.570.400 |
| | | | | | -\$ 80.000 |
| | | | | | -\$ 33.250 |
| | | | | | -\$ 391.628 |
| -\$ 2.570.400 | -\$ 2.570.400 | -\$ 2.570.400 | -\$ 2.570.400 | -\$ 2.570.400 | -\$ 3.075.278 |
| -\$ 2.330.956 | -\$ 2.298.622 | -\$ 2.266.736 | -\$ 2.235.292 | -\$ 2.204.284 | -\$ 2.600.666 |
| | | | | | |

Tabla 13.8 Cronograma de inversiones

Fuente: Elaboración propia

La diferencia entre la inversión nominal total y la inversión actualizada se debe a la aplicación del valor del dinero en el tiempo, considerando que los desembolsos se realizan de manera distribuida durante el período de construcción. En consecuencia, los flujos futuros son descontados a valor presente, resultando en un monto total inferior al valor nominal inicialmente estimado.

13.3.3 Capital de trabajo

El capital de trabajo representa los recursos financieros necesarios para asegurar el funcionamiento continuo de la planta durante sus etapas iniciales de operación. Este incluye los fondos requeridos para cubrir los costos operativos hasta que el proyecto comience a generar ingresos suficientes que permitan sostener su propia actividad.

En proyectos industriales, como el presente caso de producción de óxido de propileno, el capital de trabajo contempla principalmente la adquisición de materias primas, el pago de servicios, mano de obra, y otros costos operativos, considerando además los desfases temporales entre egresos e ingresos.

Para su estimación, se adopta el criterio de cubrir un determinado período de operación sin ingresos, el cual depende de las condiciones del mercado, los plazos de cobro y pago, y la dinámica del proceso productivo.

Existen diversos métodos para la estimación del capital de trabajo en proyectos industriales, entre los que se destacan el método del déficit acumulado máximo y el método del período de desfase. El primero resulta más adecuado para proyectos con marcada estacionalidad en sus

ingresos y egresos, mientras que el segundo se aplica comúnmente en procesos productivos continuos con ciclos operativos regulares.

En el presente proyecto, correspondiente a la producción de óxido de propileno, se opta por la utilización del método del período de desfase, dado que la planta operará bajo un régimen continuo y con un flujo relativamente estable de producción y comercialización.

Este método permite estimar el capital de trabajo necesario en función del tiempo que transcurre entre el pago de los costos operativos y la recuperación de los ingresos por ventas. Si bien presenta un carácter conservador, al no considerar explícitamente los ingresos generados dentro del período de desfase, resulta adecuado para garantizar la disponibilidad de fondos suficientes durante la etapa inicial de operación.

El capital de trabajo se determina entonces como:

$$ICT = \frac{CE}{340 \text{ días}} * nd \quad \text{Ec 13.4}$$

Donde:

- ICT: Inversión en capital de trabajo
- CE: Costos erogables anuales
- nd: número de días de desfase entre la ocurrencia de los egresos y la generación de ingresos.
- Y los 340 días, son los días laborales considerados por el proyecto.

Para el presente estudio, se adopta un período de desfase de 90 días, valor representativo para la industria petroquímica, considerando plazos de aprovisionamiento de materias primas, tiempos de procesamiento, almacenamiento y comercialización del producto final.

$$ICT = \frac{24.777.391 \frac{USD}{año}}{340 \text{ días}} * 90 \text{ días} = 6.558.721 \frac{USD}{año}$$

13.3.4 Costos fijos

13.3.4.1 Depreciaciones y amortizaciones

Dentro de los costos fijos del proyecto se incluyen las depreciaciones y amortizaciones, las cuales representan la pérdida de valor de los activos a lo largo del tiempo como consecuencia de su uso, obsolescencia o vencimiento de su vida útil.

Las depreciaciones corresponden a los activos tangibles, tales como maquinaria, equipos, edificios e instalaciones, mientras que las amortizaciones se aplican a los activos intangibles, como estudios de ingeniería, licencias y gastos preoperativos.

Para el presente proyecto, se adopta el método de **depreciación lineal**, el cual distribuye el valor del activo en partes iguales a lo largo de su vida útil. Este método es ampliamente utilizado en evaluaciones económicas debido a su simplicidad y consistencia.

| Depreciaciones | | | | | |
|---------------------------|---------------|------------------|------------------------------|----------------------------------|----------------------|
| ITEM | Valor (USD) | Vida útil (años) | Depreciacion Anual (USD/año) | Depreciacion Total (USD/10 años) | Valor residual (USD) |
| Edificios e instalaciones | \$ 1.161.750 | 25 | \$ 46.470 | \$ 464.700 | \$ 697.050 |
| Equipos y maquinarias | \$ 15.422.400 | 10 | \$ 1.542.240 | \$ 15.422.400 | \$ - |
| Rodados | \$ 80.000 | 5 | \$ 16.000 | \$ 160.000 | \$ - |
| Muebles y Otros | \$ 33.250 | 3 | \$ 11.083 | \$ 110.833 | \$ - |
| Total | \$ 16.697.400 | | \$ 1.615.793 | \$ 16.157.933 | \$ 697.050 |

Tabla. 13.9 Depreciaciones

| Amortizaciones | | | | | |
|------------------|-------------|------------------|------------------------------|--------------------------------|----------------------|
| ITEM | Valor (USD) | Vida útil (años) | Amortización Anual (USD/año) | Amortización Total (USD/3años) | Valor residual (USD) |
| Costos diferidos | \$ 650.686 | 3 | \$ 216.895 | \$ 2.168.954 | \$ - |
| Total | \$ 650.686 | | \$ 216.895 | \$ 2.168.954 | \$ - |

Amortizaciones y depreciaciones \$ 1.832.689

Tabla 13.10 Amortizaciones

13.3.4.2 Costos de mano de obra fija

Dentro de los costos fijos de operación se incluyen los costos asociados a la mano de obra necesaria para el funcionamiento de la planta. Estos comprenden tanto el personal directamente involucrado en el proceso productivo como el personal de apoyo técnico, administrativo y de servicios generales.

En el CAPÍTULO VII - “Ingeniería de Gestión” se presentó un análisis del organigrama de la empresa. Partiendo de esta información se determina cuáles son las funciones que componen la mano de obra permanente.

Los costos de mano de obra se estimaron en base a las escalas salariales correspondientes al Convenio Colectivo de Trabajo N.º 564/09 para la industria química y petroquímica, considerando valores actualizados de mercado.

A los salarios básicos se les adiciona un porcentaje correspondiente a cargas sociales y beneficios, estimado en un 60 %, de acuerdo con las condiciones laborales vigentes.

| Cargo | Categoría CCT 564/09 | Cantidad de puestos | Sueldo Básico (USD) | Extras (aguinaldo, obra social, jubilacion, etc) | Sueldo Bruto (USD) | Sueldo Total Anual (USD) |
|--|----------------------|---------------------|---------------------|--|--------------------|--------------------------|
| Operador de Planta | Categoría B | 3 | \$ 1.000 | \$ 600 | \$ 1.600 | \$ 57.600 |
| Operador Senior / Panelista | Categoría A | 2 | \$ 1.200 | \$ 720 | \$ 1.920 | \$ 46.080 |
| Jefe de Producción | Categoría A1 | 1 | \$ 1.550 | \$ 930 | \$ 2.480 | \$ 29.760 |
| Laboratorista | Categoría B | 1 | \$ 1.000 | \$ 600 | \$ 1.600 | \$ 19.200 |
| Responsable de Mantenimiento | Categoría A | 1 | \$ 1.800 | \$ 1.080 | \$ 2.880 | \$ 34.560 |
| Técnico de Mantenimiento | Categoría B | 1 | \$ 1.000 | \$ 600 | \$ 1.600 | \$ 19.200 |
| Gerente General | Fuera de CCT | 1 | \$ 2.500 | \$ 1.500 | \$ 4.000 | \$ 48.000 |
| Gerente de operaciones | Fuera de CCT | 1 | \$ 2.000 | \$ 1.200 | \$ 3.200 | \$ 38.400 |
| Responsable de Compras | Fuera de CCT | 1 | \$ 1.900 | \$ 1.140 | \$ 3.040 | \$ 36.480 |
| Responsable de Administración y Finanzas | Fuera de CCT | 1 | \$ 1.900 | \$ 1.140 | \$ 3.040 | \$ 36.480 |
| Contador | Fuera de CCT | 1 | \$ 1.000 | \$ 600 | \$ 1.600 | \$ 19.200 |
| Responsable de SSMA | Fuera de CCT | 1 | \$ 1.500 | \$ 900 | \$ 2.400 | \$ 28.800 |
| Asesor Legal | Fuera de CCT | 1 | \$ 1.000 | \$ 600 | \$ 1.600 | \$ 19.200 |
| Técnico Ambiental | Categoría A | 1 | \$ 1.000 | \$ 600 | \$ 1.600 | \$ 19.200 |
| TOTAL | | | | | | \$ 452.160 |

Tabla 13.11 Costos mano de obra

13.3.4.3 Costos de servicios

Los costos de servicios incluyen los gastos asociados al suministro de utilidades necesarias para el funcionamiento de la planta. Si bien estos costos dependen en gran medida del nivel de producción, existe un consumo mínimo requerido para mantener la planta en condiciones operativas, independientemente del régimen de producción.

Este consumo base incluye servicios tales como energía eléctrica para sistemas auxiliares, iluminación, instrumentación, aire comprimido y otros requerimientos operativos permanentes. En el presente estudio, se considera una fracción de los costos de servicios como costos fijos, correspondiente al consumo mínimo necesario para garantizar la operatividad de la planta.

| Costos fijos por servicios | |
|---------------------------------|-------------------|
| Servicios | Costo Anual (USD) |
| Telefonos e Internet | \$ 2.500 |
| Limpieza | \$ 10.000 |
| Seguridad | \$ 20.000 |
| Recursos Humanos | \$ 25.000 |
| Atención médica | \$ 50.000 |
| Comedor | \$ 10.000 |
| Gas Natural | \$ 2.000 |
| Agua/red de incendio/Matafuegos | \$ 5.000 |
| Transporte | \$ 9.000 |
| TOTAL | \$ 133.500 |

Tabla 13.12 Costos fijos de servicios

13.3.4.4 Resumen de costos fijos

A continuación, se evaluarán los resultados obtenidos de los Costos Fijos.

| COSTOS FIJOS TOTALES | | |
|---------------------------------|---------------------|-------------|
| Item | Costo Anual (USD) | Incidencia |
| Depreciaciones y Amortizaciones | \$ 1.832.689 | 76% |
| Costos fijos de mano de obra | \$ 452.160 | 19% |
| Costos fijos de servicios | \$ 133.500 | 6% |
| Costo fijo Total | \$ 2.418.349 | 100% |

Tabla 13.13 Costos fijos

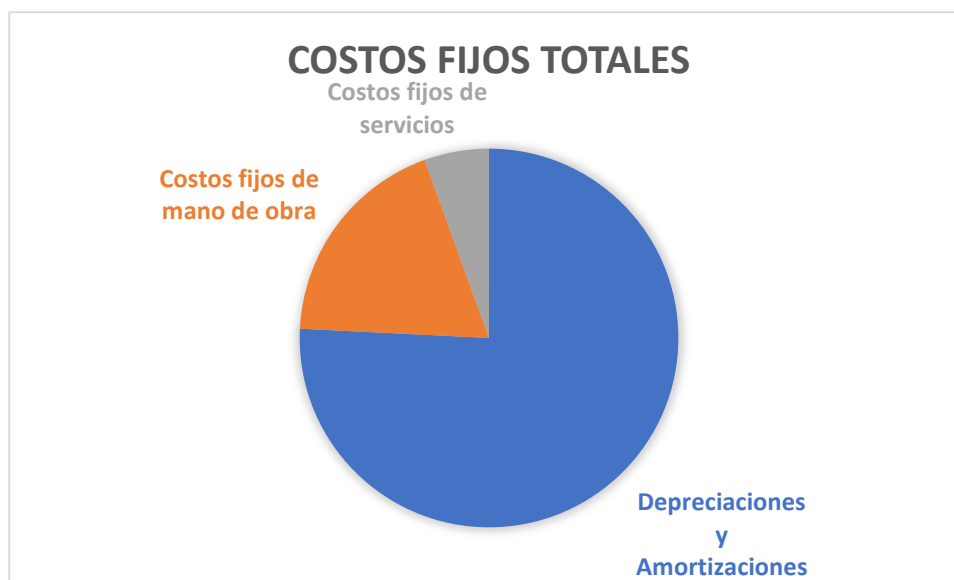


Fig. 13.1 Costos fijos

13.3.5 Costos variables

13.3.5.1 Costos de materia prima

Las materias primas constituyen el principal componente de los costos variables del proyecto, dado que su consumo está directamente relacionado con el nivel de producción de la planta de óxido de propileno.

En el presente proceso productivo, las materias primas incluyen los insumos necesarios para llevar a cabo la reacción química y las etapas posteriores de separación y purificación del producto. Su consumo se determina a partir de los balances de materia desarrollados en el capítulo de ingeniería del proyecto.

El costo asociado a las materias primas se calcula en función de los caudales requeridos y de los precios de mercado correspondientes, expresándose en términos de costo anual de operación.

| Costos Materias Primas | | | |
|-----------------------------|-----------------|----------------|-------------------------|
| MP o insumo | Cantidad(t/año) | Precio (USD/t) | Costo Anual(USD/año) |
| Propileno | 16730,36 | 800 | \$ 13.384.288,00 |
| Peróxido de hidrógeno (70%) | 19298,16 | 450 | \$ 8.684.169,84 |
| Metanol | 345,98 | 320 | \$ 110.713,60 |
| Catalizador TS-1 | 2 | 50000 | \$ 100.000,00 |
| TOTAL | | | \$ 22.279.171,44 |

Tabla 13.14 Costos materia prima

El costo del peróxido de hidrógeno al 70% se estimó en base a valores de mercado internacional y referencias de importación para uso industrial.

Diversas fuentes reportan valores comprendidos entre US\$ 300 y US\$ 800 por tonelada, dependiendo de la concentración, condiciones logísticas y escala de compra. En particular, estudios técnicos indican valores cercanos a US\$ 327/t para producto al 70% con costos logísticos incluidos.

Considerando la importación desde Brasil, el nivel de concentración requerido (70%) y condiciones de suministro industrial continuo, se adopta un valor representativo de: 450 USD/t. Este valor resulta consistente con condiciones de mercado regional y permite una estimación conservadora de los costos de materia prima.

13.3.5.2 Costos de servicios

Los costos variables de servicios comprenden los gastos asociados al consumo de utilidades directamente vinculadas al nivel de producción de la planta de óxido de propileno. A diferencia de los costos fijos de servicios, estos dependen del régimen operativo y varían proporcionalmente con la cantidad producida.

Entre los principales servicios considerados se encuentran la energía eléctrica, el vapor, el agua de enfriamiento, el agua de proceso y el aire comprimido. Estos insumos resultan indispensables para las operaciones de reacción, separación, transferencia de calor y control del proceso.

| Costos Servicios | | | |
|-------------------|-------------------|--------------|------------------------|
| Servicio | Consumo | Precio | Costo Anual(USD/año) |
| Energía Eléctrica | 4.600.000 kWh/año | 0,13 USD/kWh | \$ 598.000,00 |
| Gas Natural | 4.960.000 m3/año | 0,2 USD/m3 | \$ 992.000,00 |
| Agua | 360.000 m3/año | 0,08 USD/m3 | \$ 28.800,00 |
| TOTAL | | | \$ 1.618.800,00 |

Tabla 13.15 Costos de servicios

El consumo de servicios fue determinado a partir de los balances de energía desarrollados en el capítulo de ingeniería, considerando los requerimientos térmicos de los equipos de proceso. En particular, el consumo de gas natural se estimó a partir de la demanda total de vapor requerida por los reboilers del sistema, mientras que el consumo de agua de enfriamiento se obtuvo a partir de los deberes térmicos de los condensadores principales.

13.3.5.3 Costo de mano de obra variable

Entran en esta clasificación todas aquellas funciones incluidas en el organigrama de la empresa y que no se hayan considerado anteriormente dentro de los costos fijos de mano de obra, estas son los operarios.

| Mano de obra variable | | | | | | |
|-----------------------------|----------------------|---------------------|---------------------|--|--------------------|--------------------------|
| Cargo | Categoría CCT 564/09 | Cantidad de puestos | Sueldo Básico (USD) | Extras (aguinaldo, obra social, jubilacion, etc) | Sueldo Bruto (USD) | Sueldo Total Anual (USD) |
| Operador de Planta | Categoría B | 9 | \$ 1.000 | \$ 600 | \$ 1.600 | \$ 172.800 |
| Operador Senior / Panelista | Categoría A | 1 | \$ 1.200 | \$ 720 | \$ 1.920 | \$ 23.040 |
| Jefe de Producción | Categoría A1 | 2 | \$ 1.550 | \$ 930 | \$ 2.480 | \$ 59.520 |
| Tec. De Mantenimiento | Categoría B | 2 | \$ 1.000 | \$ 600 | \$ 1.600 | \$ 38.400 |
| Total | | | | | | \$ 293.760 |

Tabla 13.16: Costos Servicios

13.3.5.4 Costo variable unitario

El costo variable unitario es el resultado de la relación entre el total de costos variables en los que incurre la organización para llevar a cabo un determinado plan de producción y la cantidad de unidades que incluye dicho plan de producción.

$$CVU = \frac{CVT}{Q} = \frac{24.191.731 \text{ USD/año}}{23000 \frac{\text{tn}}{\text{año}}} = 1051,81 \text{ USD/tn} \quad \text{Ec. 13.5}$$

13.3.5.5 Resumen de costos variables

En esta sección se evaluarán los resultados obtenidos sobre Costos Variables.

| COSTOS VARIABLES TOTALES | | |
|-----------------------------|----------------------|-------------|
| Item | Costo Anual (USD) | Incidencia |
| Materia Prima | \$ 22.279.171 | 92% |
| Servicios | \$ 1.618.800 | 7% |
| Mano de obra | \$ 293.760 | 1% |
| Costo Variable Total | \$ 24.191.731 | 100% |

Tabla 13.17 Costos variables

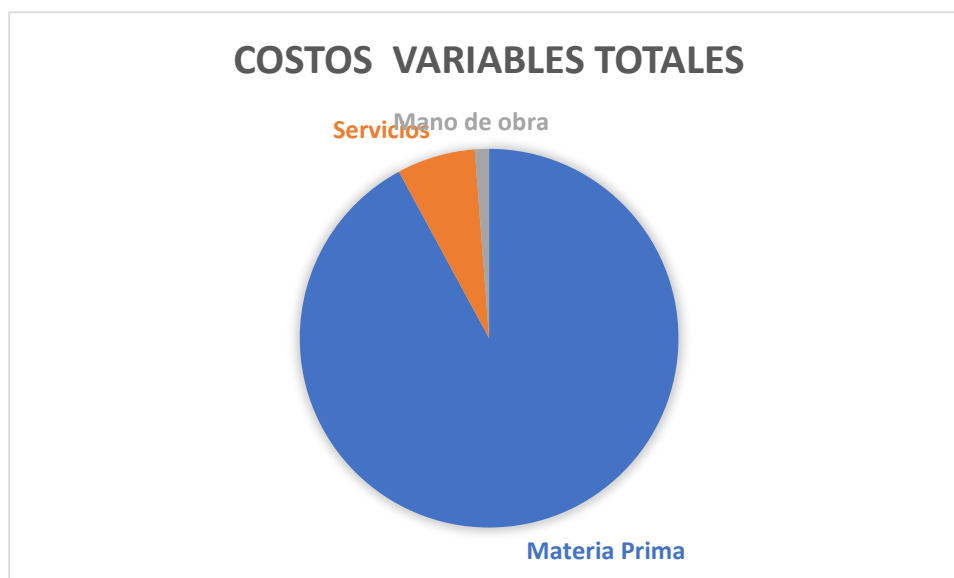


Fig. 13.2 Costos variables

Fuente: Elaboración propia

13.3.6 Costos totales

Los costos totales del proyecto resultan de la suma de los costos fijos y los costos variables asociados a la operación de la planta de producción de óxido de propileno.

La correcta identificación y cuantificación de estos costos permite evaluar la viabilidad económica del proyecto y constituye la base para el análisis de rentabilidad.

| COSTOS VARIABLES TOTALES | |
|---------------------------------|----------------------|
| Item | Costo Anual (USD) |
| Materia Prima | \$ 22.279.171 |
| Servicios | \$ 1.618.800 |
| Mano de obra | \$ 293.760 |
| Costo Variable Total | \$ 24.191.731 |
| COSTOS FIJOS TOTALES | |
| Depreciaciones y Amortizaciones | \$ 1.832.689 |
| Costos fijos de mano de obra | \$ 452.160 |
| Costos fijos de servicios | \$ 133.500 |
| Costo fijo Total | \$ 2.418.349 |
| COSTO TOTAL | \$ 26.610.080 |

Tabla 13.18 Costos totales

Fuente: Elaboración propia

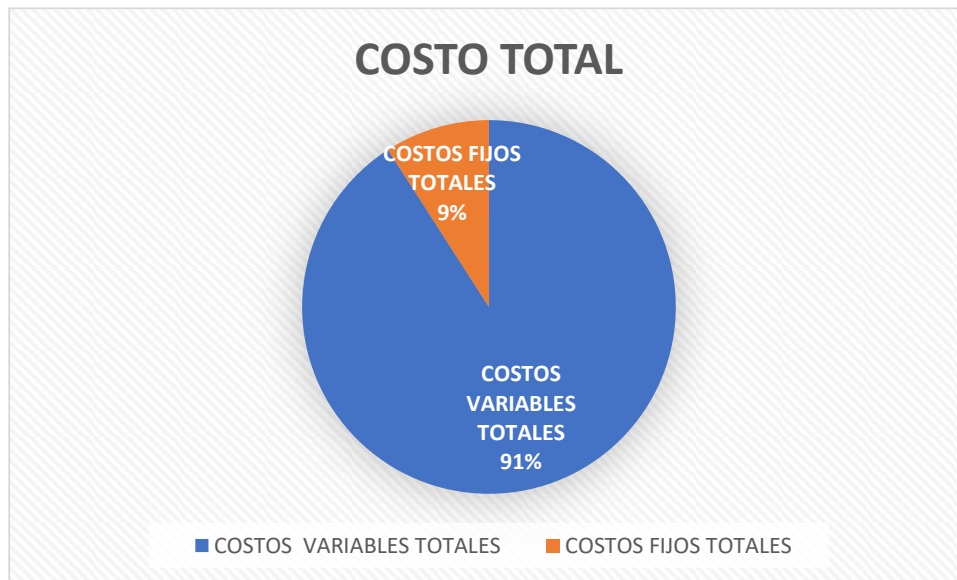


Fig. 13.3 Costos totales

Fuente: Elaboración propia

El análisis de la estructura de costos muestra un claro predominio de los costos variables, los cuales representan aproximadamente el 91 % del costo total del proyecto. Esto se debe principalmente al elevado peso de las materias primas y los servicios asociados al proceso productivo, característico de la industria petroquímica.

Por otro lado, los costos fijos constituyen solo el 9 % del total, incluyendo mano de obra, mantenimiento y depreciaciones. Esta distribución indica que la rentabilidad del proyecto se encuentra fuertemente influenciada por la eficiencia en el uso de insumos y por las condiciones del mercado de materias primas.

13.4 Punto de equilibrio

El punto de equilibrio representa el nivel de producción en el cual los ingresos totales igualan a los costos totales, es decir, el proyecto no presenta ni ganancias ni pérdidas. Este indicador permite evaluar el nivel mínimo de operación requerido para cubrir la totalidad de los costos y constituye una herramienta clave para el análisis de la viabilidad económica del proyecto.

El punto de equilibrio se determina a partir de la relación entre los costos fijos, el precio de venta del producto y el costo variable unitario.

$$Q_e = \frac{CF}{PV - CV_u} = \frac{2.418.349 \text{ USD/año}}{1550 \frac{\text{USD}}{\text{tn}} - 1051,8 \frac{\text{USD}}{\text{tn}}} = 4854,3 \text{ tn/año} \quad \text{Ec. 13.6}$$

- Q_e : cantidad en el punto de equilibrio (ton/año)
- CF: costos fijos anuales

- PV: precio de venta (USD/ton)
- CVu: costo variable unitario (USD/ton)

| | |
|---|------------------------|
| Costos fijos totales (USD) | \$ 2.418.348,73 |
| Costo Variable unitario (USD/tn) | \$ 1.051,81 |
| Precio de venta (USD/tn) | \$ 1.550,00 |
| Qe (tn/año) | 4854,3 |

| Cantidad Producida (tn) | Pv (USD/tn) | Ingresos por ventas (USD) | CFT | CVu | CV Total | CT | Resultado (USD) |
|-------------------------|-----------------|---------------------------|------------------------|--------------------|------------------------|------------------------|------------------|
| 0 | \$ 1.550 | \$ - | \$ 2.418.348,73 | \$ 1.051,81 | \$ - | \$ 2.418.348,73 | -\$ 2.418.348,73 |
| 2000 | \$ 1.550 | \$ 3.100.000 | \$ 2.418.348,73 | \$ 1.051,81 | \$ 2.103.628,82 | \$ 4.521.977,55 | -\$ 1.421.977,55 |
| 4000 | \$ 1.550 | \$ 6.200.000 | \$ 2.418.348,73 | \$ 1.051,81 | \$ 4.207.257,64 | \$ 6.625.606,38 | -\$ 425.606,38 |
| 4854,3 | \$ 1.550 | \$ 7.524.185 | \$ 2.418.348,73 | \$ 1.051,81 | \$ 5.105.836,26 | \$ 7.524.184,99 | \$ - |
| 6000 | \$ 1.550 | \$ 9.300.000 | \$ 2.418.348,73 | \$ 1.051,81 | \$ 6.310.886,46 | \$ 8.729.235,20 | \$ 570.764,80 |
| 8000 | \$ 1.550 | \$ 12.400.000 | \$ 2.418.348,73 | \$ 1.051,81 | \$ 8.414.515,28 | \$ 10.832.864,02 | \$ 1.567.135,98 |
| 10000 | \$ 1.550 | \$ 15.500.000 | \$ 2.418.348,73 | \$ 1.051,81 | \$ 10.518.144,10 | \$ 12.936.492,84 | \$ 2.563.507,16 |
| 12000 | \$ 1.550 | \$ 18.600.000 | \$ 2.418.348,73 | \$ 1.051,81 | \$ 12.621.772,93 | \$ 15.040.121,66 | \$ 3.559.878,34 |
| 14000 | \$ 1.550 | \$ 21.700.000 | \$ 2.418.348,73 | \$ 1.051,81 | \$ 14.725.401,75 | \$ 17.143.750,48 | \$ 4.556.249,52 |
| 16000 | \$ 1.550 | \$ 24.800.000 | \$ 2.418.348,73 | \$ 1.051,81 | \$ 16.829.030,57 | \$ 19.247.379,30 | \$ 5.552.620,70 |
| 18000 | \$ 1.550 | \$ 27.900.000 | \$ 2.418.348,73 | \$ 1.051,81 | \$ 18.932.659,39 | \$ 21.351.008,12 | \$ 6.548.991,88 |
| 20000 | \$ 1.550 | \$ 31.000.000 | \$ 2.418.348,73 | \$ 1.051,81 | \$ 21.036.288,21 | \$ 23.454.636,94 | \$ 7.545.363,06 |
| 22000 | \$ 1.550 | \$ 34.100.000 | \$ 2.418.348,73 | \$ 1.051,81 | \$ 23.139.917,03 | \$ 25.558.265,76 | \$ 8.541.734,24 |
| 24000 | \$ 1.550 | \$ 37.200.000 | \$ 2.418.348,73 | \$ 1.051,81 | \$ 25.243.545,85 | \$ 27.661.894,58 | \$ 9.538.105,42 |
| 26000 | \$ 1.550 | \$ 40.300.000 | \$ 2.418.348,73 | \$ 1.051,81 | \$ 27.347.174,67 | \$ 29.765.523,40 | \$ 10.534.476,60 |
| 28000 | \$ 1.550 | \$ 43.400.000 | \$ 2.418.348,73 | \$ 1.051,81 | \$ 29.450.803,49 | \$ 31.869.152,23 | \$ 11.530.847,77 |
| 30000 | \$ 1.550 | \$ 46.500.000 | \$ 2.418.348,73 | \$ 1.051,81 | \$ 31.554.432,31 | \$ 33.972.781,05 | \$ 12.527.218,95 |
| 32000 | \$ 1.550 | \$ 49.600.000 | \$ 2.418.348,73 | \$ 1.051,81 | \$ 33.658.061,13 | \$ 36.076.409,87 | \$ 13.523.590,13 |
| 34000 | \$ 1.550 | \$ 52.700.000 | \$ 2.418.348,73 | \$ 1.051,81 | \$ 35.761.689,95 | \$ 38.180.038,69 | \$ 14.519.961,31 |

Tabla 13.19 Punto de equilibrio

Fuente: Elaboración propia

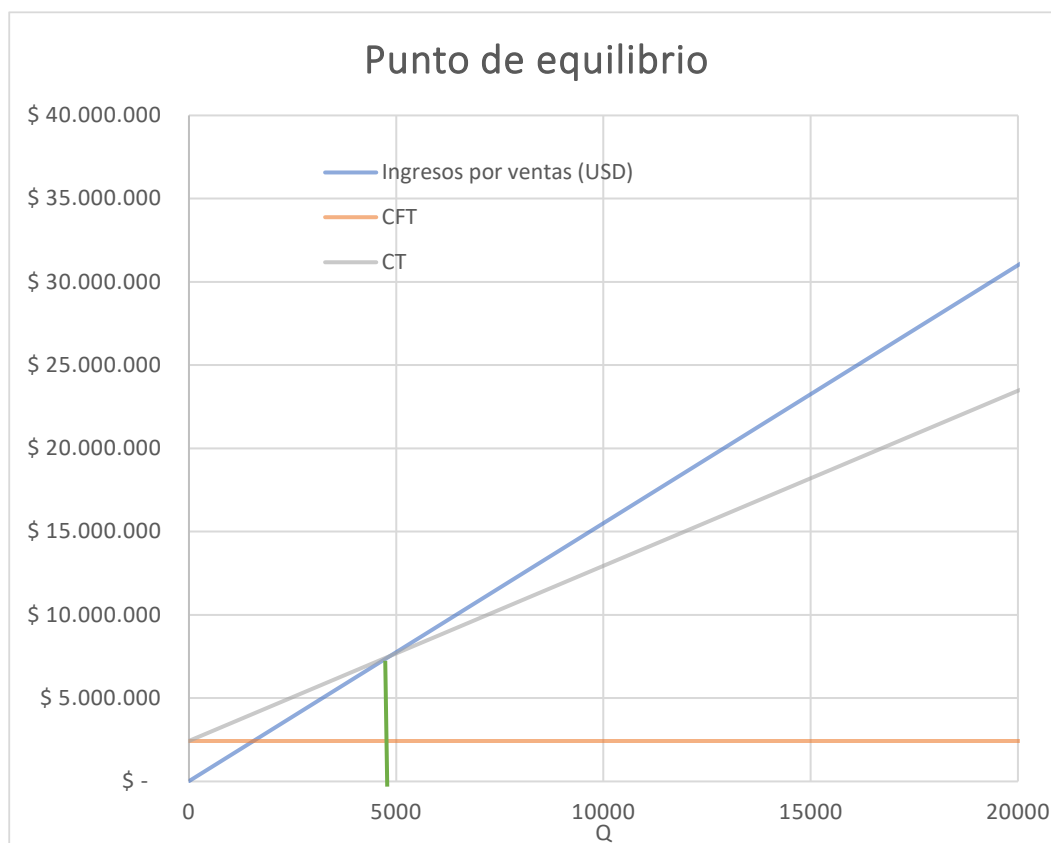


Fig. 13.4 Punto de equilibrio

Fuente: Elaboración propia

13.5 Beneficios e ingresos

13.5.1 Precio de venta

El precio de venta del óxido de propileno se determinó considerando las condiciones del mercado nacional e internacional, tomando como principal referencia los valores de importación registrados en la República Argentina. De acuerdo con datos del Instituto Petroquímico Argentino (IPA), el precio de importación del óxido de propileno (valor CIF) se sitúa en torno a USD 2.200 por tonelada, valor que incluye costos de producto, flete, seguro y demás gastos asociados a su ingreso al país. (Instituto Petroquímico Argentino (IPA), 2025)

En este contexto, la producción local presenta una ventaja competitiva significativa al eliminar los costos logísticos internacionales, permitiendo ofrecer el producto a un precio inferior al de importación, manteniendo al mismo tiempo márgenes de rentabilidad adecuados.

Adicionalmente, los precios internacionales del óxido de propileno se ubican en rangos comprendidos entre USD 1.100 y 1.500 por tonelada, lo que establece un marco de referencia para la competitividad del producto en el mercado global.

Considerando ambos factores, se adopta un precio de venta de: **1.550 USD/tn**. Este valor permite posicionar el producto de manera competitiva en el mercado local, al ubicarse por debajo del costo de importación, y resulta consistente con las condiciones del mercado internacional, asegurando la viabilidad económica del proyecto. (ICIS, 2026)

13.5.2 Ingresos totales

Los ingresos totales del proyecto corresponden al valor económico generado por la venta del óxido de propileno producido por la planta. Estos se determinan en función del volumen de producción anual y del precio de venta del producto en el mercado.

El cálculo de los ingresos totales se realiza mediante la siguiente expresión:

$$IT = Q * Pv = 23000 \frac{tn}{año} * 1550 \frac{USD}{año} = 35.650.000 \frac{USD}{año} \quad \text{Ec. 13.7}$$

13.5.3 Contribución marginal

La contribución marginal representa la diferencia entre el precio de venta del producto y el costo variable unitario, indicando cuánto aporta cada unidad producida para cubrir los costos fijos y generar utilidad.

Este indicador resulta fundamental en el análisis económico, ya que permite evaluar la capacidad del proyecto para absorber sus costos fijos y determinar el nivel de producción necesario para alcanzar el punto de equilibrio.

| Contribución Marginal | |
|---|----------------------|
| Ingreso Total (USD/año) | \$ 35.650.000 |
| Costo Variable (USD/año) | \$ 24.191.731 |
| Produccion (t/año) | 23000 |
| Contribution Marginal (USD/año) | \$ 11.458.269 |
| Contribution Marginal Unitaria (USD/t) | \$ 498,19 |
| Costo Fijo Unitario (USD/t) | \$ 105,15 |
| Utilidad(USD/t) | \$ 393,04 |

Tabla 13.20: Contribución marginal

13.5.4 Utilidad anual

La utilidad anual del proyecto representa el resultado económico obtenido luego de descontar de los ingresos totales todos los costos asociados a la operación de la planta. Este indicador permite evaluar la rentabilidad del proyecto en condiciones normales de funcionamiento.

| Utilidad Anual | |
|--|------------------------|
| Contribucion Marginal (USD/año) | \$ 11.458.269 |
| Costos fijos totales (USD/año) | \$ 2.418.348,73 |
| Utilidad (USD/año) | \$ 9.039.919,83 |

Tabla 13.21: Utilidad anual

La utilidad anual constituye un indicador preliminar de la rentabilidad del proyecto, aunque no refleja completamente la generación de caja, dado que incluye costos no erogables como las depreciaciones y amortizaciones.

13.6 Flujo de caja y rentabilidad

13.6.1 Flujo de caja

El flujo de caja del proyecto permite analizar la evolución de los ingresos y egresos monetarios a lo largo del tiempo, constituyendo la base para la evaluación económica mediante indicadores como el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR).

Para el presente estudio, se adopta un horizonte de evaluación de 10 años, considerando un período inicial de inversión seguido por la etapa operativa del proyecto.

El flujo de caja del proyecto se construyó considerando los ingresos generados por la venta de óxido de propileno y los egresos asociados a la operación de la planta, incluyendo costos fijos y variables.

| INVERSIONES | | Vida util | Año | | | | | | | | | | Valor Residual | | |
|----------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------|
| Item | lo (USD) | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | | 10 | |
| Terreno | -\$ 2.884.000 | | | | | | | | | | | | | | \$ 2.884.000 |
| Edificios e instalaciones | -\$ 1.161.750 | 25 | -\$ 46.470 | -\$ 46.470 | -\$ 46.470 | -\$ 46.470 | -\$ 46.470 | -\$ 46.470 | -\$ 46.470 | -\$ 46.470 | -\$ 46.470 | -\$ 46.470 | -\$ 46.470 | -\$ 46.470 | \$ 697.050 |
| Equipos y maquinarias | -\$ 15.422.400 | 10 | -\$ 1.542.240 | -\$ 1.542.240 | -\$ 1.542.240 | -\$ 1.542.240 | -\$ 1.542.240 | -\$ 1.542.240 | -\$ 1.542.240 | -\$ 1.542.240 | -\$ 1.542.240 | -\$ 1.542.240 | -\$ 1.542.240 | -\$ 1.542.240 | |
| Rodados | -\$ 80.000 | 5 | -\$ 16.000 | -\$ 16.000 | -\$ 16.000 | -\$ 16.000 | -\$ 16.000 | -\$ 16.000 | | | | | | | |
| Muebles y Otros | -\$ 33.250 | 3 | -\$ 11.083 | -\$ 11.083 | -\$ 11.083 | | | | | | | | | | |
| Depreciación | | | -\$ 1.615.793 | -\$ 1.615.793 | -\$ 1.615.793 | -\$ 1.604.710 | -\$ 1.604.710 | -\$ 1.588.710 | -\$ 1.588.710 | -\$ 1.588.710 | -\$ 1.588.710 | -\$ 1.588.710 | -\$ 1.588.710 | -\$ 1.588.710 | |
| Costos diferidos | -\$ 650.686 | 3 | -\$ 216.895 | -\$ 216.895 | -\$ 216.895 | | | | | | | | | | |
| Amortización | | | -\$ 216.895 | -\$ 216.895 | -\$ 216.895 | | | | | | | | | | \$ 3.581.050 |
| Rubro | | | Año | | | | | | | | | | | | |
| | | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | | |
| Ingresos por ventas | | | \$ 35.650.000 | \$ 35.650.000 | \$ 35.650.000 | \$ 35.650.000 | \$ 35.650.000 | \$ 35.650.000 | \$ 35.650.000 | \$ 35.650.000 | \$ 35.650.000 | \$ 35.650.000 | \$ 35.650.000 | \$ 35.650.000 | |
| Impuestos Ingresos Brutos(4%) | | | -\$ 1.426.000 | -\$ 1.426.000 | -\$ 1.426.000 | -\$ 1.426.000 | -\$ 1.426.000 | -\$ 1.426.000 | -\$ 1.426.000 | -\$ 1.426.000 | -\$ 1.426.000 | -\$ 1.426.000 | -\$ 1.426.000 | -\$ 1.426.000 | |
| Ingresos Netos de IB | | | \$ 34.224.000 | \$ 34.224.000 | \$ 34.224.000 | \$ 34.224.000 | \$ 34.224.000 | \$ 34.224.000 | \$ 34.224.000 | \$ 34.224.000 | \$ 34.224.000 | \$ 34.224.000 | \$ 34.224.000 | \$ 34.224.000 | |
| Costos fijos erogables | | | -\$ 585.660 | -\$ 585.660 | -\$ 585.660 | -\$ 585.660 | -\$ 585.660 | -\$ 585.660 | -\$ 585.660 | -\$ 585.660 | -\$ 585.660 | -\$ 585.660 | -\$ 585.660 | -\$ 585.660 | |
| Costos Variables | | | -\$ 24.191.731 | -\$ 24.191.731 | -\$ 24.191.731 | -\$ 24.191.731 | -\$ 24.191.731 | -\$ 24.191.731 | -\$ 24.191.731 | -\$ 24.191.731 | -\$ 24.191.731 | -\$ 24.191.731 | -\$ 24.191.731 | -\$ 24.191.731 | |
| Depreciación | | | -\$ 1.615.793 | -\$ 1.615.793 | -\$ 1.615.793 | -\$ 1.604.710 | -\$ 1.604.710 | -\$ 1.588.710 | -\$ 1.588.710 | -\$ 1.588.710 | -\$ 1.588.710 | -\$ 1.588.710 | -\$ 1.588.710 | -\$ 1.588.710 | |
| Amortización | | | -\$ 216.895 | -\$ 216.895 | -\$ 216.895 | | | | | | | | | | |
| Utilidad antes de Impuestos | | | \$ 7.613.920 | \$ 7.613.920 | \$ 7.613.920 | \$ 7.841.899 | \$ 7.841.899 | \$ 7.857.899 | \$ 7.857.899 | \$ 7.857.899 | \$ 7.857.899 | \$ 7.857.899 | \$ 7.857.899 | \$ 7.857.899 | |
| Impuestos a las ganancias (0,35) | | | -\$ 2.664.872 | -\$ 2.664.872 | -\$ 2.664.872 | -\$ 2.744.664 | -\$ 2.744.664 | -\$ 2.750.264 | -\$ 2.750.264 | -\$ 2.750.264 | -\$ 2.750.264 | -\$ 2.750.264 | -\$ 2.750.264 | -\$ 2.750.264 | |
| Utilidad Neta | | | \$ 4.949.048 | \$ 4.949.048 | \$ 4.949.048 | \$ 5.097.234 | \$ 5.097.234 | \$ 5.107.634 | \$ 5.107.634 | \$ 5.107.634 | \$ 5.107.634 | \$ 5.107.634 | \$ 5.107.634 | \$ 5.107.634 | |
| Depreciación | | | \$ 1.615.793 | \$ 1.615.793 | \$ 1.615.793 | \$ 1.604.710 | \$ 1.604.710 | \$ 1.588.710 | \$ 1.588.710 | \$ 1.588.710 | \$ 1.588.710 | \$ 1.588.710 | \$ 1.588.710 | \$ 1.588.710 | |
| Amortización | | | \$ 216.895 | \$ 216.895 | \$ 216.895 | | | | | | | | | | |
| Inversiones Inicial | | -\$ 20.232.086 | | | | | | | | | | | | | |
| Inversiones CT | | -\$ 6.558.721 | | | | | | | | | | | | | \$ 6.558.721 |
| Valor residual | | | | | | | | | | | | | | | \$ 3.581.050 |
| Flujo de Caja (USD) | | -\$ 26.790.807 | \$ 6.781.737 | \$ 6.781.737 | \$ 6.781.737 | \$ 6.781.737 | \$ 6.781.737 | \$ 6.781.737 | \$ 6.781.737 | \$ 6.781.737 | \$ 6.781.737 | \$ 6.781.737 | \$ 6.781.737 | \$ 6.781.737 | \$ 6.781.737 |

Tabla 13.22 Flujo de caja

Fuente: Elaboración propia

En primer lugar, se determinan los ingresos por ventas, a partir de la producción anual y el precio de comercialización del producto. Sobre estos ingresos se aplica el Impuesto sobre los Ingresos Brutos (IB), considerado como un porcentaje directo de la facturación, obteniéndose así los ingresos netos operativos.

Posteriormente, se descuentan los costos operativos erogables, tanto fijos como variables, junto con las depreciaciones y amortizaciones, con el fin de calcular la utilidad antes de impuestos. A partir de esta, se aplica el Impuesto a las Ganancias, obteniendo finalmente la utilidad neta del proyecto.

Las depreciaciones y amortizaciones se incluyen dentro de los costos al momento de calcular la utilidad, ya que representan la pérdida de valor de los activos a lo largo del tiempo y permiten determinar correctamente la base imponible del impuesto a las ganancias.

Sin embargo, dado que estos conceptos no implican una salida real de dinero, son considerados costos no erogables. Por este motivo, una vez obtenida la utilidad neta, se vuelven a adicionar en el flujo de caja, permitiendo reflejar adecuadamente la generación real de fondos del proyecto.

13.6.2 Valor Actual Neto (VAN)

El Valor Actual Neto (VAN) es un indicador financiero que permite evaluar la rentabilidad del proyecto mediante la actualización de los flujos de caja futuros a valor presente, utilizando una tasa de descuento determinada. (Blank, 2012)

Este indicador representa la diferencia entre el valor presente de los ingresos y el valor presente de las inversiones, permitiendo determinar si el proyecto genera valor económico.

En términos generales, un VAN positivo indica que el proyecto es rentable y genera valor agregado para los inversionistas, mientras que un VAN negativo señala que el proyecto no recupera la inversión realizada y, por ende, no resulta económicamente viable bajo las condiciones asumidas.

El VAN obtenido es 5.124.699 USD, lo cual indica que el proyecto es rentable y genera un excedente económico.

13.6.3 Tasa Interna de Retorno (TIR)

La Tasa Interna de Retorno (TIR) es un indicador financiero que permite evaluar la rentabilidad de un proyecto de inversión. Se define como la tasa de descuento que iguala a cero el Valor Actual Neto (VAN), es decir, aquella tasa para la cual el valor presente de los flujos de caja futuros es equivalente a la inversión inicial realizada. (Blank, 2012)

Este indicador representa la rentabilidad intrínseca del proyecto, independientemente de fuentes externas de financiamiento, y permite compararlo con el costo de oportunidad del capital.

El criterio de decisión es claro: si la TIR es mayor que la tasa de descuento (o tasa mínima aceptable de rendimiento), el proyecto es considerado rentable; si es menor, no lo es. La comparación entre la TIR y la tasa de descuento permite evaluar si el proyecto supera el rendimiento esperado del mercado, considerando los riesgos asociados.

El análisis arroja una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 23,1 %, lo que implica que la rentabilidad interna del proyecto es positiva.

13.7 Conclusión

El análisis del flujo de caja del proyecto, evaluado en un horizonte de 10 años y utilizando una tasa de descuento del 18,25 %, arroja un Valor Actual Neto (VAN) de 5.124.699 USD y una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 23,1 %.

El valor positivo del VAN indica que el proyecto no solo recupera la inversión inicial, sino que además genera un excedente económico por encima del costo de oportunidad del capital. En términos financieros, esto implica que la inversión crea valor y resulta conveniente desde el punto de vista económico.

Si bien el proyecto presenta un VAN positivo, su magnitud en relación con la inversión inicial indica una rentabilidad moderada, lo que sugiere cierta sensibilidad ante variaciones en las variables económicas del proceso.

Por su parte, la TIR obtenida supera la tasa de descuento utilizada en la evaluación, lo que refuerza la viabilidad del proyecto. Esto significa que la rentabilidad interna del mismo es mayor al rendimiento mínimo exigido por los inversores, confirmando su atractivo financiero.

En conjunto, los indicadores obtenidos permiten concluir que el proyecto de producción de óxido de propileno es económicamente viable y financieramente rentable, mostrando capacidad para generar valor y absorber variaciones razonables en las condiciones del mercado.

El análisis de la estructura de costos del proyecto evidencia un claro predominio de los costos variables, los cuales representan la mayor proporción del costo total, debido principalmente al peso de las materias primas y los servicios en el proceso productivo. Esta característica es propia de la industria petroquímica y condiciona fuertemente la rentabilidad del proyecto.

Los resultados muestran que el proyecto presenta una estructura de costos coherente con el tipo de proceso y un nivel de operación que permite alcanzar el equilibrio en condiciones razonables, aunque con cierta sensibilidad a los costos variables.

CAPÍTULO XIV: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

14.1 Introducción

El análisis de sensibilidad constituye una herramienta fundamental en la evaluación económica de proyectos, ya que permite estudiar el impacto de la variación de las principales variables sobre los indicadores de rentabilidad, tales como el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR). (Urbina, 2013)

Dado que los parámetros utilizados en el análisis, como el precio de venta del producto, los costos de materias primas y los costos operativo, están sujetos a incertidumbre, resulta necesario evaluar cómo cambios en estos afectan la viabilidad del proyecto.

En el presente capítulo se analizan las variables más influyentes en la rentabilidad de la planta de producción de óxido de propileno, con el objetivo de identificar los factores críticos y determinar el grado de robustez del proyecto frente a posibles fluctuaciones del entorno económico.

Cabe destacar que el presente análisis de sensibilidad se enfoca exclusivamente en variables de carácter económico-financiero, dado que son las que inciden de manera directa sobre los indicadores de rentabilidad del proyecto. En este sentido, no se consideran variables estructurales como la localización geográfica o el tamaño de planta, ya que su evaluación requiere estudios específicos y herramientas de análisis más complejas, excediendo el alcance del presente trabajo a nivel de prefactibilidad.

14.2 Parámetros a sensibilizar

14.2.1 Sensibilidad del precio de venta

El precio de venta del producto constituye una de las variables más influyentes en la rentabilidad del proyecto, dado que impacta directamente en los ingresos totales y, en consecuencia, en los indicadores económicos como el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR).

Con el objetivo de evaluar la sensibilidad del proyecto frente a variaciones en esta variable, se analiza el comportamiento del VAN y la TIR ante distintos escenarios de precio de venta del óxido de propileno, manteniendo constantes el resto de los parámetros del modelo.

Para ello, se consideran variaciones porcentuales del precio base adoptado en la evaluación económica, abarcando tanto escenarios desfavorables como favorables. A partir de estos valores, se recalculan los flujos de caja y se determinan los correspondientes indicadores de rentabilidad.

Este análisis permite identificar el umbral de precio a partir del cual el proyecto deja de ser rentable, constituyendo una herramienta clave para la toma de decisiones

Los resultados obtenidos se presentan en las tablas y gráficos siguientes, donde se observa la relación entre el precio de venta y los indicadores económicos del proyecto.

| Precio de venta de Oxido de Propileno | | | |
|---------------------------------------|--------------|----------------|---------|
| Precio de venta (USD/Tn) | Variacion(%) | VAN (USD) | TIR (%) |
| 1200 | -23% | -\$ 17.250.884 | 0,2% |
| 1300 | -16% | -\$ 10.857.860 | 7,3% |
| 1400 | -10% | -\$ 4.464.837 | 13,9% |
| 1550 | 0% | \$ 5.124.699 | 23,1% |
| 1600 | 3% | \$ 8.321.210 | 26,1% |
| 1700 | 10% | \$ 14.714.234 | 31,9% |
| 1800 | 16% | \$ 21.107.258 | 37,6% |

Tabla 14.1: Sensibilidad-precio de venta

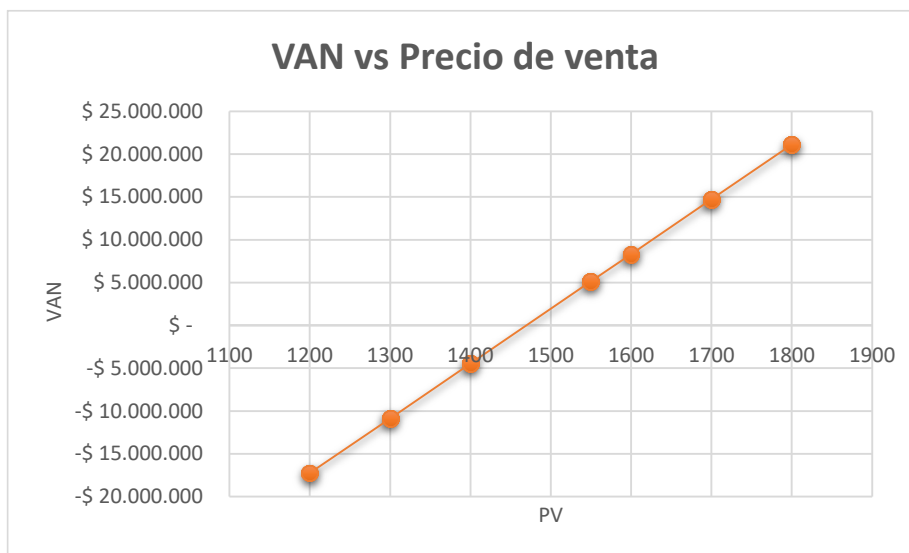


Fig. 14.1 VAN vs Precio de venta

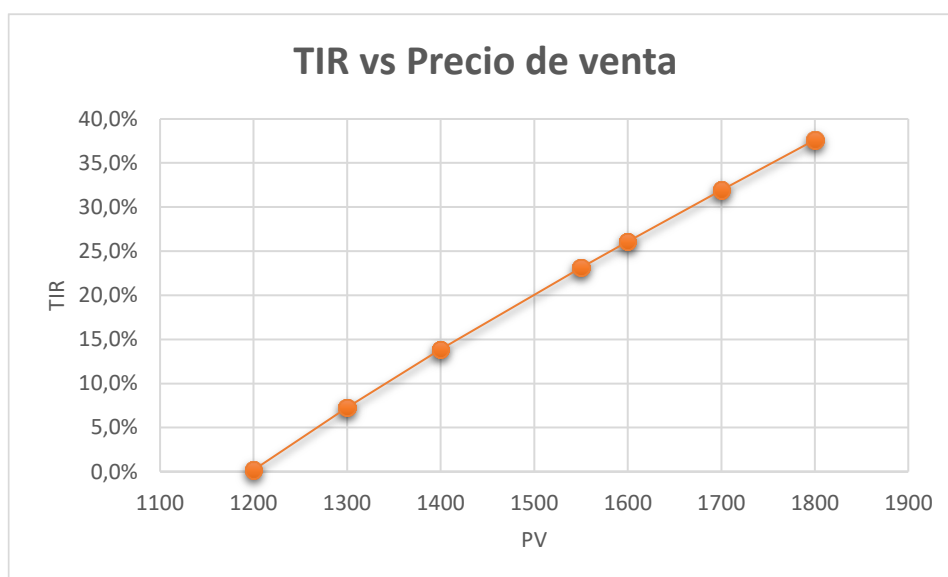


Fig. 14.2 TIR vs Precio de venta

El análisis de sensibilidad realizado sobre el precio de venta del óxido de propileno evidencia una marcada influencia de esta variable sobre los indicadores de rentabilidad del proyecto.

En primer lugar, se observa que el Valor Actual Neto (VAN) presenta una relación aproximadamente lineal creciente con el precio de venta. A medida que el precio aumenta, el VAN se incrementa de forma significativa, pasando de valores negativos a positivos en un rango cercano al precio base. En particular, el proyecto deja de ser rentable para precios inferiores a aproximadamente 1450–1500 USD/ton, donde el VAN se aproxima a cero.

Por su parte, la Tasa Interna de Retorno (TIR) también muestra una tendencia creciente con el incremento del precio, partiendo de valores prácticamente nulos para escenarios desfavorables y alcanzando valores superiores al 30 % en escenarios favorables. En el precio base adoptado (1550 USD/ton), la TIR es del 23,1 %, superando la tasa de descuento, lo que confirma la viabilidad del proyecto en condiciones normales.

Sin embargo, se observa que ante disminuciones del precio del orden del 10 % o superiores, el VAN se torna negativo y la TIR cae por debajo del costo de capital, indicando que el proyecto pierde rentabilidad en dichos escenarios.

El proyecto presenta una alta sensibilidad al precio de venta, lo cual es consistente con la estructura de costos observada, donde predominan los costos variables. Esto implica que pequeñas variaciones en el precio del producto tienen un impacto significativo en la rentabilidad, constituyendo el precio de mercado una variable crítica para la viabilidad económica del proyecto.

14.2.2 Sensibilidad del costo de materia prima

El costo de las materias primas constituye uno de los factores más determinantes en la estructura de costos del proyecto. En particular, el propileno, como materia prima principal del proceso de producción de óxido de propileno, representa la mayor incidencia dentro de los costos variables, condicionando significativamente la rentabilidad del sistema.

Con el objetivo de evaluar la influencia de esta variable crítica, se realiza un análisis de sensibilidad considerando variaciones en el precio del propileno, manteniendo constantes el resto de los parámetros del modelo. Este enfoque permite aislar el efecto de dicha materia prima sobre los indicadores económicos del proyecto.

Para ello, se plantean distintos escenarios en los que se modifica el precio base del propileno mediante variaciones porcentuales, tanto en condiciones favorables (disminución del costo) como desfavorables (incremento del mismo). A partir de estos escenarios, se recalculan los costos variables, los flujos de caja y, en consecuencia, el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR).

Los resultados obtenidos se presentan en las tablas y gráficos siguientes, permitiendo analizar el impacto directo del precio del propileno sobre la rentabilidad del proyecto.

| Precio de Propileno | | | |
|---------------------------|--------------|---------------|---------|
| Precio Propileno (USD/Tn) | Variacion(%) | VAN (USD) | TIR (%) |
| 700 | -13% | \$ 10.328.811 | 28,1% |
| 750 | -6% | \$ 7.726.755 | 25,6% |
| 800 | 0% | \$ 5.124.699 | 23,1% |
| 850 | 6% | \$ 2.522.642 | 20,6% |
| 900 | 13% | -\$ 79.414 | 18,2% |
| 950 | 19% | -\$ 2.681.470 | 15,7% |
| 1000 | 25% | -\$ 5.283.527 | 13,2% |

Tabla 14.2 Sensibilidad por precio de propileno

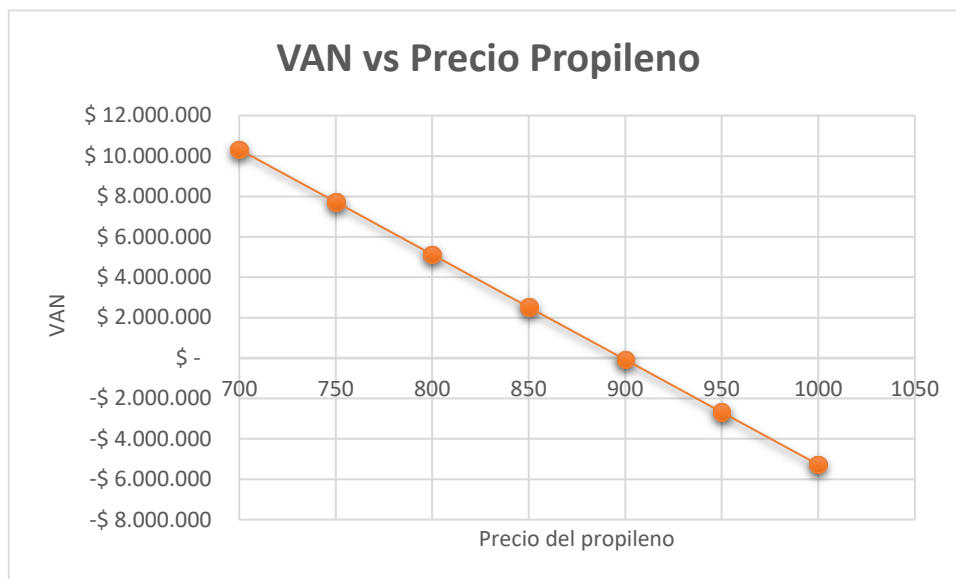


Fig. 14.3 VAN vs Precio de propileno

Fuente: Elaboración propia

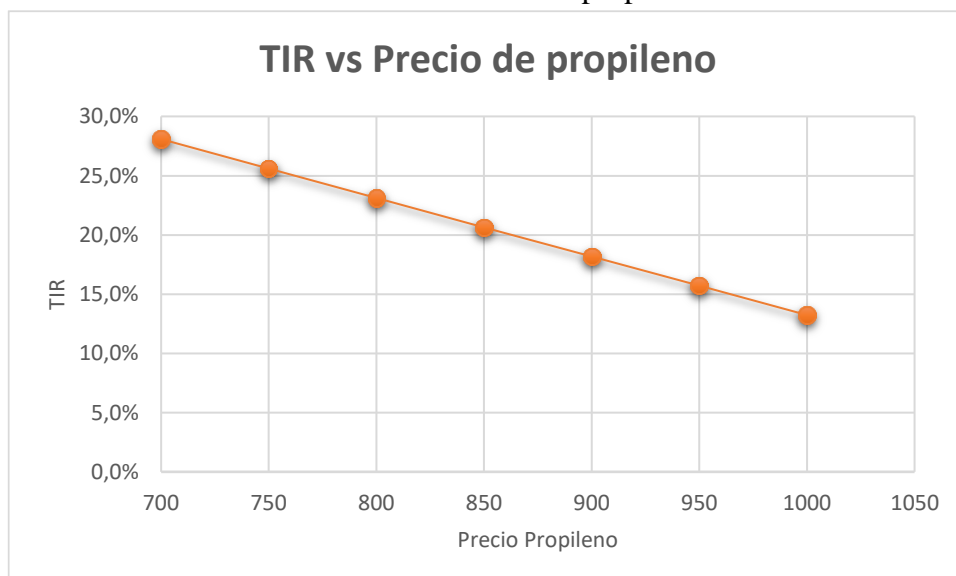


Fig 14.4 TIR vs Precio de propileno

Fuente: Elaboración propia

El análisis realizado evidencia que el proyecto presenta una alta sensibilidad al precio del propileno, observándose una relación inversa entre esta variable y los indicadores de rentabilidad.

A medida que el precio del propileno aumenta, el Valor Actual Neto (VAN) disminuye de forma significativa, pasando de valores ampliamente positivos a negativos. En particular, el proyecto deja de ser rentable para valores cercanos a 900 USD/ton, donde el VAN se aproxima a cero.

De manera similar, la Tasa Interna de Retorno (TIR) presenta una tendencia decreciente, reduciéndose desde valores cercanos al 28 % en escenarios favorables hasta aproximadamente 13 % en condiciones desfavorables. A partir de incrementos del orden del 15–20 % en el precio del propileno, la TIR se sitúa por debajo de la tasa de descuento, comprometiendo la viabilidad del proyecto.

14.3 Conclusión

El análisis de sensibilidad realizado permite evaluar la influencia de las variables económicas más relevantes sobre la rentabilidad del proyecto. En particular, se analizaron las variaciones en el precio de venta del producto y en el costo del propileno, principal materia prima del proceso.

Los resultados obtenidos evidencian que el proyecto presenta una alta sensibilidad frente a ambas variables, observándose que pequeñas variaciones en las mismas generan cambios significativos en el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR). En este sentido, se identifican rangos críticos a partir de los cuales el proyecto deja de ser rentable, lo que pone de manifiesto la importancia de las condiciones de mercado en la viabilidad económica.

Asimismo, se destaca que el costo del propileno constituye uno de los principales factores de riesgo, debido a su elevado peso dentro de los costos variables, mientras que el precio de venta del producto define directamente el nivel de ingresos del proyecto.

En conjunto, el análisis realizado permite concluir que, si bien el proyecto es económicamente viable bajo las condiciones consideradas, su rentabilidad se encuentra fuertemente condicionada por variables externas, lo que resalta la necesidad de una adecuada gestión de costos y de un seguimiento continuo de las condiciones del mercado.

BIBLIOGRAFÍA

- Solvay. (2025). *Press Release: Peróxidos do Brasil - Investimento Chile*. Obtenido de <https://www.solvay.com/en/press-release/peroxidos-do-brasil-reinforces-leadership-south-america-new-strategic-investment>
- Administración Federal de Ingresos Públicos (AFIP). (24 de Marzo de 2026). *Registro de Importadores y Exportadores: Requisitos y solvencia*. . Obtenido de <https://www.afip.gob.ar>
- Adriani, H.L, Arturi, G.J., Calabresse, A. (2018). *Ánalysis de la reestructuración productiva del sector industrial en Ensenada y Berisso*. En H. A. Adriani, *Ánalysis de la reestructuración productiva del sector industrial en Ensenada y Berisso* (págs. 17-46). Buenos Aires: Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires.
- Agencia de Recaudación de la Provincia de Buenos Aires (ARBA). (24 de Marzo de 2026). *Ingresos Brutos: Inscripción y regímenes de recaudación*. . Obtenido de <https://web.arba.gov.ar>
- Alibaba. (15 de Marzo de 2026). *Alibaba*. Obtenido de https://www.alibaba.com/product-detail/Mix-Bed-Resin-Bed-Anion-Cation_1601039455535.html?spm=a2700.prosearch.normal_offer.d_image.2fc667afbJLOdI&priceId=a7c601be0f5e444bb5eea671e83fff18
- Alibaba. (10 de Febrero de 2026). *Columna de destilación industrial utilizada en procesos químicos y petroquímicos*. Obtenido de <https://www.alibaba.com/>
- Argentina.gob.ar. (24 de Marzo de 2026). *Guía de trámites: Constitución de sociedades y CUIT*. Obtenido de <https://www.argentina.gob.ar>
- ASC MATERIAL Advance Chemicals Supplier. (12 de 6 de 2024). Obtenido de <https://www.acsmaterial.com/?srsltid=AfmBOoppmHU8fdCJEe86PptFNT9MzNwSi4NzDOxRwomU28aOF6jNFYNI>
- Asfahl, C. R., & Rieske, D. W. . (2010). *Industrial safety and health* . 6th ed. Pearson Prentice Hall.
- Atanor. (23 de Julio de 2024). *Atanor*. Obtenido de <https://www.atanor.com/negocios/>
- Axion Energy. (31 de Marzo de 2026). Obtenido de [axionenergy Refineria Campana: https://www.axionenergy.com/La-empresa/Refineria-Campana](https://www.axionenergy.com/La-empresa/Refineria-Campana)
- Blank, L. &-H. (2012). *Engineering Economy* . (7th ed.). McGraw-Hill.
- Cadenas, M. L. (2022). *Estudio de Impacto Ambiental*. La Plata.
- Cadenas, M. L. (2022). *Estudio de Impacto Ambiental*. La plata.
- CAMARCO. (2026). *Cámara Argentina de Construcción*. Obtenido de <https://www.camarco.org.ar/>
- Cao, E. (2014). *Transferencia de calor en procesos industriales* . Nueva Librería. (2.^a ed.).
- Catalysts, E. (25 de Marzo de 2025). *Catalysts Evonik*. Obtenido de <https://catalysts.evonik.com/en/products/oxidation-catalysts>
- CFS Camlin Fine Sciences. (15 de 12 de 2025). Obtenido de <https://www.cfseuropespa.com/es/chemical-performances/titanium-silicalite/>
- Chemical, B. S. (26 de Septiembre de 2018). *HPPO Technology: Economical and environment-friendly production of propylene oxide*. Obtenido de [HPPO Technology: Economical and environment-friendly production of propylene oxide: thyssenkrupp-uhde.com](https://www.thyssenkrupp-uhde.com)
- Chemicals, S. (2021). *Propylene Oxide: Technical Data Sheet and Handling Guide*.

- Chiavenato, I. (2006). *Introducción a la Teoría General de la Administración*. Mexico: McGraw-Hill.
- Company, D. C. (14 de 5 de 2024). *dow*. Obtenido de <https://www.dow.com/en-us/product-technology/propylene-oxide.html>
- Company, D. C. (21 de Enero de 2026). *Product Safety Assessment: Propylene Oxide*. Obtenido de roduct Safety Assessment: Propylene Oxide: [dow.com](https://www.dow.com)
- Corporation, M. (2024). Global Methanol Market Overview. *Methanex Corporation*.
- Crowl, D. A., & Louvar, J. F. (2019). *Chemical process safety: Fundamentals with applications* . 4th ed. Pearson Education.
- Damodaran, A. (2024). *Country Risk Premiums*. *Stern School of Business*. NYU.
- Decreto N° 351/79. (22 de mayo de 1979). *Boletín Oficial de la República Argentina*. Buenos Aires, Argentina.
- FATIQuP., F. A. (s.f.). *Convenio Colectivo de Trabajo N.º 564/09*.
- GmbH, E. D., & AG, T. I. (2019). *Alemania Patente n° EP3380458B1*.
- Google Maps. (2026). La Plata, Buenos Aires, Argentina.
- ICIS. (13 de Marzo de 2026). *Independent Commodity Intelligence Services*. Obtenido de <https://www.icis.com/explore/commodities/chemicals/propylene-oxide/>
- Informe Político. (24 de Marzo de 2026). *Tasas municipales y servicios generales: Actualización de costos y servicios* . Obtenido de <https://www.informepolitico.com.ar>
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM). (s.f.). *Norma IRAM 10005*. Buenos Aires, Argentina.
- Instituto Petroquímico Argentino (IPA). (2025). *Anuario IPA*.
- iProfesional*. (12 de 4 de 2025). Obtenido de www.iprofesional.com/impuestos
- Janicak, C. A. (2015). *Safety metrics: Tools and techniques for measuring safety performance* . 3rd ed. Government Institutes.
- Jianh Lu, K. (20 de Marzo de 2026). *Método de producción de óxido de propileno*. Obtenido de [scribd.com](https://www.scribd.com)
- Jones, C. W. (1999). *Applications of Hydrogen Peroxide and Derivatives*. Royal Society of Chemistry: Clean Technology Monographs.
- Kirk-Othmer. (2007). *Encyclopedia of Chemical Technology*. California: John Wiley & Sons.
- Koontz, H. W. (2012). *Administración: una perspectiva global y empresarial*. Mexico: McGraw-Hill.
- Ley N° 19.587. (21 de abril de 1972.). *Boletín Oficial de la República Argentina*. Buenos Aires, Argentina.
- McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriott, P. . (2007). *Operaciones unitarias en ingeniería química* . McGraw-Hill. (7.^a ed.).
- Ministerio de Salud de la Provincia de Buenos Aires. (24 de Marzo de 2026). *Ley 12.257: Código de Aguas de la Provincia de Buenos Aires*. Obtenido de <https://www.ms.gba.gov.ar>
- Ministerio de Salud y Desarrollo Social de la Nación. (24 de Marzo de 2026). *Ley 11.720: Régimen de Residuos Especiales*. Obtenido de <http://e-legis-ar.msal.gov.ar>
- Municipalidad de Ensenada. (24 de Marzo de 2026). *Habilitaciones Industriales y Tasa de Inspección, Seguridad e Higiene* . Obtenido de <https://www.ensenada.gov.ar>
- National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). (10 de Febrero de 2026). *Hierarchy of controls*. *Centers for Disease Control and Prevention* . Obtenido de <https://www.cdc.gov/niosh/topics/hierarchy/>

- Nijhuis, T. M. (2006). The Production of Propene Oxide: Catalytic Processes and Recent Developments. *I & EC research*, 3447-3459.
- Notari, B. (1991). Titanium Silicalite : A New Selective Oxidation Catalyst. . *Studies in Surface Science and Catalysis*, 343-352.
- Organización Internacional de Normalización. (2015). *Sistemas de gestión de la calidad – Requisitos (ISO Standard No. 9001:2015)*.
- Organización Internacional de Normalización. (2015). *Sistemas de gestión ambiental – Requisitos con orientación para su uso (ISO Standard No. 14001:2015)*.
- Organización Internacional de Normalización. (2018). *Norma ISO 45001*.
- Organización Internacional de Normalización. (2018). *Sistemas de gestión de la seguridad y salud en el trabajo – Requisitos con orientación para su uso (ISO Standard No. 45001:2018)*.
- PBA, G. (24 de Marzo de 2026). *Ley 11.723: Ley General del Ambiente*. Obtenido de <https://www.ututo.org>
- Permiso de trabajo Rev-02. (17 de Febrero de 2026). *Scribd*. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/752483242/PERMISO-DE-TRABAJO-SEGURO-REV-02>
- Perry, R. H., & Green, D. W. . (2008). *Perry's Chemical Engineers' Handbook (8th ed)*. McGraw-Hill Professional.
- Pratama, F. W., Fadhlan, Z., Purnamadjadi, T. A., & Adjie, W. S. . (2025).
- Propileno., A. L. (20 de Enero de 2026). *Air Liquide*. Obtenido de Air Liquid: Air Liquide SDS
- Propileno., D. T. (2017). *Scribd*. Obtenido de Scribd: <https://es.scribd.com>
- Propileno., H. d. (2022). *Linde*. Obtenido de Linde.
- Propylene Oxide (PO) Global Market Forecast to 2035*. (12 de 3 de 2025). Obtenido de <https://mcgroup.co.uk/researches/propylene-oxide-po>
- Puerto La Plata. (2024). *PUERTO LA PLATA*. Obtenido de PUERTO LA PLATA: <http://puertolaplata.com/>
- RENPI. (2025). *Registro Nacional de Parques Industriales*. Obtenido de <https://www.datos.gob.ar/dataset/produccion-registro-nacional-parques-industriales-renpi>
- Sapag Chain, N., & Sapag Chain, R. (2013). *Preparación y Evaluación de Proyectos*. Santiago de Chile: McGraw- Hill 6° Edición.
- Science, B. M. (2011). *Polyurethanes: Chemistry and Technology*. Wiley.
- Secretaría de Energía. (17 de Marzo de 2026). Obtenido de <https://www.argentina.gob.ar/economia/energia>
- Shanghai Sollant Energy Saving Technology Co., Ltd. (2 de Marzo de 2026). *Compresor de hidrógeno tipo diafragma libre de aceite para aplicaciones químicas y petroquímicas*. Obtenido de <https://www.shanghaisollant.com/>
- Solvay. (25 de Febrero de 2026). *Interox® Hydrogen Peroxide: Technical Data Sheet and User Guide*. Obtenido de Interox® Hydrogen Peroxide: Technical Data Sheet and User Guide: [solvay.com](https://www.solvay.com)
- Superintendencia de Riesgos del Trabajo. (2011). *Resolución SRT N° 299/11*. Buenos Aires, Argentina.
- Technavio. (2025). Methanol Market Analysis. *Growth, Trends and Forecast (2025-2029)*, 109-118.
- Technology, E. o. (2010). Encyclopedia of Chemical Technology. En *Propylene Oxide* (pág. Vol. 20. Sección: "Propylene Oxide"). John Wiley & Sons.

- Trabajo, I. N. (2022). *Documentación toxicológica para el establecimiento del límite de exposición profesional del óxido de propileno (DLEP 140)*. España: Ministerio de Trabajo y Economía Social.
- U.S. Department of Labor. . (11 de Marzo de 2026). *Occupational Safety and Health Administration (OSHA)*. (s.f.). *Informational booklet on industrial hygiene (OSHA 3143)*. . Obtenido de <https://www.osha.gov/publications>
- Ullmann. (2012). Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. En Ullmann, *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry* (págs. 499-535). Wiley-VCH.
- Urbina, G. B. (2013). *Evaluación de proyectos*. Mexico: McGraw Hill, 7° Edición.
- Yangzhou Tongyang. (18 de Marzo de 2026). *Yangzhou Tongyang Chemical Equipment Co., Ltd.* Obtenido de <https://www.tyceqt.com/>
- YPF, E. (31 de 3 de 2026). *YPF*. Obtenido de <https://www.ypf.com/energiaYPF/Paginas/complejo-industrial-la-plata.aspx>
- Zonaprop. (2025). *Zonaprop*. Obtenido de Zonaprop: <https://www.zonaprop.com.ar/terrenos-venta-ensenada.html>