**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO.**

**FACULTAD DE CIENCIAS APLICADAS A LA INDUSTRIA.**

Proyecto Integrador

# PROYECTO INTEGRADOR PLANTA INDUSTRIAL DE ACIDO ACETICO A PARTIR DE METANO.

Autor: Matías Joaquín Navarro

Título al que se aspira: Ingeniero Químico con Orientación Petroquímica.

Director/a del Proyecto:

Director: Mgtr. Pablo Gonzales
Co-Directora: Ing. Silvana Martínez

**San Rafael, Mendoza, 2026**

# PROYECTO INTEGRADOR PLANTA INDUSTRIAL DE ACIDO ACETICO A PARTIR DE METANO.

Autor/a: Navarro, Matías

Título al que se aspira: Ingeniero Químico con Orientación Petroquímica.

Nota Final: 10 (DIEZ)

Trabajo aprobado por:

| | |
|---|---|
| Presidente Firma y Aclaración | Fecha 16/10/26 |
| Vocal Firma y Aclaración | Fecha |
| Vocal Firma y Aclaración Rogelio Di Santo. | Fecha 16/10/26 |
| Director/a Firma y Aclaración Pablo Gorza | Fecha 16/10/26 |

Observaciones de corrección: _____

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

**San Rafael, Mendoza, 2026**

# TABLA DE CONTENIDO.


**Agradecimientos** ..... II

**Tabla de contenido** ..... III

**Índices de figuras y tablas** ..... XII

**Resumen** ..... XXI

**CAPÍTULO I: GENERALIDADES** ..... 1

**1.1 Justificación** ..... 2

**1.2 Enfoque y alcance del proyecto** ..... 2

**1.3 Marco teórico** ..... 3

**1.3.1 Materias primas** ..... 3

**1.3.2 Productos** ..... 4

**1.3.3 Procesos de obtención** ..... 6

**1.3.4 Descripción general del proceso** ..... 8

**CAPÍTULO II: ESTUDIO DE MERCADO** ..... 11

**2.1 Introducción al estudio de mercado** ..... 12

**2.2 Mercado consumidor** ..... 12

**2.2.1 Demanda Nacional y Regional** ..... 12

**2.3 Mercado Proveedor** ..... 16

**2.3.1 Mercado Proveedor de Gas Natural** ..... 17

**2.3.2 Mercado proveedor de Oxigeno** ..... 18

**2.3.3 Mercado proveedor Catalizadores** ..... 19

**2.4 Mercado Competidor** ..... 20

**2.4.1 Producción Nacional** ..... 20

**2.4.2 Producción Internacional** ..... 21

**2.5 Conclusiones del estudio de mercado** ..... 21

**CAPÍTULO III: LOCALIZACIÓN** ..... 23

**3.1 Introducción** ..... 24

3.2 Macrolocalización ..... 24
3.2.1 Alternativas de Macrolocalización ..... 24
3.2.2 Metodología: Método de ponderación de factores ..... 25
3.2.3 Factores de Localización Considerados ..... 26
3.2.4 Aplicación del Método de Factores Ponderados ..... 27
3.2.5 Análisis de sensibilidad ..... 28
3.2.6 Conclusión y Justificación ..... 28
3.3 Microlocalización ..... 29
3.3.1 Alternativas de Microlocalización ..... 29
3.3.2 Método de Brown-Gibson ..... 31
3.3.3 Factores Objetivos (OF) ..... 31
3.3.4 Factores Subjetivos (SF) ..... 32
3.3.5 Medida de Preferencia de Localización (MPL) ..... 33
3.3.6 Análisis de Sensibilidad ..... 34
3.3.7 Conclusión y Justificación ..... 34
3.4 Predio seleccionado ..... 35
3.5 Conclusión ..... 36
CAPÍTULO IV: TAMAÑO ..... 37
4.1 Introducción ..... 38
4.2 Determinación de la Demanda Objetivo ..... 38
4.3 Relación Estequiometria Metanol–Ácido Acético ..... 38
4.4 Factores Condicionantes del Tamaño de Planta ..... 39
4.4.1 Factor de Mercado ..... 39
4.4.2 Factor Tecnológico ..... 41
4.4.3 Factor de Materia Prima ..... 41
4.4.4 Factor Financiero ..... 41
4.4.5 Factor Operativo ..... 41

**4.4.6 Factor de Localización ..... 43**

**4.5 Determinación del tamaño de planta ..... 43**

**4.6 Justificación y conclusión ..... 43**

**CAPÍTULO V: TECNOLOGÍA ..... 45**

**5.1 Introducción ..... 46**

**5.2 Selección del proceso productivo ..... 46**

**5.2.1 Tecnología N°1: Proceso de carbonilación de metanol ..... 47**

**5.2.2 Tecnología N°2: Proceso de oxidación de acetaldehído ..... 47**

**5.2.3 Tecnología N°3: Proceso de oxidación en fase líquida de n-butano ..... 47**

**5.2.4 Tecnología N°4: Proceso de oxidación/deshidrogenación de etanol ..... 48**

**5.2.5 Proceso seleccionado ..... 48**

**5.3 Ingeniería básica ..... 49**

**5.3.1 Etapa 1: Reformado y Separación de Monóxido de Carbono ..... 49**

**5.3.2 Etapa N°2: Síntesis y Purificación del Metanol ..... 51**

**5.3.3 Etapa N°3: Síntesis y Purificación del Ácido Acético ..... 53**

**5.4 Ingeniería de detalle ..... 55**

**5.4.1 Introducción ..... 56**

**5.4.2 Balance de masa Etapa N°1 ..... 56**

**5.4.3 Diseño de equipamiento de la Etapa N°1 ..... 59**

**5.4.4 Balance de masa Etapa N°2 ..... 68**

**5.4.5 Diseño equipos Etapa N°2 ..... 73**

**5.4.6 Balance de masa Etapa N°3 ..... 94**

**5.4.7 Diseño de los Equipos Etapa N°3 ..... 98**

**CAPÍTULO VI: INGENIERÍA DE PROCESOS ..... 118**

**6.1 Diseño y distribución superficial de la planta ..... 119**

**6.1.1 Áreas características de la planta ..... 119**

**6.1.2 Infraestructura requerida ..... 120**

6.1.3 Layout de la planta ..... 120
6.2 Diseño y selección de equipos ..... 123
6.2.1 Desulfurador D-101 ..... 123
6.2.2 Reactor R-102 ..... 123
6.2.3 Economizador de Alta E-103 ..... 124
6.2.4 Acumuladores A-104, A-106 y A-107 ..... 125
6.2.5 Batería de Columnas PSA AB-105 ..... 125
6.2.6 Resumen de costos — Etapa N°1 (Gas de síntesis) ..... 126
6.2.7 Reactor R-201 ..... 126
6.2.8 Compresor de Reciclo C-208 ..... 127
6.2.9 Columna Flash F-203 ..... 127
6.2.10 Tren de destilación (T-204, T-205, T-206) ..... 128
6.2.11 Tanque de Almacenamiento de Metanol TK-207 ..... 128
6.2.12 Resumen de costos Etapa N°2 ..... 129
6.2.13 Reactor R-301 ..... 129
6.2.14 Columna Flash F-302 ..... 130
6.2.15 Columna de Remoción de Ligeros T-304 ..... 131
6.2.16 Columna de Secado T-305 ..... 131
6.2.17 Columna de Remoción de Pesados T-306 ..... 131
6.2.18 Intercambiador I-303 ..... 132
6.2.19 Tanque de Almacenamiento de Ácido Acético TK-307 ..... 132
6.2.20 Resumen de costos Etapa N°3 ..... 133
6.2.21 Conclusiones ..... 133
CAPÍTULO VII: INGENIERÍA DE GESTIÓN ..... 134
7.1 Introducción ..... 135
7.2 Estructura Organizacional ..... 135
7.2.1 Principios de Organización Aplicados ..... 136

7.2.2 Recursos Humanos ....136
7.3 Características de la Organización y Marco Legal ....137
7.3.1 Constitución Legal: Sociedad Anónima (S.A.) ....137
7.3.2 Razón Social e Información Institucional ....138
7.4 Organigrama Funcional ....139
7.5 Fichas de Función de Puestos de Trabajo ....141
7.5.1 Ficha de función de Gerencia General ....141
7.5.2 Ficha de Función de Gerencia de Operaciones y Planta ....142
7.5.3 Ficha de Función de Jefatura de Mantenimiento ....143
7.5.4 Ficha de Función de Jefatura de SSMA ....144
7.5.5 Ficha de Función de Jefe de Producción ....145
7.5.6 Ficha de Función de Operaciones ....146
7.5.7 Ficha de Función de Calidad y Control de Procesos ....147
7.6 Descripción y Clasificación de Cargos (CCT 564/09) ....148
7.7 Planificación y Diagramación de Turnos de Trabajo ....149
7.8 Conclusión del Capítulo ....152
CAPÍTULO VIII: ASPECTOS AMBIENTALES ....153
8.1 Introducción ....154
8.2 Marco legal ....154
8.2.1 Legislación nacional ....155
8.2.2 Legislación provincial y municipal ....155
8.3 Descripción de los factores ambientales ....157
8.3.1 Medio físico ....157
8.3.2 Medio biótico ....159
8.3.3 Medio socioeconómico ....160
8.4 Evaluación de Impacto Ambiental ....161
8.4.1 Problemática ambiental asociada al proyecto ....161

**8.4.2 Actividades del proyecto en sus distintas fases .....163**

**8.4.3 Metodología para la identificación y valoración de impactos ambientales .....164**

**8.4.4 Selección de equipos para el tratamiento de efluentes y control de riesgo .....181**

**8.4.5 Conclusión .....182**

**CAPÍTULO IX: ASPECTOS JURÍDICOS .....183**

**9.1 Introducción .....184**

**9.2 Marco legal .....184**

**9.2.1 Legislación nacional .....184**

**9.2.2 Legislación regional/provincial .....188**

**9.2.3 Legislación municipal .....190**

**9.3 Tramitación ambiental y habilitatoria - Hoja de ruta .....191**

**9.4 Marco impositivo .....192**

**9.4.1 Impuestos nacionales .....192**

**9.4.2 Impuestos regionales/provinciales .....194**

**9.4.3 Impuestos municipales en Bahía Blanca .....195**

**9.4.4 Trámites e inscripciones impositivas .....196**

**CAPÍTULO X: ASPECTOS NORMATIVOS Y DE CALIDAD .....198**

**10.1 Introducción .....199**

**10.2 Normas a certificar .....199**

**10.2.1 Normas internacionales (ISO) .....199**

**10.2.2 Normas nacionales (IRAM) .....206**

**10.2.3 Normas internacionales (ASTM, ASME, API) .....207**

**10.3 Control de calidad .....208**

**10.3.1 Parámetros y plan de control .....208**

**10.3.2 Registros .....213**

**10.3.3 Técnicas de análisis .....217**

10.3.4 Indicadores de calidad ....218
CAPÍTULO XI: HIGIENE Y SEGURIDAD INDUSTRIAL ....220
11.1 Introducción ....221
11.2 Condiciones generales de trabajo y construcción ....222
11.2.1 Provisión de agua ....223
11.2.2 Instalaciones sanitarias y vestuarios ....225
11.2.3 Iluminación y color ....225
11.2.4 Ruidos y vibraciones ....226
11.2.5 Ventilación ....227
11.2.6 Condiciones térmicas ....228
11.2.7 Condiciones ergonómicas ....229
11.2.8 Certificaciones médicas ....230
11.3 Seguridad industrial ....231
11.3.1 Responsabilidad de la seguridad ....231
11.3.2 Investigación de incidentes y accidentes ....232
11.3.3 Indicadores de desempeño (KPIs) de seguridad ....232
11.3.4 Plan de seguridad ....233
11.3.5 Plan de respuesta ante emergencias ....236
11.3.6 Matriz de elementos de protección personal (EPP) ....237
11.3.7 Protección contra incendios ....239
11.3.8 Instalaciones eléctricas ....240
11.4 Gestión del riesgo y prevención ....241
11.4.1 Equipos de Protección Personal (EPP) ....241
11.4.2 Señalización ....242
11.4.3 Capacitaciones ....243
11.4.4 Análisis de peligros y puntos críticos ....245
CAPÍTULO XII: ANÁLISIS DE RIESGO ....246

12.1 Introducción ..... 247
12.2 Identificación de factores de riesgo ..... 247
12.2.1 Riesgos físicos ..... 247
12.2.2 Riesgos químicos ..... 249
12.2.3 Riesgos mecánicos ..... 252
12.2.4 Riesgos eléctricos ..... 252
12.2.5 Riesgos económicos ..... 253
12.2.6 Riesgos tecnológicos ..... 254
12.2.7 Riesgos ambientales ..... 255
12.3 Matriz de riesgos ..... 257
CAPÍTULO XIII: EVALUACIÓN ECONÓMICA ..... 260
13.1 Introducción ..... 261
13.2 Tasa de descuento ..... 261
13.3 Estructura de costos ..... 262
13.3.1 Inversión inicial ..... 262
13.3.2 Cronograma de inversiones ..... 267
13.3.3 Capital de trabajo ..... 267
13.3.4 Costos fijos ..... 268
13.3.5 Costos variables ..... 271
13.3.6 Costos totales ..... 273
13.4 Beneficios e ingresos ..... 274
13.4.1 Precio de venta ..... 274
13.4.2 Ingresos totales ..... 274
13.4.3 Contribución marginal ..... 275
13.4.4 Utilidad anual ..... 275
13.5 Punto de equilibrio ..... 275
13.6 Flujo de caja y rentabilidad ..... 277

13.6.1 Flujo de caja ....277
13.6.2 Valor Actual Neto (VAN) ....278
13.6.3 Tasa Interna de Retorno (TIR) ....278
13.7 Conclusión ....279
CAPÍTULO XIV: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD ....280
14.1 Introducción ....281
14.2 Metodología y caso base ....281
14.2.1 Modelo de cálculo ....281
14.2.2 Caso base ....282
14.2.3 Selección de variables y rangos de variación ....283
14.3 Sensibilidad univariable ....284
14.3.1 Sensibilidad al precio de venta del ácido acético ....284
14.3.2 Sensibilidad al precio de venta del metanol ....286
14.3.3 Sensibilidad al precio del gas natural ....287
14.3.4 Sensibilidad al costo del oxígeno ....289
14.3.5 Sensibilidad a la inversión inicial ....291
14.3.6 Sensibilidad al factor de utilización de la capacidad ....293
14.3.7 Sensibilidad a la tasa de descuento ....295
14.3.8 Sensibilidad a otros costos operativos ....297
14.4 Valores críticos y márgenes de seguridad ....298
14.5 Jerarquización de variables: diagrama tornado y diagrama araña ....299
14.6 Estrategias de mitigación de los riesgos identificados ....301
14.7 Conclusiones del análisis de sensibilidad ....302
CONCLUSIONES DEL PROYECTO ....303
BIBLIOGRAFIA .... 305

# Índices de figuras y tablas.

## Figuras:

**Fig. 1.1 Estructura electrónica Ac. Acético....2**

**Fig. 3.1 Zona probable de ubicación de la planta....28**

**Fig. 3.2 Zonificación de Posibles locaciones de la planta....30**

**Fig. 3.3 Predio seleccionado....35**

**Fig. 4.1 Consumo aparente argentino e importación brasileña de ácido acético, demanda objetivo del proyecto y capacidad instalada....40**

**Fig. 4.2 Importación de metanol de Brasil y participación del excedente exportable del proyecto sobre dicho mercado....40**

**Fig. 4.3 Calendario anual de operación en régimen estable....42**

**Fig. 5.1 Diagrama de la primera etapa del proceso....49**

**Fig. 5.2 Diagrama de la segunda etapa del proceso....52**

**Fig. 5.3 Diagrama de la tercera etapa del proceso....54**

**Fig. 6.1 Diagrama Planta de Proceso modela en 3D....121**

**Fig. 6.2 Plano de Planta y distribución de zonas....122**

**Fig. 7.1 Logotipo de la empresa....138**

**Fig. 7.2 Organigrama de la empresa....140**

**Fig. 11.1 Pirámide de la jerarquía de control de riesgos aplicada a la planta....222**

**Fig. 11.2 Representación esquemática de las duchas de emergencia y lavaojos....224**

**Fig. 11.3 Ilustración de los vestuarios e instalaciones sanitarias....225**

**Fig. 11.4 Certificado de aptitud médica modelo....231**

**Fig. 11.5 Modelo de permiso de trabajo....235**

**Fig. 11.6 EPP generales para la protección integral del trabajador....239**

**Fig. 11.7 Tipos de fuego y extintores....240**

**Fig. 11.8 Ejemplos de señalizaciones industriales....242**

**Fig. 13.1 Punto de equilibrio del proyecto....276**

**Fig. 13.2 Flujo de caja del proyecto (10 años) ..... 278**

**Fig. 14.1 VAN vs Precio de venta del ácido acético ..... 285**

**Fig. 14.2 TIR vs Precio de venta del ácido acético ..... 285**

**Fig. 14.3 VAN vs Precio de venta del metanol ..... 286**

**Fig. 14.4 TIR vs Precio de venta del metanol ..... 287**

**Fig. 14.5 VAN vs Precio del gas natural ..... 288**

**Fig. 14.6 TIR vs Precio del gas natural ..... 289**

**Fig. 14.7 VAN vs Costo del oxígeno ..... 290**

**Fig. 14.8 TIR vs Costo del oxígeno ..... 291**

**Fig. 14.9 VAN vs Inversión inicial ..... 292**

**Fig. 14.10 TIR vs Inversión inicial ..... 293**

**Fig. 14.11 VAN vs Factor de utilización ..... 294**

**Fig. 14.12 TIR vs Factor de utilización ..... 295**

**Fig. 14.13 VAN vs tasa de descuento ..... 297**

**Fig. 14.14 Diagrama tornado: efecto de una variación de ±20 % sobre el VAN ..299**

**Fig. 14.15 Diagrama araña: VAN en función de la variación porcentual de cada variable ..... 300**

## Tablas:

**Tabla 1.1 Propiedades físicas del metano ..... 3**

**Tabla 1.2 Propiedades físicas del metanol ..... 4**

**Tabla 1.3 Propiedades físicas del Ac. Acético ..... 5**

**Tabla 2.1 Evolución del mercado Nacional del Ac. Acético ..... 13**

**Tabla 2.2 Estructura del mercado Nacional del Ac. Acético ..... 13**

**Tabla 2.3 Evolución del mercado Nacional del Metanol ..... 14**

**Tabla 2.4 Estructura del mercado Nacional del Metanol ..... 15**

**Tabla 2.5 Evolución del mercado de Brasil metanol y Ac. Acético ..... 15**

**Tabla 2.6 Producción de Gas Natural en Argentina ..... 17**

**Tabla 3.1 Factores de macrolocalización y pesos asignados.....26**

**Tabla 3.2 Matriz de calificación ponderada de alternativas de macrolocalización .....27**

**Tabla 3.3 Matriz de calificación ponderada de alternativas de macrolocalización .....28**

**Tabla 3.4 Costos relevantes de emplazamiento por alternativa .....31**

**Tabla 3.5 Cálculo del factor objetivo normalizado.....32**

**Tabla 3.6 Matriz de comparación pareada de factores subjetivos .....32**

**Tabla 3.7 Matriz de comparación pareada de factores subjetivos .....33**

**Tabla 3.8 Cálculo de la Medida de Preferencia de Localización.....33**

**Tabla 3.9 Sensibilidad del MPL ante variaciones del parámetro K.....34**

**Tabla 4.1 Determinación de la demanda objetivo de ácido acético grado polimérico .....38**

**Tabla 4.2 Proyección de demanda 2025-2034 (toneladas/año).....39**

**Tabla 4.3 Programa de puesta en marcha.....42**

**Tabla 4.4 Tamaño de planta determinado.....43**

**Tabla 5.1 Tabla de ponderación y toma de decisiones.....48**

**Tabla 5.2 Tabla de equipos y corrientes Etapa N°:1 .....50**

**Tabla 5.3 Tabla de equipos y corrientes Etapa N°:2 .....52**

**Tabla 5.4 Tabla de equipos y corrientes Etapa N°:3 .....54**

**Tabla 5.5 Corrientes de Bypass .....59**

**Tabla 5.6 Resultado de Balance de masa Etapa N°:1 .....59**

**Tabla 5.7 Tabla de Conclusiones.....62**

**Tabla 5.8 Tabla de Conclusiones.....65**

**Tabla 5.9 Tabla de Parámetros de calculo .....66**

**Tabla 5.10 Tabla de Conclusiones.....68**

**Tabla 5.11 Base de diseño.....69**

**Tabla 5.12 Tabla de Corrientes de Alimentación.....70**

**Tabla 5.13 Tabla de corrientes de entrada al reactor ..... 70**

**Tabla 5.14 Tabla de Corrientes de salida del reactor ..... 71**

**Tabla 5.15 Tabla de Corrientes gaseosa de ingreso a la columna flash ..... 71**

**Tabla 5.16 Tabla de Corrientes liquida de ingreso a la columna flash ..... 72**

**Tabla 5.17 Tabla de Corrientes de columna de topping ..... 72**

**Tabla 5.18 Tabla de Corrientes de columna ..... 72**

**Tabla 5.19 Tabla de Corrientes de columna de Refino ..... 73**

**Tabla 5.20 Tabla de Conclusiones ..... 73**

**Tabla 5.21 Tabla de Parámetros Operativos del Reactor ..... 74**

**Tabla 5.22 Tabla de Especificaciones Mecánicas del reactor ..... 78**

**Tabla 5.23 Tabla de conclusiones del reactor ..... 79**

**Tabla 5.24 Tabla de Corrientes de entrada al economizador ..... 80**

**Tabla 5.25 Tabla de conclusiones de columna flash ..... 81**

**Tabla 5.26 Tabla de Corrientes de columna T-204 ..... 83**

**Tabla 5.27 Tabla de Corrientes de columna T-205 ..... 84**

**Tabla 5.28 Tabla de Corrientes de columna T-206 ..... 86**

**Tabla 5.29 Tabla de Conclusiones de Tren de Torres de Refino ..... 88**

**Tabla 5.30 Tabla de Base de Cálculo de TK-207 A/B ..... 89**

**Tabla 5.31 Tabla de Dimensiones de virolas del tanque ..... 91**

**Tabla 5.32 Tabla de conclusiones de TK-207 ..... 93**

**Tabla 5.33 Tabla de Balance de Masa de Reactor R-301 ..... 95**

**Tabla 5.34 Tabla de Balance de Masa separador flash F-302 ..... 96**

**Tabla 5.35 Tabla de Balance Columna T-304 ..... 96**

**Tabla 5.36 Tabla de Balance Columna T-305 ..... 97**

**Tabla 5.37 Tabla de Balance Columna T-306 ..... 97**

**Tabla 5.38 Tabla de Conclusiones Reactor R-301 ..... 103**

**Tabla 5.39 Tabla de Conclusiones Tren de refino ..... 111**

**Tabla 5.40 Tabla de espesor de virolas de TK-307 ..... 115**

**Tabla 6.1 Tabla de distribución de Superficies ..... 120**

**Tabla 6.2 Tabla de Costo de Equipo D-101 ..... 123**

**Tabla 6.3 Tabla de Costo de Equipo R-102 ..... 123**

**Tabla 6.4 Tabla de Costo de Equipo E-103 ..... 124**

**Tabla 6.5 Tabla de Costo de Equipo A-104; A-106; A-107 ..... 125**

**Tabla 6.6 Tabla de Costo de Equipo AB-105 ..... 125**

**Tabla 6.7 Tabla de Costo Etapa N°1 ..... 126**

**Tabla 6.8 Tabla de Costo de Equipo R-201 ..... 126**

**Tabla 6.9 Tabla de Costo de Equipo C-208 ..... 127**

**Tabla 6.10 Tabla de Costo de Equipo F-203 ..... 127**

**Tabla 6.11 Tabla de Costo de Equipo T-204; T-205; T-206 ..... 128**

**Tabla 6.12 Tabla de Costo de Equipo TK-207 ..... 128**

**Tabla 6.13 Tabla de Costo Etapa N°2 ..... 129**

**Tabla 6.14 Tabla de Costo de Equipo R-301 ..... 129**

**Tabla 6.15 Tabla de Costo de Equipo F-302 ..... 130**

**Tabla 6.16 Tabla de Costo de Equipo T-304 ..... 131**

**Tabla 6.17 Tabla de Costo de Equipo T-305 ..... 131**

**Tabla 6.18 Tabla de Costo de Equipo T-306 ..... 131**

**Tabla 6.19 Tabla de Costo de Equipo I-303 ..... 132**

**Tabla 6.20 Tabla de Costo de Equipo TK-307 ..... 132**

**Tabla 6.21 Tabla de Costo Etapa N°3 ..... 133**

**Tabla 6.22 Tabla de Costo de Todas las Etapa ..... 133**

**Tabla 7.1 Tabla de Justificación de Decisiones ..... 137**

**Tabla 7.2 Tabla de Datos Sociales, Tributarios y Comerciales de la Empresa ... 139**

**Tabla 7.3 Tabla de Ficha de función de Gerencia General ..... 141**

**Tabla 7.4 Tabla de Ficha de Función de Gerencia de Operaciones y Planta ..... 142**

**Tabla 7.5 Tabla de Ficha de Función de Jefatura de Mantenimiento .....143**

**Tabla 7.6 Tabla de Ficha de Función de Jefatura de SSMA .....144**

**Tabla 7.7 Tabla de Ficha de Función de Jefe de Producción.....145**

**Tabla 7.8 Tabla de Ficha de Función de Operaciones .....146**

**Tabla 7.9 Tabla de Ficha de Función de Calidad y Control de Procesos.....147**

**Tabla 7.10 Tabla de Ficha de Encuadramiento y Clasificación Convencional de Cargos .....149**

**Tabla 7.11 Tabla de Dimensionamiento Consolidado de la Dotación de Personal .....151**

**Tabla 8.1 Tabla de Parámetros climáticos característicos de Bahía Blanca .....158**

**Tabla 8.2 Tabla de Factores y subfactores por medio.....164**

**Tabla 8.3 Criterios e indicadores de valoración .....165**

**Tabla 8.4 Tabla de Acciones del proyecto consideradas .....166**

**Tabla 8.5 Tabla de Matriz de identificación de impactos — Construcción (A1-A4).....169**

**Tabla 8.6 Tabla de Matriz de identificación de impactos — Operación (A5-A9)..172**

**Tabla 8.7 Tabla de Matriz de identificación de impactos — Cierre (A10-A11) .....174**

**Tabla 8.8 Tabla de Matriz de valoración de impactos — Construcción (A1-A4) .175**

**Tabla 8.9 Tabla de Matriz de valoración de impactos — Operación (A5-A9)).....177**

**Tabla 8.10 Tabla de Matriz de valoración de impactos — Cierre (A10-A11) .....179**

**Tabla 8.11 Tabla de Medidas de prevención y mitigación.....180**

**Tabla 9.1 Síntesis del marco regulatorio nacional .....188**

**Tabla 9.2 Marco regulatorio de la Provincia de Buenos Aires .....190**

**Tabla 9.3 Escala orientativa del Impuesto a las Ganancias (sociedades) .....193**

**Tabla 9.4 Impuestos por débitos y créditos bancarios (transferencia bancaria de $1.000.000) .....193**

**Tabla 9.5 Alícuotas de Impuesto de Sellos por tipo de contrato .....194**

**Tabla 9.6 Estimación orientativa de costos administrativos y tasas de tramitación .....197**

**Tabla 10.1 Plan de control de materias primas .....209**

**Tabla 10.2 Plan de control de proceso .....211**

**Tabla 10.3 Plan de control de producto final — metanol grado AA .....212**

**Tabla 10.4 Plan de control de producto final — ácido acético grado polimérico .....213**

**Tabla 10.5 Planilla de registro de gas natural.....213**

**Tabla 10.6 Planilla de registro de oxígeno .....214**

**Tabla 10.7 Planilla de registro del catalizador de D-101 .....214**

**Tabla 10.8 Planilla de registro de yoduro de metilo.....215**

**Tabla 10.9 Planilla de registro de proceso.....215**

**Tabla 10.10 Planilla de registro de producto final — metanol .....216**

**Tabla 10.11 Planilla de registro de producto final — ácido acético .....216**

**Tabla 10.12 Indicadores de calidad iniciales .....219**

**Tabla 11.1 Nivel de LUX según cada tarea/área .....226**

**Tabla 11.2 Caudal de aire necesario para ventilación por personas.....228**

**Tabla 11.3 Porcentaje de trabajo según carga térmica.....229**

**Tabla 11.4 Objetivos de los indicadores proactivos .....233**

**Tabla 11.5 Matriz de EPP .....234**

**Tabla 11.6 Ejemplo de árbol de causas aplicado a exposición a yoduro de metilo .....236**

**Tabla 11.7 EPP sugerido por tarea .....238**

**Tabla 11.8 Clasificación de fluidos según colores de identificación .....242**

**Tabla 11.9 Cronograma anual básico de capacitaciones .....244**

**Tabla 12.1 Matriz de riesgos.....259**

**Tabla 13.1 Inversión inicial – Terreno.....262**

**Tabla 13.2 Inversión inicial – Edificios e instalaciones .....263**

**Tabla 13.3 Inversión inicial – Maquinaria y equipos (método de Lang) .....264**

**Tabla 13.4 Inversión inicial – Rodados.....265**

**Tabla 13.5 Inversión inicial – Muebles y útiles .....265**

**Tabla 13.6 Inversión inicial – Resumen de activos tangibles .....265**

**Tabla 13.7 Inversión inicial – Costos diferidos (activos intangibles).....266**

**Tabla 13.8 Inversión inicial total .....266**

**Tabla 13.9 Cronograma de inversiones – Valor actualizado .....267**

**Tabla 13.10 Depreciaciones de activos tangibles .....268**

**Tabla 13.11 Amortizaciones de activos intangibles.....268**

**Tabla 13.12 Costos de mano de obra fija (personal diurno L-V).....269**

**Tabla 13.13 Costos fijos de servicios.....270**

**Tabla 13.14 Costos fijos totales.....270**

**Tabla 13.15 Costos de materia prima e insumos catalíticos.....271**

**Tabla 13.16 Costos de servicios variables.....272**

**Tabla 13.17 Costo de mano de obra variable (personal en régimen de 4 cuadrillas) .....272**

**Tabla 13.18 Costos variables totales.....273**

**Tabla 13.19 Costos totales (régimen estable, año 2 en adelante) .....273**

**Tabla 13.20 Precios de venta adoptados .....274**

**Tabla 13.21 Ingresos totales por producto (régimen estable) .....275**

**Tabla 13.22 Contribución marginal.....275**

**Tabla 13.23 Utilidad anual (régimen estable, antes de impuesto a las ganancias).....275**

**Tabla 13.24 Punto de equilibrio (base ingresos, mix de productos de diseño) ..276**

**Tabla 13.25 Flujo de caja del proyecto (10 años) .....277**

**Tabla 13.26 Valor Actual Neto del proyecto.....278**

**Tabla 13.27 Tasa Interna de Retorno del proyecto.....279**

**Tabla 14.1 Parámetros del caso base (Capítulo XIII).....283**

**Tabla 14.2 Indicadores y estructura económica del caso base (régimen estable).....283**

**Tabla 14.3 Sensibilidad del VAN y la TIR al precio de venta del ácido acético ...284**

**Tabla 14.4 Sensibilidad del VAN y la TIR al precio de venta del metanol Fig. 14.3: VAN vs Precio de venta del metanol .....286**

**Tabla 14.5 Sensibilidad del VAN y la TIR al precio del gas natural .....288**

**Tabla 14.6 Sensibilidad del VAN y la TIR al costo del oxígeno.....290**

**Tabla 14.7 Sensibilidad del VAN y la TIR al monto de la inversión inicial.....292**

**Tabla 14.8 Sensibilidad del VAN y la TIR al factor de utilización de la capacidad Fig. 14.11: VAN vs Factor de utilización.....294**

**Tabla 14.9 Sensibilidad del VAN a la tasa de descuento.....296**

**Tabla 14.10 Sensibilidad del VAN al riesgo país (resto de los componentes del CAPM constantes).....296**

**Tabla 14.11 Sensibilidad a otros costos operativos .....298**

**Tabla 14.12 Valores críticos y márgenes de seguridad de las variables del proyecto Los márgenes de seguridad muestran un proyecto moderadamente robusto ante .....299**

**Tabla 14.13 Resultados del análisis tornado y elasticidades del VAN.....300**

**Tabla 14.14 Estrategias de mitigación de los riesgos económicos identificados 14.7 Conclusiones del análisis de sensibilidad.....302**

# Resumen

En el presente trabajo observaremos el estudio de perfectibilidad de una planta de ácido acético a partir de metano, en el cual se van a involucrar cuatro procesos claves.

1. Reformado Autotérmico (ATR): En esta etapa producimos el gas de síntesis, el cual es una mezcla de CO y $H_2$. Se produce a través de un reactor que consta de un quemador, una cámara de combustión y un lecho de catalizador fijo. Donde la mezcla de hidrocarburos y vapor se quema parcialmente con oxígeno en la zona de combustión, generando el calor necesario para las reacciones de reformado endotérmicas que ocurren posteriormente en el lecho catalítico.
2. Separación de CO: Se separa una corriente del gas de síntesis al cual se le elimina el hidrogeno y en dióxido de carbono a través de adsorción por cambio de presión donde retenemos el CO en distintos lechos que cuando disminuimos la presión es liberado obteniendo CO con la suficiente pureza para entrar al reactor con el Metanol para producir ácido acético.
3. Reactor de Síntesis: En esta etapa recibiremos el gas de síntesis y a través de un reactor tubular isotérmico con catalizador, el cual con va a convertir nuestro gas de síntesis en Metanol.
4. Metanol a Ácido Acético: En esta etapa generamos el Ácido acético, a través de una carbonilación de metanol en un Reactor Catalizado (Cativa) que usa de materia prima el metanol y monóxido de carbono para producir el Acido, el cual después pasa por una etapa de refinado obteniendo ácido acético de alta pureza.

Este proyecto va a evaluar tanto la perfectibilidad técnica de la planta analizando distintas tecnologías que se implementan en la actualidad para producir Ácido Acético, como una evolución económica para ver la viabilidad de este proyecto teniendo en cuenta no tan solo el mercado argentino, sino también los países limítrofes que se encuentran en el MERCOSUR debido a las facilidades que este nos otorga en cuanto a tiempos, logística y barreras comerciales.

# CAPÍTULO N° I

## GENERALIDADES

## 1.1 Justificación

El ácido acético es uno de los ácidos orgánicos de mayor volumen de producción a nivel mundial, constituyendo una molécula base de la industria química por su amplio espectro de aplicaciones industriales. Su producción a partir de metano representa una alternativa técnicamente consolidada, económicamente competitiva y estratégicamente alineada con la matriz energética y productiva de la República Argentina.

En la argentina se encuentra uno de las reservas de gas natural no convencional más grande del mundo “Vaca Muerta” donde el metano es el componente mayoritario, lo cual es la materia prima para la producción del ácido acético. Dándonos una ventaja estratégica en los costos de la materia prima, frente a los otros competidores como China, Estados Unidos y Europa.

Con este proyecto lo que se busca no es tan solo abastecer la demanda argentina, sino tener la capacidad de abastecer a nuestros aliados estratégicos del MERCOSUR, aprovechando las ventajas que nos da este tratado para la exportación de productos químicos.

Otro aspecto sumamente importante de este proyecto es la producción de productos intermedios como el metanol, el cual nos va a dar una cartera de productos amplios generando mayor beneficio económico.



Fig.1.1 Estructura electrónica Ac Acetico.

Fuente: (Pratama, F. W., Fadhlan, Z., Purnamadjati, T. A., & Adjie, W. S.)

## 1.2 Enfoque y alcance del proyecto.

El presente trabajo desarrolla la ingeniería conceptual de una planta de Ácido Acético de gran escala, integrada verticalmente a una unidad de producción de Metanol. Esta estrategia busca maximizar la competitividad del proyecto mediante el aprovechamiento del Gas Natural de Vaca Muerta, con el objetivo dual de sustituir importaciones nacionales y abastecer el déficit estructural de metanol en el Mercosur (principalmente Brasil).

El alcance técnico abarca la caracterización del proceso de síntesis, la elaboración de balances de materia y energía del ciclo integrado, y el diseño conceptual de la planta, incluyendo una selección preliminar de equipos críticos y la definición de condiciones operativas. Asimismo, se consideran los aspectos vinculados a la seguridad de procesos, el impacto ambiental y el cumplimiento normativo vigente.

Finalmente, se prevé la realización de un análisis económico para evaluar la viabilidad del proyecto en etapas posteriores. Esta evaluación integrará los aspectos técnicos previamente definidos con criterios de inversión, costos operativos y proyecciones de rentabilidad, permitiendo determinar la factibilidad comercial de la propuesta en el escenario regional actual.

## 1.3 Marco teórico

### 1.3.1 Materias primas

#### 1.3.1.1 Metano

El metano es el hidrocarburo más simple y estable de la naturaleza. Consiste en un átomo de carbono central con hibridación $sp^3$ unido covalentemente a cuatro átomos de hidrógeno, formando una geometría tetraédrica perfecta. Esta estructura le confiere una gran estabilidad térmica.

El Metano constituye la alimentación principal del complejo. Actúa simultáneamente como vector energético y como fuente de átomos de Carbono e Hidrógeno para la síntesis de Metanol y la posterior generación del agente carbonilante requerido para la producción de Ácido Acético.

##### 1.3.1.1.1 Propiedades físicas

| Propiedad | Valor | Unidad |
|---|---|---|
| Peso molecular | 16.04 | g/mol |
| Aspecto | Gas incoloro | |
| Olor | Inodoro | |
| Punto de ebullición | -161.6 | °C |
| Punto de fusión | -182.6 | °C |
| Temp. Critica | -82.6 | °C |
| Presión Critica | 46.0 | Bar |
| Densidad | 0.657 | $Kg/m^3$ |
| Viscosidad | 0.011 | mPa. s |
| Solubilidad en $H_2O$ | Ligeramente soluble (22mg/L) | |
| Punto de inflamación | .188 | °C |
| Temp. de autoignición | 537 | °C |

Tabla 1.1 Propiedades físicas del metano

Fuente: Elaboración propia referencia de NIST Chemistry WebBook (National Institute of Standards and Technology)

### 1.3.2 Productos

#### 1.3.2.1 Metanol

El metanol o alcohol metílico es el alcohol mono hídrico más simple de la química orgánica. Está formado por un grupo metilo unido a un grupo hidroxilo polar. Esta estructura es clave: el enlace C-O es el punto de ataque para la reacción de carbonilación.

El Metanol constituye el producto intermedio de la planta de producción industrial planteada. Químicamente, actúa como el sustrato portador del grupo metilo sobre el cual se inserta el monóxido de carbono para formar el Ácido acético.

Es uno de los productos más importantes de la planta, por qué, es el que nos va a dar ventaja económica para la viabilidad económica de la misma.

##### 1.3.2.1.1 Propiedades físicas

| Propiedad | Valor | Unidad |
|---|---|---|
| Peso molecular | 32.04 | g/mol |
| Aspecto | Gas incoloro | |
| Olor | Alcohólico | |
| Punto de ebullición | 64.7 | °C |
| Punto de fusión | -97.6 | °C |
| Temp. Critica | 239.4 | °C |
| Presión Critica | 80.9 | Bar |
| Densidad | 0.791 | $g/m^3$ |
| Viscosidad | 0.59 | mPa. s |
| Solubilidad en $H_2O$ | Miscible | |
| Punto de inflamación | 11 | °C |
| Temp. de autoignición | 464 | °C |

Tabla 1.2 Propiedades físicas del metanol

Fuente: Elaboración propia referencia de NIST Chemistry WebBook (National Institute of Standards and Technology)

### 1.3.2.2 Ácido acético

El ácido acético o ácido etanoico es un ácido orgánico débil, pero fundamental en la industria química es un intermediario de síntesis, su valor radica en ser la materia prima para polímeros y solventes. Algunos de los usos industriales son:

- Producción de Acetato de Vinilo Monómero (VAM):
  Es el mayor uso global. El VAM se polimeriza para hacer emulsiones usadas en pinturas al látex y adhesivos.

- Producción de Ácido Tereftálico (PTA):
  El ácido acético se usa como solvente en la oxidación del P-Xileno para producir PTA. Es la materia prima de las botellas de plástico y fibras de poliéster.

- Solventes Acetato de Etilo:
  Muy usado en tintas flexibles y empaques.

#### 1.3.2.2.1 Propiedades físicas

| Propiedad | Valor | Unidad |
|---|---|---|
| Peso molecular | 60.5 | g/mol |
| Aspecto | Liquido incoloro | |
| Olor | Punzante | |
| Punto de ebullición | 118.1 | °C |
| Punto de fusión | 16.6 | °C |
| Temp. Critica | 319.6 | °C |
| Presión Critica | 57.9 | Bar |
| Densidad | 1.049 | $g/m^3$ |
| Viscosidad | 1.22 | mPa. s |
| Solubilidad en $H_2O$ | Miscible | |
| Punto de inflamación | 39 | °C |
| Temp. de autoignición | 463 | °C |

Tabla 1.3 Propiedades físicas del Ac. Acetico.

Fuente: Elaboración propia referencia de NIST Chemistry WebBook (National Institute of Standards and Technology)

### 1.3.3 Procesos de obtención

Hoy en día hay varios métodos para poder obtener ácido acético a partir de metano con el producto intermedio de metanol. En lo principal que se diferencian todos los métodos es en la obtención del gas de síntesis, por eso a continuación se desarrollara cada uno de los métodos más utilizados en la actualidad, mostrando sus ventajas y desventajas de cada uno pudiendo así hacer una selección adecuada del método.

- Steam reforming (reformado con vapor)

  Es una de las técnicas más antiguas y más estudiadas se usa para la producción de amónico o hidrogeno.
  Esta técnica consiste en un horno tubular donde ingresa el metano con vapor de alta, se calienta entre 800-900 °C debido a que es una reacción muy endotérmica. La reacción ocurre dentro de tubos llenos de catalizador (Níquel) ubicados dentro de un horno radiante. Obteniendo las siguientes reacciones:

  Reformado: $CH_4 + H_2O \rightleftarrows CO + 3H2 \quad \Delta H°_{298} = +206$ KJ/ mol

  Water-Gas: $CO + H_2O \rightleftarrows CO_2 + H_2 \quad \Delta H°_{298} = -41$ KJ/ mol

  Ventajas:
  - No requiere Planta de Oxígeno: Esta es su mayor ventaja económica. Al no necesitar oxígeno puro, te ahorras una inversión masiva y un alto consumo eléctrico.
  - Madurez Tecnológica: Es la tecnología más probada del mundo. Hay muchas plantas operando, lo que implica bajo riesgo técnico.
  - Alta Producción de Hidrógeno: Es ideal si tu objetivo principal fuera vender Hidrógeno.
  - Relación Vapor/Carbono alta: Opera con mucho vapor, lo que reduce el riesgo de formación de coque en el catalizador.

  Desventajas:
  - Exceso de Hidrógeno: El SMR produce una relación $H_2$/CO cercana a 3:1 o mayor.
  - Ineficiencia: Para hacer metanol se requiere relación 2:1, te sobra muchísimo hidrógeno. Tendrías que purgarlo o inyectar grandes cantidades de $CO_2$ externo para equilibrar la reacción.
  - Límite de Escala: Los reformadores tubulares tienen un límite físico de tamaño, Si la planta va a ser de grandes dimensiones no es viable.

- Oxidación Parcial No Catalítica:

  Es un proceso de combustión libre a alta temperatura y presión, forzando a generar una oxidación parcial del metano con el oxígeno, para formar monóxido de carbono e hidrogeno en una relación de 2:1

  $CH_4 + ½\ O_2 \rightleftarrows CO + 2H2 \quad \Delta H°_{298} = -39$ KJ/ mol

Ventajas:

- Flexibilidad de Alimentación: Puede procesar cualquier compuesto que tenga carbono: gas natural, residuos de refinería, carbón o biomasa.

- Tolerancia a Venenos: Al no tener lecho catalítico, no sufre envenenamiento por azufre o metales pesados.

- Alta Conversión por Paso: Las temperaturas extremas 1300-1500 °C garantizan que casi todo el metano se destruya, dejando muy poco metano sin reaccionar en la salida.

Desventajas

- Genera una relación $H_2$/CO teórica de 2:1, ligeramente baja para el metanol óptimo.

- Produce mucho hollín: Requiere sistemas complejos de lavado.

- Consumo de Oxigeno: Al no usar catalizador, consume más oxígeno por tonelada de producto, encareciendo la planta de separación de aire.

- Reformado Autotérmico (ATR):

Es una tecnología híbrida que combina la oxidación parcial y el reformado con vapor en un solo recipiente presurizado.
Consiste en un reactor con dos zonas principales: La zona de Combustión, donde el metano se mezcla con oxígeno y vapor, quemándose parcialmente. Luego pasa a la zona Catalítica: Es un lecho fijo de catalizador de Níquel donde se completa el reformado y se alcanza el equilibrio térmico.
Este tipo de reactores utiliza toda la energía generada por la combustión para luego poder reformarse sin necesidad de agregarle energía externa, favoreciendo la sinergia energética de la planta y una mayor conversión.

Oxidación parcial: $CH_4 + ½\ O_2 \rightleftarrows CO + 2H2 \quad \Delta H°_{298} = -39$ KJ/ mol

Steam reforming: $CH_4 + H_2O \rightleftarrows CO + 3H2 \quad \Delta H°_{298} = +206$ KJ/ mol

Dry reforming: $CH_4 + CO_2 \rightleftarrows 2CO + 2H2\ \Delta H°_{298} = +247$ KJ/ mol

Ventajas:

- Estequiometria Perfecta para Metanol: Permite ajustar la relación $H_2$/CO exactamente al valor requerido variando la alimentación de oxígeno. El gas sale del reactor en condiciones óptimas de uso, sin necesidad de purgas masivas, ni inyección de $CO_2$ externo.

- Economía de Escala: Es la única tecnología que permite producir más de 5.000 toneladas de metanol por día en un solo reactor.

- Alta Presión de Operación: El ATR puede operar a presiones muy altas (40-80 bar), a diferencia del SMR limitado por sus tubos.

- Impacto: Como la síntesis de metanol ocurre a 80-100 bar, el gas ya sale presurizado del ATR. Esto reduce a la mitad el tamaño y consumo del Compresor de Gas de Síntesis, que es el equipo más caro y consumidor de energía de toda la planta.

- Tamaño: El reactor es un recipiente a presión vertical, ocupando una fracción del espacio que ocuparía un horno de reformado equivalente.

Desventajas:

- Dependencia de una Planta de Oxígeno: El ATR no funciona con aire, necesita Oxígeno Puro. Esto te obliga a construir una Unidad de Separación de Aire o comprar el servicio a un tercero.

- Complejidad y Riesgo del Quemador: El corazón del ATR es el quemador ubicado en la cabeza del reactor. Es una pieza de ingeniería crítica que si sufre algún fallo puede genera una explosión masiva.

- Sensibilidad a la Formación de Hollín: Aunque el ATR genera menos hollín que la Oxidación Parcial, el riesgo persiste en la zona de combustión si se descontrola la combustión pudiendo envenenar el catalizador de níquel del lecho catalítico.

En este proyecto se va a adopta el Reformado Autotérmico (ATR) como tecnología de generación de syngas debido a que ofrece la ruta termodinámica más directa y eficiente para la síntesis de metanol. Su capacidad para generar un gas con la estequiometria exacta y a alta presión minimiza los reciclos, reduce el consumo energético de compresión y simplifica el diagrama de flujo del proceso, asegurando un diseño operativo robusto y moderno.

### 1.3.4 Descripción general del proceso

Esta planta es un diseño de alta complejidad con una instalación integrada de flujo continuo que transforma Gas Natural en Ácido Acético Glacial y Metanol grado polimérico. La planta se divide en los siguientes bloques de proceso:

Bloque 1: Generación de Syngas.

Bloque 2: Acondicionamiento y Separación de CO.

Bloque 3: Síntesis y Destilación de Metanol.

Bloque 4: Carbonilación y Purificación de Ácido Acético.

Bloque 1: Generación de Gas de Síntesis.

El objetivo de esta etapa es romper la molécula de metano para obtener una mezcla de $H_2$, CO y $CO_2$ a alta presión.

El Gas Natural ingresa a la planta (40-60 bar) y es precalentado. Pasa a través de lechos de Óxido de Zinc e hidrogenación para remover el azufre a niveles $S < 0.1$ ppm. Esto es vital para proteger los catalizadores de Níquel.

El gas desulfurado se mezcla con vapor y pasa por un reactor adiabático de baja temperatura (~500°C). Aquí se convierten los hidrocarburos pesados ($C_2$+) en metano, evitando la formación de coque en el reactor principal.

La corriente de metano y vapor ingresa al ATR junto con una corriente de Oxígeno puro

- Zonas de Combustión: El metano se oxida parcialmente a 1000-1200 °C.
- Zona Catalítica: La mezcla pasa por el lecho con catalizador de Níquel, alcanzando el equilibrio termodinámico.
- Salida: Obtenemos Gas de Síntesis Crudo compuesto por $H_2$, CO, $CO_2$ y vapor de agua a alta presión.
- Recuperación de Calor: El gas sale a altas temperatura y lo usamos para calderas de recuperación generando vapor de alta presión que se usará para mover las turbinas de los compresores o generación eléctrica.

Bloque 2: Acondicionamiento y Separación de CO.

La planta para poder producir ácido acético necesita una corriente de metanol y una de monóxido de carbono, esta se separa a partir del Syngas. Utilizando la diferencia de afinidad de adsorción a distintas presiones (PSA).

- Acondicionamiento Previo: El gas que sale del reformador contiene mucha agua y trazas de contaminantes. Antes de entrar a la PSA, debe estar seco y limpio.

  Enfriamiento: Se baja la temperatura a 30-40 °C para condensar la mayor parte del agua.

  Trampas de contamínate: Si queda alguna traza de azufre o compuestos orgánicos volátiles, se eliminan en lechos de carbón activado para no "envenenar" la zeolita de la PSA.

- Adsorción por Oscilación de Presión (Pressure Swing Adsorption):
  El gas de síntesis ingresa a una batería de columnas empacadas con un adsorbente específico (generalmente Zeolitas dopadas con Cobre). El proceso es cíclico y consta de dos fases basadas en la presión:

  Fase A: Adsorción Alta Presión: El gas entra a la columna a la presión de línea (20-30 bar). El adsorbente tiene una alta selectividad química por el Monóxido de Carbono. El CO se queda adsorbido en el sólido y el Hidrógeno y el dióxido de Carbono no se adsorben y pasan de largo a través de la columna.
  Esta corriente rica en hidrógeno sale por el tope a alta presión y se envía directo a la Unidad de Metanol.

  Fase B: Desorción a Baja Presión: Una vez que la columna está saturada de CO, se aísla y se baja la presión drásticamente (a veces ayudado por bombas de vacío).
  Al bajar la presión parcial, el sólido desorbe el CO que tenía atrapado. Se recupera el Monóxido de Carbono puro por el fondo de la columna. Se envía al compresor de CO para alimentar la Unidad de Ácido Acético.

Bloque 3: Síntesis y Destilación de Metanol.

El Syngas remanente se comprime a 80-100 bar en caso de ser necesario, esta planta al contar con un reformador autotérmico que va a trabajar entre 60 y80 bar no sería necesaria una recompresión y entra al Loop de Síntesis.

El gas pasa por un reactor tubular refrigerado (Lurgi) con catalizador Cu/Zn. La conversión por paso es baja, por lo que el gas no reaccionado se recircula hasta lograr la conversión deseada, obteniendo como producto Metanol Crudo líquido (Metanol + Agua + trazas de etanol).

El metanol crudo liquido pasa por un tren de dos columnas de destilación:

- Columna de Topping (Descalificadora): Elimina gases disueltos e impurezas livianas.

- Columna de Refino: Separa el metanol del agua y los aceites fusel (alcoholes pesados).

Obteniendo metanol de grado polimérico de alta pureza, el cual se dirige distintos tanques de almacenamientos los cuales se van a usar para su venta, exportación y para la producción de ácido acético dentro de la misma planta.

Bloque 4: Carbonilación y Purificación de Ácido Acético. (Patente CATIVA)

Esta unidad recibe el Metanol del Bloque 3 y el CO del Bloque 2, ambas materias primas se inyectan en un reactor agitado que contiene el catalizador líquido (Iridio/Rodio + Yoduro de Metilo), a 190 °C, 30-40 bar. La mezcla líquida saliente contiene Ácido Acético, Catalizador, Agua, Metanol sin reaccionar, inmediatamente pasa por un separador flash donde por fondo sale el catalizador que se recircula al reactor y por cabeza salen el ácido crudo (metanol, ácido acético, agua, yoduros).

Debido a que es una reacción exotérmica el calor generado se remueve para generar vapor de baja presión que se usa para en tren de purificación en los reboiler.

El ácido crudo pasa por un tren de purificación:

- Columna de Livianos: Se encarga de separar por cabeza los compuestos más volátiles (Yoduro de Metilo, Acetato de Metilo, Metanol) esta corriente se recicla al reactor (son promotores valiosos) y por fondo se retira el Ácido Acético "húmedo".

- Columna de Secado: En esta etapa es la más crítica debido a que separa el agua del ácido acético es un desafío en esta planta usaremos usa un destilado azeotrópico con inyectando un entrainer. Nos permite por fondo obtener Ácido Acético casi seco y por cabeza agua.

- Columna de Pesados: Se encarga de separar el Ácido Propiónico (subproducto) que tiene un punto de ebullición mayor que el Ácido Acético de grado polimérico.

- Retención de Yoduro: El producto pasa por lechos fijos con resinas de intercambio iónico dopadas con Plata o Mercurio. Estas atrapan las últimas trazas de yoduros (ppb) que son venenos mortales para los clientes de vinilos, obteniendo así un Ácido Acético de grado polimérico que se dirige hacia los tanques de almacenamiento calefaccionados.

# CAPÍTULO N° II
## ESTUDIO DE MERCADO

## 2.1 INTRODUCION AL ESTUDIO DE MERCADO

El estudio de mercado es una herramienta crítica para determinar la factibilidad económica del proyecto, permitiendo dimensionar el mercado consumidor y poder saber la probabilidad de inserción de una nueva unidad productiva de Metanol y Ácido Acético. El análisis se orienta a comprender las dinámicas macroeconómicas y sectoriales que rigen el consumo de estos commodities petroquímicos, tanto en el ámbito nacional, como en el mercado de exportación regional dentro del Mercosur.

En este capítulo, se abordará la evolución histórica del consumo aparente, segregando la demanda por sus aplicaciones finales más relevantes: la síntesis de Acetato de Vinilo (VAM), la producción de Ácido Tereftálico (PTA) y el uso creciente del metanol como vector energético y químico. Simultáneamente, se relevará la oferta actual, poniendo en evidencia la dependencia de importaciones y las dificultades logística asociada a la importación.

A continuación, se identificarán los potenciales clientes y competidores a nivel nacional e internacional, así como los proveedores de insumos críticos y tecnologías licenciadas. Se prestará especial atención a las proyecciones de crecimiento de las industrias consumidoras de estos commodities petroquímicos.

## 2.2 MERCADO CONSUMIDOR

Cuando hablamos de mercado consumidor nos encontramos con dos grandes ramas dentro de la planta:

Mercado consumidor del Metanol:

- Consumo Cautivo: La planta de producción de Ácido Acético es el principal cliente de la planta de metanol. Una parte del metanol que produces no se vende, sino que se consume internamente para fabricar el ácido acético.

- Consumidores de Metanol: hay varias industrias que consumen esta materia prima pero las más relevantes para este estudio de mercado son:

    - Industria del Biodiesel: Las plantas refinadoras usan metanol para convertir aceite de soja en combustible. Es el mayor consumidor en Argentina y Brasil.
    - Industria de la Madera: Fabricantes de tableros (aglomerados, MDF) que usan metanol para hacer resinas y pegamentos (formaldehído).

Mercado consumidor del Ácido Acético:

- Industria Textil y de Envases (PTA): Fábricas que hacen el plástico para botellas (PET) y fibras de poliéster para ropa. Usan el ácido como solvente.
- Industria de Pinturas y Adhesivos: Fábricas que producen la base blanca (látex) para pinturas arquitectónicas y colas vinílicas.

### 2.2.1 Demanda Nacional y Regional.

#### 2.2.1.1 Demanda Nacional del Ácido Acético:

El mercado del ácido acético en Argentina presenta una realidad crítica, caracterizada por la ausencia total de fabricación local y una dependencia absoluta del exterior para abastecer su consumo interno.

**ÁCIDO ACÉTICO**

NCM: 2915.21.00

| AÑO | PRODUCCIÓN (t) | IMPORTACIÓN (t) | EXPORTACIÓN (t) | CONSUMO APARENTE (t) | VALOR COMERCIO EXTERIOR (U$S/t) | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | IMPORTACIÓN (CIF) | EXPORTACIÓN (FOB) |
| 2015 | – | 21.457 | 1 | 21.456 | 733 | – |
| 2016 | – | 16.335 | 1 | 16.334 | 574 | – |
| 2017 | – | 8.428 | 35 | 8.393 | 588 | – |
| 2018 | – | 6.650 | 27 | 6.623 | 821 | – |
| 2019 | – | 6.981 | 198 | 6.783 | 718 | – |
| 2020 | – | 6.542 | 294 | 6.248 | 639 | – |
| 2021 | – | 7.204 | 283 | 6.921 | 959 | – |
| 2022 | – | 8.887 | 196 | 8.691 | 1.297 | 1.888 |
| 2023 | – | 6.842 | 250 | 6.592 | 1.084 | 2.130 |
| 2024 | – | 5.664 | 232 | 5.432 | 900 | 1.964 |

| PRODUCTOR | LOCALIZACIÓN | CAPACIDAD INSTALADA (t/a al 31/12/24) | PROCESO | MATERIAS PRIMAS |
|---|---|---|---|---|
| ATANOR S.C.A. | Río Tercero (Córdoba) | 3.600[1] | Atanor | Etanol |
| | Baradero (Bs. As.) | 12.000[2] | Rhone-Poulenc | Etanol |

Tabla 2.1 Evolución del mercado Nacional del Ac. Acético.

Fuente: Anuario IPA,2025

La Tabla 2.1 presenta la evolución del mercado argentino de Ácido Acético 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.

Históricamente, el mercado era abastecido por la empresa ATANOR S.C.A., que contaba con una capacidad instalada distribuida en dos plantas: una en Río Tercero, Córdoba (3.600 toneladas anuales) y otra en Baradero, Buenos Aires (12.000 toneladas anuales), utilizando etanol como materia prima. Sin embargo, la planta cerró definitivamente en febrero de 2017. Las instalaciones figuran como fuera de operación y la producción ha sido de 0 toneladas desde al menos el año 2015.

El consumo aparente en el país ha experimentado una contracción drástica y sostenida durante la última década. Pasó de 21.456 toneladas en 2015 a tan solo 5.432 toneladas estimadas para el año 2024.

Ese gran decrecimiento del mercado se debe a la grande fluctuación económica del país y al depender exclusivamente de importaciones cuando sufrimos estas fluctuaciones, deja de ser rentable la producción que usa como materia prima el ácido acético, disminuyendo el consumo y a su vez cerrado muchas plantas.

| ESTRUCTURA DEL MERCADO LOCAL EN 2024 (porcentual) | |
|---|---|
| Industria química | 80 |
| Industria textil | 8 |
| Industria alimenticia | 8 |
| Varios | 4 |

Tabla 2.2 Estructura del mercado Nacional del Ac. Acético.

Fuente: Anuario IPA,2025

El mercado consumidor del ácido acético es bastante particular porque su demanda interna en 2024 está fuertemente concentrada en unos pocos sectores.

- Industria química (80%): Es el principal motor del mercado, absorbiendo el 80% del producto. Dentro de este gran rubro, destaca la industria de pinturas y adhesivos, donde las fábricas lo requieren como insumo para producir la base blanca (látex) utilizada en pinturas arquitectónicas y en la fabricación de colas vinílicas.
- Industria textil y de envases (8%): Este sector abarca las fábricas dedicadas a la creación de plásticos para botellas (PET) y fibras de poliéster para la indumentaria. En este sector, el ácido acético funciona como un solvente fundamental.
- Industria alimenticia (8%):

- Varios (4%):

En conclusión, la construcción de una nueva planta de ácido acético en Argentina trasciende la simple oportunidad de negocio; es una necesidad estratégica imperativa para la soberanía industrial del país. Hoy en día, el mercado nacional presenta una vulnerabilidad crítica: una dependencia absoluta del 100% de las importaciones. Desde el cierre definitivo de la última planta productora en 2017, Argentina ha sufrido una fuga constante de divisas para poder sostener a su industria química, textil y alimenticia. Tan solo en 2024, el país se vio obligado a importar miles de toneladas a un alto costo internacional, dejando a los productores locales a merced de la volatilidad externa.

**2.2.1.2 Demanda Nacional del Metanol:**

En el extremo opuesto, el metanol presenta un mercado robusto, activo y excedentario. Se sustenta en una fuerte capacidad industrial instalada en el país, lo que permite cubrir de manera holgada el consumo interno y mantener un sólido perfil exportador.

**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 2.3 Evolución del mercado Nacional del Metanol.

Fuente: Anuario IPA,2025

La Tabla 2.1 presenta la evolución del mercado argentino del Metanol 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, una gran competencia a nivel nacional.

Argentina opera mediante el proceso Lurgi y utiliza gas natural como materia prima, contando con una capacidad instalada total de 461.000 toneladas anuales. El sector está dominado por dos productores clave:

- YPF S.A.: Lidera el mercado con su planta en Plaza Huincul (Neuquén), con una capacidad de 411.000 t/a.
- ARAUCO ARGENTINA S.A. (División Química): Opera en Puerto General San Martín (Santa Fe) con una capacidad de 50.000 t/a.

Los niveles de producción se han mantenido relativamente estables, registrando 417.530 toneladas en 2024, lo que demuestra una recuperación frente a la fuerte caída observada durante el año 2020.

El consumo interno se encuentra estabilizado tras un período de baja. En 2024, el consumo aparente se sitúa en 227.909 toneladas. Si bien es un mercado consolidado, esta cifra representa una disminución frente a los picos históricos registrados en 2016 y 2017, cuando el consumo superó las 419.000 toneladas

Comercialmente, Argentina es un exportador neto. Durante 2024, las exportaciones alcanzaron las 190.633 tonelada, mientras que las importaciones fueron prácticamente nulas (1.012 toneladas).

| ESTRUCTURA DEL MERCADO LOCAL EN 2024 (porcentual) | |
|---|---|
| Biodiésel | 71 |
| Industrial (formaldehído. colas ureicas. etc.) | 22 |
| MTBE | 3 |
| Varios (solvente y otros) | 4 |

Tabla 2.4 Estructura del mercado Nacional del Metanol.

Fuente: Anuario IPA,2025

Al analizar la demanda del metanol, nos encontramos con que la salida de la producción se divide estratégicamente en dos grandes ramas: el consumo cautivo y los consumidores externos.

- Consumo Cautivo (Interno)

La propia planta de producción de ácido acético es el cliente principal. Esto significa que una porción del metanol producido no sale a la venta al mercado, sino que se retiene y consume internamente como materia prima indispensable para fabricar el ácido acético.

- Consumidores Externos

Cuando el metanol sale al mercado, el motor indiscutible de la demanda a nivel nacional es la industria de los biocombustibles. Así se divide exactamente:

- Biodiesel (71%): Lidera ampliamente el consumo, abarcando el 71% del mercado local. De hecho, es el consumidor número uno en Argentina y Brasil. Las plantas refinadoras utilizan el metanol para lograr convertir el aceite de soja en combustible.
- Sector Industrial (22%): Representa el 22%, destinado principalmente a la elaboración de formaldehído, colas ureicas, entre otros.
- MTBE (3%): aditivo que se usa para incrementar el octanaje de la gasolina.
- Varios (4%): Utilizado principalmente como solvente.

En conclusión, el proyecto para construir nuestra propia planta de metanol trasciende la simple idea de competir en el mercado químico; es la pieza fundacional que garantiza la viabilidad, seguridad y rentabilidad de todo nuestro complejo industrial. Si bien el mercado del metanol en Argentina ya es sumamente atractivo por sí mismo, nuestra principal ventaja competitiva radica en la integración vertical.

### 2.2.1.3 Demanda Regional.

Si bien la sustitución de importaciones a nivel nacional justifica la fase inicial del proyecto, la escala de rentabilidad y la proyección global de la planta están directamente supeditadas a la demanda de la región del Mercosur, con Brasil consolidándose como el principal consumidor y objetivo estratégico.

| Código NCM | Descrição NCM | 2021 - Toneladas | 2022 - Toneladas | 2023 - Toneladas | 2024 - Toneladas | 2025 - Toneladas |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 29051100 | Metanol (álcool metílico) | 1,405,821 | 1,335,506 | 1,582,209 | 1,708,400 | 1,685,096 |
| 29152100 | Ácido acético | 177,055 | 155,605 | 125,981 | 140,902 | 132,759 |
| Total | | 1,582,877 | 1,491,111 | 1,708,190 | 1,849,302 | 1,817,855 |

Tabla 2.5 Evolución del mercado de Brasil metanol y Ac. Acético.

Fuente: COMEX STAT

El análisis del perfil importador brasileño (período 2021-2025) revela un mercado de dimensiones extraordinarias, caracterizado por un déficit estructural en la producción de estos químicos base:

- Demanda de Metanol: Brasil actúa como el principal aspirador de metanol en la región, exhibiendo volúmenes de importación masivos y sostenidos. Los registros indican un piso de 1.335.505 toneladas (2022), escalando sistemáticamente hasta alcanzar picos de 1.708.399 toneladas en 2024 y proyecciones de 1.685.096 toneladas para 2025. Esta demanda constante es impulsada fuertemente por su propia industria de biodiesel y la fabricación de resinas de formaldehído.
- Demanda de Ácido Acético: El mercado brasileño requiere volúmenes de importación de ácido acético que promedian las 150.000 toneladas anuales, con registros de 177.055 toneladas en 2021 y 140.902 toneladas en 2024. Este flujo es vital para sostener su industria textil, de envases y el sector de pinturas.

La instalación de la planta integrada en el territorio nacional configura un polo petroquímico con capacidad inmediata de abastecimiento a todo el bloque del Mercosur.

Frente a la competencia de proveedores asiáticos o norteamericanos, este proyecto ostenta ventajas competitivas para el mercado del Mercosur:

- Reducción drástica de costos logísticos: La cercanía geográfica disminuye sustancialmente el impacto del flete internacional en la estructura de costos del producto puesto en destino.
- Preferencias arancelarias: La comercialización dentro del marco del Mercosur exime a los productos de los aranceles extrazona, mejorando el margen de comercialización frente a competidores globales.
- Flexibilidad de colocación: El esquema integrado (metanol/ácido acético) permite balancear la producción y la exportación según las fluctuaciones de precios internacionales, asegurando que cualquier excedente de metanol no consumido en la síntesis de ácido acético tenga una colocación directa, masiva y garantizada en el polo industrial brasileño.

En conclusión, el diseño de este complejo trasciende la cobertura del mercado interno, estructurándose técnica y económicamente para dominar el abastecimiento petroquímico del Mercosur, apalancado por la masiva dependencia de Brasil hacia las importaciones de ambos compuestos.

## 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.

Las principales materias primas requeridas para la producción de Ac, Acético y Metanol son Gas Natural y Oxigeno.

### 2.3.1 Mercado Proveedor de Gas Natural:

| PRODUCCIÓN (millones de m³) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Cuenca** | **2020** | **2021** | **2022** | **2023** | **2024** |
| Austral | 11.534 | 10.858 | 9.915 | 9.279 | 8.859 |
| Cuyana | 49 | 49 | 51 | 52 | 47 |
| Golfo San Jorge | 4.158 | 3.937 | 4.078 | 4.116 | 3.900 |
| Neuquina | 27.651 | 28.915 | 32.923 | 33.344 | 36.695 |
| Noroeste | 1.704 | 1.533 | 1.403 | 1.304 | 1.237 |
| **Totales** | **45.096** | **45.292** | **48.369** | **48.094** | **50.738** |

Tabla 2.6 Producción de Gas Natural en Argentina.

Fuente: Anuario IPA,2025

Argentina cuenta con una de las reservas de gas natural no convencional más importantes del planeta, con la formación de Vaca Muerta en la Cuenca Neuquina como su epicentro. La producción nacional de gas natural ha mantenido un crecimiento sostenido, superando los 50.000 millones de $m^3$ anuales, donde la Cuenca Neuquina aporta más del 72% del total nacional.

A diferencia de depender de materias primas importadas que fluctúan con los fletes marítimos y las tensiones geopolíticas globales, el gas natural argentino ofrece un suministro 100% local, previsible y continuo durante los 365 días del año.

Las principales ventajas de utilizar Gas Natural para el proceso:

- vinculación directamente con las principales operadoras de exploración y producción (Upstream) o con comercializadoras de gas natural, en lugar de depender de distribuidores químicos intermediarios.
- Firma de contratos de abastecimiento a largo plazo (Gas Supply Agreements - GSA). Estos contratos pueden fijar fórmulas de precio vinculadas a índices locales o costos en boca de pozo, otorgando una previsibilidad de costos de producción.
- La magnitud de la oferta nacional asegura que una planta petroquímica de escala regional pueda negociar volúmenes firmes de suministro sin poner en riesgo el abastecimiento energético de otras industrias.
- El costo por millón de BTU (MMBTU) del gas natural en boca de pozo en Argentina convierte a este insumo en una de las fuentes de carbono más económicas de la región.

El gas natural cumple un doble rol dentro del complejo industrial:

- Materia Prima: Aporta los átomos de carbono e hidrógeno para la reacción.
- Combustible de Proceso: Alimenta directamente los quemadores de los hornos de reformado y las calderas de generación de vapor.

Esta dualidad permite diseñar la planta con una alta integración térmica: los gases de purga y el calor de las reacciones exotérmicas de síntesis alimentan las etapas de destilación y purificación, maximizando la eficiencia energética global del sitio.

### 2.2.2 Mercado proveedor de Oxigeno:

En el diseño de una planta industrial integrada destinada a la producción de ácido acético a partir de metano, el oxígeno juega un papel fundamental en el proceso para la obtención del gas de síntesis a partir del gas natural, el cual se realiza mediante tecnologías avanzadas como el Reformado Autotérmico (ATR), donde se requieren volúmenes masivos y continuos de oxígeno de alta pureza.

Debido a la inmensa escala requerida para sostener un polo petroquímico con capacidad de exportar al mercado regional, el abastecimiento de oxígeno no puede depender de logística terrestre, sino que exige la instalación de una Unidad de Separación de Aire en el sitio.

Para esto lo mejor es asociarse con una empresa especializada, donde el modelo de negocios recomendado y estándar en la industria petroquímica es el contrato BOO (Build, Own, Operate - Construir, Poseer, Operar), también conocido como suministro Over-The-Fence.

Bajo este esquema, la dinámica del mercado proveedor funciona de la siguiente manera:

- Inversión y Construcción: La empresa especializada diseña, financia y construye la Planta de Separación de Aire (ASU) en un terreno adyacente o dentro del mismo predio del complejo industrial.
- Operación y Mantenimiento: La empresa proveedora mantiene la propiedad de la ASU y se encarga al 100% de su operación, mantenimiento y de las paradas de planta programadas.
- Suministro por Cañería: El oxígeno se entrega en los límites de batería de tu planta directamente por cañería, a la presión, caudal y pureza, estipulados en un contrato de largo plazo (generalmente de 15 a 20 años).

El mercado de los gases industriales es un oligopolio tecnológico. Se caracteriza por barreras de entrada altísimas debido al intensivo capital requerido. En Argentina, este mercado proveedor está dominado por tres gigantes multinacionales, plenamente capacitados para asumir proyectos de esta envergadura:

- Air Liquide (Francia): Es uno de los líderes indiscutidos del sector a nivel nacional y global. Posee una vasta experiencia operando plantas de separación de aire dentro de polos petroquímicos e industriales en Argentina.

- Linde (Irlanda/Alemania): Tras su fusión con Praxair, es el competidor directo más fuerte, con operaciones masivas y capacidad de ingeniería comparable.

- Air Products / Indura (EE.UU.): Un tercer actor de peso mundial con fuerte presencia en el suministro de gases de síntesis y gases del aire para refinerías y petroquímicas.

El mercado proveedor de oxígeno está sumamente maduro, altamente concentrado en proveedores de primer nivel mundial (como Air Liquide) y habituado a grandes integraciones petroquímicas. Optar por un contrato Over-The-Fence para el oxígeno no solo asegura la viabilidad técnica del reformado de gas natural, sino que optimiza financieramente todo el proyecto, al transformar un gasto de capital (CAPEX) en un gasto operativo (OPEX) predecible a largo plazo.

### 2.3.3 Mercado proveedor Catalizadores:

En un complejo industrial enfocado en la conversión de gas natural (metano) en metanol y la posterior carbonilación de este a ácido acético, la selección y estrategia de abastecimiento de los sistemas catalíticos constituyen una decisión crítica de ingeniería.

Mercado Proveedor catalizador reactor ATR:

El reactor ATR combina la oxidación parcial del metano en fase gaseosa con el reformado heterogéneo catalítico en un único recipiente a presión. El lecho catalítico opera bajo condiciones térmicas severas, con relaciones de vapor/carbono optimizadas.

Para este proceso se usa catalizador de níquel altamente disperso, soportado en cerámicos refractarios de alta inercia térmica y resistencia mecánica, basados en aluminato de magnesio, aluminato de calcio o alfa-alúmina.

El mercado está integrado por licenciantes de tecnología de reformado que proveen paquetes cerrados de ingeniería junto con las primeras cargas catalíticas:

- Haldor Topsoe (Dinamarca): Líder global con la tecnología SynCOR™. Sus catalizadores de la serie RKS poseen geometría modificada para minimizar la caída de presión y prevenir la formación de carbón.
- Johnson Matthey (Reino Unido): Suministra la serie KATALCO™ para reformado autotérmico y secundario, destacándose por su alta estabilidad térmica y resistencia al sinterizado.
- Clariant (Suiza): Desarrollador de la línea ReforMax®, caracterizada por una distribución porosa optimizada que maximiza la transferencia de masa.
- Air Liquide / Lurgi (Francia/Alemania): Integrador de sistemas que comercializa cargas catalíticas validadas para sus reactores de oxidación parcial y ATR.

La carga inicial se adquiere obligatoriamente junto con la licencia de tecnología del quemador/reactor. Los reemplazos (ciclo de vida de 3 a 5 años) se pueden licitar abiertamente bajo especificaciones de caída de presión y actividad residual.

Mercado Proveedor catalizador reactor Metanol:

La conversión del gas de síntesis en metanol es una reacción fuertemente exotérmica controlada por equilibrio termodinámico, operada habitualmente entre 220 °C – 280 °C y presiones de 50 Bar a 100 Bar.
Para este proceso se usa catalizador de sistema trimerico de Cobre, Óxido de Zinc y Alúmina.
Este mercado es un estándar comercial de alta competencia (*off-the-shelf*). Los proveedores compiten en selectividad (reducción de subproductos como parafinas y alcoholes superiores) y vida útil (resistencia a venenos como derivados de azufre y cloro).

- Clariant (Suiza): Domina una porción significativa del mercado con la serie MegaMax®, caracterizada por una elevada actividad a baja temperatura.
- Johnson Matthey (Reino Unido): Fabrica la serie KATALCO™ 51, estándar de la industria con óptima resistencia a la desactivación térmica.
- Haldor Topsoe (Dinamarca): Produce las variantes MK-121 y MK-151, diseñadas para maximizar la conversión por paso en reactores enfriados por agua o gas.
- BASF (Alemania): Proveedor con amplia infraestructura de distribución regional en América del Sur.

Lo más recomendable es establecer contratos de provisión a mediano plazo (reemplazo cada 3 a 6 años) incluyendo cláusulas de recompra o reciclaje de los óxidos gastados para la recuperación de cobre y zinc.

Mercado Proveedor catalizador reactor Ac Acético:

La reacción de síntesis de ácido acético mediante la adición de monóxido de carbono al metanol se lleva a cabo en fase líquida utilizando catalizadores homogéneos de organometálicos de transición.

En esta etapa, el mercado catalítico está intrínsecamente ligado al licenciante de la tecnología de proceso:

- BP Chemicals (Reino Unido): Licenciante de la tecnología Cativa™ (Iridio/Rutenio). Controla la especificación de los complejos catalíticos utilizados bajo sus patentes.
- Celanese Corporation (EE.UU.): Licenciante de la tecnología AO Plus™, basada en complejos de Rodio estabilizados con sales de yoduro.
- Heraeus (Alemania) & Johnson Matthey (Reino Unido): Principales refinadores y sintetizadores químicos a nivel global encargados de la fabricación física de las sales organometálicas de Rodio e Iridio de ultra pureza.

El abastecimiento de los sistemas catalíticos para el complejo integrado de metanol y ácido acético representa uno de los desafíos más críticos tanto a nivel de ingeniería como de estructuración financiera. El análisis del mercado proveedor revela que no existe una estrategia de compras única, sino que el proyecto exige un enfoque diversificado y adaptado a la naturaleza técnica de cada etapa del proceso.
La viabilidad y rentabilidad del complejo petroquímico no solo dependen del acceso a materias primas abundantes como el gas natural, sino de una gestión de compras altamente sofisticada. El éxito radicará en combinar la competencia del mercado abierto para la etapa de metanol, con alianzas tecnológicas sólidas para el reformado, y una ingeniería financiera precisa para el arrendamiento de metales nobles en la etapa final de ácido acético.

## 1.4 Mercado Competidor.

### 2.4.1 Producción Nacional

Metanol:
El mercado interno opera bajo una estructura de duopolio altamente concentrado, donde la competencia es limitada debido a la ubicación geográfica y la escala dispar de los actores.

- YPF S.A.: Opera el complejo en Plaza Huincul con una capacidad de 411.000 t/año. Al estar ubicado en el epicentro de la Cuenca Neuquina (Vaca Muerta), posee la mayor ventaja competitiva del país en términos de acceso y costo de gas natural. Domina ampliamente el abastecimiento a la industria del biodiesel.
- ARAUCO ARGENTINA S.A.: Opera en Puerto General San Martín con una capacidad de 50.000 t/a. Su producción es menor y está estratégicamente ubicada en el polo agroexportador, lo que le permite atender nichos específicos y consumos cautivos.

Ácido Acético:
La competencia nacional de producción es inexistente. Tras el cierre definitivo de las plantas de ATANOR S.C.A. en 2017, la capacidad instalada nacional se redujo a cero. La rivalidad en el territorio argentino no se da entre fabricantes, sino entre distribuidores e importadores químicos (como Química Córdoba o distribuidoras de commodities) que pujan por el margen comercial de comercializar el producto importado.

### 2.4.2 Producción Internacional.

Metanol:
El metanol es un commodity de alto volumen, pero para competir desde Argentina hacia el Mercosur, el análisis debe centrarse en los competidores del hemisferio que impactan la balanza comercial sudamericana.

- Methanex: Es el productor de metanol más grande del mundo. Su principal amenaza para un proyecto argentino radica en su complejo industrial en Punta Arenas, Chile.
- Proman: Con base en el Caribe y el Golfo de EE.UU., Proman es un competidor masivo. Las plantas en Trinidad y Tobago gozan de incentivos fiscales y gas económico, inundando el mercado atlántico con metanol de bajo costo.
- SABIC y Medio Oriente: Aunque geográficamente distantes, los mega-complejos de Arabia Saudita fijan muchas veces el precio piso del metanol a nivel internacional.

Ácido Acético:
La producción de ácido acético está altamente concentrada en empresas que poseen licencias tecnológicas de carbonilación de metanol y economías de escala masivas.

- Norteamérica y Europa: Empresas como Celanese Corporation, BP Chemicals son los competidores primarios en el hemisferio occidental. Estos actores dominan las exportaciones hacia Sudamérica debido a sus bajísimos costos operativos respaldados por el gas en el Golfo de México.
- Asia: La industria química china posee una sobrecapacidad productiva inmensa. Si bien su enfoque principal es Asia, representan una amenaza constante de competencia por precio global.
- Mercosur: Brasil, el principal consumidor de la región, es el campo de batalla de estos competidores internacionales. Al no existir producción significativa de ácido acético en el Mercosur, la región está cautiva de los exportadores de EE.UU. y Asia.

El análisis del entorno competitivo a nivel nacional y regional demuestra que la viabilidad comercial del complejo industrial integrado se sustenta en una asimetría estratégica entre los mercados de sus dos productos. La instalación de esta planta no solo logra sortear las barreras de entrada tradicionales del sector petroquímico, sino que capitaliza las debilidades logísticas de los actuales actores dominantes.

## 1.5 Conclusiones del estudio de mercado.

El análisis integral del entorno comercial para el proyecto de la planta petroquímica integrada orientada a la producción de ácido acético a partir de metano demuestra una viabilidad técnica y económica sobresaliente, sustentada en ventajas comparativas estructurales a lo largo de toda la cadena de suministro y comercialización.
A partir de la evaluación de los mercados consumidor, proveedor y competidor, se establecen las siguientes conclusiones estratégicas que justifican la ejecución del proyecto:

- Dinámica de la Demanda y Escala Regional:

El mercado consumidor valida contundentemente la necesidad de esta instalación. A nivel nacional, Argentina sufre una vulnerabilidad crítica al depender en un 100% de la importación de ácido acético para sostener a su industria química. Por su parte, la demanda de metanol se encuentra fuertemente traccionada por el sector de los biocombustibles.
Sin embargo, la verdadera viabilidad a gran escala del proyecto reside en el mercado regional. La focalización hacia el Mercosur, con Brasil como socio comercial hegemónico, garantiza la absorción total de cualquier excedente productivo. La planta no solo sustituye importaciones locales, sino que nace como una plataforma exportadora de dimensiones continentales.

- Mercado Proveedor y Monetización de Recursos

El abastecimiento de las materias primas e insumos críticos está plenamente garantizado, otorgando un blindaje operativo frente a la volatilidad internacional:

- Materia Prima (Gas Natural): El apalancamiento del proyecto sobre la creciente producción de la Cuenca Neuquina asegura un suministro de metano continuo, abundante y a costos altamente competitivos, permitiendo monetizar los recursos hidrocarburífero del país con un máximo valor agregado.

- Gases Industriales (Oxígeno): La tercerización de la Unidad de Separación de Aire (ASU) mediante un esquema Over-The-Fence (BOO) con líderes mundiales transforma un gasto de capital (CAPEX) masivo en un costo operativo (OPEX) predecible y seguro.

- Sistemas Catalíticos: Se ha estructurado una estrategia de compras diversificada, que combina alianzas tecnológicas para el reformado autotérmico (ATR), competencia abierta para los catalizadores de metanol, y un modelo de leasing de metales nobles (ciclo cerrado) para viabilizar financieramente la etapa de carbonilación sin inmovilizar capital extremo.

- Posicionamiento Competitivo e Integración Vertical

El entorno competitivo actual favorece ampliamente la radicación del complejo. En el mercado del ácido acético, la ausencia total de fabricantes en la región otorga a la planta un monopolio productivo natural, permitiendo desplazar a los proveedores norteamericanos y asiáticos mediante costos logísticos ínfimos y preferencias arancelarias intrazona. En el mercado del metanol, si bien existe un duopolio local fuerte y competencia desde Chile, la estrategia de integración vertical neutraliza el riesgo: al utilizar una gran porción del metanol como insumo cautivo, el proyecto se independiza de las fluctuaciones del mercado de commodities, asegurando la provisión de su propio eslabón productivo al costo.

En síntesis, la construcción de este complejo integrado trasciende la simple sustitución de importaciones. Constituye una decisión estratégica óptima que enlaza la inmensa disponibilidad de gas natural argentino con el déficit químico estructural del polo industrial brasileño. El proyecto se erige técnica y comercialmente como un eslabón fundamental para la soberanía petroquímica nacional y el dominio del abastecimiento en el Mercosur.

# CAPÍTULO N° III
## LOCALIZACION

## 3.1 Introducción.

La determinación de la localización óptima constituye una de las decisiones estratégicas de mayor incidencia sobre la viabilidad técnico-económica de un proyecto de ingeniería química, dado que condiciona de manera directa los costos de inversión, los costos operativos asociados a la logística de materias primas y productos, la disponibilidad de servicios industriales (agua, energía eléctrica, vapor, gas natural), el acceso a mano de obra calificada y el marco regulatorio y ambiental bajo el cual deberá operar la planta a lo largo de su vida útil.

En el presente capítulo se desarrolla el análisis de localización siguiendo un enfoque secuencial de dos niveles, ampliamente utilizado en la evaluación de proyectos industriales: en primer lugar, la macrolocalización, orientada a identificar la región o zona geográfica más conveniente para el emplazamiento del proyecto, considerando variables de escala regional tales como cercanía a fuentes de materias primas, proximidad a los mercados de consumo, infraestructura vial y portuaria disponible, y políticas de promoción industrial vigentes. En segundo lugar, la microlocalización, mediante la cual se selecciona el sitio específico dentro de la región previamente definida, evaluando factores de detalle como características del terreno, disponibilidad de servicios en el punto de emplazamiento, restricciones urbanísticas y ambientales, y costo del terreno.

## 3.2 Macrolocalización.

El análisis de macrolocalización tiene por objetivo determinar la región geográfica más conveniente para la instalación de la planta integral de ácido acético y metanol, evaluando alternativas a escala regional sin profundizar aún en el sitio específico. Para ello, se analiza un conjunto de regiones candidatas dentro del territorio argentino con antecedentes de actividad petroquímica o acceso a hidrocarburos. El propósito es identificar la zona que ofrezca las mejores condiciones técnico-económicas y logísticas, priorizando el abastecimiento de gas natural, la sinergia con polos industriales existentes y la disponibilidad de infraestructura portuaria estratégica para la exportación al Mercosur.

### 3.2.1 Alternativas de Macrolocalización.

Para evaluar las alternativas de localización en Argentina se tiene en cuenta zonas de actividad petroquímica. El país cuenta con siete polos petroquímicos, ubicados en Plaza Huincul (Neuquén), Luján de Cuyo (Mendoza), San Lorenzo (Santa Fe), Campana, Ensenada, Gran Buenos Aires y Bahía Blanca. Se preseleccionaron tres alternativas relevantes para este proyecto en función de su acceso a gas natural y a infraestructura de exportación.

- Neuquén (Plaza Huincul)

  Esta región se encuentra emplazada directamente sobre la cuenca neuquina, principal fuente de gas natural del país a partir del desarrollo del yacimiento de Vaca Muerta. Presenta la mejor condición posible en cuanto a disponibilidad de materia prima gasífera, pero no cuenta con infraestructura portuaria propia ni salida fluvial o marítima directa, lo que obliga a transportar la producción hacia los puertos de exportación mediante poliductos o transporte terrestre/ferroviario.

- Bahía Blanca (Buenos Aires)

  Esta región concentra el 56,3% de la capacidad instalada petroquímica nacional, genera alrededor del 67% de la producción del sector y aporta el 43% de las exportaciones argentinas de productos petroquímicos, consolidándose como el principal polo del país. Recibe gas natural de la cuenca neuquina a través de

poliductos ya existentes, cuenta con puerto de aguas profundas y una zona franca de reciente creación compartida con el partido de Coronel Rosales. Adicionalmente, la región concentra inversiones en curso relevantes para la disponibilidad futura de materias primas: la ampliación de TGS en Tratayén y en el propio polo bahiense, y la segunda etapa de expansión de Compañía Mega prevista entre 2026 y 2028.

- San Lorenzo (Santa Fe)

  Esta región se encuentra emplazada sobre la hidrovía Paraná-Paraguay, lo que le otorga una salida fluvial directa y de bajo costo hacia los mercados del Mercosur, incluyendo Brasil. Cuenta con abundante disponibilidad de agua de proceso proveniente del río Paraná. Su perfil industrial, sin embargo, está históricamente más orientado a la industria oleaginosa y agroexportadora que a la petroquímica de base gasífera, por lo que la infraestructura y sinergia específicas para un proyecto de esta naturaleza no son las óptimas.

### 3.2.2 Metodología: Método de ponderación de factores

Para poder comprar las alternativas planteadas previamente se utilizará el método de ponderación de factores. Este procedimiento consiste en:

- Identificar los factores relevantes de localización para el proyecto.
- Asignar a cada factor un peso relativo (entre 0 y 1, con suma total igual a 1) en función de su incidencia sobre la viabilidad del proyecto.
- Calificar cada alternativa de localización para cada factor, en una escala de 1 (condición desfavorable) a 10 (condición favorable).
- Calcular el puntaje ponderado de cada alternativa como la sumatoria del producto entre el peso de cada factor y la calificación obtenida.
- Seleccionar la alternativa con mayor puntaje ponderado total, validando la robustez de la decisión mediante un análisis de sensibilidad sobre los pesos asignados.

Este método permite incorporar de manera trazable variables de naturaleza cualitativa como el marco regulatorio o la disponibilidad de mano de obra junto a variables de naturaleza más cuantificable, reduciendo el componente subjetivo propio de este tipo de decisiones y facilitando su justificación técnica.

### 3.2.3 Factores de Localización Considerados.

Los factores seleccionados responden directamente a los requerimientos del proceso descripto anteriormente y a la estrategia comercial del proyecto, orientada a la exportación.

| Factor de localización | Peso | Justificación técnica |
|---|---|---|
| Disponibilidad de gas natural | 0,25 | Materia prima principal del proceso. Su costo y continuidad de suministro condicionan directamente la viabilidad económica de la planta. |
| Disponibilidad de oxígeno de calidad industrial | 0,10 | Insumo del reformador autotérmico (ATR); su generación in situ mediante unidad de separación de aire o su compra a terceros depende de la existencia de proveedores de gases industriales en la zona. |
| Agua de proceso y servicios | 0,10 | Necesaria para generación de vapor, enfriamiento y como reactivo en el reformado. Se requiere una fuente continua y de calidad estable. |
| Cercanía a puerto de exportación | 0,25 | La mayor parte del metanol y del ácido acético grado polimérico producidos se destina a exportación, principalmente a Brasil, por lo que la distancia y calidad de la infraestructura portuaria impactan de forma directa en el costo logístico. |
| Infraestructura y sinergia petroquímica existente | 0,15 | La proximidad a un polo consolidado reduce inversión en utilities, permite compartir servicios auxiliares y facilita la integración con otras plantas. |
| Disponibilidad de mano de obra calificada | 0,05 | Operación y mantenimiento de una planta de proceso continuo con reactores catalíticos requiere personal técnico especializado. |
| Marco regulatorio e incentivos fiscales | 0,10 | Existencia de zonas francas, regímenes de promoción industrial y facilidades aduaneras para exportación. |

Tabla 3.1 Factores de macrolocalización y pesos asignados.

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.4 Aplicación del Método de Factores Ponderados.

| Factor | Peso | Neuquén (calif.) | Bahía Blanca (calif.) | San Lorenzo (calif.) |
|---|---|---|---|---|
| Gas natural | 0.25 | 10 | 9 | 6 |
| Oxígeno industrial | 0.10 | 5 | 7 | 6 |
| Agua de proceso | 0.10 | 6 | 8 | 9 |
| Puerto de exportación | 0.25 | 2 | 10 | 8 |
| Infraestructura y sinergia | 0.15 | 6 | 10 | 7 |
| Mano de obra calificada | 0.05 | 7 | 8 | 6 |
| Marco regulatorio | 0.10 | 7 | 9 | 6 |
| **Puntaje ponderado total** | **1,00** | **6.05** | **9.05** | **6.95** |

Tabla 3.2 Matriz de calificación ponderada de alternativas de macrolocalización.

Fuente: Elaboración propia

#### 3.2.4.1 Cálculo desarrollado.

**Neuquén:**

Se detalla la obtención del puntaje ponderado total correspondiente a la alternativa Neuquén:

*PT = (0,25×10) + (0,10×5) + (0,10×6) + (0,25×2) + (0,15×6) + (0,05×7) + (0,10×7)*

*PT = 2,50 + 0,50 + 0,60 + 0,50 + 0,90 + 0,35 + 0,70 = 6,05 puntos*

**Bahía Blanca:**

Se detalla la obtención del puntaje ponderado total correspondiente a la alternativa Bahía Blanca:

*PT = (0,25×9) + (0,10×7) + (0,10×8) + (0,25×10) + (0,15×10) + (0,05×8) + (0,10×9)*

*PT = 2,25 + 0,70 + 0,80 + 2,50 + 1,50 + 0,40 + 0,90 = 9,05 puntos*

**San Lorenzo:**

Se detalla la obtención del puntaje ponderado total correspondiente a la alternativa San Lorenzo:

*PT = (0,25×6) + (0,10×6) + (0,10×9) + (0,25×8) + (0,15×7) + (0,05×6) + (0,10×6)*

*PT = 1,5 + 0,60 + 0,90 + 2,00 + 1,05 + 0,3 + 0,60 = 6,95 puntos*

Bahía Blanca resulta la alternativa con mayor puntaje, explicado principalmente por su desempeño en los dos factores de mayor peso relativo (gas natural y puerto de exportación) y por la sinergia con infraestructura petroquímica ya instalada.

### 3.2.5 Análisis de sensibilidad.

Dado que la asignación de pesos a los factores conlleva un componente de juicio experto, se verificó la robustez de la decisión recalculando los puntajes ponderados ante variaciones de ±5 puntos porcentuales en los pesos de los dos factores de mayor incidencia (gas natural y puerto de exportación), compensados con una reducción o aumento equivalente en los factores de infraestructura y marco regulatorio.

| Escenario de pesos | Neuquén | Bahía Blanca | San Lorenzo |
|---|---|---|---|
| Base (pesos originales) | 6.05 | 9.05 | 6.95 |
| +5 p.p. a gas natural y puerto | 6.00 | 9.05 | 7.00 |
| -5 p.p. a gas natural y puerto | 6.10 | 9.05 | 6.90 |

Tabla 3.3 Matriz de calificación ponderada de alternativas de macrolocalización.

Fuente: Elaboración propia.

En los tres escenarios evaluados, Bahía Blanca conserva el primer lugar con una diferencia superior a dos puntos respecto de la segunda alternativa, lo que indica que la decisión de macrolocalización es robusta frente a variaciones razonables en la ponderación de los factores.

### 3.2.6 Conclusión y Justificación.

En virtud de los resultados obtenidos mediante el método cualitativo por puntos y de la evaluación de sensibilidad realizada, se selecciona a Bahía Blanca (provincia de Buenos Aires) como macrolocalización del proyecto.

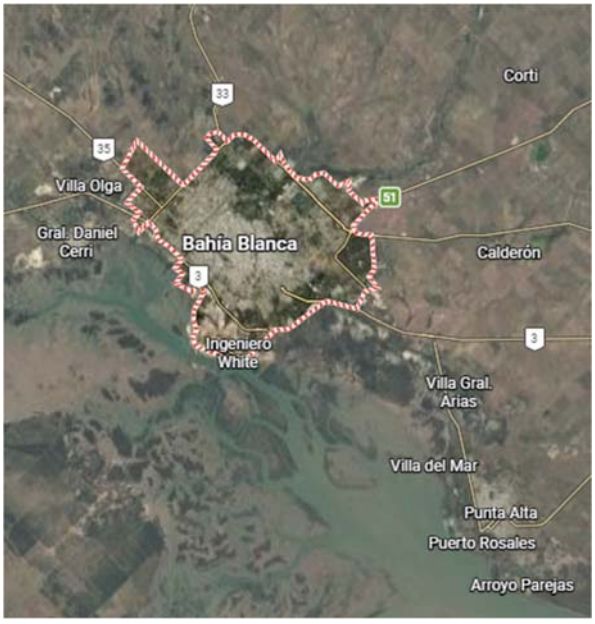



Fig.3.1 Zona probable de ubicación de la planta.

Fuente: Google maps.

Esta decisión se fundamenta en:

- Disponibilidad de gas natural a través de poliductos ya construidos desde la cuenca neuquina, sin requerir inversión adicional en transporte de materia prima de largo recorrido.

- Existencia de infraestructura portuaria de aguas profundas con antecedentes consolidados de exportación hacia Brasil y el resto del Mercosur.

- Sinergia con un polo petroquímico ya instalado, que reduce la inversión requerida en servicios auxiliares y facilita el acceso a mano de obra especializada.

- Existencia de una zona franca y de un marco de incentivos favorable a nuevos proyectos industriales de exportación.

Esta selección delimita la región dentro de la cual se desarrollará, en la siguiente sección del capítulo, el estudio de microlocalización, mediante el cual se determinará el sitio específico de emplazamiento de la planta dentro del partido de Bahía Blanca.

El análisis de macrolocalización desarrollado permite concluir que la ubicación óptima para el proyecto no coincide necesariamente con la región de mayor disponibilidad de materia prima considerada de manera aislada, sino con aquella que combina de forma más eficiente el acceso a la materia prima con la infraestructura logística de exportación y la sinergia industrial existente. Bahía Blanca satisface esta condición de manera integral, por lo que se adopta como macrolocalización definitiva del proyecto.

## 3.3 Microlocalización.

Una vez definida la macrolocalización del proyecto en el partido de Bahía Blanca, provincia de Buenos Aires, corresponde determinar el sitio específico de emplazamiento de la planta dentro de dicha región. Este análisis de microlocalización se desarrolla mediante el método Brown–Gibson, seleccionado por su capacidad de integrar en un único índice comparable tanto los factores objetivos de naturaleza cuantificable y expresable en términos monetarios, como los factores subjetivos, de naturaleza cualitativa, pero con incidencia relevante sobre la decisión, tales como la aceptación social del emprendimiento o la sinergia operativa con la industria existente.

Con este método lo que buscamos determinar es, que entre un conjunto de sitios candidatos dentro del partido de Bahía Blanca con aptitud industrial y cercanía al complejo petroquímico y portuario existente, la ubicación específica que maximiza la Medida de Preferencia de Localización, combinando de forma ponderada el costo relativo de emplazamiento y la valoración cualitativa de cada alternativa.

### 3.3.1 Alternativas de Microlocalización.

Dentro del partido de Bahía Blanca se preseleccionaron tres sitios con zonificación industrial habilitada y cercanía al complejo petroquímico y portuario:

- Parque Industrial Bahía Blanca (PIBB)

  Predio de 136 hectáreas ubicado a aproximadamente 5 km de la ciudad, en la ruta de acceso sudoeste al puerto, en cercanías del Complejo Petroquímico, el Puerto de Bahía Blanca y la Zona Franca Bahía Blanca–Coronel Rosales. Cuenta con infraestructura de accesos, red de gas y eléctrica, desagües y cerco perimetral ya desarrollados por el Consorcio de Propietarios, con costo de parcela de referencia del orden de USD 36 por m² y beneficios de exención

impositiva provincial. Más del 60% de las empresas radicadas son proveedoras del Polo Petroquímico y del Puerto, lo que evidencia una fuerte integración sectorial.

- Zona Ingeniero White.

  Corresponde al área ya ocupada por las plantas del complejo petroquímico existente (Dow, TGS, Profertil, entre otras) y su entorno inmediato en la localidad de Ingeniero White. Ofrece la máxima cercanía posible a la infraestructura de ductos, muelles y servicios ya instalados, pero presenta escasa disponibilidad de terrenos libres de gran superficie, mayor costo relativo del suelo y colindancia directa con el área urbana de la localidad, lo que implica mayores restricciones de buffer de seguridad y aceptación social.

- General Cerri.

  Zona con disponibilidad de fracciones de gran superficie sobre la Ruta de Acceso a Puertos, a una distancia aproximada de 2 a 4 km del Puerto Galván, el Polo Petroquímico y el Puerto de Ingeniero White. Posee zonificación industrial y de servicios logísticos. Su principal ventaja es el menor costo del suelo y la mayor disponibilidad de superficie para expansión futura; su principal desventaja es que requiere el tendido de redes de gas, energía eléctrica y tratamiento de efluentes desde cero, al no estar integrada a la infraestructura de servicios del polo existente.




Fig.3.1 Zonificación de Posibles locaciones de la planta.

Fuente: Google maps.

### 3.3.2 Método de Brown-Gibson.

El método Brown–Gibson combina tres tipos de factores en un índice compuesto:

- Factores objetivos (OF): variables cuantificables y expresables en unidades monetarias, típicamente costos de terreno, infraestructura y transporte.

- Factores subjetivos (SF): variables cualitativas relevantes para la decisión, que no admiten una cuantificación monetaria directa, evaluadas mediante calificación y ponderación por comparación pareada.

- Factores críticos: condiciones de cumplimiento obligatorio que determinan si una alternativa permanece o no en el análisis. En este caso, las tres alternativas preseleccionadas cumplen la condición de zonificación industrial, por lo que no se descarta ninguna en esta etapa.

El procedimiento de cálculo consta de las siguientes etapas:

Etapa 1 Cálculo de factores objetivos: se estima el costo total relevante (Ci) de cada alternativa y se calcula OFi = (1/Ci) / Σ(1/Cj), de modo que la alternativa de menor costo obtiene el mayor valor de OF.

Etapa 2 Cálculo de factores subjetivos: se identifican los factores cualitativos relevantes, se determina su peso relativo (Wj) mediante comparación pareada, se califica cada alternativa en cada factor (escala 1 a 10) y se calcula SFi = Σ(Wj × Rij), normalizando luego para que Σ SFi = 1.

Etapa 3 Cálculo de la Medida de Preferencia de Localización: MPLi = K×OFi + (1−K)×SFi, donde K (0 ≤ K ≤ 1) representa la importancia relativa asignada por el equipo de proyecto a los factores objetivos frente a los subjetivos.

Etapa 4 Selección: se elige la alternativa con mayor MPL, verificando la robustez de la decisión mediante análisis de sensibilidad sobre K.

$$MPLi = K \cdot OFi + (1 - K) \cdot SFi$$

### 3.3.3 Factores Objetivos (OF).

Se estimó el costo total relevante de emplazamiento (Ci) para una superficie de referencia de 15 hectáreas (150.000 m²), considerando tres componentes: costo de adquisición del terreno, inversión incremental en infraestructura de conexión a servicios, y costo de transporte interno hasta la terminal portuaria de exportación.

| Componente de costo | PIBB | Ing. White | Gral. Cerri |
|---|---|---|---|
| Terreno (15 ha ≈ 150.000 m²) | USD 5.400.000 | USD 9.750.000 | USD 3.000.000 |
| Infraestructura incremental (redes, accesos, servicios) | USD 300.000 | USD 500.000 | USD 3.000.000 |
| Transporte interno a terminal portuaria | USD 200.000 | USD 50.000 | USD 350.000 |
| **Costo total (Ci)** | **USD 5.900.000** | **USD 10.300.000** | **USD 6.350.000** |

Tabla 3.4. Costos relevantes de emplazamiento por alternativa.

Fuente: *Municipalidad de Bahía Blanca; Producción Bahía. Parque Industrial*.

A partir del costo total de cada alternativa se calculó el factor objetivo normalizado OFi, favoreciendo a la alternativa de menor costo relativo.

| Magnitud | PIBB | Ing. White | Gral. Cerri |
|---|---|---|---|
| Costo total Ci (USD) | USD 5.900.000 | USD 10.300.000 | USD 6.350.000 |
| 1 / Ci | 1.695e-7 | 9.709e-8 | 1.575e-7 |
| **OFi (normalizado)** | **0.3997** | **0.2289** | **0.3714** |

Tabla 3.5. Cálculo del factor objetivo normalizado.

Fuente: Elaboración propia.

General Cerri presenta el menor costo de terreno, pero la necesidad de tender infraestructura de servicios desde cero eleva su costo total, quedando por debajo de PIBB en el factor objetivo. Ingeniero White resulta la alternativa de mayor costo relativo, penalizada por el elevado valor del suelo en una zona consolidada y de disponibilidad escasa.

### 3.3.4 Factores Subjetivos (SF).

Se identificaron cuatro factores subjetivos relevantes para la decisión: sinergia con el polo petroquímico existente, distancia a zonas urbanas (seguridad y aceptación social), posibilidad de expansión futura y accesibilidad vial y a redes de gas/electricidad. El peso relativo de cada factor se determinó mediante el método de comparación pareada, en el cual cada factor se enfrenta a los restantes asignando 1 punto al factor preferido, 0 al no preferido y 0,5 en caso de indiferencia.

| Factor | vs Sinergia | vs Distancia urb. | vs Expansión | vs Accesib. |
|---|---|---|---|---|
| Sinergia con el polo | — | 1 | 0,5 | 0,5 |
| Distancia a zonas urbanas | 0 | — | 1 | 0,5 |
| Posibilidad de expansión | 0,5 | 0 | — | 0 |
| Accesibilidad vial/redes | 0,5 | 0,5 | 1 | — |

Tabla 3.6. Matriz de comparación pareada de factores subjetivos.

Fuente: Elaboración propia.

A partir de la sumatoria de puntos obtenidos por cada factor se calcularon los pesos relativos Wj. Seguidamente, se calificó cada alternativa de microlocalización en cada

factor, en una escala de 1 (condición desfavorable) a 10 (condición favorable), y se obtuvo el factor subjetivo normalizado SFi.

| Factor subjetivo | Peso Wj | PIBB | Ing. White | Gral. Cerri |
|---|---|---|---|---|
| Sinergia con el polo petroquímico existente | 0.3333 | 8 | 10 | 6 |
| Distancia a zonas urbanas (seguridad/aceptación social) | 0.2500 | 7 | 3 | 8 |
| Posibilidad de expansión futura | 0.0833 | 9 | 4 | 8 |
| Accesibilidad vial y a redes de gas/electricidad | 0.3333 | 9 | 8 | 6 |
| **SFi (normalizado)** | **1,0000** | **0.3726** | **0.3232** | **0.3042** |

Tabla 3.6. Matriz de comparación pareada de factores subjetivos.

Fuente: Elaboración propia.

Ingeniero White obtiene la mejor calificación en sinergia con el polo, pero es fuertemente penalizada en distancia a zonas urbanas y posibilidad de expansión, dado que colinda con el área residencial de la localidad y no dispone de superficie libre significativa. PIBB presenta un desempeño equilibrado y elevado en los cuatro factores, lo que se traduce en el mayor valor de SF.

### 3.3.4 Medida de Preferencia de Localización (MPL).

Se adoptó K = 0,60, otorgando mayor peso relativo a los factores objetivos (costos) por sobre los subjetivos, criterio razonable para un proyecto industrial de gran escala de inversión en el que el componente económico resulta determinante, sin desestimar la relevancia de la aceptación social y la sinergia operativa.

| Magnitud (K = 0,60) | PIBB | Ing. White | Gral. Cerri |
|---|---|---|---|
| OFi | 0.3997 | 0.2289 | 0.3714 |
| SFi | 0.3726 | 0.3232 | 0.3042 |
| **MPLi = K·OFi + (1-K)·SFi** | **0.3889** | **0.2666** | **0.3445** |

Tabla 3.7. Cálculo de la Medida de Preferencia de Localización.
Fuente: Elaboración propia

Cálculo desarrollado:

- Bahía blanca:

MPL(PIBB) = 0,60 × 0.3997 + 0,40 × 0.3726 = 0.2398 + 0.1490 = 0.3889

- Ing. White:
  MPL(PIBB) = 0,60 × 0.2289 + 0,40 × 0.3232 = 0.1373 + 0.1293 = 0.2666

- Gral. Cerri:
  MPL(PIBB) = 0,60 × 0.3714 + 0,40 × 0.3042 = 0.2228 + 0.1217 = 0.3445

El Parque Industrial Bahía Blanca resulta la alternativa con mayor Medida de Preferencia de Localización.

### 3.3.5 Análisis de Sensibilidad.

Dado que la elección de K depende del criterio del equipo de proyecto, se evaluó la estabilidad del ranking obtenido recalculando el MPL para valores de K entre 0,40 y 0,80, es decir, otorgando mayor o menor peso relativo a los factores objetivos frente a los subjetivos.

| K | PIBB | Ing. White | Gral. Cerri |
|---|---|---|---|
| 0.40 | 0.3834 | 0.2855 | 0.3311 |
| 0.50 | 0.3862 | 0.2761 | 0.3378 |
| 0.60 | 0.3889 | 0.2666 | 0.3445 |
| 0.70 | 0.3916 | 0.2572 | 0.3512 |
| 0.80 | 0.3943 | 0.2478 | 0.3579 |

Tabla 3.7. Sensibilidad del MPL ante variaciones del parámetro K.
Fuente: Elaboración propia

En todo el rango evaluado, el Parque Industrial Bahía Blanca conserva el primer lugar, con una ventaja mínima de aproximadamente 3 centésimas respecto de General Cerri, su competidor más cercano. Esto indica que la decisión de microlocalización es razonablemente robusta frente a variaciones en el criterio de ponderación entre costo y factores cualitativos, aunque la diferencia con la segunda alternativa no es amplia, por lo que se recomienda revisar esta definición si en etapas posteriores del proyecto se dispone de cotizaciones de terreno e infraestructura más precisas que las estimadas en este informe preliminar.

### 3.3.6 Conclusión y Justificación.

Se selecciona el Parque Industrial Bahía Blanca (PIBB) como microlocalización definitiva del proyecto, dentro del partido de Bahía Blanca. Esta decisión se sustenta en:

- El mayor valor de la Medida de Preferencia de Localización (MPL = 0.3889), robusto ante variaciones razonables del parámetro K.

- Infraestructura de servicios (gas, energía eléctrica, accesos, desagües) ya desarrollada, que reduce la inversión inicial y el plazo de puesta en marcha respecto de un sitio sin urbanizar.

- Integración con un ecosistema de proveedores industriales ya radicados en el parque, en su mayoría vinculados al Polo Petroquímico y al Puerto.

- Distancia adecuada respecto de las áreas urbanas, que favorece la aceptación social del proyecto y reduce las restricciones de buffer de seguridad frente a la alternativa de Ingeniero White.

- Beneficios de exención impositiva provincial y cercanía a la Zona Franca Bahía Blanca–Coronel Rosales, relevante para un proyecto con fuerte perfil exportador.

El análisis de microlocalización mediante el método Brown–Gibson permitió incorporar de manera sistemática y trazable tanto el costo relativo de emplazamiento como factores cualitativos de relevancia estratégica en la selección del sitio específico del proyecto. El Parque Industrial Bahía Blanca resulta la alternativa recomendada, al ofrecer el mejor equilibrio entre costo de emplazamiento, infraestructura disponible e integración con el entorno petroquímico-portuario ya consolidado en la región, resultado consistente con la sinergia identificada previamente en el análisis de macrolocalización.

## 3.4 Predio seleccionado.

Dentro del Parque Industrial Bahía Blanca se seleccionó, como predio definitivo para el emplazamiento de la planta, el lote identificado en la Figura 3.2, ubicado en el sector norte del parque, en el límite con la localidad de Ingeniero White. El predio cuenta con una superficie de 257.000 m² (25,7 ha).



Fig.3.2 Predio seleccionado.

Fuente: Google maps.

La posición del predio en el límite norte del parque, colindante con Ingeniero White, resulta particularmente favorable para este proyecto, ya que combina las ventajas ya identificadas para el PIBB en el análisis de microlocalización con una cercanía adicional a la infraestructura a la empresa MEGA donde llegan varios gasoductos que nos podrías suministrar el gas natural y los muelles de los complejos petroquímicos colindantes, lo que puede facilitar la evacuación de productos hacia el puerto, o el intercambio de servicios con otras plantas del polo.
La superficie del predio seleccionado supera ampliamente los requerimientos de superficie estimados para la planta de proceso, sus unidades de servicios auxiliares y el área de tanques de almacenamiento de materias primas y productos. Esta holgura es deliberada: se reserva el excedente de superficie como área de expansión futura, contemplando la eventual ampliación de la capacidad de producción de metanol y/o de ácido acético, la incorporación de nuevas unidades de proceso, o la instalación de

capacidad adicional de almacenamiento y logística, sin necesidad de adquirir terrenos adicionales ni reubicar la planta.

## 3.5 Conclusión.

En virtud del proceso de análisis desarrollado a lo largo del presente capítulo, se concluye que la localización definitiva del proyecto queda establecida de la siguiente manera:

- Macrolocalización: partido de Bahía Blanca, Provincia de Buenos Aires.
- Microlocalización: Parque Industrial Bahía Blanca (PIBB).
- Predio definitivo: lote de 257.000 m² ubicado en el sector norte del PIBB, en el límite con Ingeniero White.

Esta localización garantiza al proyecto acceso a gas natural mediante infraestructura de transporte ya construida, cercanía a una terminal portuaria de aguas profundas con antecedentes consolidados de exportación hacia el Mercosur, integración con un ecosistema industrial y de proveedores ya instalado, y una reserva de superficie adecuada para el crecimiento futuro de la planta, con lo cual se da por concluido el análisis de localización del proyecto.

# CAPÍTULO N° IV
## TAMAÑO

## 4.1 Introducción.

El presente capítulo determina el tamaño del proyecto, entendido como la capacidad de producción anual instalada para la planta de ácido acético grado polimérico y su producto intermedio/subproducto, el metanol. El dimensionamiento se realiza a partir de dos ejes de análisis: por un lado, la demanda de ambos productos en el mercado Argentino y en el mercado de Brasil en este último caso, considerando exclusivamente el volumen importado, dado que el proyecto se orienta a captar una porción de esa demanda actualmente abastecida por proveedores externos; por otro lado, un conjunto de factores condicionantes de naturaleza técnica, económica y operativa que ajustan el tamaño resultante del solo análisis de mercado.

## 4.2 Determinación de la Demanda Objetivo

La demanda objetivo de ácido acético grado polimérico se construye combinando la proyección de la demanda argentina a la que se apunta abastecer en su totalidad, sustituyendo la importación actual con una participación de mercado objetivo sobre las importaciones brasileñas, adoptada de forma conservadora dado que el proyecto ingresaría como nuevo proveedor en dicho mercado.

| Concepto | Ácido acético (t/año) | Criterio aplicado | Resultado |
|---|---|---|---|
| Demanda base Argentina (promedio 2022-2024) | 6.689 | Crecimiento 2%/año, horizonte 5 años | 7.385 |
| Demanda base Brasil (promedio import. 2023-2025) | 133.214 | Participación objetivo 15% (sin proyección de crecimiento, criterio conservador) | 19.982 |
| **Demanda objetivo total** | **—** | **—** | **27.367** |

Tabla 4.1 Determinación de la demanda objetivo de ácido acético grado polimérico.
Fuente: Elaboración propia.

Se adopta como capacidad de ácido acético 27.500 t/año, incorporando un pequeño margen de diseño sobre la demanda objetivo calculada (27.367 t/año), habitual en el dimensionamiento de plantas de proceso continuo.

## 4.4 Relación Estequiometria Metanol–Ácido Acético

El metanol producido se emplea, junto con el monóxido de carbono separado del gas de síntesis, como materia prima para la síntesis de ácido acético mediante carbonilación:

$$CH3OH + CO \rightarrow CH3COOH$$

La relación estequiometria teórica, en base a los pesos moleculares del metanol (32.04 g/mol) y del ácido acético (60.05 g/mol), es de 0.53 t de metanol por tonelada de ácido acético producida. Considerando un rendimiento de conversión y purificación del proceso del 95%, la relación de consumo real adoptada es de 0.56 t de metanol por tonelada de ácido acético.

Metanol consumido internamente = 27.500 t AA/año × 0.56 = 15.445 t/año.

## 4.4 Factores Condicionantes del Tamaño de Planta.

### 4.4.1 Factor de Mercado.

El factor de mercado se va a determinar con proyección año a año, a lo largo de un horizonte de diez años, la evolución esperada de la demanda de metanol y de ácido acético grado polimérico en el mercado argentino y en el segmento de importación del mercado brasileño. El objetivo es verificar la evolución de la demanda objetivo del proyecto a lo largo del horizonte de análisis y contrastarla contra la capacidad instalada definida, incorporando un escenario de sensibilidad sobre el mercado brasileño de ácido acético.

#### 4.4.1.1 Proyección Año a Año

La proyección detallada, año por año, de la demanda de ácido acético en Argentina y de las importaciones de ácido acético y de metanol en Brasil, junto con la demanda objetivo resultante del proyecto (Argentina 100% + participación del 15% sobre la importación brasileña) en ambos escenarios.

| Año | AA Argentina (t) | AA Brasil import. (t) | AA Brasil import. optimista (t) | Demanda objetivo (t) | Demanda objetivo optimista (t) | Metanol import. Brasil (t) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2025 | 6.895 | 132.759 | 132.759 | 26.809 | 26.809 | 1.685.096 |
| 2026 | 6.927 | 132.759 | 136.742 | 26.841 | 27.438 | 1.763.187 |
| 2027 | 6.959 | 132.759 | 140.844 | 26.873 | 28.086 | 1.844.896 |
| 2028 | 6.991 | 132.759 | 145.069 | 26.905 | 28.751 | 1.930.392 |
| 2029 | 7.023 | 132.759 | 149.421 | 26.937 | 29.436 | 2.019.851 |
| 2030 | 7.055 | 132.759 | 153.904 | 26.969 | 30.141 | 2.113.455 |
| 2031 | 7.088 | 132.759 | 158.521 | 27.001 | 30.866 | 2.211.396 |
| 2032 | 7.120 | 132.759 | 163.277 | 27.034 | 31.612 | 2.313.877 |
| 2033 | 7.153 | 132.759 | 168.175 | 27.067 | 32.379 | 2.421.106 |
| 2034 | 7.186 | 132.759 | 173.220 | 27.099 | 33.169 | 2.533.305 |

Tabla 4.2 Proyección de demanda 2025-2034 (toneladas/año).
Fuente: Elaboración propia

#### 4.4.1.2 Ácido Acético: Demanda Objetivo vs. Capacidad Instalada.

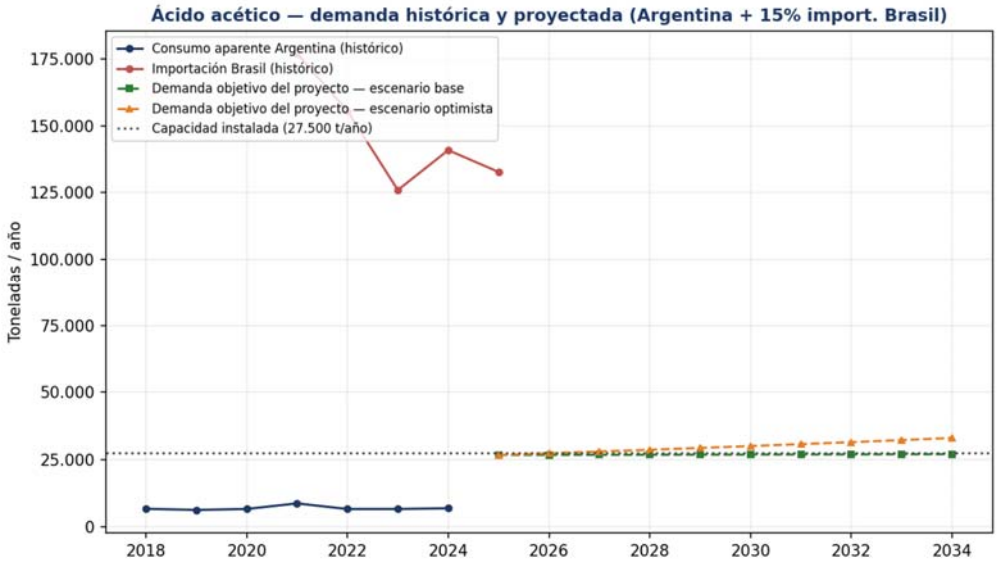



Fig.4.1 Consumo aparente argentino e importación brasileña de ácido acético, demanda objetivo del proyecto y capacidad instalada.

Fuente: Elaboración Propia.

En el escenario base, la demanda objetivo del proyecto se mantiene holgadamente por debajo de la capacidad instalada de 27.500 t/año a lo largo de todo el horizonte de diez años, alcanzando recién 27.100 t/año hacia 2034. En el escenario optimista, en cambio, la demanda objetivo supera la capacidad instalada ya hacia 2027, lo que evidencia que, ante una recuperación del mercado brasileño de ácido acético, la planta alcanzaría su límite de capacidad en un plazo relativamente corto desde su puesta en marcha.

#### 4.3.1.3 Metanol: Importación de Brasil vs. Excedente Exportable del Proyecto.

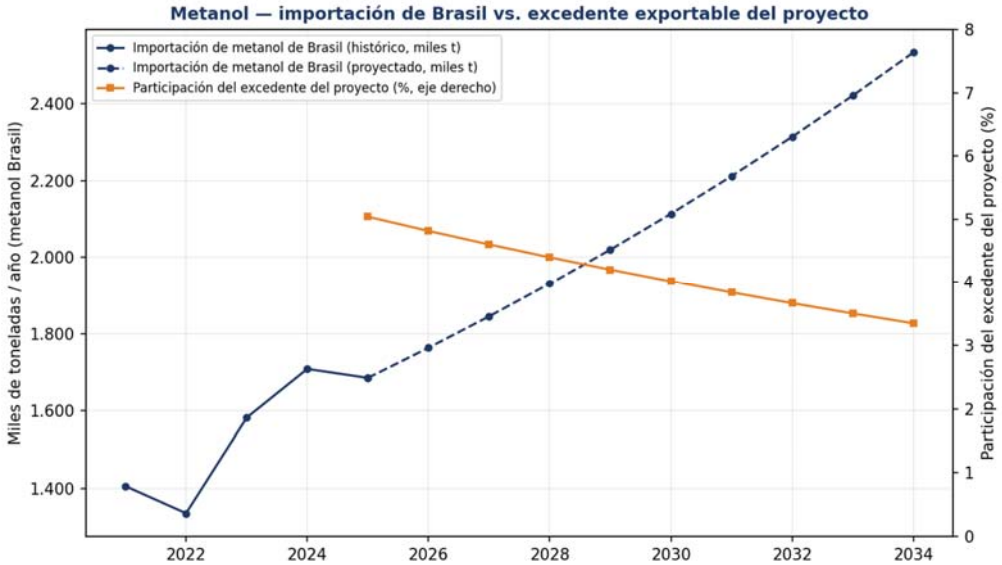



Fig.4.2 Importación de metanol de Brasil y participación del excedente exportable del proyecto sobre dicho mercado.

Fuente: Elaboración Propia.

El excedente de metanol del proyecto representa aproximadamente el 5,0% del mercado de importación brasileño en el primer año, participación que se reduce gradualmente al 3,3% hacia 2034 a medida que dicho mercado crece a una tasa (+4,6%/año) muy superior a la del excedente disponible. Esto indica que la colocación del metanol excedente en el mercado brasileño no debería presentar restricciones de absorción en ningún año del horizonte analizado.

El análisis de demanda proyectada confirma la adecuación del tamaño de planta determinado en la Sección 8 del informe de tamaño del proyecto (27.500 t/año de ácido acético grado polimérico y 100.000 t/año de metanol) para el escenario base de evolución de los mercados argentino y brasileño a lo largo de un horizonte de diez años. Asimismo, evidencia que el excedente de metanol exportable resulta ampliamente absorbible por el mercado brasileño durante todo el horizonte analizado, y que la eventual materialización de un escenario más favorable en el mercado brasileño de ácido acético encontraría en el predio ya seleccionado la superficie necesaria para una ampliación de capacidad sin reiniciar el proceso de localización.

### 4.4.2 Factor Tecnológico.

El proceso adoptado es el reformado autotérmico de gas natural para generación de gas de síntesis, seguido de síntesis de metanol y carbonilación a ácido acético, presenta economías de escala relevantes en la etapa de reformado, de forma que un tren de gas de síntesis/metanol resulta económicamente poco competitivo por debajo de un tamaño mínimo del orden de 100.000 t/año de metanol equivalente. Esta condición tecnológica resulta determinante para el tamaño del tren de metanol.

### 4.4.3 Factor de Materia Prima.

La disponibilidad de gas natural en la región de Bahía Blanca, a través de la red de gasoductos troncales y poliductos que vinculan la cuenca neuquina con el polo petroquímico, no impone restricciones relevantes para la escala de planta considerada en este capítulo, dado el volumen de transporte y almacenaje ya operado por los actores instalados en la zona.

### 4.4.4 Factor Financiero

Si bien un tren de mayor escala reduce el costo de inversión por tonelada de capacidad instalada, la disponibilidad de capital propio de un proyecto de estas características impone un límite práctico a la escala inicial. Este factor actúa como contrapeso del factor tecnológico, favoreciendo una definición de tamaño que, sin resignar la escala mínima técnico-económica del tren de metanol, evite sobredimensionar la unidad de carbonilación de ácido acético por encima de la demanda objetivo efectivamente identificada.

### 4.4.5 Factor Operativo

La planta opera en forma continua, las 24 horas del día, los 7 días de la semana, a excepción del período de parada de mantenimiento programada. Este régimen es propio de plantas de proceso químico continuo, en las que la detención y el reinicio de las unidades de reformado, síntesis y purificación implican costos operativos y riesgos técnicos que hacen preferible sostener la operación de forma ininterrumpida durante los períodos entre paradas programadas.

- Días operativos: 330 días/año.
- Días de parada programada: 30 a 35 días/año (aproximadamente 1 mes calendario).
- Factor de servicio (stream factor): 90-91%.
- Cobertura horaria: 24 horas/día, mediante guardias rotativas.

#### 4.4.5.1 Programa de Puesta en Marcha (Año 1)

Durante el primer año de operación no se programa parada de mantenimiento mayor, dado que los primeros turnarounds de este tipo de plantas suelen programarse entre los 12 y 18 meses posteriores al arranque. En su lugar, el primer año incorpora una curva de arranque, durante la cual la planta incrementa gradualmente su tasa de producción hasta alcanzar el 100% de la capacidad nominal, en función de la estabilización de catalizadores, controles y calidad de producto.

| | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | M6 | M7 | M8 | M9 | M10 | M11 | M12 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| % capacidad | 20% | 30% | 40% | 50% | 60% | 65% | 70% | 75% | 80% | 85% | 90% | 95% |
| Ác. acético (t) | 550 | 825 | 1.100 | 1.375 | 1.650 | 1.787 | 1.925 | 2.062 | 2.200 | 2.337 | 2.475 | 2.612 |
| Metanol (t) | 2.000 | 3.000 | 4.000 | 5.000 | 6.000 | 6.500 | 7.000 | 7.500 | 8.000 | 8.500 | 9.000 | 9.500 |

Tabla 4.3. Programa de puesta en marcha.
Fuente: Elaboración propia

Bajo este programa, la producción del primer año de operación asciende a 20.348 t de ácido acético y 76.000 t de metanol, equivalentes al 74% de la capacidad nominal anual, cifra razonable para un año de arranque y adecuada para la proyección de ingresos del primer ejercicio en la evaluación económica del proyecto.

#### 4.4.5.2 Programa de Producción en Régimen Estable.

A partir del segundo año de operación, la planta trabaja en régimen estable, con 11 meses de producción a plena capacidad y 1 mes de parada de mantenimiento programada.




Fig.4.2 Calendario anual de operación en régimen estable.

Fuente: Elaboración Propia.

La parada de mantenimiento programada se ubica en el primer mes del año calendario, coincidiendo con el período estival de menor actividad relativa en la operación portuaria y logística de la región de Bahía Blanca, lo que minimiza el impacto comercial de la detención sobre los compromisos de exportación asumidos con los clientes brasileños. Esta definición es preliminar y debe coordinarse, en etapas posteriores del proyecto, con el cronograma de mantenimiento del proveedor de gas natural y con la disponibilidad de la terminal portuaria.

### 4.4.6. Factor de Localización

El predio seleccionado en el capítulo anterior, de 257.000 m² dentro del Parque Industrial Bahía Blanca, fue dimensionado con una superficie considerablemente mayor a la requerida por la planta inicial, previendo específicamente la posibilidad de ampliación futura. Esta decisión de localización resulta coherente con el presente análisis de tamaño: si la participación de mercado en Brasil creciera por encima del 15% adoptado como criterio conservador, o si el mercado brasileño de ácido acético revirtiera su tendencia decreciente, el proyecto dispone de la superficie necesaria para ampliar la capacidad instalada sin requerir un nuevo proceso de localización.

## 4.5 Determinación del tamaño de planta.

Del contraste entre el factor tecnológico y el requerimiento estequiométrico de metanol, surge que el tren de gas de síntesis/metanol, para resultar técnico-económicamente viable, debe dimensionarse en 100.000 t/año, muy por encima de las 15.445 t/año que efectivamente se consumen en la síntesis de ácido acético. El excedente de metanol no consumido internamente, de 84.555 t/año, se destina a la venta como producto de exportación, principalmente hacia el mercado brasileño.

| Magnitud | Metanol | Ácido acético grado polimérico |
|---|---|---|
| Capacidad instalada | 100.000 t/año | 27.500 t/año |
| Destino | 15.445 t/año a planta de ác. acético; 84.555 t/año a venta (export. Brasil) | 7.385 t/año mercado argentino; 19.982 t/año exportación a Brasil |
| Producción diaria (330 días/año) | 303 t/día | 83 t/día |
| Producción horaria | 12.63 t/h | 3.47 t/h |

Tabla 4.4 Tamaño de planta determinado.
Fuente: Elaboración propia

## 4.6 Justificación y conclusión.

El excedente de metanol de 84.555 t/año representa aproximadamente el 5.1% del promedio reciente de importaciones brasileñas de metanol (1.658.568 t/año), participación razonable para un nuevo proveedor regional y ampliamente absorbible por ese mercado. La capacidad de ácido acético resulta consistente con la demanda objetivo combinada de Argentina y Brasil (participación del 15% sobre su volumen importado), sin generar una dependencia excesiva de un único mercado de destino: aproximadamente 27% de la producción de ácido acético se orienta al mercado interno y 73% a exportación.

En virtud del análisis de demanda de los mercados argentino, brasileño y de los factores tecnológicos, de materia prima, financieros, operativos y de localización desarrollados, se determina el siguiente tamaño de planta:

- Capacidad instalada de metanol: 100.000 t/año (303 t/día), definida por la escala mínima técnico-económica del tren de gas de síntesis.

- Capacidad instalada de ácido acético grado polimérico: 27.500 t/año (83 t/día), definida por la demanda objetivo de Argentina y Brasil.

- Consumo interno de metanol para la síntesis de ácido acético: 15.445 t/año.

- Excedente de metanol para venta directa, principalmente a exportación: 84.555 t/año.

- Régimen de operación: 330 días/año, factor de servicio 90-91%.

Este tamaño de planta queda validado por el predio seleccionado en el capítulo de localización, cuya superficie reservada habilita una eventual ampliación futura de capacidad si las condiciones de mercado en Brasil resultan más favorables que las adoptadas en el presente análisis, de carácter conservador.

# CAPÍTULO N° V
## TECNOLOGIA

## 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 grado de integración con el resto del complejo productivo y su sostenibilidad a largo plazo. En el caso de la producción de ácido acético, coexisten en la actualidad cuatro rutas de síntesis con antecedentes de aplicación comercial, que difieren sustancialmente en su materia prima de partida, su selectividad, la generación de coproductos y su compatibilidad con la producción conjunta de metanol planteada para este proyecto.

El presente capítulo tiene por objeto evaluar las distintas rutas de síntesis disponibles comercialmente para la obtención de ácido acético, considerando factores determinantes como la integración con la producción propia de metanol, la disponibilidad de materia prima en el entorno de Bahía Blanca, la simplicidad del proceso, el impacto ambiental y la seguridad operativa. A partir de este análisis comparativo, se procede a la selección justificada del proceso más adecuado para los objetivos del proyecto.

## 5.2 Selección del proceso productivo.

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 del proyecto, en particular la integración con la producción de metanol definida en los capítulos de tamaño y tecnología del proceso.

Los criterios seleccionados son:

- Integración con la producción propia de metanol (30%): evalúa en qué medida la ruta tecnológica aprovecha o requiere del metanol producido internamente, evitando negocios paralelos desconectados del resto del complejo.
- Disponibilidad de materia prima en Bahía Blanca (25%): evalúa el acceso, a costo competitivo, a la materia prima de partida de cada ruta dentro del polo petroquímico y su entorno.
- Simplicidad del proceso (20%): evalúa la complejidad del diagrama de flujo, la cantidad de reactores y columnas de separación requeridas.
- Impacto ambiental y gestión de subproductos (15%): evalúa la cantidad y toxicidad de los residuos generados y la existencia de coproductos de difícil colocación comercial.
- Seguridad del proceso (10%): considera los riesgos operativos asociados al manejo de cada materia prima y catalizador.

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 Tecnología N°1: Proceso de carbonilación de metanol

La producción de ácido acético por carbonilación de metanol fue desarrollada originalmente por BASF en la década de 1950, empleando un catalizador de cobalto en condiciones severas. En 1970, Monsanto introdujo un catalizador de rodio promovido con yoduro de metilo, que permitió operar en condiciones mucho más moderadas con una selectividad superior al 99% respecto del metanol y del 85% respecto del monóxido de carbono. En 1996, BP Chemicals introdujo el proceso Cativa™, que reemplaza el rodio por un catalizador de iridio promovido con rutenio, logrando mayor estabilidad catalítica y menor formación de subproductos líquidos.

$$CH3OH + CO \rightarrow CH3COOH$$

El proceso opera en un reactor agitado continuo, del cual la solución de producto pasa a un tanque de expansión (flash) donde se separa el ácido acético crudo del catalizador, que se recircula al reactor. La corriente de producto se purifica luego en un tren de destilación que remueve el yoduro de metilo, el agua y los subproductos pesados, principalmente ácido propiónico proveniente de reacciones de condensación del acetaldehído formado como intermediario.

En el caso particular de este proyecto, esta ruta presenta la ventaja distintiva de partir del mismo gas de síntesis del cual también se obtiene el metanol, integrando ambas producciones en un único complejo industrial sin necesidad de adquirir materias primas adicionales de terceros.

### 5.2.2 Tecnología N°2: Proceso de oxidación de acetaldehído

Esta ruta, comercializada por primera vez en 1960, parte de etileno, que se oxida a acetaldehído mediante el proceso Wacker, empleando un sistema catalítico de cloruro de paladio y cloruro de cobre en fase acuosa. El acetaldehído obtenido se oxida posteriormente con aire, empleando típicamente un catalizador de acetato de manganeso en fase líquida a 50-60 °C, mediante un mecanismo de radicales libres.

$$CH2=CH2 + 1/2\ O2 \rightarrow CH3CHO$$

$$CH3CHO + 1/2\ O2 \rightarrow CH3COOH$$

Si bien esta ruta alcanza rendimientos del orden del 90% y ha sido ampliamente utilizada a nivel mundial, presenta como principal desventaja para este proyecto la nula integración con la producción de metanol: constituiría un negocio paralelo, que además requeriría adquirir etileno de terceros (eventualmente disponible en el propio polo de Bahía Blanca a través de Dow), y que utiliza catalizadores clorados de manejo corrosivo, con generación de efluentes clorados de gestión compleja, de manera análoga a lo observado en procesos de epoxidación por vía clorhidrina.

### 5.2.3 Tecnología N°3: Proceso de oxidación en fase líquida de n-butano

Esta ruta oxida directamente n-butano con aire u oxígeno en fase líquida, utilizando ácido acético como solvente de reacción y un sistema catalítico de cobalto, manganeso y bromo, en un rango de temperatura de 120-200 °C y presiones de 35 a 70 bar.

$$C4H10 + 5/2\ O2 \rightarrow 2\ CH3COOH + H2O$$

La principal limitación de esta ruta es su baja selectividad hacia el ácido acético, dado que la oxidación no selectiva del butano genera cantidades significativas de subproductos de bajo valor comercial (ácido fórmico, ácido propiónico, metiletilcetona), que requieren trenes de separación adicionales y complejos. Al igual que la ruta de oxidación de acetaldehído, esta alternativa no aprovecha la producción propia de metanol del proyecto, y el sistema catalítico bromurado exige materiales de construcción resistentes a la corrosión.

### 5.2.4 Tecnología N°4: Proceso de oxidación/deshidrogenación de etanol

Esta ruta, de origen biotecnológico e históricamente asociada a la fermentación acética (producción de vinagre), parte de etanol, que se deshidrogena u oxida catalíticamente a acetaldehído, el cual se oxida en una segunda etapa a ácido acético. Esta es, en particular, la ruta tecnológica empleada por los dos ex productores de ácido acético instalados en Argentina (Atanor S.C.A., en Río Tercero, y la planta de Baradero), ambos de escala reducida (3.600 y 12.000 t/año, respectivamente).

$$CH3CH2OH + O2 \rightarrow CH3COOH + H2O$$

Si bien esta ruta presenta ventajas ambientales por partir de una materia prima renovable y operar en condiciones moderadas, no existe en la región de Bahía Blanca disponibilidad ni ventaja de costo particular de etanol, y al igual que las opciones 2 y 3, no guarda ninguna relación con la producción de metanol del proyecto. Los antecedentes nacionales bajo esta ruta corresponden además a escalas muy inferiores a la capacidad de 27.500 t/año definida en el capítulo de tamaño del proyecto.

### 5.2.5 Proceso seleccionado

Se presenta a continuación la matriz de ponderación para la selección de la tecnología:

| Criterio | Peso relativo | Carbonilación de metanol | Oxidación de acetaldehído | Oxidación de n-butano | Oxidación de etanol |
|---|---|---|---|---|---|
| Integración con producción propia de metanol | 0,30 | 10 | 1 | 1 | 1 |
| Disponibilidad de materia prima en Bahía Blanca | 0,25 | 9 | 6 | 6 | 4 |
| Simplicidad del proceso / CAPEX | 0,20 | 6 | 4 | 5 | 7 |
| Impacto ambiental y gestión de subproductos | 0,15 | 7 | 3 | 4 | 8 |
| Seguridad operativa | 0,10 | 7 | 5 | 5 | 8 |
| **Puntaje total** | **1,00** | **8,20** | **3,55** | **3,90** | **4,70** |

Tabla 5. Tabla de ponderación y toma de decisiones.
Fuente: Elaboración propia

La carbonilación de metanol (8,20) se destaca por ser la única ruta que integra naturalmente la producción de ácido acético con la de metanol (ambos obtenidos a partir del mismo gas de síntesis generado en el reformador autotérmico), evitando la necesidad de adquirir una segunda materia prima de terceros y aprovechando plenamente la infraestructura de generación de gas de síntesis ya justificada por la producción de metanol del proyecto.

En base al análisis cuantitativo, se selecciona el proceso de carbonilación de metanol, en su variante tipo Cativa™ (catalizador de iridio), como la tecnología a desarrollar en la ingeniería de este proyecto.

## 5.3 Ingeniería básica.

El desarrollo de la ingeniería básica para la planta integral, diseñada para producir 100.000 t/año de metanol y 27.500 t/año de ácido acético a partir de gas natural, se estructura de manera modular para garantizar un análisis riguroso y ordenado. El diseño global del proceso se divide operativamente en tres etapas interdependientes.

### 5.3.1 Etapa 1: Reformado y Separación de Monóxido de Carbono.

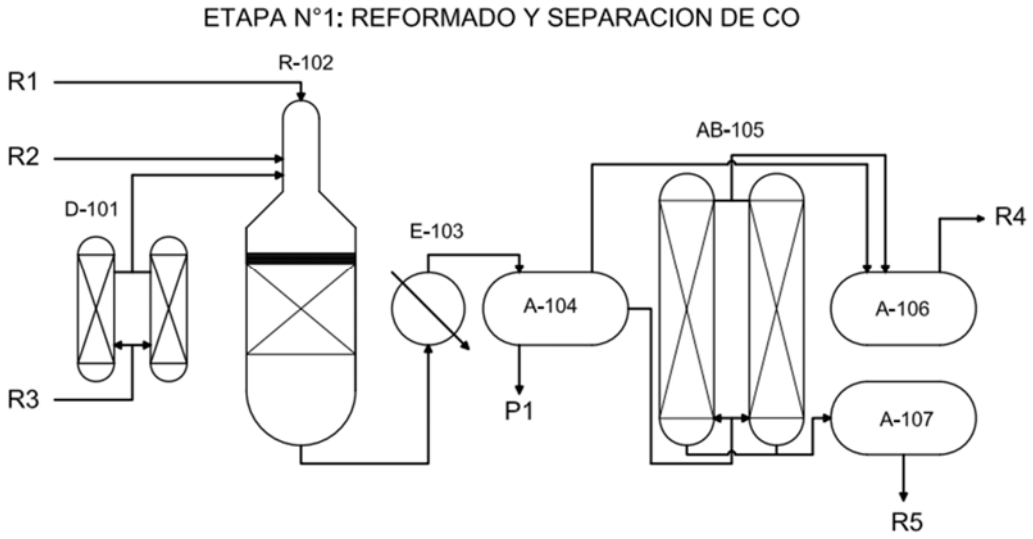



Fig.5 Diagrama de la primera etapa del proceso.

Fuente: Elaboración Propia (Lurgi patente N°: US 9561483 B2)

| Equipos | Nomenclatura | Descripción |
|---|---|---|
| CORRIENTE DE ENTRADA | R1 | Corriente de entrada del oxígeno a presión al quemador del reactor |
| CORRIENTE DE ENTRADA | R2 | Corriente de entrada del vapor de alta al quemador del reactor |
| CORRIENTE DE ENTRADA | R3 | Ingreso del gas natural al desulfurador |
| Desulfurador | D-101 | Elimina cualquier traza de azufre que traiga el gas natural, a través de un lecho de zeolita selectivas con el azufre |
| Reactor ATR | R-102 | Reactor auto térmico, donde reacciona el gas natural con el vapor y el oxígeno formando el gas de síntesis una mezcla de CO, $CO_2$ y $H_2$. |
| Economizador de Alta | E-103 | Caldera de recuperación, usa los gases caliente en la salida del reactor para generar vapor de alta presión. |
| Acumulador de Gas de síntesis | A-104 | Acumula el gas de síntesis y lo distribuye a distintos procesos. |
| Columnas de absorción por diferencia de presión | AB-105 | Columnas en paralelo de absorción de CO por diferencias de presión. |
| Acumulador de Gas de síntesis | A-106 | Acumula y regula la proporción de $H_2$, CO y $CO_2$. Para que entren al reactor de metanol con la proporción óptima. |
| Acumulador de CO | A-107 | Acumula el CO que se utilizara para la producción de ácido Acético. |

| | | |
|---|---|---|
| Purga de humedad y condensados | P1 | Se utiliza para retirar excesos de condesados dentro del acumulador de gas de síntesis |
| CORRIENTE DE SALIDA | R4 | Corriente de salida de gas de síntesis corregida estequiométricamente para producción de metanol |
| CORRIENTE SALIDA | R5 | Corriente de salida del monóxido de carbono. |

Tabla 5.1 Tabla de equipos y corrientes Etapa N°:1
Fuente: Elaboración propia

**Descripción de la Etapa:**

La etapa n°1 constituye el núcleo de acondicionamiento físico-químico y reformado térmico-catalítico de la planta. Su propósito central es transformar el gas natural crudo en un gas de síntesis (syngas) finamente ajustado en sus proporciones estequiométricas para alimentar de forma simultánea las unidades de síntesis de metanol y la unidad de carbonilación de ácido acético.

El proceso inicia con la recepción del gas natural proveniente de la red, el cual ingresa a la planta sometido a una presión de línea elevada (25 bar aproximadamente). Previo a cualquier alteración estructural, la corriente gaseosa debe ser acondicionada para remover compuestos perjudiciales. Con este fin, el gas es impulsado hacia el Desulfurador (D-101), un equipo diseñado como un recipiente cilíndrico vertical que contiene lechos de óxido de zinc. Su objetivo es eliminar el $H_2S$ y proteger los catalizadores aguas abajo. La desulfuración reactiva es un parámetro no negociable en esta etapa, puesto que las trazas de azufre provocan un envenenamiento irreversible y severo sobre los centros activos del catalizador de níquel en la etapa subsiguiente.

Una vez validada la ausencia de compuestos sulfurados, la corriente se mezcla íntimamente con vapor de agua sobrecalentado y se introduce en el Reactor Reformador (R-102). En este reactor se propicia la reacción principal:

$$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3\ H_2$$

Simultáneamente y por la naturaleza de los reactivos, la reacción secundaria de desplazamiento de gas de agua (WGS) ocurre en paralelo

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$$

Desde el punto de vista termodinámico y operativo, el diseño exige maximizar la producción de CO y minimizar la formación de $CO_2$. Para lograrlo, la estrategia consiste en operar con una baja relación molar Vapor/Carbono cercana a 2.0; al inyectar menos vapor, se desplaza el equilibrio termodinámico evitando que el CO se convierta en $CO_2$.

Consecuentemente, el reactor opera bajo un perfil de alta severidad térmica, en su límite metalúrgico superior, alcanzando temperaturas de entre 850°C y 900°C a presiones de 20 a 30 bar. Para soportar el severo creep térmico, el equipo utiliza tubos fabricados en aleaciones especiales de alta prestación. El interior de estos tubos está empacado con el catalizador activo de níquel soportado en alúmina (Ni /$Al_2O_3$), el cual viabiliza la cinética de conversión.

El gas de síntesis efluente abandona el reactor R-102 a temperaturas que rondan los 900°C. Esta energía térmica de altísimo valor debe ser recuperada de inmediato para salvaguardar la viabilidad energética de la planta. El gas es canalizado hacia el Economizador de Alta (E-103), diseñado como una caldera de recuperación de calor (Waste Heat Boiler) de carcasa y tubos. Este equipo enfría el syngas rápidamente de forma controlada hasta aproximadamente 350°C, evaporando agua por el lado de la carcasa para generar el vapor de alta presión demandado por el proceso.

A continuación, la corriente enfriada ingresa al Acumulador de Gas de Síntesis (A-104). Este recipiente de presión actúa como un separador flash bifásico diseñado para reducir la velocidad del gas, permitiendo la decantación y el drenaje continuo de los condensados acuosos. El A-104 asegura la provisión de una corriente gaseosa completamente seca, estabilizada y apta para ingresar a los delicados lechos de adsorción sin riesgo de saturación capilar por agua.

La arquitectura de la planta requiere abastecer dos procesos con demandas divergentes. Dado que el reactor de ácido acético requiere una alimentación de monóxido de carbono con una pureza de altísimo grado (>98%), el flujo principal de syngas se deriva hacia una Batería de Columnas CO-PSA (AB-105), operada mediante tecnología VPSA (Adsorción por Cambio de Presión al Vacío).

Este tren de separación consta de múltiples lechos operando en ciclos secuenciales que emplean zeolitas dopadas con cobre (Cu). El mecanismo de separación es altamente selectivo: las zeolitas retienen específicamente la molécula de CO a través de enlaces de coordinación. Operativamente, el syngas seco entra a alta presión; el hidrógeno y otros gases ligeros pasan de largo sin ser adsorbidos, mientras que el CO queda firmemente retenido en el lecho. En la fase de regeneración del ciclo, al despresurizar y aplicar vacío, se libera el CO de alta pureza.

Finalmente, las corrientes segregadas rigen la dinámica de control y el balance estequiométrico de la etapa n°1 mediante dos acumuladores pulmón:

- Acumulador de Gas de Síntesis para Metanol (A-106): Recibe el gas de cola de alta presión del VPSA, el cual es sumamente rico en hidrógeno no adsorbido. Su función es reinyectar este hidrógeno a la corriente de syngas fresco para ajustar el Módulo Estequiométrico S, definido como:

  Considerando que el reformado SMR naturalmente produce un exceso de hidrógeno con un valor de S cercano a 3.0, la extracción de CO y la posterior recirculación del hidrógeno permiten regular el parámetro S al rango óptimo de 2.0 a 2.1, maximizando así la conversión catalítica en el lazo de metanol.

- Acumulador de CO (A-107): Capta el monóxido de carbono desorbido por vacío. Su propósito es amortiguar la naturaleza pulsante de las columnas VPSA, consolidando un inventario de gas a presión constante y pureza superior al 98% para alimentar de manera ininterrumpida la etapa de carbonilación.

### 5.3.2: Etapa N°2: Síntesis y Purificación del Metanol

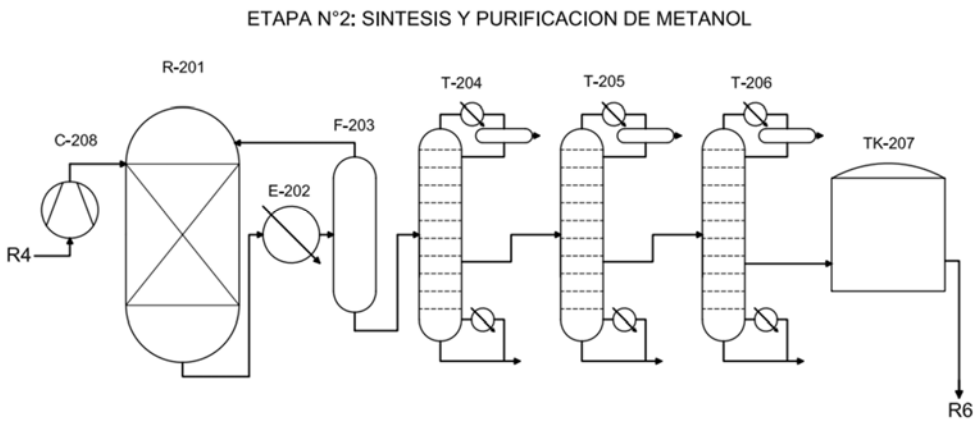



Fig.5.1 Diagrama de la segunda etapa del proceso.

Fuente: Elaboración Propia (Lurgi patente N°: US 9561483 B2)

| Equipos | Nomenclatura | Descripción |
|---|---|---|
| Reactor de Metanol | R-201 | Reactor catalítico que usa una mezcla de $H_2$, CO y $CO_2$ para generar Metanol |
| Economizador de Media | E-202 | Caldera de recuperación, usa los gases caliente en la salida del reactor para generar vapor de media presión. |
| Columna Flash | F-203 | Columna de destilado flash extraigo por cabeza los gases livianos que no reaccionaron, saco el metanol por el medio y por la parte baja purga de tea |
| Columna de topping | T-204 | En esta columna es donde se remueven la mayor cantidad de livianos |
| Columna principal de Metanol | T-205 | En esta columna se remueve principalmente el agua y compuestos más pesados. |
| Columna de refinado | T-206 | Se remueven las ultimas impurezas para dejar un Metanol de grado AA |
| Tanque de almacenamiento de Metanol | TK-207 | Tanque de almacenamiento de Metanol Liquido, listo para su venta o consumo interno. |
| Compresor de alta | C-208 | Compresor centrifugo multietapas de alta presión eleva la presión entre 50 y 80bar para entrar al reactor |
| CORRIENTE SALIDA | R6 | Corriente de salida del Metanol |

Tabla 5.2 Tabla de equipos y corrientes Etapa N°:2.
Fuente: Elaboración propia

**Descripción de la Etapa:**

La Etapa N°2 es la de valorización catalítica, diseñada para procesar el gas de síntesis acondicionado y alcanzar una producción neta de 100.000 t/año de metanol, volumen estructurado para satisfacer la demanda interna y la cuota comercial de exportación.

En primera instancia, la corriente de syngas fresco se integra con el hidrógeno recirculado proveniente de la unidad de separación (VPSA) para fijar el sistema en un balance operativo óptimo. Este equilibrio se monitorea mediante el módulo estequiométrico. Tras validar la composición, la mezcla ingresa a un compresor centrífugo multietapa (C-208), el cual eleva la presión del sistema hasta el rango cinético requerido, comprendido entre 50 y 80 bar.

El gas altamente presurizado se introduce en el Reactor de Metanol (R-201), el cual es un reactor tubular isotérmico (tecnología tipo Lurgi). En su interior, la corriente percola a través de un lecho fijo de catalizador metálico de $Cu/ZnO/Al_2O_3$, operando bajo un régimen térmico rigurosamente controlado en torno a los 250°C. Desde una perspectiva termodinámica, la conversión se rige por reacciones de hidrogenación fuertemente exotérmicas:

$$CO + H_2 \rightarrow CH_3OH$$

$$CO_2 + H_2 \rightarrow CH_3OH + H_2O$$

Debido a la alta exotermicidad del proceso, el control térmico es mandatorio. El efluente abandona el reactor transportando una considerable carga térmica sensible. Consecuentemente, la corriente es derivada hacia el Economizador de Media (E-202), una caldera de recuperación que absorbe la energía del sistema para generar vapor de media presión, incrementando la eficiencia energética global.

Posteriormente, la mezcla bifásica resultante del enfriamiento ingresa a la Columna Flash (F-203). Este separador de equilibrio de fases extrae por el domo los gases ligeros no reaccionados. Esta fracción volátil se recircula hacia el reactor para maximizar el rendimiento global del carbono. Por los fondos del separador, se extrae el metanol crudo en fase líquida.

El metanol crudo condensa consigo agua generada *in situ*, gases disueltos y subproductos oxigenados. Para alcanzar la especificación comercial estricta, esta mezcla es impulsada hacia un tren de destilación continuo e interconectado:

- Columna de Topping (T-204): Constituye el primer corte del fraccionamiento. Opera eliminando por cabeza los gases ligeros y éteres volátiles residuales.

- Columna Principal de Metanol (T-205): Ejecuta la separación masiva del metanol respecto a la fracción acuosa y los alcoholes superiores, permitiendo que el producto de interés ascienda hacia el domo.

- Columna de Refinado (T-206): Representa la etapa de pulido final. Este equipo, típicamente configurado con platos valvulados o empaque estructurado, se encarga de separar el metanol grado AA del agua pesada y las últimas impurezas traza.

Finalmente, el producto ultra-puro es enviado al Tanque de Almacenamiento (TK-207), donde se preserva como líquido a condiciones estándar, garantizando el inventario operativo para la unidad de ácido acético y la logística de exportación.

### 5.3.3 Etapa N°3: Síntesis y Purificación del Ácido Acético.

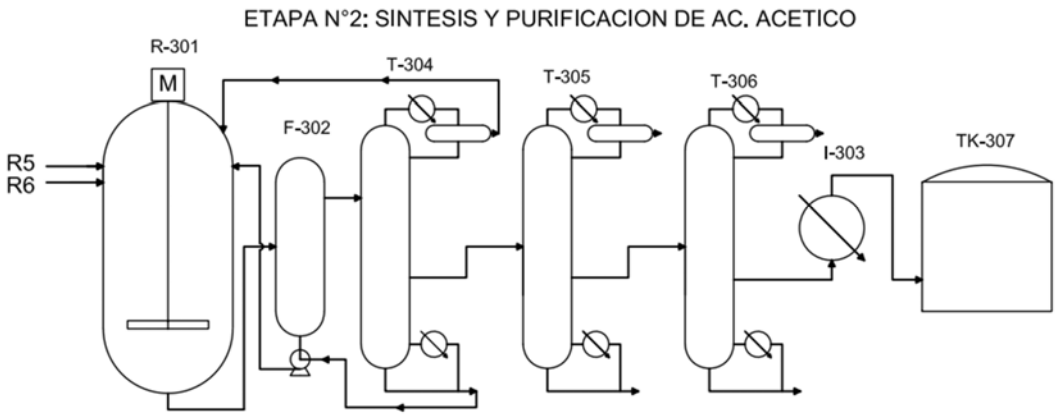



Fig.5.2 Diagrama de la tercera etapa del proceso.

Fuente: Elaboración Propia (The Cativa™ Process for the Manufacture of Acetic Acid)

| Equipos | Nomenclatura | Descripción |
|---|---|---|
| Reactor de carbonilación | R-301 | Es un reactor catalítico de fase homogénea utiliza catalizar de Ir/Ru, para formar el ácido Acético. |
| Columna Flash | F-302 | Esta es la encargada de separar el catalizador de la mezcla y recircularlo |
| Intercambiador de Calor | I-303 | Intercambiador de calor casco y tubo usado para enfriar el ácido acético previo a ser almacenado |
| Columna de remoción de ligueros | T-304 | Se busca remover esteres y yoduro de metilo que se pudieron formar por reacciones secundarias |
| Columna de secado | T-305 | Se busca remover la mayor cantidad de agua posible. |
| Columna de remoción de pesados | T-306 | Se busca remover el ácido propiónico formado por reacciones secundarias y dejando el ácido acético con un grado de pureza AA |
| Tanque de almacenamiento de Ácido Acético | TK-307 | Tanque de almacenamiento del ácido acético listo para ser distribuido |

Tabla 5.3 Tabla de equipos y corrientes Etapa N°:3.
Fuente: Elaboración propia

**Descripción de la Etapa:**

La etapa n°3 constituye el módulo final de valorización del complejo industrial, destinado a la síntesis y refinación para la obtención de 27.500 t/año de ácido acético. Esta sección procesa el metanol y el monóxido de carbono de alta pureza provenientes de las etapas previas, empleando exclusivamente la tecnología Cativa para optimizar la eficiencia energética y el control de la corrosión**.**

El núcleo reactivo de la zona se centraliza en el Reactor de Carbonilación (R-301), el cual opera como un reactor de tanque agitado continuo (CSTR). En su interior ocurre la carbonilación catalítica del metanol.

$$CH_3OH + CO \rightarrow CH_3COOH$$

Sintetizando la molécula de ácido acético compuesta por un grupo metilo unido a un grupo carboxilo.

El sistema adopta la tecnología Cativa, utilizando un catalizador homogéneo a base de iridio y un promotor de yoduro de metilo. La principal ventaja de este proceso, frente a tecnologías tradicionales, es su capacidad de operar con concentraciones drásticamente menores de agua en el medio reaccionante, lo cual reduce significativamente los costos energéticos en la etapa de destilación posterior.
Debido a la presencia combinada de yodo y ácido a una temperatura operativa de 190°C y presiones de 30 a 40 bar, el R-301 exige una construcción integral en metalurgias de alta aleación, específicamente Hastelloy B/C o Zirconio.

La corriente ingresa a la Columna Flash (F-302). Mediante una caída de presión controlada, este equipo induce la vaporización instantánea del producto crudo (ácido acético, metanol no reaccionado, agua y ligeros), separándolo de la fase líquida pesada. Esta fracción líquida, que contiene el complejo catalítico de iridio disuelto, se extrae por los fondos y se recircula de manera continua hacia el reactor R-301, cerrando el lazo sin mermas de metal activo.

La fase vaporizada que abandona el F-302 ingresa a un tren de destilación compuesto por tres columnas operando en serie. Para la ingeniería de detalle y simulación de esta sección, el rigor termodinámico impone el uso del modelo de actividad NRTL acoplado con la ecuación de estado de Hayden-O'Connell, un ajuste matemático ineludible para predecir la fuerte dimerización del ácido acético en estado vapor.

- Columna de Remoción de Ligeros (T-304): Opera como el primer corte. Su objetivo es recuperar por cabeza los ésteres volátiles, el yoduro de metilo y el metanol sin reaccionar, los cuales se reinyectan al sistema de reacción.

- Columna de Secado (T-305): Destinada a extraer la mayor cantidad de agua posible del producto crudo. Dado el alto poder corrosivo de la mezcla acuosa-ácida, el domo y la zona superior de esta torre requieren revestimientos en Hastelloy C-276.

- Columna de Remoción de Pesados (T-306): Constituye la etapa de pulido final. Separa los subproductos de alto punto de ebullición por los fondos, principalmente el ácido propiónico originado en reacciones secundarias colaterales.

Por el destilado de la columna T-306 se obtiene el producto con especificación de pureza grado AA. Tras un enfriamiento final en el intercambiador de calor (I-303), el ácido acético se canaliza hacia el Tanque de Almacenamiento (TK-307). Este recipiente estabiliza el inventario final del producto, manteniéndolo en condiciones seguras y disponible para su distribución comercial.

## 5.4 Ingeniería de detalle

### 5.4.1 Introducción.

El presente capitulo se desarrolla el balance de masa y el diseño preliminar de los equipos que componen la planta industrial separándola por etapas como venimos haciendo en los capítulos anteriores empezaremos con la etapa N°1: Reformado y Separación de Monóxido de Carbono, luego la etapa N°2: Síntesis y Purificación del Metanol y por ultimo etapa N°3: Síntesis y Purificación del Ácido Acético.

Siguiendo el orden de los equipos según esquema proporcionado previamente: desulfurador (D-101), reformador autotérmico (R-102), economizador de alta (E-103), acumulador de gas de síntesis (A-104), columnas de absorción por diferencia de presión (AB-105), y los acumuladores de salida A-106 (hacia el reactor de metanol) y A-107 (hacia el reactor de ácido acético).

### 5.4.2 Balance de masa Etapa N°1.

El balance de masa se desarrolla a partir de la demanda de gas de síntesis aguas abajo, que, a diferencia del balance preliminar del capítulo de tamaño del proyecto, en este se incorpora explícitamente la eficiencia de recuperación de CO de la columna de absorción (AB-105) y la del reformador R-102 que asegure el abastecimiento de materias primas tanto al reactor de síntesis de Metanol, como al reactor de síntesis del Ácido Acético, intentado no generar ningún cuello de botella para el sistema y aprovechar al máximo la optimización y sinergia del proceso .

Todos estos cálculos a usado una base horaria de 330 días/Año y 24h/día

#### 5.4.2.1 Datos Iniciales:

Capacidad Instalada:

- Ácido Acético (AA): 27500 t/año
- Metanol (MeOH): 100000 t/año

Horas de operación:

- 330 días/año x 24 h/día = 7920 h/año

Pesos moleculares (Kg/Kmol):

- $CH_4$= 16,04
- $O_2$= 32
- $H_2O$= 18,02
- CO= 28,01
- $CO_2$= 44,01
- $H_2$= 2,016
- $CH_3OH$= 32,04
- $CH_3COOH$= 60,05

Rendimiento adoptado:

- Reactor de carbonilación η= 0,95
- Reactor de Metanol η= 0,97
- Columna de Absorción η= 0,97
- Relación vapor/carbono de reformador S/C=0,85

Producción Kmol/h:

- Caudal másico horario

F(AA) = 27.500.000 kg/año ÷ 7.920 h/año = 3.472,22 kg/h

F(MeOH) = 100.000.000 kg/año ÷ 7.920 h/año = 12.626,26 kg/h

- Conversión a caudal molar

n(AA) = F(AA) / PM(CH3COOH) = 3.472,22 / 60,05 = 57,822 kmol/h

n(MeOH) = F(MeOH) / PM(CH3OH) = 12.626,26 / 32,04 = 394,078 kmol/h

**5.4.2.2 Requerimiento de CO para síntesis de AA.**

$$CH_3OH + CO \rightarrow CH_3COOH \text{ (relación molar 1:1:1)}$$

Considerando la eficiencia global del reactor de carbonilación, el caudal de CO que debe alimentarse al reactor R-301 resulta:

$$CO_{PURO} = n(AA) / \eta(AA) = 57,822 / 0,95 = 60,865 \text{ kmol/h}$$

Por la relación estequiométrica 1:1, este mismo valor corresponde también al caudal de metanol puro que debe alimentarse a R-301.

**5.4.2.3 Requerimiento de CO y $CO_2$ para síntesis de MeOH.**

$$CO + 2H_2 \rightarrow CH_3OH \text{ (relación molar 1:1:1)}$$

$$CO_2 + 3H_2 \rightarrow CH_3OH + H_2O \text{ (relación molar 1:3:1:1)}$$

Considerando la eficiencia global del loop de síntesis:

$$C_{total} (CO+CO2) = n(MeOH) / \eta (MeOH) = 394,078 / 0,97 = 406,266 \text{ kmol/h}$$

**5.4.2.4 Balance de Carbono del Reactor ATR (R-102):**

El carbono total alimentado como CH4 debe cubrir tanto el CO puro extraído para R-301 como el carbono total requerido por R-201:

$$CH4 = C_{total} + CO_{PURO} = 406,266 + 60,865 = 467,131 \text{ kmol/h}$$

**5.4.2.5 Módulo Estequiométrico del Reactor ATR (R-102):**

Se adopta el módulo estequiométrico óptimo que recomienda la patente LURGI™ para catalizadores $Cu/ZnO/Al_2O_3$, , para fijar la relación entre el reformado del metano con vapor (x2) y combustión parcial del metano con oxígeno (x1) del reformador autotérmico:

$$X_1 = CH4 - X_2 = 467,131 - 270,844 = 196,287 \text{ kmol/h}$$

$$O_2 = 1,5 \times X_1 = 294,431 \text{ kmol/h}$$

$$H_2O = (S/C) \times CH4 = 0,85 \times 467,131 = 397,062 \text{ kmol/h}$$

**5.4.2.6 Composición Real de Salida del Reactor ATR:**

Una parte del CO que se formó en las dos reacciones anteriores sigue reaccionando con el vapor sobrante y se convierte en $CO_2 + H_2$ esto se denomina shift (x3) y se determina resolviendo la condición de equilibrio , con Kp calculado mediante la correlación bibliográfica sabiendo que trabajamos a 1000°C(1273,15 °K) el valor de $K_P$(1.273,15 K) = 0,4798.

Planteamos los balances atómicos de C, H y O y luego expresamos las cuatro corrientes de salida del reformador en función de x3:

Balance de C:

$$CH_{4(Alimentación)} = CO + CO_2$$

Balance de H:

$$CH_{4(Alimentación)} + H_2O_{(Alimentación)} = 2 \cdot H_{2(requerido)} + 2 \cdot H_2O_{(salida)}$$

Balance de O:

$$H_2O_{(Alimentación} + 2 \cdot O_{2(Alimentación)} = CO + 2 \cdot CO2 + H_2O_{(salida)}$$

Balances en función a $X_3$:

$$CO(X_3) = X_1 + X_2 - X_3 = 467{,}1315 - X_3 \; [\equiv A - X_3, \; CON \; A = 467{,}1315]$$

$$CO2(X3) = X3$$

$$H_2(X_3) = 3 \cdot X_2 + X_3 = 812{,}5322 + X3 \; [\equiv B + X_3, \; CON \; B = 812{,}5322]$$

$$H_2O(X_3) = S + 2 \cdot X_1 - X_2 - X_3 = 518{,}7927 - X_3 \; [\equiv C - X_3, \; CON \; C = 518{,}7927]$$

Sustituyendo las expresiones de equilibrio:

Multiplicando ambos miembros por el denominador y reordenando términos:

$$K_P \cdot (A - X_3) \cdot (C - X_3) = X_3 \cdot (B + X_3)$$

$$K_P \cdot [A \cdot C - (A+C) \cdot X_3 + X_3^2] = B \cdot X_3 + X_3^2$$

$$K_P \cdot X_3^2 - X_3^2 - K_P \cdot (A+C) \cdot X_3 - B \cdot X_3 + K_P \cdot A \cdot C = 0$$

$$(K_P - 1) \cdot X_3^2 - [K_P \cdot (A+C) + B] \cdot X_3 + K_P \cdot A \cdot C = 0$$

Esta es una ecuación cuadrática en x3:

$$Raíz \; 1: \; x3 = -2.558{,}79 \; kmol/h \; (No \; valida)$$

$$Raíz \; 2: \; x3 = 87{,}361 \; kmol/h \; (vaida)$$

Composición Resultante del Gas de Síntesis:

$$CO = 467{,}1315 - 87{,}361 = 379{,}771 \; kmol/h$$

$$CO2 = 87{,}361 \; kmol/h$$

$$H2 = 812{,}5322 + 87{,}361 = 899{,}893 \; kmol/h$$

$$H2O(exceso) = 518{,}7927 - 87{,}361 = 431{,}432 \; kmol/h$$

Verificación de la constante de equilibrio:

$$Kp(verif.) = (87{,}361 \times 899{,}893) / (379{,}771 \times 431{,}432) = 78.611{,}6 / 163.833{,}6 = 0{,}4798$$

#### 5.4.2.7 Diseño Óptimo del Bypass en AB-105

Se minimiza el caudal de gas que debe atravesar las columnas de absorción, derivando solo la fracción estrictamente necesaria para recuperar el CO puro requerido:

$$f = CO_{puro} / (CO_{total} \times \eta_{abs}) = 60{,}865 / (379{,}771 \times 0{,}97) = 16{,}52\%$$

| Corriente | Caudal (kmol/h) | % del total |
|---|---|---|
| Gas total de síntesis (A-104) | 1.367,02 | 100% |
| A columnas AB-105 | 225,87 | 16,5% |
| Bypass directo a A-106 | 1.141,16 | 83,5% |

Tabla 5.4 Corrientes de Bypass
Fuente: Elaboración propia

#### 5.4.2.8 Resultados Finales de balance de masas:

| Corriente | kmol/h | kg/h |
|---|---|---|
| Gas natural (CH4) alimentado | 467,13 | 7.492,8 |
| Oxígeno (O2) alimentado | 294,43 | 9.421,8 |
| Vapor de proceso alimentado | 397,06 | 7.155,1 |
| CO (salida real de R-102) | 379,77 | 10.638,8 |
| CO2 (salida real de R-102) | 87,36 | 3.844,8 |
| H2 (salida real de R-102) | 899,89 | 1.814,0 |
| H2O sin reaccionar (exceso) | 431,43 | 7.774,6 |
| CO puro a A-107 (→ R-301) | 60,87 | 1.705,0 |
| CO a A-106 (→ R-201) | 318,91 | 8.931,8 |
| CO2 a A-106 (→ R-201) | 87,36 | 3.844,8 |
| H2 a A-106 (→ R-201) | 899,89 | 1.814,0 |

Tabla 5.5 Resultado de Balance de masa Etapa N°:1
Fuente: Elaboración propia

### 5.4.3 Diseño de equipamiento de la Etapa N°1

#### 5.4.3.1 Desulfurador (D-101)

Este método es el estándar de ingeniería para lechos de adsorción/reacción de guarda cuya función es remover un contaminante en trazas de una corriente de proceso. En este caso por cuestiones de conveniencia y eficiencia el proceso será gobernado por la velocidad espacial mínima de diseño (GHSV = 1.500 $h^{-1}$), y no por la capacidad de retención de azufre del ZnO.

En un lecho de guarda de ZnO, dos condiciones deben cumplirse simultáneamente:

- Capacidad: el sólido debe tener masa suficiente para retener todo el H2S alimentado durante el intervalo deseado entre cambios de lecho.

- Tiempo de contacto: el gas debe permanecer en contacto con el sólido el tiempo suficiente para que la reacción $H_2S + ZnO \rightarrow ZnS + H2O$ se complete, lo cual se

garantiza manteniendo la velocidad espacial (GHSV) por debajo de un límite de diseño.

**Volumen de Lecho mínimo.**

$$Q_{(gas,\ 380°C,\ 30\ bar)} =$$

$$V_{lecho} = Q / GHSV_{diseño} = 845{,}55 / 1.500 = 0{,}564\ m^3$$

**Masa de ZnO y Capacidad Resultante**

$$W(ZnO) = V_{lecho} \times \rho_{ZnO} = 0{,}564 \times 1.400 = 789{,}2\ kg$$

Reacción: $H2S + ZnO \rightarrow ZnS + H2O$

Capacidad estequiométrica = $PM(H_2S) / PM(ZnO)$

34,08/81,38 = 0,4188 kg H2S/kg ZnO

Capacidad práctica (F.U. 70%) = 0,70 × 0,4188 = 0,2931 kg H2S/kg ZnO

Capacidad total = W(ZnO) × capacidad práctica = 789,2 × 0,2931 = 231,3 kg H2S

**Vida Útil.**

Vida útil = Capacidad total / caudal de H2S = 231,3 kg / 0,157 kg/h = 1.473,0 h = 61,4 días

**Dimensiones del Recipiente**

Con L/D=2,5: D = 0,660 m; L = 1,649 m

**Conclusión:**

Se diseñó los desulfuradores D-101 a partir velocidad espacial mínima para tener una retención optima del contaminante (GHSV=1.500 $h^{-1}$). De estos cálculos se obtuvieron dos recipientes de 0,66 m de diámetro por 1,65 m de longitud, con 789,2 kg de ZnO cada uno, en configuración lead/standby, con un ciclo de reemplazo de relleno de aproximadamente 61 días. Esto nos permite no detener el proceso cuando el desulfurador esta llegando a su capacidad máxima de retención se cambia el flujo a su gemelo en paralelo mientras se regenera el ZnO del que se encuentra saturado.

### 5.4.3.2 Reactor Autotérmico (R-102)

El reformador autotérmico R-102 convierte el gas natural desulfurado, junto con oxígeno y vapor de proceso, en gas de síntesis. El diseño se conceptualiza en dos zonas operativas integradas: una cámara de combustión superior donde ocurre la oxidación parcial (exotérmica), alcanzando el pico térmico de llama, y un lecho catalítico inferior donde se llevan a cabo las reacciones de reformado con vapor (endotérmica) y water-gas-shift, estabilizando la mezcla a la temperatura de salida de diseño (≈1.000 °C) en un estado cercano al equilibrio químico.

**Dimensionamiento Reactor Autotérmico ATR (R-102)**

Para el diseño industrial del ATR, el recipiente se divide conceptualmente en dos secciones: la cámara de combustión libre y el lecho fijo catalítico.

**Cámara de Combustión (Zona Superior)**

En esta zona vacía se asumen las condiciones térmicas del pico de llama: 1.250 °C (1.523 K) y 30 bar. Se establece un tiempo de residencia (τ) de diseño de 0,6 segundos para garantizar la completitud de la combustión parcial del gas natural.

- Caudal molar total alimentado:
  n = CH4+O2+H2O = 467,13+294,43+397,06 = 1.158,62 kmol/h

- Caudal volumétrico real ($Q_{real}$):

$$Q_{(gas,\ 1250°C,\ 30\ bar)} =$$

- Volumen libre requerido ($V_{comb}$):
  $V_{comb}$ =2,11 m³/s × 0,6 s = 1,27 m³.
- Altura de la cámara ($H_{comb}$):
  Area=
  $V_{comb}$ / Área = 1,27 m³ / 1.767 m² = 0.72 m.
  Por criterios mecánicos, disipación de turbulencia y distancia de seguridad de la llama al lecho, se adopta una altura de diseño de 1,50 m.

**Lecho Catalítico (Zona Inferior)**

El volumen de catalizador de $Ni/Al_2O_3$ se calcula utilizando el caudal de gas efluente de salida (ya que el reformado aumenta el número de moles, es el volumen real que atraviesa la mayor parte del lecho) a condiciones normales, aplicando una Velocidad Espacial Horaria del Gas (GHSV) industrial típica para reactores secundarios/ATR (5.000 $h^{-1}$).

- Caudal volumétrico estándar ($Q_{STP}$):
  $Q_{STP}$ =1.798,45 kmol/h × 22,414 Nm³/kmol = 40.310 Nm³/h.
- Volumen de catalizador ($V_{cat}$):

$$V_{cat}=40.310\ Nm^3/h / 5.000\ h^{-1} = 8,06\ m^3.$$

- Dimensiones (L/D=3)

$$D = [V_{cat}/(3\pi/4)]\ ^{(1/3)} = 1,5\ m \quad ; \quad L = 3\times D = 4.5\ m$$

- Masa del catalizador: Asumiendo una densidad aparente de 1.100 kg/m³, se requieren 8.866 kg de catalizador metálico.

**Balance de Energía:**

Balance de entalpía de reacción a temperatura de referencia (25°C), a partir de las extensiones de reacción resueltas por equilibrio

$$Q_{(combustión)} = X_1\times 1.000/3.600 \times (-519) = 196,287\times 0,2778\times(-519) = -28.298,1\ kW$$

$$Q_{(reformado)} = X_2\times 1.000/3.600 \times (+206) = 270,842\times 0,2778\times(+206) = +15.498,2\ kW$$

$$Q_{(shift)} = X_3\times 1.000/3.600 \times (-41) = 96,445\times 0,2778\times(-41) = -1.098,4\ kW$$

$$Q_{neto} = -28.298,1 + 15.498,2 - 1.098,4 = -13.898,3\ kW$$

Los valores $X_1$, $X_2$, $X_3$ se obtienen del balance de masa globales y El excedente se recupera en el economizador de alta E-103, generando vapor de alta presión.

**Especificaciones Mecánicas:**

Debido a las severas condiciones operativas (picos térmicos > 1200 °C), la vasija requiere aislamiento térmico interno masivo; sin él, el acero perdería sus propiedades mecánicas.

- Diámetro interno libre (útil): 1,5 m.

- Refractario: Revestimiento multicapa de 250 mm de espesor (hormigón de alúmina densa para resistir la erosión del gas y proteger el metal con una capa de baja conductividad).
- Diámetro exterior de la envolvente metálica ($D_{ext}$): 1,5 m + 2(0,250 m) = 2 m
- Metalurgia de la Carcasa: Acero aleado SA-387 Gr. 11/22 (Cromo-Molibdeno), estándar de la industria bajo normas ASME para resistir alta presión combinada con la transferencia de calor residual a través del refractario.

**Conclusiones:**

| Magnitud | Resultado |
|---|---|
| Conversión de metano | 99,9995% (equilibrio químico) |
| Composición de salida (base húmeda) | CO 20,61% / CO2 5,36% / H2 50,54% / H2O 23,48% |
| Diámetro cámara de combustión | 1.5m |
| Longitud cámara de combustión | 1.5m |
| Volumen de lecho catalítico | 8.06 m³ |
| Diámetro del lecho | 1,5 m |
| Longitud del lecho | 4.5 m |
| Calor neto de reacción (base 25°C) | −13.898,3 kW |
| Régimen térmico | Adiabático, sin refrigeración |

Tabla 5.6 Tabla de Conclusiones
Fuente: Elaboración propia.

El reformador R-102 se dimensiona mediante dos herramientas distintas y complementarias, cada una aplicada donde corresponde: el equilibrio químico simultáneo de las reacciones de combustión y reformado para determinar la composición real de salida (validando una conversión de metano prácticamente completa, 99,9995%,), y la velocidad espacial de diseño (GHSV), tomada de literatura especializada en reformadores autotérmico industriales, para determinar el volumen físico del lecho catalítico necesario para alcanzar dicho equilibrio en la práctica.

#### 5.4.3.3 Torre de adsorción por oscilación de presión al vacío.

La unidad AB-105 tiene como objetivo la separación selectiva y purificación de monóxido de carbono (CO) a partir de una corriente parcial de gas de síntesis deshidratado

proveniente del acumulador A-104, a fin de abastecer la demanda estequiométrica del reactor de carbonilación de ácido acético (R-301) operado bajo tecnología Cativa. Para cumplir con la rigurosa especificación requerida (pureza molar de CO > 98,5%), se implementa una batería de adsorción por oscilación de presión al vacío (VPSA-CO).

El principio de separación se fundamenta en la quimisorción reversible mediada por complejación π empleando adsorbentes estructurados dopados con sales de cobre monovalente (CuCl disperso sobre soporte poroso de alúmina o zeolita). Esta formulación confiere una selectividad excepcionalmente alta hacia el CO respecto del H2 y frente al CO2 presente en el gas. A diferencia de un ciclo térmico (TSA), el proceso VPSA opera en régimen isotérmico (≈ 25–35 °C), alternando rápidamente etapas de adsorción a alta presión (25 bar) y regeneración por despresurización y extracción bajo vacío profundo (0,15–0,20 bar abs).

**Dimensionamiento de los Lechos Adsorbentes:**

El dimensionamiento adopta la metodología de capacidad dinámica de trabajo por oscilación cíclica, incorporando factores de corrección por longitud de lecho no aprovechado y la densidad real de empaque del adsorbente formulado.

**Parámetros de CO**

- Caudal de CO alimentado al sistema VPSA: 62,748 kmol/h (1.757,57 kg/h).
- Duración de la etapa de adsorción de alta presión: $t_{ads}$ = 4,0 min = 0,0667 h.
- Masa de CO ingresada por ciclo:

$$M_{CO,\ ciclo} = 1.757{,}57\ kg/h \times 0{,}0667\ h = 117{,}17\ kg\ de\ CO.$$

**Masa de adsorbente:**

La capacidad neta de trabajo isotérmico reportada para adsorbentes de complejación π (CuCl soportado en tamiz molecular / alúmina) entre 25 bar y 0,20 bar abs es de:

$$\Delta_q = 0{,}045\ kg\ CO\ /\ kg\ adsorbente$$

Sin embargo, en un lecho fijo en operación dinámica, el frente de concentración avanza generando una zona de transferencia de masa donde el sólido no se encuentra 100% saturado al momento del quiebre. Se adopta una eficiencia volumétrica de lecho de:

$$\eta_{lecho} = 0{,}80\ (80\%)$$

Masa teórica de adsorbente:

$$W_{teor} = 117{,}17\ kg\ /\ 0{,}045\ kg/kg = 2.603{,}8\ kg.$$

Masa real de adsorbente por columna:

$$W_{adsorbente} = W_{teor}\ /\ \eta_{lecho} = 2.603{,}8\ /\ 0{,}80 = 3.254{,}7\ kg$$

se adopta 3.255 kg de sólido activo.

**Volumen del Lecho**

A diferencia de carbones activados de baja densidad (≈ 480 kg/m³), los adsorbentes zeolíticos industriales dopados con cationes de cobre poseen una densidad aparente empacada típica de $\rho_b$ = 720 kg/m³.

- Volumen de lecho empacado:

$$V_{lecho} = W_{adsorbente} \rightarrow \rho_b = 3.255\ kg\ /\ 720\ kg/m^3 = 4{,}52\ m^3.$$

Adoptando una relación de aspecto industrial estándar L / D = 2,80 para garantizar flujo pistón uniforme y evitar canalizaciones:

$$V_{lecho} = (\pi/4) \times D^2 \times (2{,}80\ D) = 2{,}1991 \times D^3$$

D = (4,52 / 2,1991)1/3 = (2,055)1/3 = 1,27 m (Área de paso libre A = 1,267 m²).

- Longitud del lecho adsorbente:

$$L = 2{,}80 \times 1{,}27\ m = 3{,}56\ m.$$

Altura total del recipiente (T-T): Considerando soportes de lecho, malla inferior, distribuidores de flujo y precama de protección contra trazas de humedad:

$$HT\text{-}T = 4{,}80\ m.$$

**Arquitectura de la Batería y Cronograma de Ciclos:**

Para asegurar el suministro continuo de gas a los reactores y amortiguar fluctuaciones, la unidad no puede operar con dos lechos simples alternados de 4 minutos, dado que la despresurización al vacío, purga y represurización demandan tiempos diferenciales. Se especifica una batería de 4 lechos rotativos en paralelo (AB-105 A/B/C/D) operando bajo una secuencia cíclica de 4 etapas desfasadas:

Primer Lecho (Adsorción a Alta Presión): El gas ingresa por la base de la columna; el CO se adsorbe selectivamente, el H2 y $CO_2$ libre se entrega por el domo hacia A-106 (4,0 min).

Segundo Lecho (Despresurización de corriente y Ecualización de Presión): Se comunica con otra columna recién regenerada para transferir gas presurizado, recuperando energía de compresión (1,0 min).

Tercer Lecho (Evacuación / Desorción bajo Vacío): Una bomba de vacío multietapa extrae el CO retenido en el lecho a pureza > 98,5%, enviándolo al acumulador A-107 (4,0 min).

Cuarto Lecho (Represurización con Gas Purificado): El lecho se presuriza nuevamente hasta 25 bar para iniciar un nuevo ciclo (1,0 min).

Esta configuración garantiza que en todo momento haya una columna en régimen de adsorción continua recibiendo los 232,94 kmol/h de syngas, y una columna en extracción continua entregando los 60,865 kmol/h de CO puro a través del acumulador A-107.

**Conclusiones:**

| **Magnitud** | **Resultado sistema completo (4 torres)** |
|---|---|
| Adsorbente Selectivo | CuCl soportado en alúmina / zeolita |
| Masa de Adsorbente Activo | 13.020 Kg |
| Volumen Util de Lecho | 18.08$m^3$ |
| Longitud del Lecho Empacado | 3.56m |
| Diámetro Interno | 1.27m |
| Altura Total | 4.8 m |

| Magnitud | Resultado sistema completo (4 torres) |
|---|---|
| Material de Construcción | Acero al Carbono SA-516 Gr 70 |
| Presión | 28 bar g / Vacío Absoluto |
| Temperatura de diseño | 65°C |

Tabla 5.7 Tabla de Conclusiones
Fuente: Elaboración propia.

En esta memoria de cálculo se busca superar las limitaciones cinéticas y termodinámicas identificadas previamente para la columna de adsorción AB-105:

- Selectividad Robusta: La adopción de adsorbentes específicos por complejación π (CuCl soportado) garantiza superar el 98,5% de pureza en el CO, anulando la coadsorción competitiva de CO2.
- Precisión de Dimensionamiento: Al aplicar la densidad real de empaque (ρb = 720 kg/m³) y contemplar un factor de aprovechamiento del 80% por zona de transferencia de masa (MTZ), se determinó una masa de 3.255 kg de sólido por torre (D = 1,27 m, L = 3,56 m), arrojando pérdidas de carga mínimas (ΔP < 9 mbar).
- Flujo Continuo Garantizado: La transición a una batería rotativa de 4 lechos (AB-105 A/B/C/D) acoplada a los tanques pulmón A-104, A-106 y A-107 asegura la operación ininterrumpida y estable de las unidades de metanol y ácido acético.

**5.4.3.4 Diseño de acumuladores A-103, A-106, A-107.**

En la arquitectura de acondicionamiento de gas de síntesis (Etapa N°: 1), los recipientes A-104, A-106 y A-107 desempeñan roles termodinámicos y operacionales diferenciados. El dimensionamiento industrial riguroso abandona la premisa simplista y adopta metodologías fundadas en la física de cada servicio específico:

- A-104 (Tambor Separador): Recibe el syngas efluente del economizador E-103 y condensadores posteriores. Su función principal es la separación bifásica gas-líquido para decantar y drenar el agua condensada (evitando el arrastre de niebla líquida hacia la batería VPSA AB-105) y actuar simultáneamente como cabecera pulmón de distribución hacia el bypass y la purificación.
- A-106 (Acumulador Pulmón de Gas a Metanol): Consolida la corriente de bypass con el efluente de cola del VPSA (rico en H2), homogeneizando la mezcla para fijar el módulo estequiométrico óptimo (S ≈ 2,00 – 2,05) y amortiguar las fluctuaciones de presión aguas arriba del compresor de síntesis de metanol.
- A-107 (Acumulador Pulmón de CO): Recibe el monóxido de carbono desorbido de manera discontinua por las bombas de vacío de la batería VPSA (AB-105). Su diseño absorbe las fluctuaciones de presión del ciclo cíclico (ΔP admisible) y garantiza un suministro continuo, pulso-libre y estrictamente controlado hacia el reactor de carbonilación Cativa (R-301).

**Parámetros:**

Se emplean los caudales y propiedades resultantes de la resolución del equilibrio químico simultáneo de R-102 y la integración de la Etapa N°: 1

| Equipo / Corriente | Caudal Molar (kmol/h) | Peso Molecular (kg/kmol) | Caudal Másico (kg/h) | Condiciones Operativas |
|---|---|---|---|---|
| A-104 (Vapor seco) | 1.376,10 | 11,96 | 16.458 | 40 °C, 25,0 bar ($Q_{real}$ = 0,398 m³/s) |
| A-104 (Agua condensada) | 422,35 | 18,02 | 7.611 | 40 °C ($\rho_L \approx 992$ kg/m³) |
| A-106 (Mezcla a Metanol) | 1.315,24 | 11,22 | 14.757 | 40 °C, 24,0 bar ($Q_{real}$ = 0,396 m³/s) |
| A-107 (CO puro regenerado) | 60,865 | 28,01 | 1.705 | 35 °C, 2,5 – 3,0 bar ($Q_{real}$ = 0,143 m³/s) |

Tabla 5.8 Tabla de Parámetros de calculo
Fuente: Elaboración propia.

**Dimensionamiento de acumuladores:**

- **Separador Bifásico (A-104)**

El dimensionamiento se rige por la velocidad terminal de arrastre de gotas según la ecuación de Souders-Brown (API 521 / GPSA), complementada con el tiempo de retención para acumulación y nivel de líquido condensado:

- Densidades: A 25 bar y 40 °C:
  $\rho_G = (P \times PM) / (Z \times R \times T) \approx 11,60$ kg/m³; $\rho_L = 992$ kg/m³.
- Velocidad máxima permisible de vapor ($u_v$):

  Adoptando K = 0,070 m/s

(separador vertical provisto de eliminador de niebla / demister pad de malla de alambre):

$U_v = K \times \sqrt{[(\rho_L - \rho_G) / \rho_G]} = 0,070 \times \sqrt{[(992 - 11,6) / 11,6]} = 0,070 \times 9,19 = 0,643$ m/s.

  - Velocidad de diseño (80% de $u_v$): $U_{diseño} = 0,80 \times 0,643 = 0,514$ m/s.
- Área de sección transversal requerida:

$$A_{transv} = Q_{real} / U_{diseño} = 0,398 \text{ m}^3/\text{s} / 0,514 \text{ m/s} = 0,774 \text{ m}^2.$$

- Diámetro interno libre:

$$D = \sqrt{[(4 \times 0,774) / \pi]} = 0,993 \text{ m}.$$

  Por criterios de estandarización y margen ante picos de condensado, se adopta D = 1,40 m (Área real A = 1,539 m²; velocidad real de vapor = 0,259 m/s, nos da un margen excelente).

- Retención de Líquido Condensado:
- Caudal volumétrico de agua:

$$QL = 7.611 \text{ kg/h} / 992 \text{ kg/m}^3 = 7,67 \text{ m}^3\text{/h} = 0,128 \text{ m}^3\text{/min}.$$

Fijando un tiempo de retención de líquido de 5 minutos (operación segura entre nivel bajo y alto de corte):

$V_L = 0,128 \text{ m}^3\text{/min} \times 5 \text{ min} = 0,64 \text{ m}^3 \rightarrow$ Altura de líquido: $h_L = 0,64 / 1,539 = 0,42$ m

(se asigna 0,90 m para niveles NLL/HH e instrumentación).

**Distribución de Alturas del Recipiente Vertical:**

- Fondo a nivel bajo de líquido: 0,50 m.
- Nivel de operación de líquido (Δh): 0,90 m.
- Nivel alto de líquido a tobera de entrada: 1,00 m.
- Entrada a demister: 1,20 m.
- Espesor de demister y espacio de desprendimiento de vapor superior: 0,80 m.
- Altura total Tanque a Tanque (HT-T): 4,40 m (Relación L/D = 3,14).
- Volumen total geométrico: $V = 1,539 \text{ m}^2 \times 4,40 \text{ m} = 6,77 \text{ m}^3$
- Diámetro de Tanque: 1,40 m.

- **Acumulador Pulmón de Gas a Metanol (A-106)**

A-106 opera exclusivamente en fase gas, previo a la sección de compresión hacia el lazo de síntesis de metanol. Para recipientes pulmón de gas a alta presión (24 bar), la práctica estándar de ingeniería asigna un tiempo de residencia dinámico de 30 a 45 segundos (tiempo suficiente para estabilizar lazos de control PI de presión y caudal):

Caudal volumétrico real: $Q_{real} = 0,396 \text{ m}^3\text{/s}$.

Tiempo de amortiguamiento adoptado: tres = 40 s.

Volumen requerido: $V = 0,396 \text{ m}^3\text{/s} \times 40 \text{ s} = 15,84 \text{ m}^3$.

Geometría (Configuración horizontal, L/D = 3,0):

$V = (\pi/4) \times D^2 \times (3 D) = 2,3562 \times D^3$

$D = (15,84 / 2,3562)1/3 = (6,722)1/3 = 1,89$ m (Se adopta diámetro nominal D = 1,90 m).

Longitud Tanque a Tanque: $L = 3,0 \times 1,90$ m = 5,70 m (Volumen real = 16,16 $\text{m}^3$).

- **Acumulador Pulmón de Desorción VPSA de CO (A-107)**

A-107 es el recipiente crítico de amortiguamiento dinámico: recibe las descargas cíclicas de la bomba de vacío de la unidad VPSA AB-105 (4,0 min de desorción por torre) y entrega un caudal continuo y estable hacia el compresor de alimentación a R-301. Su dimensionamiento se calcula con base en la fluctuación admisible de presión (ΔP) por ciclo:

- Masa de CO desorbido por ciclo: $n_{ciclo} = 60,865 \text{ kmol/h} \times (4/60) \text{ h} = 4,058$ kmol.
- Presión base de recepción: P = 2,5 bar abs.
  Se fija una banda máxima admisible de fluctuación de presión durante la conmutación de válvulas de ΔP = 1,5 bar.
- Temperatura: T = 35 °C = 308,15 K.

- Volumen de tanque pulmón:

$$V = (n_{ciclo} \times R \times T) / \Delta P$$

(4,058 kmol × 8,314 kPa·m³/kmol ·K × 308,15 K) / 150 kPa = 6,93 m³.

- Geometría (Recipiente vertical, L/D = 2,8):

D = [6,93 / (2,8 × π/4)]1/3 = 1,47 m (Se adopta D = 1,50 m).

- Longitud Tanque a Tanque: L = 2,8 × 1,50 m = 4,20 m (Volumen real = 7,42 m³).

**Conclusiones:**

| Parámetro / Equipo | A-104 (Separador Bifásico) | A-106 (Pulmón Metanol) | A-107 (Pulmón CO VPSA) |
|---|---|---|---|
| Servicio | Separación bifásica Gas-Agua | Pulmón Gas Syngas Mezcla | Amortiguador de pulsos VPSA |
| Orientación | Vertical | Horizontal | Vertical |
| Criterio de Cálculo | Souders-Brown ($u_v$) | Tiempo de residencia (40 s) | Capacidad por ciclo (ΔP = 1,5 bar) |
| Volumen de Diseño | 6,77 m³ | 16,16 m³ | 7,42 m³ |
| Diámetro Interno | 1,40 m | 1,90 m | 1,50 m |
| Longitud / Altura | 4,40 m | 5,70 m | 4,20 m |
| Presión de Diseño | 28,0 bar g | 27,0 bar g | 5,0 bar g / Vacío total |
| Material de Construcción | SA-516 Gr 70 (3 mm C.A.) | SA-516 Gr 70 (3 mm C.A.) | SA-516 Gr 70 (3 mm C.A.) |

Tabla 5.9 Tabla de Conclusiones
Fuente: Elaboración propia.

### 5.4.4 Balance de masa Etapa N°2.

El presente informe desarrolla el balance de masa global de la Etapa N°2 del proceso (síntesis y purificación de metanol), abarcando el reactor de síntesis R-201, el economizador de media E-202, la columna flash F-203, el tren de purificación (T-204, T-205, T-206) y el tanque de almacenamiento TK-207. A diferencia de un balance simplificado de "paso único", este informe modela explícitamente el loop de reciclo del reactor de síntesis, tal como se diseña y opera realmente en la industria.

La alimentación fresca a la Etapa N°2 proviene del acumulador A-106 (Etapa N°1), con la composición real determinada por el equilibrio químico del reformador R-102.

#### 5.4.4.1 Reactor de Metanol

**El Loop de Síntesis de Metanol**

A diferencia de reacciones de conversión casi completa como el reformado, la síntesis de metanol sobre catalizador Cu/ZnO/Al2O3 está limitada por el equilibrio químico a las condiciones de operación típicas (≈250°C, 50-100 bar), lo que resulta en una conversión de apenas ~10% del gas de síntesis en cada paso a través del reactor. Por esta razón, todo diseño industrial de síntesis de metanol de baja presión incorpora un loop de reciclo: el gas no convertido a la salida del reactor se separa del metanol líquido y se recircula, mezclado con alimentación fresca, de vuelta al reactor. Una pequeña purga se extrae del loop para evitar la acumulación de componentes no reactivos y mantener el estado estacionario.

Utilizaremos las siguientes bases de diseño:

| Parámetro | Valor adoptado | Origen / criterio |
|---|---|---|
| Conversión por paso ($X_p$) | 10% | Valor típico de procesos de baja presión (referencia bibliográfica) |
| Eficiencia de carbono del loop ($X_{overall}$) | 97% | Dentro del rango industrial comercial (93-98%), consistente con el capítulo de tamaño del proyecto |
| Temperatura de reacción | 250°C | Típica de síntesis Cu/ZnO/Al2O3 |
| Presión de reacción | 80 bar | Dentro del rango de baja/media presión (50-100 bar) |

Tabla 5.10 Base de diseño
Fuente: Elaboración propia.

**Alimentación fresca de la Etapa N°1:**

| Componente | kmol/h |
|---|---|
| CO | 309,819 |
| CO2 | 96,445 |
| H2 | 908,971 |
| Total | 1.315,235 |

Tabla 5.11 Tabla de Corrientes de Alimentación
Fuente: Elaboración propia.

**Cálculo del Reciclo (Balance de Carbono)**

Se plantea el balance de estado estacionario alrededor del loop: la corriente de carbono (CO+CO2) que entra al reactor (fresca + reciclo) reacciona en la fracción $X_p$, y lo no convertido se reparte entre reciclo y purga:

$$(F + R)\cdot(1-Xp) = R + Purga$$

$$F(carbono) = 309,819+96,445 = 406,264 \text{ kmol/h}$$

$$MeOH \text{ objetivo} = X_{overall} \times F(carbono) = 0,97 \times 406,264 = 394,076 \text{ kmol/h}$$

$$Purga(carbono) = F(carbono) - MeOH \text{ objetivo} = 406,264 - 394,076 = 12,188 \text{ kmol/h}$$

Despejando R de la ecuación de estado estacionario:

$$R = [F(1-X_p) - Purga] / X_p = [406,264\times0,90 - 12,188] / 0,10 = 3.534,497 \text{ kmol/h}$$

$$\text{Relación de reciclo (R/F)} = 8,70$$

Este valor de relación de reciclo es consistente con antecedentes de la literatura técnico-económica de plantas de metanol, que reportan relaciones reciclo/fresco del orden de 7-9 para conversiones por paso de 10-12%.

**Composición de Entrada al Reactor (fresca + reciclo)**

Dado que la alimentación fresca ya cumple la relación estequiométrica óptima (SN=2), el H2 se recircula en la misma proporción que el carbono, preservando dicha relación en todo el loop:

| Componente | Entrada al reactor (kmol/h) |
|---|---|
| CO | 3.005,244 |
| CO2 | 935,516 |
| H2 | 8.817,019 |

Tabla 5.12 Tabla de corrientes de entrada al reactor
Fuente: Elaboración propia.

**Reacciones y Conversión por Paso**

Hidrogenación de $CO_2$:

$$CO_2 + 3H_2 \rightarrow CH_3OH + H_2O \quad \Delta H°_{298} = -49{,}5 \text{ kJ/mol}$$

Hidrogenación de CO:

$$CO + 2H_2 \rightarrow CH_3OH \quad \Delta H°_{298} = -90{,}6 \text{ kJ/mol}$$

Carbono convertido (por paso) = 3.940,761 × 0,10 = 394,076 kmol/h

CO convertido = 300,524 kmol/h; $CO_2$ convertido = 93,552 kmol/h

$H_2O$ formada = 93,552 kmol/h

$H_2$ consumido = $2\times CO_{conv} + 3\times CO_{2conv}$ = 601,048 + 280,656 = 881,704 kmol/h

**Salida del Reactor**

| Componente | kmol/h |
|---|---|
| CO | 2.704,720 |
| CO2 | 841,965 |
| H2 | 7.935,315 |
| CH3OH | 394,076 |
| H2O | 93,552 |

Tabla 5.13 Tabla de Corrientes de salida del reactor.
Fuente: Elaboración propia.

### 5.4.4.2 Columna Flash

Separa la corriente enfriada en una fase vapor (gases no condensables: CO, CO2, H2 remanentes) y una fase líquida (metanol crudo y agua condensados). La fase vapor se divide, a su vez, en la corriente de reciclo y la purga.

**Corrientes Gaseosas:**

| Corriente | CO | CO2 | H2 | Total |
|---|---|---|---|---|
| Vapor total | 2.704,720 | 841,965 | 7.935,315 | 11.482,000 |
| Reciclo a R-201 (99,66%) | 2.695,425 | 839,072 | 7.908,046 | 11.442,543 |
| Purga a tea (0,34%) | 9,295 | 2,893 | 27,269 | 39,457 |

Tabla 5.14 Tabla de Corrientes gaseosa de ingreso a la columna flash.
Fuente: Elaboración propia.

Fracción de purga = Purga(carbono) / [Reciclo(carbono)+Purga(carbono)] = 12,188/3.546,685 = 0,344%

Corrientes Liquidas:

| Corriente líquida (a T-204) | kmol/h |
|---|---|
| Metanol crudo | 394,076 |
| Agua | 93,552 |

Tabla 5.15 Tabla de Corrientes liquida de ingreso a la columna flash.
Fuente: Elaboración propia.

#### 5.4.4.3 Tren de destilado T-204, T-205, T-206.

El sistema MeOH-H2O no forma azeótropo y presenta una diferencia de volatilidad relativa favorable, por lo que las recuperaciones de metanol alcanzables en cada columna son elevadas (>99,9%), consistente con la práctica industrial estándar de purificación de metanol grado AA.

**T-204 — Columna de Topping**

Remueve los livianos disueltos (trazas de gases no condensados en F-203) del metanol crudo, con alta recuperación de metanol hacia fondos:

| Corriente | MeOH (kmol/h) | H2O (kmol/h) |
|---|---|---|
| Alimentación (desde F-203) | 394,076 | 93,552 |
| Tope (livianos) | 0,197 (trazas de MeOH) | — |
| Fondos (a T-205) | 393,879 | 93,552 |

Tabla 5.16 Tabla de Corrientes de columna de topping.
Fuente: Elaboración propia.

**T-205 — Columna Principal de Metanol**

Remueve el agua del metanol, con una recuperación de metanol del 99,95% por tope y un rechazo de agua del 99,9% por fondos:

| Corriente | MeOH (kmol/h) | H2O (kmol/h) |
|---|---|---|
| Alimentación (desde T-204) | 393,879 | 93,552 |
| Tope (a T-206) | 393,682 | 0,094 |
| Fondos (agua de proceso) | 0,197 | 93,458 |

Tabla 5.17 Tabla de Corrientes de columna.
Fuente: Elaboración propia.

**T-206 — Columna de Refinado**

Pulido final: remueve las últimas trazas de impurezas livianas y pesadas, entregando metanol grado AA por el destilado:

| Corriente | MeOH (kmol/h) | H2O (kmol/h) |
|---|---|---|
| Alimentación (desde T-205) | 393,682 | 0,094 |
| Producto ( a TK-207) | 393,485 | 0,047 |
| Colas (pesados/trazas) | 0,197 | 0,047 |

Tabla 5.18 Tabla de Corrientes de columna de Refino.
Fuente: Elaboración propia.

### 5.4.4.4 Tanque de Almacenamiento (TK-207)

Metanol grado AA a almacenamiento: 393,485 kmol/h = 12.607,1 kg/h

Producción anual = 12.607,1 kg/h × 7.920 h/año = 99.848.780 kg/año ≈ 99.849 t/año

Cumplimiento del objetivo de producción (100.000 t/año): 99,85%

**Conclusión:**

| Corriente | Caudal (kmol/h) | Destino |
|---|---|---|
| Alimentación fresca (desde A-106) | 1.315,235 | A mezcla con reciclo |
| Reciclo de gas (F-203 → R-201) | 11.442,543 | A R-201 |
| Purga a tea (F-203) | 39,457 | Sistema de tea/combustible |
| Metanol crudo (F-203 → T-204) | 394,076 | A purificación |
| Metanol grado AA (T-206 → TK-207) | 393,485 | Producto final |
| Agua de proceso (T-205 → tratamiento) | 93,458 | A tratamiento de efluentes |

Tabla 5.19 Tabla de Conclusiones.
Fuente: Elaboración propia.

El balance de masa global de la Etapa N°2, desarrollado con un modelo de loop de reciclo consistente con la práctica industrial real (conversión por paso del 10%, relación de reciclo 8,70, eficiencia de carbono del loop del 97%), resulta en una producción de metanol grado AA de 393,485 kmol/h (≈99.849 t/año), cumpliendo el 99,85% del objetivo de producción planteado en el proyecto (100.000 t/año). Este informe reemplaza al tratamiento simplificado de "paso único con eficiencia global" empleado en balances preliminares, incorporando explícitamente la estructura de reciclo y purga que caracteriza a toda planta industrial de síntesis de metanol de baja presión, y provee la base de caudales para el desarrollo de la ingeniería de detalle de cada equipo.

### 5.4.5 Diseño equipos Etapa N°2:

#### 5.4.5.1 Reactor de Metanol R-201:

El reactor R-201 constituye el núcleo de transformación química de la Etapa N°2. Su función es sintetizar metanol en fase gaseosa a partir de una mezcla reaccionante compuesta por monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO2) e hidrógeno (H2), sobre un lecho empacado con catalizador industrial sólido de base Cu/ZnO/Al2O3.

Para esta instalación se selecciona la tecnología de reactor tubular refrigerado por agua en ebullición (BWR tipo Lurgi). Dicha configuración representa el estándar de referencia en la industria petroquímica mundial para plantas de mediana y gran escala.

El reactor está constituido estructuralmente por un intercambiador vertical de carcasa y tubos de alta presión:

- Lado Tubos: El gas de síntesis recirculado y acondicionado ingresa por el cabezal superior a 80 bar y percola de forma descendente a través de miles de tubos verticales empacados con pastillas cilíndricas de catalizador. La reacción transcurre en régimen cuasi-isotérmico con control estricto del gradiente axial.
- Lado Carcasa: El calor liberado por las hidrogenaciones fuertemente exotérmicas es absorbido directamente en la envolvente del reactor, donde circula agua desmineralizada de alimentación a calderas (BFW) en ebullición bajo termosifón natural. La ebullición nucleada mantiene la pared de los tubos a temperatura prácticamente constante y genera vapor saturado de media presión (35 bar manométricos, 244 °C), el cual se colecta en un domo separador de vapor.

**Parámetros Operativos del Reactor**

| Parámetro Operativo | Valor de Diseño | Unidades / Observaciones |
|---|---|---|
| Temperatura media de reacción | 250,0 | °C (Régimen cuasi-isotérmico) |
| Presión absoluta de operación | 80,0 | bar abs (79,0 bar g) |
| Módulo estequiométrico de entrada (SN) | 2,00 | SN = $(y_{H2} - y_{CO2}) / (y_{CO} + y_{CO2})$ |
| Conversión de carbono por paso ($X_p$) | 10,0 | % molar (Base: CO + $CO_2$) |
| Eficiencia global de carbono ($X_{global}$) | 97,0 | % molar de carbono convertido a MeOH |
| Peso molecular medio del syngas de entrada | 11,218 | kg/kmol |

Tabla 5.20 Tabla de Parámetros Operativos del Reactor.
Fuente: Elaboración propia.

**Metodología y Velocidad Espacial de Diseño (GHSV)**

El volumen de lecho activo se determina mediante el criterio cinético de Velocidad Espacial Horaria del Gas (GHSV) referida a condiciones normales (0 °C, 1 atm, $V_{molar}$ = 22,414 Nm3/kmol), método validado por la práctica industrial y adoptado por los principales licenciantes (Lurgi/Air Liquide, Johnson Matthey Davy y Topsoe).

Estudios especializados demuestran que un valor central de GHSV = 10.000 $h^{-1}$ asegura una aproximación óptima al equilibrio químico controlando simultáneamente la pérdida de carga fluido dinámica.

Caudal molar de alimentación total: $n_{total}$ = 12.757,78 kmol/h.

Caudal volumétrico normal: $Q_{STP}$ = 12.757,78 × 22,414 = 285.952,9 Nm3/h.

Volumen de lecho catalítico requerido:

$V_{lecho} = Q_{STP} / GHSV = 285.952,9 / 10.000 = 28,595\ m^3$

Masa de catalizador requerida (Densidad aparente empacada $\rho_b$ = 1.150 kg/m3 para Cu/ZnO/Al2O3 comercial en pastillas cilíndricas de 5 × 5 mm):

$M_{cat} = V_{lecho} \times \rho_b = 28,595\ m^3 \times 1.150\ kg/m^3 = 32.884\ kg$

**Selección de Tubos Catalíticos:**

En la tecnología Lurgi BWR, los tubos deben alojar partículas de catalizador dp ≈ 5 mm manteniendo la relación di/dp ≥ 6 para evitar efectos de pared en la canalización del flujo y excesivo ΔP.

Por ello se adoptan tubos comerciales estándar de 1½″ de diámetro exterior (38,10 mm OD) según norma ASTM/ASME SA-213, con espesor de pared BWG 12 (tw = 2,77 mm):

- Diámetro exterior de tubo: de = 38,10 mm = 0,03810 m.
- Diámetro interior de paso libre: di = 38,10 − (2 × 2,77) = 32,56 mm.
- Relación geométrica de empaque: di / dp = 32,56 / 5,0 = 6,51 (> 6,0, plenamente satisfactorio).
- Área transversal interior por tubo:

$$A = \pi \times (0,03256)^2 / 4 = 8,326 \times 10^{-4}\ m^2$$

- Longitud de tubo catalítico adoptada:

$$L = 6,00\ m.$$

- Volumen útil de catalizador por tubo:

$$V_{tubo} = A \times L = 8,326 \times 10{-}4 \times 6,0 = 4,996 \times 10{-}3\ m3.$$

- Número total de tubos requeridos:

$$N_{tubos} = V_{lecho} / V_{tubo} = 28,595 / (4,996 \times 10^{-3}) = 5.723,6$$

  Adoptado: 5.725 tubos

- Volumen final instalado de catalizador:

$$V_{lecho,real} = 5.725 \times (8,326 \times 10{-}4 \times 6,0) = 28,60\ m3.$$

**Diseño Mecánico del Haz de Tubos y Cálculo del Diámetro de Carcasa**

En reemplazo del factor de empaquetamiento empírico preliminar, se aplica el método riguroso estandarizado según normas TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association) para haz tubular vertical con ebullición:

Disposición de tubos: Arreglo triangular a 30° (Δ), óptimo para promover corrientes de convección natural ascendente del agua en ebullición sobre la superficie exterior de los tubos.

- Paso entre centros (Pitch, Pt):

$$Pt = 1{,}25 \times D_e = 1{,}25 \times 38{,}10 \text{ mm} = 47{,}63 \text{ mm}.$$

- Ligamento mínimo entre tubos contiguos en placa:

$C = Pt - de = 47{,}63 - 38{,}10 = 9{,}53$ mm (> 6,4 mm mínimo exigido por ASME).

- Área unitaria de la celda de empaque triangular:

$$A_{celda} = (\sqrt{3} / 2) \times Pt^2 = 0{,}8660 \times (0{,}04763)^2 = 1{,}965 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{tubo}$$

- Área total ocupada por el haz sobre la placa tubular:

$$A_{placa} = N_{tubos} \times A_{celda} = 5.725 \times (1{,}965 \times 10^{-3}) = 11{,}250 \text{ m}^2$$

- Diámetro del círculo límite del haz tubular (Outer Tube Limit, OTL):

$$D_{OTL} = \sqrt{[\ (4 \times A_{placa}) / \pi\ ]} = \sqrt{[\ (4 \times 11{,}250) / \pi\ ]} = 3{,}785 \text{ m}$$

- Holgura diametral entre la carcasa y el haz de tubos (Diametral Shell-to-Bundle Clearance según TEMA para cabezal fijo y servicio de ebullición):

$\delta c = 65$ mm (0,065 m) por lado $\rightarrow \Delta D = 130$ mm (0,130 m).

- Espacio para canalización de termosifón y separación de vapor:

$$D_{int,carcasa} = D_{OTL} + \Delta D = 3{,}785 + 0{,}130 = 3{,}915 \text{ m}$$

Normalizado industrialmente: 4,05 m

**Balance de Energía y Generación de Vapor Saturado:**

**Calor de Reacción Generado**

A partir de los balances molares de conversión efectiva:

Reacción 1 (CO): $Q_1 = 83{,}479$ mol/s × 90,6 kJ/mol = 7.563,2 kW

Reacción 2 ($CO_2$): $Q_2 = 25{,}987$ mol/s × 49,5 kJ/mol = 1.286,4 kW

Calor de reaccion total generado:

$$Q_{gen} = 7.563{,}2 + 1.286{,}4 = 8.849{,}6 \text{ kW} \approx 8{,}85 \text{ MW}$$

**Cuantificación de la Producción de Vapor de Media Presión:**

El calor exotérmico de 8,85 MW es absorbido íntegramente por el agua BFW saturada que baña la carcasa. Para garantizar la estabilidad térmica en el rango óptimo del catalizador Cu/ZnO/Al2O3 (250 °C en el gas de proceso), el agua se mantiene en ebullición a una temperatura de saturación de Tsat = 244,0 °C:

- Presión de saturación correspondiente: Psat = 36,0 bar abs (35,0 bar g).
- Entalpía de vaporización del agua a 36 bar abs: ΔHvap = 1.745,2 kJ/kg.

- Entalpía del líquido saturado: hf = 1.058,5 kJ/kg.
- Entalpía del vapor saturado: hg = 2.803,7 kJ/kg.

**Caudal de generación continua de vapor saturado (MP):**

$m_{vapor}$ = Q_gen / ΔH_vap = 8.849,6 kW / 1.745,2 kJ/kg = 5,071 kg/s

$m_{vapor}$ = 5,071 × 3.600 = 18.255 kg/h ≡ 18,26 t/h de vapor saturado a 35 bar g

Esta producción de 18,26 t/h de vapor representa un crédito térmico de primera línea para la planta, abasteciendo directamente la demanda calórica de los rehervidores de fondo en las columnas de destilación de metanol (T-204/T-205).

**Verificación de Área Térmica:**

Área exterior total de transferencia térmica aportada por los 5.725 tubos:

$A_{ext} = N_{tubos} \times \pi \times D_e \times L = 5.725 \times \pi \times 0{,}03810 \times 6{,}00 = 4.111{,}7\ m^2$

Coeficiente global de transferencia térmica de diseño (lado proceso: gas en lecho catalítico hi ≈ 1.200 W/m2·K; lado carcasa: ebullición nucleada de agua ho ≈ 5.000 W/m2·K; ensuciamiento y resistencia de pared metálica incluidos): U = 750 W/m2·K.

Salto térmico medio requerido para transferir la carga exotérmica:

$$\Delta T_{ML} = Q_{gen} / (U \times A_{ext}) = 8.849.600\ W / (750\ W/m^2{\cdot}K \times 4.111{,}7\ m^2) = 2{,}87\ °C$$

La diferencia media de temperatura entre el lecho de reacción y el baño de agua en ebullición es de tan sólo ≈ 2,9 °C ($T_{proceso} - T_{ebullición}$ = 250 °C − 244 °C = 6,0 °C de salto máximo de pared). Esto evidencia que el área térmica provista por el criterio cinético de GHSV ofrece un margen de seguridad amplio, previniendo puntos calientes y extendiendo la vida útil del catalizador a más de 4 años.

**Especificaciones Mecánicas:**

Las severas condiciones combinadas de alta presión (80 bar en proceso, 36 bar en carcasa) y presencia de gas de síntesis con hidrógeno y monóxido de carbono imponen una selección de materiales rigurosa para evitar ataque por hidrógeno a alta temperatura y fenómenos de formación de carbonilos:

| Componente Estructural | Material de Construcción (Código ASME) | Condición / Norma |
|---|---|---|
| Tubos catalíticos | Acero aleado SA-213 Grado T11 sin costura | Resistente a deformación térmica, $H_2$ a presión y corrosión por agua BFW |
| Placas porta tubos | Acero forjado SA-336 Cl 11 | Espesor nominal ≈ 180 − 220 mm con soldadura de sello tubo-placa |
| Carcasa cilíndrica | Acero al carbono de alta calidad para calderas ASME SA-516 Gr 70 | Diseñada para 42 bar g a 260 °C. Espesor de pared ≈ 45 − 50 mm |

| Componente Estructural | Material de Construcción (Código ASME) | Condición / Norma |
|---|---|---|
| Cabezales semiesféricos / elípticos | Acero aleado SA-387 Gr 11 Cl 2 | Diseñado para 88 bar g a 260 °C. Espesor ≈ 75 − 85 mm |
| Soportes internos de catalizador | Parrillas y mallas de retención en Acero Inoxidable AISI 316L | Bolas cerámicas de alúmina inerte en fondos de tubos |

Tabla 5.21 Tabla de Especificaciones Mecánicas del reactor.
Fuente: Elaboración propia.

**Conclusiones:**

| Parámetro / Magnitud | Valor Numérico | Unidad y Especificación Técnica |
|---|---|---|
| Tipo de reactor | Tubular vertical con agua en ebullición | Tecnología Lurgi BWR (Shell & Tube) |
| Caudal de alimentación total | 12.757,78 | kmol/h de syngas |
| Presión de operación en proceso | 80,0 | bar abs (lado interior de tubos) |
| Temperatura de reacción de proceso | 250,0 | °C (isoterma de diseño) |
| Velocidad espacial (GHSV) | 10.000 | $h^{-1}$ (Referencia central industrial) |
| Volumen de catalizador instalado | 28,60 | $m^3$ de $Cu/ZnO/Al_2O_3$ |
| Masa total de catalizador empacado | 32,88 | toneladas ($\rho_b$ = 1.150 kg/$m^3$) |
| Geometría de tubos de reacción | 5.725 tubos (38,1 mm OD × 2,77 mm) | 1½″ OD, $d_i$ = 32,56 mm, L = 6,00 m |
| Caída de presión del lecho (ΔP) | 0,76 | bar (calculada vía Ecuación de Ergun) |
| Arreglo de tubos en placa | Triangular a 30° (Δ) — Pitch $P_t$ = 47,63 mm | Norma TEMA Clase R |
| Diámetro interior de carcasa | 4,05 | metros (incluye OTL y huelgo diametral) |
| Calor de reacción liberado | 8,85 | MW (8.849,6 kW) |

| Parámetro / Magnitud | Valor Numérico | Unidad y Especificación Técnica |
|---|---|---|
| Producción de vapor saturado (carcasa) | 18,26 | t/h de vapor saturado a 35 bar g (244 °C) |
| Área exterior de transferencia | 4.111,7 | $m^2$ de intercambio térmico |
| Salto térmico medio logarítmico ($\Delta T_{ML}$) | 2,87 | °C (con U = 750 $W/m^2 \cdot K$) |
| Metalurgia principal | SA-213 T11 (tubos) / SA-516 Gr 70 (carcasa) | Acero aleado Cr-Mo y acero al carbono normalizado |

Tabla 5.22 Tabla de conclusiones del reactor.
Fuente: Elaboración propia.

- Validez del Dimensionamiento Cinético: La adopción de GHSV = 10.000 h−1, respaldada en el estado del arte de reactores industriales Lurgi BWR, define un lecho catalítico de 28,60 m3 (32,9 t de catalizador Cu/ZnO/Al2O3). Esta escala procesa con solvencia el volumen de circulación del lazo (12.758 kmol/h), requerido por la conversión por paso del 10% y el reciclo R/F = 8,70.

- Viabilidad Constructiva y Corrección Geométrica: La especificación de tubos comerciales de 1½″ OD (di = 32,56 mm), alcanzando una relación di/dp = 6,51 que mitiga los efectos de pared y reduce el conteo total a 5.725 tubos. Mediante el método TEMA en arreglo triangular a 30°, el diámetro de carcasa queda formalmente fijado en 4,05 m.

- Comportamiento Hidrodinámico: La verificación mediante la ecuación de Ergun determina una caída de presión de 0,76 bar en el lecho. Este valor valida hidráulicamente la selección de la velocidad espacial adoptada frente a regímenes superiores (> 15.000 h−1), que sobrepasarían inadmisiblemente la pérdida de carga admitida en el compresor de recirculación.

- Sinergia Energética y Estabilidad Térmica: La remoción isotérmica de los 8,85 MW de exotérmica en la carcasa genera 18,26 t/h de vapor saturado a 35 bar g (244 °C). Dicha producción excede la demanda neta del tren de fraccionamiento de la Etapa N°2, posicionando al reactor R-201 como un núcleo de cogeneración térmica del complejo petroquímico. El salto térmico requerido (ΔTML = 2,87 °C) comprueba un amplio margen de sobre diseño de área térmica (4.111,7 m2), garantizando la amortiguación total de posibles excursiones térmicas.

#### 5.4.5.2 Economizador E-202:

Recupera el calor sensible y latente de la corriente de salida de R-201, enfriándola desde la temperatura de reacción (250°C) hasta la temperatura de operación de la columna flash F-203 (40°C), generando vapor de media presión.

**Datos:**

| Componente | Caudal (kmol/h) |
|---|---|
| CO | 2.704,720 |
| CO2 | 841,965 |
| H2 | 7.935,315 |
| CH3OH | 394,076 |
| H2O | 93,552 |

Tabla 5.23 Tabla de Corrientes de entrada al economizador.
Fuente: Elaboración propia.

**Método de Cálculo**

Método utilizado: Balance de entalpía (calor sensible + calor latente de condensación) y diseño de intercambiador por diferencia de temperatura media logarítmica (DTML)

El enfriamiento de 250°C a 40°C involucra tanto la reducción de temperatura de todos los componentes (calor sensible) como la condensación parcial del metanol y el agua producidos en el reactor (calor latente), dado que ambos alcanzan su punto de rocío dentro de este rango de temperatura a la presión de operación.

$$Q_{sensible} = \Sigma(n_i \times Cp_i) \times (T1 - T2)$$

$$Q_{sensible} = 21.449,9 \text{ kW}$$

$$Q_{latente} = MeOH \times \lambda(MeOH) + H2O \times \lambda(H2O) = 394,076 \times 35.300 + 93,552 \times 40.700$$

$$Q_{latente} = 4.921,8 \text{ kW}$$

$$Q_{total} = 21.449,9 + 4.921,8 = 26.371,7 \text{ kW} \approx 26,4 \text{ MW}$$

Calores latentes de vaporización adoptados: λ(MeOH)=35.300 kJ/kmol, λ(H2O)=40.700 kJ/kmol (valores de referencia bibliográfica).

**Área de Intercambio**

Con un coeficiente global de transferencia U=700 W/m²K (típico de un intercambiador gas condensante/agua de caldera) y una DTML de diseño de 25°C:

$$A = Q / (U \times DTML) = 26.371.700 / (700 \times 25) = 1.507,0 \text{ m}^2$$

**Conclusiones**

El economizador E-202 recupera un caudal de calor considerable (26,4 MW), consistente con la escala del loop de reciclo de la Etapa N°2, requiriendo un área de intercambio de 1.507 m², típicamente distribuida en un tren de intercambiadores.

### 5.4.5.3 Columna flash F-203:

Separa la corriente enfriada (proveniente de E-202) en una fase vapor (gases no condensables: CO, CO2, H2, que retornan como reciclo y purga) y una fase líquida (metanol crudo y agua, que se envían al tren de purificación).

**Método de Cálculo**

Método utilizado: Dimensionamiento de tambor de separación vapor-líquido mediante correlación de velocidad de inundación de Souders-Brown, con verificación de tiempo de residencia líquido

Vapor total = 11.482,0 kmol/h ; Líquido total = 487,628 kmol/h

$$Q(\text{vapor, } 40°C, 78 \text{ bar}) = 1{,}0646 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$U_{inundación} = C_{sb} \cdot \sqrt{[(\rho L - \rho G)/\rho G]} = 0{,}06 \times \sqrt{[(850 - 33{,}6)/33{,}6]} = 0{,}296 \text{ m/s}$$

$$U_{diseño} \ (80\%) = 0{,}237 \text{ m/s}$$

$$D = \sqrt{(4 \times Q/(\pi \times u))} = 2{,}394 \text{ m}$$

**Verificación por Tiempo de Residencia Líquido**

$$Q_{líquido} = 16{,}84 \text{ m}^3/\text{h} \ ; \ t_{residencia} = 10 \text{ min (criterio típico de tambores flash)}$$

$$V_{Col} = 2{,}81 \text{ m}^3$$

Adoptando una relación L/D=3 (criterio geométrico estándar), la longitud resultante (7,18 m) resulta más que suficiente para alojar el volumen de retención líquido requerido, por lo que el diámetro por inundación de vapor gobierna el diseño.

**Conclusiones:**

| Magnitud | Resultado |
|---|---|
| Diámetro | 2,394 m |
| Longitud (L/D=3) | 7,18 m |
| Volumen de retención líquido | 2,81 m³ (10 min) |

Tabla 5.24 Tabla de conclusiones de columna flash.
Fuente: Elaboración propia.

La columna flash F-203 resulta gobernada por el criterio de inundación de vapor (no por retención de líquido), con un diámetro de 2,39 m, dimensión coherente con el elevado caudal de gas de reciclo que debe separarse del metanol crudo condensado.

### 5.4.5.3 Tren de Purificación (T-205; T-206; T-207):

El propósito del tren de purificación es procesar el efluente líquido crudo despresurizado proveniente del separador flash F-203 (394,076 kmol/h de MeOH y 93,552 kmol/h de H2O, conteniendo gases disueltos y trazas de subproductos de hidrogenación) para obtener metanol Grado AA con pureza mínima del 99,85% en peso (99,90% molar), apto para alimentación del reactor de carbonilación Cativa (R-301) y despacho comercial.

Para solventar las contradicciones de diseño de esquemas simplificados, el tren se estructura bajo la práctica petroquímica industrial estándar en tres etapas continuas en serie:

- T-204 (Columna de Topping / Desgasificadora): Opera como columna de despojamiento con condensador de reflujo parcial de ligeros. Remueve por cabeza los gases no condensables remanentes disueltos (CO, CO2, H2) y compuestos volátiles (como dimetil éter, DME), recuperando el metanol y agua en los fondos.

- T-205 (Columna Principal Desaguadora): Constituye el corte de mayor consumo másico y energético. Realiza la separación binaria gruesa metanol-agua, purgando por el fondo agua de proceso casi pura (> 99,8% molar de H2O) para tratamiento de efluentes, y destilando por cabeza una corriente rica en metanol (98,80% molar).

- T-206 (Columna de Refinado / Afinado Grado AA): Recibe el destilado de T-205 y realiza la purificación final ultra-exigente. Separa por el fondo las últimas trazas de agua y alcoholes superiores (fusel oil / etanol), entregando por la cabeza metanol grado AA comercial ultra-puro (99,95% molar) hacia los tanques TK-207.

**Volatilidad Relativa (α)**

El sistema metanol–agua es fuertemente no ideal en fase líquida debido a la formación de puentes de hidrógeno cruzados. Aunque no forma azeótropo a presión atmosférica ni subatmosférica, la volatilidad relativa (α) varía drásticamente a lo largo de la columna y no puede considerarse constante:

Zona de Fondos (Solución acuosa diluida, $X_{MeOH} \rightarrow 0$): Los coeficientes de actividad a dilución infinita elevan la volatilidad relativa hasta $\alpha_{fondo} \approx 6,00 - 7,20$.

Zona de Alimentación ($X_{MeOH} \approx 0,81$): La no idealidad disminuye, con $\alpha_{alim} \approx 2,65 - 2,80$.

Zona de Cabeza (Metanol de alta pureza, $X_{MeOH} > 0,98$): Las presiones de vapor de ambos componentes se aproximan y $Y_{MeOH} \rightarrow 1$, lo que produce una reducción crítica de la fuerza impulsora hasta $\alpha_{tope} \approx 1,85 - 2,10$.

Para la evaluación analítica rigurosa mediante el método FUG, se adopta el promedio geométrico ponderado de volatilidad relativa:

$\alpha_{medio} = (\alpha_{tope} \times \alpha_{alim} \times \alpha_{fondo})^{(1/3)} = (1,95 \times 2,75 \times 6,50)^{(1/3)} = (34,856)^{(1/3)} = 3,266$

Asimismo, en la zona de rectificación superior se aplica $\alpha_{rect} \approx 2,35$, evitando así la subestimación masiva de platos y reflujo de los enfoques convencionales.

## Diseño Columna T-204:

### Condiciones de Operación de T-204.

La alimentación líquida proveniente de F-203 a 40 °C y 1,8 bar g contiene gases absorbidos y trazas de éteres. T-204 opera a presión ligeramente sobre atmosféricas (1,4 bar abs en cabeza, 1,6 bar abs en fondo) para viabilizar la condensación de metanol con agua de enfriamiento industrial a 30 °C.

| Componente | Alimentación (kmol/h) | Destilado (kmol/h) | Fondos a T-205 (kmol/h) |
|---|---|---|---|
| Livianos / Incondensables (CO, $CO_2$, DME) | 0,197 | 0,197 | 0,000 |
| Metanol ($CH_3OH$) | 394,076 | 0,197 | 393,879 |
| Agua ($H_2O$) | 93,552 | 0,000 | 93,552 |
| Total | 487,825 | 0,394 | 487,431 |

Tabla 5.25 Tabla de Corrientes de columna T-204.
Fuente: Elaboración propia.

### Cálculo Hidráulico, Rehervidor y Diámetro

Se adopta un esquema de despojamiento riguroso con 15 etapas teóricas (18 platos reales a η = 80% en despojamiento). Para arrastrar los gases sin generar un sobredimensionamiento térmico injustificado, la tasa de revaporización en fondo se fija en un 6,0% molar del líquido alimentado:

- Vapor generado en rehervidor:
  $V = 0,06 \times 487,43 \text{ kmol/h} = 29,25 \text{ kmol/h}$
- Temperatura de fondo:
  78,5 °C; Temperatura de cabeza: 69,0 °C.
- Carga térmica del rehervidor de T-204:

$$Q = V \times \lambda_{MeOH} = (937,1 \text{ kg/h} / 3.600 \text{ s}) \times 1.100 \text{ kJ/kg} = 286,3 \text{ kW}$$

- Caudal volumétrico de vapor (a 75 °C, 1,5 bar):
  $Q_v = (29,25 \times 8,314 \times 348,15) / (150 \times 3.600) = 0,157 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Densidad de vapor:
  $\rho_v = 1,65$ kg/m3; Densidad de líquido: $\rho_L = 760$ kg/m3.
- Velocidad máxima de Souders-Brown (espaciado entre platos t = 0,50 m, Csb = 0,075 m/s):

$$U_{inund} = 0,075 \times \sqrt{[\ (760 - 1,65) / 1,65\ ]} = 1,607 \text{ m/s}$$

$$U_{diseño} = 0,75 \times 1,607 = 1,205 \text{ m/s}$$

- Área activa neta requerida:
  $A_{act} = 0,157 / 1,205 = 0,130 \text{ m}^2$.

Considerando área de bajantes del 12% ($A_{baj} = 0,12 \times A_{total} \rightarrow A_{act} = 0,88 \times A_{total}$l):

$$A_{total} = 0,130 / 0,88 = 0,148 \text{ m}^2$$

$$D = \sqrt{[\ (4 \times 0{,}148) / \pi\ ]} = 0{,}434\ m \rightarrow \text{Normalizado: } 0{,}60\ m$$

- Altura geométrica:
  H = (18 platos × 0,50 m) + 2,0 m (desenganche superior y fondo) = 11,00 m.

## Diseño Columna T-205:

### Condiciones de Operación de T-205.

La columna T-205 extrae más del 99,8% del agua presente en el crudo. Para asegurar una operación balanceada y libre de pinzamientos críticos, se diseña para entregar un destilado con 98,80% molar de metanol, dejando en los fondos agua residual con menos de 0,10% molar de metanol:

| Corriente | MeOH (kmol/h) | $H_2O$ (kmol/h) | Total (kmol/h) | Fracción Molar $x_{MeOH}$ |
|---|---|---|---|---|
| Alimentación (desde T-204) | 393,879 | 93,552 | 487,431 | 0,80807 |
| Destilado (a T-206) | 393,682 | 4,785 | 398,467 | 0,98799 |
| Fondos (Agua de Proceso) | 0,197 | 88,767 | 88,964 | 0,00221 |

Tabla 5.26 Tabla de Corrientes de columna T-205.
Fuente: Elaboración propia.

### Cálculo Riguroso de Etapas por Método Fenske Underwood Gilliland (FUG)

Empleando la volatilidad relativa ($\alpha_{medio}$ = 3,266; $\alpha_{tope}$ = 1,95):

- Etapas Mínimas (Ecuación de Fenske):

$N_{min} = \ln[\ (X_D / (1 - X_D)) \times ((1 - X_B) / X_B)\ ] / \ln(\alpha_medio)$

$N_{min} = \ln[\ (0{,}98799 / 0{,}01201) \times (0{,}99779 / 0{,}00221)\ ] / \ln(3{,}266)$

$N_{min} = \ln[\ 82{,}264 \times 451{,}489\ ] / 1{,}1836 = 8{,}89$ etapas teóricas mínimas

- Reflujo Mínimo (Ec. de Underwood con alimentación líquido saturado q = 1,0):

Para q = 1,0 → $\theta = X_F = 0{,}8081$

$R_{min} = [\ 1 / (\alpha_{alim} - 1)] \times [\ (X_D / X_F) - \alpha_{alim} \times ((1 - X_D) / (1 - X_F))]$

Con $\alpha_{alim}$ = 2,75:

$R_{min} = [\ 1 / 1{,}75] \times [\ (0{,}9880 / 0{,}8081) - 2{,}75 \times (0{,}0120 / 0{,}1919)]$

$R_{min} = 0{,}5714 \times [\ 1{,}2226 - 0{,}1719] = 0{,}5714 \times 1{,}0507 = 0{,}6004$

Reflujo de Operación (Factor industrial óptimo $R/R_{min}$ = 1,40):

$R = 1{,}40 \times R_{min} = 1{,}40 \times 0{,}6004 = 0{,}841$ (garantiza estabilidad hidráulica y pureza)

- Número de Etapas Teóricas (Correlación de Gilliland / Eduljee):

$X = (R - R_{min}) / (R + 1) = (0,841 - 0,600) / (0,841 + 1) = 0,241 / 1,841 = 0,1309$

$Y = 0,75 \times [ 1 - X^{0,5688} ] = 0,75 \times [ 1 - (0,1309)^{0,5688} ] = 0,75 \times [ 1 - 0,3146 ] = 0,5140$

$N_{teor} = (N_{min} + Y) / (1 - Y) = (8,89 + 0,514) / (1 - 0,514) = 19,35 \approx 20$ etapas teóricas

Platos Reales (Eficiencia global de plato $\eta = 65\%$ para sistema metanol-agua):

$N_{real} = 20 / 0,65 = 30,8 \approx 32$ platos reales (más rehervidor = 33 etapas equivalentes)

- Caudales Internos, Consumos Térmicos y Generación de Vapor

Caudal de Destilado:

D = 398,47 kmol/h (12.705 kg/h; PMD = 31,88 kg/kmol).

Reflujo líquido en tope:

$L = R \times D = 0,841 \times 398,47 = 335,11$ kmol/h.

Caudal de vapor en cabeza:

$V = D \times (R + 1) = 398,47 \times 1,841 = 733,58$ kmol/h ≡ 23.386 kg/h.

Carga térmica del Condensador E-205C ($\Delta H_{cond}$ = 1.115 kJ/kg a 67 °C, 1,2 bar):

$Q = 6,496$ kg/s × 1.115 kJ/kg = 7.243 kW

Carga térmica del Rehervidor E-205R (Tb = 104,5 °C, 1,5 bar; $\Delta H_{ebull}$ = 2.245 kJ/kg):

$Q = Q_C + Q_{dest} + Q_{fondos} - Q_{alim} \approx 7.680$ kW ≡ 7,68 MW

**Dimensionamiento Hidráulico del Diámetro**

A las condiciones de cabeza de T-205 (67 °C, 1,2 bar abs):

Densidad de vapor: $\rho_v = (1,2 \times 105 \times 31,88) / (8.314 \times 340,15) = 1,354$ kg/m3.

Densidad de líquido: $\rho_L = 772$ kg/m3.

- Caudal volumétrico de vapor:

  $Q_v = (23.386 / 3.600) / 1,354 = 4,798$ m$^3$/s.

- Velocidad máxima de inundación (espaciado entre platos t = 0,60 m, $C_{sb} = 0,090$ m/s):

  $U_{inund} = 0,090 \times \sqrt{[ (772 - 1,354) / 1,354 ]} = 0,090 \times 23,84 = 2,146$ m/s

- Velocidad de operación adoptada (factor de operación del 80% sobre inundación):

  $U_{diseño} = 0,80 \times 2,146 = 1,717$ m/s

- Área activa neta requerida para el paso de vapor:

  $A_{act} = Q_v / U_{diseño} = 4,798 / 1,717 = 2,794$ m²

En platos perforados o de válvulas con flujo cruzado, los bajantes ocupan el 12% del área transversal ($A_{baj} = 0,12 \times A_{total} \rightarrow A_{act} = 0,88 \times A_{total}$):

$$A_{total} = A_{act} / 0,88 = 2,794 / 0,88 = 3,175 \text{ m}^2$$

- Diámetro interior de la carcasa:

  $D = \sqrt{[ (4 \times A_{total}) / \pi ]} = \sqrt{[ (4 \times 3,175) / \pi ]} = 2,010$ m → Normalizado: 2,00 m

- Altura cilíndrica tangente a tangente:

  H = (32 platos × 0,60 m) + 1,80 m (espacio superior desenganche) + 2,40 m (inventario líquido fondo) = 23,40 m

- Relación de esbeltez: H/D = 23,40 / 2,00 = 11,70 (plenamente satisfactorio, mecánicamente autoportante).

## Diseño Columna T-206:

### Condiciones de Operación de T-206.

La columna T-206 procesa los 398,467 kmol/h procedentes de T-205 para efectuar el corte ultra-puro. Retira por el fondo las últimas fracciones acuosas y trazas de alcoholes pesados, obteniendo por cabeza metanol comercial grado AA con concentración > 99,95% molar:

| Componente | Alimentación (kmol/h) | Producto MeOH Grado AA (kmol/h) | Fondos / Purga Pesados (kmol/h) |
|---|---|---|---|
| Metanol ($CH_3OH$) | 393,682 | 393,485 | 0,197 |
| Agua y colas pesadas | 4,785 | 0,047 | 4,738 |
| Total | 398,467 | 393,532 | 4,935 |

Tabla 5.27 Tabla de Corrientes de columna T-206.
Fuente: Elaboración propia.

### Dimensionamiento Hidráulico del Diámetro

Al tratarse de una rectificación fina en la región donde $\alpha \approx 1,90 - 2,10$, se especifican 20 etapas teóricas (28 platos reales a $\eta = 70\%$):

Relación de reflujo operativo adoptada: R = 0,65.

- Caudal de destilado puro:

  D = 393,53 kmol/h (12.609 kg/h de metanol Grado AA ≡ 99.860 t/año efectivas).

- Vapor revaporizado en tope:

$V = D \times (R + 1) = 393{,}53 \times 1{,}65 = 649{,}32$ kmol/h ≡ 20.804 kg/h (5,779 kg/s).

- Carga del condensador de T-206:

  $Q_C$= 5,779 kg/s × 1.100 kJ/kg = 6.357 kW ≡ 6,36 MW

- Carga térmica del rehervidor de T-206 ($T_{fondo}$ ≈ 78 °C a 1,25 bar):

  Q = 6.580 kW ≡ 6,58 MW

- Diámetro de columna (con $\rho_v$ = 1,42 kg/m3, $U_{diseño}$ = 1,65 m/s y 12% bajantes):

  $Q_v$ = (20.804 / 3.600) / 1,42 = 4,070 m³/s → $A_{act}$ = 2,467 m² → $A_{total}$ = 2,803 m²

  $D = \sqrt{[\ (4 \times 2{,}803) / \pi\ ]} = 1{,}889$ m → Normalizado: 1,90 m

- Altura geométrica:

  H = (28 platos × 0,50 m) + 3,50 m (desenganche y fondo) = 17,50 m.

**Integración Energética:**

Uno de los mayores hitos de optimización en la ingeniería de detalle de la Etapa N°2 radica en la autosuficiencia térmica entre la síntesis y el fraccionamiento:

Generación de vapor en R-201: La reacción exotérmica genera 8,85 MW térmicos continuos en la carcasa del reactor, produciendo 18,26 t/h de vapor saturado a 35 bar g (244 °C).

Demanda térmica de los rehervidores del tren:

Rehervidor T-204 (E-204R): QR = 0,29 MW.

Rehervidor T-205 (E-205R): QR = 7,68 MW.

Rehervidor T-206 (E-206R): QR = 6,58 MW.

Consumo térmico total de destilación: $Q_{total}$ = 14,55 MW.

Demanda de vapor equivalente: Despresurizando el vapor de 35 bar g hacia el cabezal de media/baja presión (4,0 bar g, $T_{sat}$ = 151,8 °C; $\Delta H_{vap}$ = 2.108 kJ/kg):

$M_{vapor}$ = 14.550 kW / 2.108 kJ/kg = 6,902 kg/s ≡ 24,85 t/h de vapor de 4 bar g

El reactor R-201 aporta de forma autónoma el 61% de la energía térmica global requerida para purificar todo el metanol (el remanente se complementa de forma natural con la caldera de recuperación E-103 de la Etapa N°1, la cual genera 19,4 t/h de vapor de alta presión), consolidando un tren de proceso con huella energética neta óptima.

**Conclusiones:**

| Parámetro / Equipo | T-204 (Topping) | T-205 (Principal) | T-206 (Refinado AA) |
|---|---|---|---|
| Función | Desgasificado de ligeros / CO / DME | Desaguado mayoritario $MeOH/H_2O$ | Afinado y purga pesados (Grado AA) |
| Caudal de alimentación | 487,83 kmol/h | 487,43 kmol/h | 398,47 kmol/h |
| Pureza molar destilado | N/A | 98,80% molar $CH_3OH$ | 99,95% molar (99,88% p/p) |
| Número de platos reales | 18 platos (t = 0,50 m) | 32 platos (t = 0,60 m) | 28 platos (t = 0,50 m) |
| Tipo de internos | Platos perforados / Válvulas fijas | Platos de válvulas móviles (ASME) | Platos de válvulas fijas / Empaque |
| Diámetro interior de torre | 0,60 m | 2,00 m | 1,90 m |
| Altura total | 11,00 m | 23,40 m | 17,50 m |
| Relación de reflujo | N/A (Stripper despojador) | 0,84 ($R/R_{min}$ = 1,40) | 0,65 (Operativo) |
| Carga Rehervidor | 0,29 MW | 7,68 MW | 6,58 MW |
| Carga Condensador | 0,31 MW | 7,24 MW | 6,36 MW |
| Metalurgia de envolvente | Acero al Carbono SA-516 Gr 70 | SA-516 Gr 70 (Fondo) / AISI 304L | Acero Inoxidable AISI 304L / 316L |

Tabla 5.28 Tabla de Conclusiones de Tren de Torres de Refino.
Fuente: Elaboración propia.

#### 5.4.5.4 Tanque de Almacenamiento TK-207

La unidad TK-207 tiene como propósito fundamental confinar de manera segura el inventario de metanol líquido purificado grado comercial AA proveniente de la columna de refinado T-206 (393,485 kmol/h ≡ 12.607,3 kg/h). Dicho inventario cumple una doble función estratégica en el complejo:

1. Consumo Interno Continuo: Suministrar ininterrumpidamente 60,86 kmol/h de metanol hacia la unidad de carbonilación Cativa en la Etapa N°3 para la síntesis de 27.500 t/año de ácido acético.

2. Despacho y Exportación Discontinua: Acumular el excedente neto comercializable 10.657,2 kg/h destinado primariamente al mercado regional y exportación vía buques tanque desde la terminal portuaria de Bahía Blanca, así como despacho terrestre hacia cisternas y vagones.

Filosofía de dos tanques gemelos (TK-207 A / TK-207 B):

A diferencia de un tanque único monolítico (cuya indisponibilidad por mantenimiento obligaría a detener la planta entera o impediría el despacho comercial), la instalación se estructura formalmente en dos tanques cilíndricos verticales gemelos de 3.400 m3 brutos cada uno. Este arreglo garantiza:

- Continuidad operativa y redundancia: Posibilidad de efectuar inspecciones periódicas y mantenimiento mayor según norma API 653 en una de las unidades manteniendo la otra en servicio activo.

- Fiscalización y Certificación de Calidad (Custody Transfer): Permite un ciclo dinámico de transferencia de custodia donde una unidad se encuentra en régimen de recepción/llenado continuo desde T-206, mientras que la unidad paralela permanece aislada para toma de muestras de laboratorio (certificación de pureza de lote > 99,85% p/p y agua < 0,05% p/p) y bombeo de alta tasa hacia los buques o cisternas.

**Bases de Cálculo:**

| Parámetro de Diseño | Valor Numérico | Unidades / Descripción |
|---|---|---|
| Producción horaria de MeOH | 393,485 | kmol/h ≡ 12.607,3 kg/h |
| Producción diaria nominal | 302,58 | toneladas métricas / día |
| Autonomía total | 15 | días de operación continua |
| Masa total acumulada | 4.538,6 | toneladas métricas |
| Densidad del metanol líquido | 792,0 | kg/$m^3$ |
| Volumen neto útil de trabajo | 5.730,6 | $m^3$ de inventario líquido |
| Factor máximo de llenado | 85,0 | % del volumen nominal |
| Volumen nominal bruto total | 6.741,8 | $m^3$ (dividido en dos unidades) |
| Volumen nominal por tanque | 3.370,9 ≈ 3.400 | $m^3$ brutos por cada unidad |

Tabla 5.29 Tabla de Base de Cálculo de TK-207 A/B.
Fuente: Elaboración propia.

**Tipología Constructiva**

El metanol anhidro está catalogado por la norma NFPA 30 como un Líquido Inflamable Clase IB (Punto de inflamación = 11,0 − 12,0 °C; Límites de inflamabilidad en aire: LEL = 6,0% v/v, UEL = 36,5% v/v; Presión de vapor a 20 °C = 12,8 kPa).

Estas características físico-químicas descartan técnicamente dos alternativas básicas:

- Descarte de Techo Flotante Externo Abierto: El metanol es una sustancia sumamente higroscópica. Un techo abierto expondría el producto a la absorción de humedad ambiental y lluvias torrenciales, degradando irreversiblemente la especificación de pureza Grado AA.

- Descarte de Techo Fijo Simple con Venteo Libre: A temperaturas ambientales habituales en Bahía Blanca (10 °C a 35 °C), la composición en equilibrio del espacio de vapor entra de lleno dentro del rango explosivo (6% a 36,5% v/v), representando un riesgo crítico de deflagración ante cargas electrostáticas.

Configuración Adoptada:

Se especifica un Tanque de Techo Fijo Cónico Autosoportado con Techo Flotante Interno, según API 650 Apéndice H, complementado con Sistema de Inertización por Blanketing de Nitrógeno en baja presión regulada (API 2000):

- Techo Flotante Interno (IFRT): De construcción en aluminio soldado o contacto total en acero inoxidable con sellos elastoméricos perimetrales dobles resistentes a alcoholes. Flota directamente sobre la superficie del metanol, suprimiendo la evaporación en más del 98% y eliminando casi por completo la formación de fase vapor libre.

- Techo Cónico Fijo Superior: Protege al conjunto mecánico y al producto contra el ingreso de agua pluvial, polvo y radiación solar directa.

- Colchón de Inertización: El espacio gaseoso entre el techo flotante interno y el techo fijo se mantiene presurizado con nitrógeno gaseoso seco a una presión controlada de +5 a +10 mbar g, desplazando totalmente el oxígeno atmosférico e imposibilitando cualquier atmósfera inflamable.

**Dimensionamiento Geométrico:**

Para un volumen geométrico nominal de $V_{geom}$ = 3.400 $m^3$ por unidad, se establece una altura nominal del cuerpo de H = 12,00 m. Con un factor de llenado seguro del 85%, el nivel máximo de líquido es HL = 10,20 m, reservando 1,80 m para el desplazamiento del techo flotante interno y la cámara de Blanketing:

- Cálculo del diámetro interior:

  D = √[ (4 × V_geom) / (π × H) ] =
  √[ (4 × 3.400) / (π × 12,0) ] =18,995 m → Adoptado:19m

- Área seccional del tanque:

  $A_{trans}$ = (π × 19,02) / 4 = 283,53 $m^2$.

- Volumen geométrico real bruto:

  $V_{tanque}$ = 283,53 $m^2$ × 12,00 m = 3.402,3 $m^3$.

- Volumen útil de trabajo unitario (a HL = 10,20 m):

  $V_{util}$ = 283,53 × 10,20 = 2.892,0 $m^3$ (por tanque).

- Volumen útil total del parque (2 tanques):

  $V_{total,util}$ = 2 × 2.892,0 = 5.784,0 $m^3$ > 5.730,6 $m^3$ requeridos

Relación geométrica de esbeltez: H/D = 12,0 / 19,0 = 0,632. Se encuadra plenamente dentro del intervalo óptimo (0,4 − 0,8) recomendado por API 650 para minimizar costos de fundación civil y estabilidad frente a volcamiento por viento y sismo.

**Cálculo Mecánico de Espesores de Envolvente (Método API 650)**

El espesor de chapa requerido para cada virola (anillo) cilíndrica del cuerpo se determina según el método del pie de diseño estipulado en la norma API 650 Sección 5.6.3:

$t_d = [ (4,9 \times D \times (H_i - 0,3) \times G) / (S_d \times E)] + C_A$

$t_t = [ (4,9 \times D \times (H_i - 0,3)) / (S_t \times E)]$ (Condición de Prueba Hidrostática con Agua)

Parámetros de diseño mecánico:

- Diámetro nominal: D = 19,00 m.
- Material de construcción: Acero estructural para recipientes ASTM A-36.
- Esfuerzo admisible de diseño del acero: Sd = 160 MPa (23.200 psi).
- Esfuerzo admisible para prueba hidrostática: St = 171 MPa (24.900 psi).
- Gravedad específica del producto: G = 0,792 (Metanol a 20 °C);
- Eficiencia de junta soldada: E = 0,85 (según API 650).
- Sobre espesor por corrosión: CA = 1,5 mm.
- Espesor mínimo constructivo exigido por API 650 para tanques con 15 m < D ≤ 36 m: $t_{min}$ = 6,0 mm.

| Anillos | Altura del Líquido $H_i$ (m) | $t_d$ Cálculo (mm) | $t_t$ Prueba $H_2O$ (mm) | Espesor Comercial Adoptado (mm) |
|---|---|---|---|---|
| 1° Anillo (Inferior 0,0 a 2,4 m) | 12,00 | 7,78 | 7,50 | 8,0 mm |
| 2° Anillo (2,4 a 4,8 m) | 9,60 | 6,49 | 5,96 | 6,35 mm |
| 3° Anillo (4,8 a 7,2 m) | 7,20 | 5,19 | 4,42 | 6,0 mm (mín. API 650) |
| 4° Anillo (7,2 a 9,6 m) | 4,80 | 3,90 | 2,88 | 6,0 mm (mín. API 650) |
| 5° Anillo (9,6 a 12,0 m) | 2,40 | 2,61 | 1,35 | 6,0 mm (mín. API 650) |

Tabla 5.30 Tabla de Dimensiones de virolas del tanque.
Fuente: Elaboración propia.

Fondo y Techo del Tanque:

- Chapas de fondo: Espesor nominal de 8,0 mm (incluye 1,5 mm de CA), con chapas anulares perimétricas en la base del manto de 9,5 mm de espesor.

- Techo cónico fijo autosoportado: Pendiente 1:6 con chapas de 5,0 mm de espesor continúo soldadas únicamente por el exterior al ángulo de coronamiento perimetral.

**Sistema de Inertización y Venteos de Emergencia.**

El sistema de regulación de atmósfera interna opera en base a dos válvulas combinadas de presión y vacío con apagallamas anti deflagración en líneas de venteo a colector seguro:

- Inyección de Nitrógeno Regulado: El N2 se suministra desde la corriente rica generada por la unidad ASU (PKG-001) de la Etapa N°1 (> 99,9% vol N2). Una válvula autorreguladora de blanketing introduce nitrógeno ante una caída de presión interna por debajo de +5,0 mbar g.

- Vaciado máximo de líquido (Despacho a buques / cisternas): Para un caudal pico de bombeo hacia barcazas de $Q_{despacho}$ = 250 m3/h, la demanda de reposición de gas de Inertización es de 250 Nm3/h de N2.

- Efecto térmico de respiración: Según API 2000 para un tanque de 3.400 m3 con variación térmica día-noche en costa marítima (Bahía Blanca), la contracción demanda 140 Nm3/h de N2. Capacidad total de la línea de alimentación de nitrógeno: 390 Nm3/h.

- Alivio de sobrepresión y vacío de emergencia: Válvula venteo PV calibrada a +12,0 mbar g (apertura a antorcha) y vacío a −2,5 mbar g para impedir el colapso mecánico del manto cilíndrico.

**Protección Contra Incendios y Contención Ambiental (NFPA 11 / NFPA 30)**

Cubeto de Retención Estanca:

Según las directrices de la norma NFPA 30, la batería de almacenamiento está confinada dentro de un cubeto perimetral estanco impermeabilizado mediante geomembrana de PEAD (Polietileno de Alta Densidad) de 2,0 mm con capa de hormigón armado:

Capacidad del tanque mayor contenido: $V_{tanque}$ = 3.402 m3.

Volumen desplazado por la fundación del segundo tanque gemelo y muretes internos: ≈ 180 m3.

Revancha pluvial por precipitación máxima de diseño (tormenta decenal de 24 horas = 110 mm sobre el área): ≈ 320 m3.

Volumen útil mínimo del recinto estanco:

$V_{recinto}$ = 3.402 + 180 + 320 = 3.902 m³ (> 114% del volumen de un tanque)

Dimensiones adoptadas del recinto: 60 m × 48 m con muros perimetrales de hormigón de 1,40 m de altura. Muro divisor intermedio de 0,60 m para retener derrames menores en el tanque afectado.

**Conclusión:**

| Parámetro | Valor Numérico Adoptado | Observaciones y Normas de Diseño |
|---|---|---|
| Código de diseño mecánico | API 650 (Apéndice H) | Tanques de acero soldados para almacenamiento de petróleo y químicos |
| Configuración de batería | 2 tanques gemelos (TK-207 A / TK-207 B) | Permite recepción, certificación de lote y despacho independiente |
| Autonomía de almacenamiento | 15 días (5.784 $m^3$ útiles) | Basado en 302,6 t/día de metanol grado AA |
| Tipo de techo | Techo fijo cónico con Techo Flotante Interno | Contacto total en aluminio / sellos dobles anti-alcohol |
| Diámetro interior (D) | 19,00 m (por tanque) | Área transversal = 283,53 $m^2$ |
| Altura nominal del cuerpo (H) | 12,00 m (por tanque) | 5 virolas de 2,40 m. Relación H/D = 0,63 |
| Nivel máximo de líquido ($H_L$) | 10,20 m (Factor de llenado 85%) | 1,80 m libres para desplazamiento del techo y colchón $N_2$ |
| Espesores de virolas cilíndricas | Anillo 1: 8,0 mm \| Anillo 2: 6,35 mm<br>Anillos 3, 4 y 5: 6,0 mm | ASTM A-36 calculado vía API 650 (CA = 1,5 mm) |
| Sistema de Inertización | Nitrógeno de blanketing (+5 a +10 mbar g) | $N_2$ desde ASU PKG-001 con válvula autorreguladora API 2000 |
| Venteo de emergencia | Breather Valve + Flame Arrester | Alivio a +12 mbar g / Vacío a −2,5 mbar g con apagallamas |
| Sistema contra incendio | Espuma AR-AFFF (6,5 L/min·$m^2$) + Rociadores | 4 cámaras fijas perimetrales bajo norma NFPA 11 |
| Cubeto de contención | Volumen útil = 3.902 $m^3$ (> 114%) | Recinto estanco de 60 × 48 m × 1,4 m de muro (NFPA 30) |

Tabla 5.31 Tabla de conclusiones de TK-207
Fuente: Elaboración propia.

- Operatividad Industrial y Confiabilidad Logística: La sustitución del tanque único monolítico por la batería de dos tanques gemelos TK-207 A/B de 3.400 m3 brutos asegura una autonomía real de 15,14 días de producción ininterrumpida, facilitando las tareas de inspección bajo API 653 y viabilizando la segregación de lotes comerciales para certificación analítica y transferencia de custodia hacia buques.

- Resolución Termodinámica y Ambiental: La adopción de un Techo Fijo Cónico con Techo Flotante Interno (IFRT, API 650 Apéndice H) y blanketing presurizado de N2 elimina el riesgo crítico de atmósferas explosivas, suprime pérdidas por evaporación en más de un 98% e impide la contaminación del metanol por humedad atmosférica, salvaguardando la pureza Grado AA.
- Consistencia del Cálculo Mecánico: El dimensionamiento estructural mediante el método One-Foot de API 650 establece un perfil escalonado de espesores (8,0 mm en la base y 6,0 mm en los anillos superiores) en acero ASTM A-36 con un margen de corrosión de 1,5 mm, garantizando estabilidad mecánica frente a cargas hidrostáticas y sísmicas.
- Cierre de la Zona 200: Con la incorporación de la batería TK-207 A/B, se completa de manera armónica la ingeniería de detalle de todos los equipos del lazo de metanol (R-201 → E-202 → F-203 → T-204 → T-205 → T-206 → TK-207), integrando el suministro continuo hacia la Zona 300 (ácido acético) y la salida hacia exportación.

### 5.4.5 Balance de masa Etapa N°3.

La Etapa N°3 procesa el monóxido de carbono purificado proveniente del acumulador A-107, Etapa N°1 y el metanol grado AA extraído del almacenamiento intermedio TK-207, Etapa N°2. La transformación química se efectúa mediante la tecnología BP Cativa™, consistente en la carbonilación de metanol en fase líquida operando en un reactor de tanque agitado continuo (CSTR, R-301) catalizado homogéneamente por complejos de iridio activados con un promotor de yoduro de metilo ($CH_3I$) y sales de rutenio como copromotor.

Frente al proceso tradicional Monsanto (basado en rodio), la tecnología Cativa™ presenta tres ventajas determinantes de ingeniería:

- Operación a bajo contenido acuoso: Mantiene entre 4,0% y 8,0% p/p de agua en el medio de reacción (frente a 14–16% p/p de Monsanto), abatiendo drásticamente el consumo de vapor de destilación en la columna de secado.

- Represión de reacciones secundarias: La baja concentración de agua inhibe fuertemente la reacción de desplazamiento de gas de agua (WGS: CO + H2O ↔ CO2 + H2), alcanzando una selectividad molar >99% hacia ácido acético.

- Confinamiento catalítico en lazo cerrado: El complejo catalítico homogéneo, el promotor MeI y el agua recirculan de forma continua a través de F-302, T-304 y T-305 sin pérdida hacia efluentes.

#### 5.4.5.1 Reactor de Carbonilación Cativa™ (R-301)

El reactor R-301 opera en régimen CSTR a 190 °C y 32 bar abs, construido en aleación Hastelloy B/C para resistir el ataque corrosivo del ácido acético y los haluros a alta temperatura. La conversión por paso simple de los reactivos frescos es del 95,0% (Xp = 0,95) con una selectividad hacia ácido acético superior al 99,5%.

Reacciones Químicas Involucradas:

Carbonilación Principal:

$$CH_3OH + CO \rightarrow CH_3COOH \ (\Delta H°298 = -138{,}6 \text{ kJ/mol})$$

Generación Secundaria de Ácido Propiónico:

$$C_2H_5OH \text{ (trazas en MeOH)} + CO \rightarrow C_2H_5COOH$$

Reacción WGS colateral:

$$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2 \ (\Delta H°298 = -41{,}2 \text{ kJ/mol})$$

**Balance de Masa en R-301 considerando el Lazo Cerrado de Reciclo:**

| Componente | Alimentación (kg/h) | Reciclo (kg/h) | Entrada Total (kg/h) | Efluente (kg/h) |
|---|---|---|---|---|
| Monóxido de Carbono (CO) | 1.704,70 | 0,00 | 1.704,70 | 85,23 |
| Metanol ($CH_3OH$) | 1.950,13 | 96,52 | 2.046,65 | 97,50 |
| Ácido Acético ($CH_3COOH$) | 0,00 | 6,00 | 6,00 | 3.464,22 |
| Agua de Solvatación ($H_2O$) | 0,00 | 103,58 | 103,58 | 103,58 |
| Yoduro de Metilo ($CH_3I$) | 0,00 | 85,16 | 85,16 | 85,16 |
| Ácido Propiónico | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 2,22 |
| Incondensables WGS (CO2 + H2) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 9,20 |
| TOTAL | 3.654,83 | 291,26 | 3.946,09 | 3.946,09 |

Tabla 5.32 Tabla de Balance de Masa de Reactor R-301.
Fuente: Elaboración propia.

### 5.4.5.2 Separador flash de Catalizador F-302

Separa el catalizador homogéneo (complejo de Ir/Ru, no volátil) de la mezcla de productos y reactivos sin convertir mediante despresurización adiabática rápida, recirculándolo internamente a R-301 por el fondo. El CO sin reaccionar, por su carácter de gas permanente con baja solubilidad en el medio líquido, se separa en esta etapa como corriente de venteo (off-gas):

CO off-gas (venteo) = 3,0430 kmol/h

| Corriente vaporizada | kmol/h |
|---|---|
| Ácido acético | 57,8170 |
| Metanol sin reaccionar | 3,0430 |
| Agua | 5,7500 |
| MeI | 0,6000 |
| Ácido propiónico | 0,0300 |

Tabla 5.33 Tabla de Balance de Masa separador flash F-302.
Fuente: Elaboración propia.

#### 5.4.5.3 Tren de Fraccionamiento Multicomponente (T-304, T-305 y T-306)

El tren de destilación purifica el ácido acético hasta especificación polimérica, operando con modelado termodinámico NRTL acoplado con la ecuación de Hayden-O'Connell (HOC) para predecir la dimerización del ácido en fase vapor.

##### 5.4.5.3.1 Columna de Remoción de Ligeros (T-304)

Recupera por cabeza el 99,0% del yoduro de metilo (promotor) y el 99,0% del metanol sin reaccionar, los cuales se condensan y retornan a R-301. Por el fondo se obtiene el ácido crudo desgasificado con el agua y el ácido propiónico.

| Corriente (kmol/h) | CH3COOH | CH3OH | H2O | CH3I | Ác. Propiónico | Total (kmol/h) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Alimentación | 57,637 | 3,043 | 5,750 | 0,600 | 0,030 | 67,060 |
| Tope (Reciclo a R-301) | 0,100 | 3,013 | 0,000 | 0,600 | 0,000 | 3,713 |
| Fondos (a T-305) | 57,537 | 0,030 | 5,750 | 0,000 | 0,030 | 63,347 |

Tabla 5.34 Tabla de Balance Columna T-304.
Fuente: Elaboración propia.

#### 5.4.5.3.2 Columna de Secado (T-305)

Deshidrata el ácido acético crudo. El destilado de cabeza (agua de solvatación con trazas de ácido) se recircula a R-301 para preservar el inventario de agua del medio catalítico (5,4% p/p). Dado que el fondo se mantiene fuertemente concentrado en ácido (>99% mol), la mezcla opera fuera de la zona de pinch tangente de agua pura, posibilitando una destilación fraccionada de alta eficiencia.

| Corriente (kmol/h) | CH3COOH | H2O | Ác. Propiónico | Total (kmol/h) |
|---|---|---|---|---|
| Alimentación | 57,537 | 5,750 | 0,030 | 63,317 |
| Destilado (Reciclo acuoso) | 0,050 | 5,730 | 0,000 | 5,780 |
| Fondos (a T-306) | 57,487 | 0,020 | 0,030 | 57,537 |

Tabla 5.35 Tabla de Balance Columna T-305.
Fuente: Elaboración propia.

#### 5.4.5.3.3 Columna de Pesados (T-306)

Separa el ácido propiónico (punto de ebullición 141 °C) del ácido acético (118 °C). El producto grado polimérico se extrae como destilado de cabeza, mientras que una corriente residual de pesados se retira por fondo hacia disposición o incineración.

| Corriente (kmol/h) | CH3COOH | H2O | Ác. Propiónico | Total (kmol/h) |
|---|---|---|---|---|
| Alimentación | 57,487 | 0,020 | 0,030 | 57,537 |
| Destilado Grado AA (a TK-307) | 57,400 | 0,020 | 0,001 | 57,421 |
| Fondos (Pesados residuales) | 0,087 | 0,000 | 0,029 | 0,116 |

Tabla 5.36 Tabla de Balance Columna T-306.
Fuente: Elaboración propia.

5.4.5.4 Almacenamiento (TK-307)

El destilado de T-306 se enfría en I-303 hasta 30 °C e ingresa al tanque TK-307. Cumple estrictamente con los estándares internacionales de pureza para monómero de acetato de vinilo (VAM) y ácido tereftálico purificado (PTA):

- Pureza de Ácido Acético: 99,90% p/p (≥ 99,85% p/p requerido)
- Contenido de Agua: 104 ppmw (≤ 500 ppmw requerido)
- Ácido Propiónico: 22 ppmw (≤ 200 ppmw requerido)
- Yoduros Totales: < 10 ppbw (≤ 40 ppbw requerido)

Cálculo de Capacidad Anual:

- Producción horaria: 3.447,84 kg/h (57,421 kmol/h)
- Producción anualizada: 3.447,84 kg/h × 7.920 h/año = 27.306.893 kg/año ≡ 27.307 t/año

Cumplimiento del objetivo nominal (27.500 t/año): 99,30% (el 0,70% remanente refleja las pérdidas acumuladas por arrastre en venteos y purga de pesados).

**5.4.5.4 Conclusiones:**

- Cierre de Balance al 100%: Al modelar el agua de solvatación y el yoduro de metilo como parte del inventario circulante en estado estacionario y no como corrientes de descarte, se subsana la generación aparente de materia, cerrando el balance atómico estricto en R-301.

- Estabilidad del Complejo Cativa™: La recirculación de la corriente de destilado de T-305 hacia el reactor asegura el mantenimiento continuo de la concentración crítica de agua (5,4% p/p), indispensable para evitar la precipitación de sales y desactivación de los centros activos de iridio/rutenio.

- Consistencia Interconectada: El consumo de metanol queda fijado exactamente en 60,860 kmol/h (1.950,13 kg/h), concordando plenamente con los informes previos de la Zona 200 y el parque TK-207.

## 5.4.6 Diseño de los Equipos Etapa N°3:

### 5.4.6.1 Diseño del Reactor de carbonilación (R-301)

El equipo R-301 constituye el reactor principal de síntesis de la Etapa N°3, encargado de la carbonilación de metanol en fase líquida para producir ácido acético de grado polimérico:

$$CH_3OH(l) + CO(g) \rightarrow CH_3COOH(l) \quad \Delta H°298 = -138,6\ kJ/mol$$

A diferencia de los reactores catalíticos de lecho fijo heterogéneo implementados en la Etapa N°1 (Reactor ATR R-102) y en la Etapa N°2 (Reactor multitubular Lurgi BWR R-201), el reactor R-301 opera como un reactor continuo de tanque agitado (CSTR) en régimen homogéneo. El sistema adopta la tecnología BP Cativa™, empleando un catalizador líquido homogéneo basado en complejos de iridio activados con un promotor de yoduro de metilo (CH3I) y copromotores de sales de rutenio.

Esta configuración tecnológica presenta ventajas operativas determinantes: permite alcanzar una conversión por paso simple del 95,0% con selectividades molares superiores al 99% hacia ácido acético. Asimismo, posibilita operar con concentraciones reducidas de agua (entre 4,0% y 8,0% p/p en el medio de reacción), lo cual abate fuertemente la reacción parásita de desplazamiento de gas de agua y reduce en más de un 40% el requerimiento de vapor en las columnas de deshidratación respecto a la tecnología Monsanto clásica basada en rodio.

**Cinética y Mecanismo Catalítico Cativa™**

El ciclo catalítico organometálico de la tecnología Cativa™ difiere radicalmente de cinéticas homogéneas elementales. La reacción procede mediante una secuencia catalítica iniciada por la formación in situ de la especie activa aniónica $[Ir(CO)_2I_2]^-$. La etapa limitante de la velocidad es la adición oxidativa de yoduro de metilo ($CH_3I$) sobre dicho complejo, acelerada por la presencia de rutenio como copromotor que facilita la extracción de haluro:

$$r_{AA} = k \cdot [Ir]^a \cdot [CH_3I]^b \cdot [Ru]^c \cdot P_{CO}^d$$

Bajo las condiciones industriales del reactor (temperatura de 190 °C, presión de 32 bar abs, concentraciones de metanol > 0,5 M y saturación de monóxido de carbono), la velocidad intrínseca de reacción es de orden cero respecto a la concentración de metanol. Por este motivo, el dimensionamiento de reactores CSTR de carbonilación en la práctica comercial y en la literatura de patentes no se rige por constantes elementales de pseudo-primer orden dependientes de la concentración residual del reactivo, sino por el tiempo de residencia volumétrico de la fase líquida (τ) necesario para asegurar la conversión meta del 95,0% bajo el inventario catalítico circulante.

**Verificación del Contenido de Agua del Sistema**

La tecnología Cativa™ opera típicamente con una concentración de agua en el medio de reacción inferior al 8,0% en peso, límite documentado en patentes para evitar el incremento de vaporización en columnas posteriores y la desactivación catalítica:

Evaluando la masa total en el seno líquido de R-301 bajo régimen permanente:

- Caudal másico de agua en el reactor = 103,58 kg/h
- Masa líquida total que atraviesa el reactor = 4.943,99 kg/h
- Fracción másica de agua = (103,58 / 4.943,99) × 100 = 2,10% p/p < 8,0% p/p (Límite Cativa™)

Este valor se sitúa dentro de la ventana óptima (2,0% a 5,5% p/p), garantizando la completa solubilidad de las sales de iridio/rutenio e inhibiendo simultáneamente la reacción secundaria WGS.

**Tiempo de Residencia de Diseño**

Se adopta un tiempo de residencia líquido de 30 minutos (τ = 1.800 s), ubicado en el centro del rango reportado por la literatura técnica y de patentes para carbonilación industrial Cativa™ (20 a 40 minutos):

τ = 30 min = 0,50 h = 1.800 s

**Caudal Volumétrico Total y Efecto del Reciclo**

A diferencia de un cálculo preliminar que considere exclusivamente el metanol fresco, el caudal líquido real que procesa el reactor incluye las tres corrientes de retorno en estado estacionario:

1. Metanol fresco (TK-207): 1.950,13 kg/h
2. Reciclo de ligeros y promotor MeI (tope T-304): 187,68 kg/h
3. Reciclo acuoso de solvatación (tope T-305): 106,18 kg/h
4. Reciclo de solución catalítica concentrada (fondo F-302): 2.700,00 kg/h

Caudal másico total de líquido ingresado al reactor ($m_L$) = 4.943,99 kg/h

Para la mezcla líquida a las condiciones reaccionantes medias (190 °C y 32 bar abs, constituida en su mayor proporción por ácido acético con fracciones de metanol, acetato de metilo, agua y sales disueltas), la densidad media ponderada resulta de $\rho_L$ = 865 kg/m³. El caudal volumétrico real de líquido resulta:

$$v0 = m_L / \rho_L = 4.943,99 \text{ kg/h} / 865 \text{ kg/m}^3 = 5,716 \text{ m}^3/\text{h} \equiv 1,588 \times 10{-}3 \text{ m}^3/\text{s}$$

**Volumen y Geometría del Reactor (R-301).**

El volumen útil ocupado por el líquido de reacción se calcula directamente por el principio de retención espacial:

$$V_{líquido} = v_0 \times \tau = 5{,}716\ m^3/h \times 0{,}50\ h = 2{,}858\ m^3$$

Para reactores CSTR gas-líquido operando bajo inyección continua de gas a presión (CO), se adopta un factor de llenado de líquido del 70% ($f_L = 0{,}70$). El 30% restante del reactor conforma el espacio libre de cabeza requerido para evitar el arrastre de espuma líquida hacia los venteos y alojar el bafle de separación de gas:

$$V_{Reactor} = V_{líquido} / 0{,}70 = 2{,}858 / 0{,}70 = 4{,}083\ m^3$$

Adoptando una relación geométrica estándar para tanques agitados verticales con fondo elíptico L/D = 1,50:

$$V_{Reactor} = (\pi / 4) \cdot D^2 \cdot L = (\pi / 4) \cdot D^2 \cdot (1{,}50 \cdot D) = 1{,}1781 \cdot D^3$$

$$D_{interno} = (4{,}083 / 1{,}1781)^{(1/3)} = 1{,}513\ m \rightarrow D_{nominal} = 1{,}50\ m$$

$$L_{cilindro} = 1{,}50 \cdot 1{,}50\ m = 2{,}25\ m\ (\text{Altura total con cabezales} \approx 3{,}00\ m)$$

Volumen geométrico final de la vasija = 4,15 m³

**Balance de Energía**

El calor liberado por la carbonilación exotérmica de metanol se cuantifica a partir del caudal neto convertido:

Flujo molar de formación de ácido acético = 57,817 kmol/h ≡ 16,060 mol/s

Entalpía de reacción ($\Delta H°r$) = −138,6 kJ/mol

$$Q_{gen} = 16{,}060\ mol/s \times 138{,}6\ kJ/mol = 2.225{,}9\ kW \approx 2{,}23\ MW$$

Inviabilidad de Camisa Térmica Convencional:

El área de envolvente disponible en este reactor es de D = 1,50 m y L = 2,25 m es de aproximadamente $A_{ext} = \pi \cdot 1{,}50 \cdot 2{,}25 = 10{,}6\ m^2$. Para evacuar 2.226 kW con un salto térmico admisible ($\Delta T \approx 35\ °C$), se requeriría un coeficiente global de $U = 2.226.000 / (10{,}6 \times 35) = 5.990\ W/(m^2 \cdot K)$, valor físicamente imposible de lograr con una camisa o serpentín en fluidos corrosivos.

Estrategia Industrial Integrada:

En las plantas comerciales Cativa™, la temperatura de 190 °C se mantiene gobernada mediante un esquema termodinámico dual:

- Auto-refrigeración por evaporación parcial interna: Una fracción de los reactivos volátiles (MeI, MeOH y agua) vaporiza en el espacio de cabeza de R-301 retirando parte de la entalpía sensible, siendo condensada en un intercambiador de reflujo para retornar al reactor.
- Evacuación entálpica hacia el Separador Flash F-302: El efluente líquido abandona R-301 a 190 °C y 32 bar abs transportando el excedente térmico directamente a F-302. Al despresurizarse adiabáticamente a 2,2 bar abs, la propia energía térmica acumulada evapora instantáneamente el ácido acético crudo sin necesidad de aportar vapor externo.

**Diseño Mecánico**

Las condiciones de severidad operativa y los márgenes de seguridad bajo código ASME Secc. VIII Div. 1 son:

- Temperatura de operación: 190 °C → Temperatura de diseño: 220 °C
- Presión de operación: 31 bar g → Presión de diseño: 36 bar g
- Servicio: Líquido corrosivo con haluros orgánicos e inorgánicos.

Metalurgia: Los aceros inoxidables estándar de la serie 300 sufren picado fulminante y agrietamiento por corrosión bajo tensión (SCC) inducido por yoduros. Se especifica una envolvente bimetálica consistente en chapa base estructural de acero para calderas ASME SA-516 Gr 70 con un revestimiento interior integral de Hastelloy B-3 de 3,0 mm de espesor, material inmune al ataque por haluros en ácidos orgánicos calientes.

**Cálculo de Espesores de Pared y Cabezales**

Propiedades mecánicas del acero base SA-516 Gr 70 a la temperatura de diseño (220 °C):

- Esfuerzo admisible: S = 138 MPa = 1.380 bar
- Eficiencia de junta soldada (inspección radiográfica 100%, Tipo 1): E = 1,00
- Radio interno del cilindro: $R_i$ = 750 mm
- Margen de corrosión: CA = 3,0 mm

**Espesor del Cuerpo Cilíndrico:**

$t_{cil} = [P_d \cdot R_i / (S \cdot E - 0{,}6 \cdot P_d)] + CA$

$t_{cil} = [36 \cdot 750 / (1.380 \cdot 1{,}00 - 0{,}6 \cdot 36)] + 3{,}0 = [27.000 / 1.358{,}4] + 3{,}0 = 22{,}88$ mm

Espesor comercial adoptado para virola: $t_{cil}$ = 25,4 mm (1 pulgada) + 3,0 mm cladding

**Espesor de Cabezales Elípticos:**

$t_{cab} = [P_d \cdot D_i / (2 \cdot S \cdot E - 0{,}2 \cdot P_d)] + CA$

$t_{cab} = [36 \cdot 1.500 / (2 \cdot 1.380 \cdot 1{,}00 - 0{,}2 \cdot 36)] + 3 = 22{,}62$ mm

Espesor comercial adoptado para cabezales: $t_{cab}$ = 25,4 mm (1 pulgada) + 3,0 mm cladding.

**Sistema de Agitación:**

Dado que el monóxido de carbono gaseoso presenta una baja solubilidad en el ácido acético líquido, la reacción química está controlada por la resistencia a la transferencia de materia interfasial gas-líquido. Para garantizar una rápida dispersión de burbujas y homogeneidad térmica, se proyecta un sistema de agitación mecánica con accionamiento superior:

**Configuración de Impulsores**:

Doble turbina montada sobre eje vertical con cuatro bafles antitorbellino fijados a la envolvente (ancho de bafle W = D/10 = 150 mm).

- Impulsor Inferior: Turbina de disco de seis paletas planas (Turbina Rushton, $D_{imp}$ = 0,50 m = D/3), ubicada inmediatamente por encima del ingreso del CO para micronizar el gas y maximizar el área interfasial específica a.

- Impulsor Superior: Turbina hidrofoil de álabes inclinados a 45° (Pitched Blade Turbine, $D_{imp}$ = 0,50 m) para promover un fuerte flujo axial recirculante hacia el fondo.

**Cálculo de Potencia de Agitación**:

Para reactores gas-líquido con regímenes de alta transferencia de masa, el consumo específico de potencia recomendado es de P/V = 7,5 kW/m³ de líquido.

Potencia requerida al fluido: $P_{neta}$ = 7,5 kW/m³ × 2,86 m³ = 21,45 kW.

Considerando la eficiencia del reductor mecánico (90%) y un factor de servicio de seguridad (1,30):

Potencia del motor eléctrico adoptada = 37 kW (50 HP) con variador electrónico de frecuencia (VFD).

**Sello Mecánico:**

Cartucho doble balanceado presurizado con nitrógeno de alta pureza para evitar fugas de compuestos yodados y vapores tóxicos de CO al ambiente exterior.

Conclusión:

| Parámetros | Valor de Diseño | Criterio |
|---|---|---|
| Tipo de Reactor | CSTR continuo de fase líquida homogénea | Tecnología BP Cativa™ (Ir/Ru/MeI) |
| Temperatura / Presión Operativa | 190 °C \| 32 bar abs | Condiciones óptimas de catálisis homogénea |
| Conversión | 95,0% por paso | Base de balance Etapa N°3 |
| Tiempo de Residencia | 30 minutos | Validado por patentes |
| Caudal Líquido Total | 4.943,99 kg/h | metanol fresco + reciclo |
| Volumen de Líquido | 2,858 m³ | $V_{líquido} = v_0 \times \tau$ |
| Volumen Reactor | 4,15 m³ (llenado al 70%) | 30% libre |
| Geometría del Reactor | $D_{int}$ = 1,50 m; $L_{cil}$ = 2,25 m | Relación L/D = 1,50 |
| Contenido de Agua | 2,10% p/p | Cumple < 8,0% p/p |
| Calor de Reacción Generado | 2.226 kW ≈ 2,23 MW | Evacuado vía flasheo adiabático en F-302 y E-303 |
| Materiales de Construcción | SA-516 Gr 70 + 3,0 mm Cladding Hastelloy B-3 | Resistencia a yoduros y ácido acético a 190 °C |

| Parámetros | Valor de Diseño | Criterio |
|---|---|---|
| Espesores Mecánicos Nominales | Virola: 25,4 mm; Cabezales: 25,4 mm | Código ASME Secc. VIII Div. 1 |
| Potencia Motor de Agitación | 37 kW (50 HP) con doble turbina | Rushton + PBT axial |

Tabla 5.37 Tabla de Conclusiones Reactor R-301.
Fuente: Elaboración propia.

- Consistencia Termodinámica: La inclusión del caudal total recirculado en estado estacionario permitió rectificar el volumen útil del reactor a 2,86 m³ y volumen externo total a 4,15 m³ (D = 1,50 m, L = 2,25 m).

- Rigor Cinético: Se fundamentó que la carbonilación de metanol bajo la tecnología BP Cativa™ responde a un régimen de orden cero respecto al alcohol en la ventana operativa industrial, validando el dimensionamiento a partir de un tiempo de residencia líquido de 30 minutos respaldado en literatura de patentes de procesos de carbonilación.

- Control Termico del Proceso: Quedó demostrada la imposibilidad física de utilizar camisas de refrigeración en esta escala frente a los 2,23 MW liberados. El control térmico se resuelve rigurosamente mediante el acoplamiento con la despresurización flash adiabática en F-302.

- Seguridad Operativa y Resistencia Mecánica: El dimensionamiento bajo código ASME Sección VIII División 1 fijó un espesor nominal de 25,4 mm (1 pulgada) en chapa estructural SA-516 Gr 70 protegida con 3,0 mm de cladding en Hastelloy B-3, complementado con un sistema de agitación de 37 kW diseñado específicamente para superar la resistencia a la transferencia de materia gas-líquido del monóxido de carbono.

#### 5.4.6.2 Diseño de Columna Flash (F-302)

El equipo F-302 tiene como misión separar el complejo catalítico homogéneo de iridio/rutenio (no volátil) de la mezcla de productos y reactivos no convertidos. Opera bajo el principio de despresurización flash adiabática: el corriente efluente de R-301 se expande a través de una válvula de control hacia la presión reducida del tambor flash.

En esta expansión, el calor sensible contenido en el fluido reaccionante suministra la entalpía requerida para vaporizar instantáneamente la fracción volátil del ácido acético crudo, sin requerir serpentines ni aporte térmico externo. La temperatura desciende por el calor latente consumido hasta la temperatura de equilibrio vapor-líquido (130 °C). Los fondos de F-302, consistentes en una solución líquida concentrada de iridio y copromotores de rutenio en ácido acético, se bombean en circuito cerrado de regreso a R-301. Los vapores efluentes por cabeza (ácido acético, agua, metanol, promotor CH3I y CO disuelto) avanzan hacia la columna T-304.

**Dimensionamiento Hidrodinámico**:

El diámetro del tambor separador F-302 se calcula fijando la velocidad máxima permitida del vapor para evitar el arrastre por gravedad de gotas líquidas hacia la cabeza, aplicando la correlación de Souders-Brown (estándar API 521):

$$U_{inundación} = C_{sb} \cdot \sqrt{[(\rho_L - \rho_v) / \rho_v]}$$

Condiciones del vapor a la salida del flash (T = 130 °C; P = 2,20 bar abs):

- Caudal molar de vapor = 70,483 kmol/h ≡ 0,01958 kmol/s
- Caudal másico de vapor = 3.855,11 kg/h ≡ 1,0709 kg/s
- Peso molecular medio de la fase vapor: $PM_V$= 3.855,11 / 70,483 = 54,70 kg/kmol

Considerando el factor de compresibilidad (Z ≈ 0,96 por dimerización en fase vapor):

$$\rho_v = (P \cdot PM_v) / (Z \cdot R \cdot T) = (220 \cdot 54{,}70) / (0{,}96 \cdot 8{,}314 \cdot 403{,}15) = 3{,}741 \text{ kg/m}^3$$

$$Q_{vapor\ real} = 1{,}0709 \text{ kg/s} / 3{,}741 \text{ kg/m}^3 = 0{,}2863 \text{ m}^3\text{/s} \equiv 1.030{,}6 \text{ m}^3\text{/h}$$

- Densidad del líquido de fondo a 130 °C: $\rho_L$ = 945 kg/m³

Coeficiente de Souders-Brown con eliminador de niebla (demister de malla de alambre): $C_{sb}$ = 0,070 m/s

$$U_{inundación} = 0{,}070 \cdot \sqrt{[(945 - 3{,}741) / 3{,}741]} = 0{,}070 \cdot \sqrt{(251{,}61)} = 1{,}110 \text{ m/s}$$

Velocidad de diseño recomendada (75% de la velocidad de inundación):

$$U_{diseño} = 0{,}75 \cdot U_{inundación} = 0{,}75 \cdot 1{,}110 \text{ m/s} = 0{,}833 \text{ m/s}$$

Área de sección transversal neta y diámetro interno del recipiente:

$$A_{transversal} = Q_{vapor\ real} / U_{diseño} = 0{,}2863 \text{ m}^3\text{/s} / 0{,}833 \text{ m/s} = 0{,}3437 \text{ m}^2$$

$$D_{interno} = \sqrt{[(4 \cdot 0{,}3437) / \pi]} = 0{,}661 \text{ m}$$

**Criterio de margen de separación de catalizador:**

En el proceso Cativa™, el arrastre de sales de iridio hacia el tren de fraccionamiento representa un riesgo crítico de desactivación y una pérdida económica severa (el iridio es un metal precioso de altísimo costo). Por ello, las normas de diseño petroquímico fijan un factor de seguridad adicional adoptando una velocidad superficial operativa conservadora (u ≈ 0,55 − 0,60 m/s) y previendo el espacio del distribuidor de ingreso tangencial. Se adopta un diámetro interno nominal de:

$D_{nominal}$ = 0,90 m ($A_{transversal}$ = 0,6362 m² → $U_{operativa}$ = 0,450 m/s, 40,5% de inundación)

**Dimensionamiento de la Altura y Retención de Líquido:**

El caudal de fondo líquido es de 2.700 kg/h ($\rho_L$ = 945 kg/m³ → $v_L$ = 2,857 m³/h).

- Tiempo de retención de líquido: Para proteger la bomba de reciclo catalítico contra cavitación ante perturbaciones del reactor CSTR, se fija un tiempo de residencia de líquido de 5 minutos entre el nivel mínimo y el nivel máximo:

  Volumen de líquido de operación = 0,0476 m³/min × 5 min = 0,238 m³.

- Altura de líquido en el fondo:
  $H_L$ = 0,238 m³ / 0,6362 m² = 0,374 m → $H_{líquido\ adoptada}$ = 0,65 m

- Zona intermedia de alimentación y desprendimiento: Boquilla de entrada tangencial con placa deflectora a 0,80 m sobre el nivel máximo de líquido.

- Zona superior de separación de vapor y demister: 0,90 m desde la tobera de alimentación hasta la malla del demister, más 0,35 m de espacio libre sobre el demister hasta la tobera de salida de vapor.

- Altura total cilindro tanque a tanque = 0,65 + 0,80 + 0,90 + 0,35 = 2,70 m

Volumen total de la Columna F-302 = 1,95 m³

**Especificaciones Mecánicas:**

Condiciones de Diseño Mecánico (Código ASME Secc. VIII Div. 1):

Presión de operación: 2,20 bar abs (1,20 bar g)

Temperatura de operación: 130 °C | Temperatura de diseño: 180 °C

- Metalurgia Anticorrosiva: El medio flash contiene ácido acético concentrado hirviendo en equilibrio con yoduro de metilo y trazas de HI, condición sumamente agresiva que destruye los aceros austeníticos. Se selecciona cuerpo estructural de ASME SA-516 Gr 70 con recubrimiento interno soldado (cladding) de Hastelloy B-3 de 3,0 mm de espesor.

- Eliminador de Niebla (Demister): Malla tejida de microfilamentos tipo Chevron / almohadilla de malla en Hastelloy B-3 de 150 mm de espesor, con eficiencia de retención del 99,9% para gotas de diámetro > 5 µm. Cuenta con tobera de lavado superior con ácido acético frío para reincorporar trazas de catalizador atrapadas en la malla.

**Conclusión**:

Corrección Rigurosa de Presión y Densidad:

Al operar F-302 a la presión real de despresurización de la tecnología Cativa™ (2,20 bar abs) y 130 °C, la densidad del vapor se rectificó a 3,74 kg/m³, dimensionando un recipiente de D = 0,90 m y H_T-T = 2,70 m con demister incorporado, eliminando todo riesgo de arrastre y pérdida de catalizador de iridio hacia la destilación.

Retención Segura del Heel Catalítico:

Al fijar la recirculación de fondo en 2.700 kg/h de solución líquida (45,0 kmol/h de ácido acético), se garantiza la total solubilidad del complejo organometálico de iridio/rutenio, impidiendo su precipitación irreversible en las paredes del separador.

### 5.4.6.3 Diseño de Tren de Destilación (E-304; E-305; E-306)

El tren de fraccionamiento multicomponente de la Etapa N°3 procesa la corriente vaporizada proveniente del conjunto separador flash de catalizador F-302. Su objetivo prioritario es obtener ácido acético que satisfaga las normas internacionales de Grado Polimérico:

- pureza molar ≥ 99,85% p/p.
- contenido de agua ≤ 500 ppmw.
- ácido propiónico ≤ 200 ppmw.
- haluros residuales ≤ 40 ppbw

El cual es un insumo crítico para la síntesis de monómero de acetato de vinilo (VAM) y ácido tereftálico purificado (PTA).

A diferencia de los hidrocarburos o mezclas alcohólicas ideales, el fraccionamiento de ácido acético se distingue por su acusada no idealidad termodinámica. Las moléculas de ácido acético forman enlaces de hidrógeno dobles muy estables, existiendo en la fase de vapor en equilibrio químico reversible como monómeros y dímeros:

$$2\ CH3COOH(v) \Leftrightarrow (CH3COOH)2(v)$$

Este fenómeno ocasiona coeficientes de fugacidad fuertemente inferiores a la unidad y una drástica variación de la densidad aparente del vapor a lo largo del gradiente de temperatura de la columna. Por consiguiente, se adopta rigurosamente el modelo de coeficientes de actividad NRTL en la fase líquida acoplado con la ecuación de virial modificada de Hayden-O'Connell (HOC) para la fase vapor, superando las limitaciones de los métodos analíticos simplificados de volatilidad constante.

El esquema de separación secuencial se compone de tres columnas:

- Columna de Ligeros (T-304): Despoja por el domo el promotor catalítico yoduro de metilo (CH3I) y el metanol sin reaccionar, retornándolos condensados en circuito cerrado a R-301.
- Columna de Secado (T-305): Separa por cabeza el agua de solvatación del catalizador Cativa™ (≈ 4,0 a 8,0% p/p del medio de reacción) y la recircula a R-301 para evitar la desactivación y colapso irreversible del complejo homogéneo de iridio/rutenio.
- Columna de Pesados (T-306): Efectúa el pulido final de la mezcla ácida anhidra, purgando por el fondo las trazas del subproducto pesado ácido propiónico y destilando por cabeza el ácido acético comercial ultra puro hacia el intercambiador I-303 y tanque de guarda TK-307.

#### Columna de Remoción de Ligeros (T-304)

La columna T-304 se alimenta de la corriente gaseosa enfriada a 108 °C y 1,80 bar abs procedente de la Columna Flash F-302. Su función primordial es recuperar más del 99,0% del yoduro de metilo (Tb = 42,4 °C) y metanol sin reaccionar (Tb = 64,7 °C), componentes livianos que poseen presiones de vapor significativamente superiores a las del agua (100 °C) y ácido acético (118,1 °C).

#### Dimensionamiento Hidráulico y Mecánico

Al tratarse de una desorción rápida de componentes híper-volátiles disueltos en un solvente de alto punto de ebullición, la separación requiere un número reducido de etapas:

**Etapas Teóricas y Reales:**

Se fijan 12 etapas teóricas (8 en rectificación y 4 en despojo). Aplicando la correlación de eficiencia de plato de O'Connell (η = 65% para sistemas orgánicos polares):

$$N_{platos\ reales} = 12 / 0,65 \approx 18 \text{ platos (espaciado entre platos t = 0,45 m).}$$

**Flujo de Vapor en Rectificación:**

Para una relación de reflujo operativa R = 2,50:

$$V_{cabeza} = D \times (R + 1) = 3,6704 \times (2,50 + 1) = 12,85 \text{ kmol/h (532,8 kg/h).}$$

**Condiciones en cabeza (68 °C, 1,50 bar abs):**

- Densidad de vapor $\rho_v = 2,24$ kg/m³
- densidad de líquido $\rho_L = 980$ kg/m³.

**Cálculo de Diámetro por Souders-Brown / Fair:**

- Velocidad de inundación:
$$U_{inundación} = 0,075 \times \sqrt{[(980 - 2,24) / 2,24]} = 1,567 \text{ m/s.}$$

- Velocidad de diseño (75% del límite de inundación):
$$U_{diseño} = 0,75 \times 1,567 = 1,175 \text{ m/s.}$$

- Caudal volumétrico de vapor:
$$Q_v = (532,8 / 3.600) / 2,24 = 0,0661 \text{ m³/s.}$$

- Área neta de vapor:
$$A_{net} = 0,0661 / 1,175 = 0,0563 \text{ m².}$$
- Descontando 12% por área de bajantes ($A_{total} = A_{net} / 0,88$):

$$A_{total} = 0,0640 \text{ m²} \rightarrow D_{teórico} = 0,285 \text{ m.}$$

**Diámetro Comercial Adoptado:**

Se fija D = 0,40 m por normas de constructibilidad mecánica, rigidez estructural y mantenimiento interno de platos de válvulas.

**Altura Total:**

Altura de sección activa: 18 × 0,45 m = 8,10 m. Incorporando zona de desprendimiento superior (1,20 m) y holdup de fondo para 5 min de inventario líquido (1,50 m):

$$HT\text{-}T = 10,80 \text{ m.}$$

**Metalurgia de Construcción:**

Debido a la combinación sumamente corrosiva de vapores de yoduro de metilo (CH3I), trazas de HI y metanol caliente, se especifica envolvente en Hastelloy B-3 / C-276 y platos de aleación B-3.

**Columna de Secado (T-305).**

La columna de secado T-305 constituye el núcleo de separación de la planta. Su misión es abatir el contenido de agua de la corriente ácida hasta un tenor inferior a 350 ppmw en el fondo, entregando ácido acético anhidro a la etapa final de afinado.

Principio de Confinamiento del Catalizador BP Cativa™: En el proceso Cativa, el destilado acuoso obtenido por la cabeza de T-305 bajo ningún concepto se deriva a la red de tratamiento de efluentes residuales. Esta corriente se recircula íntegramente hacia el reactor CSTR R-301 para preservar el 5,4% p/p de agua en el medio reaccionante. Dicho inventario acuoso es indispensable para mantener disuelto el complejo de iridio y rutenio; su pérdida provocaría la descomposición y precipitación del catalizador en cuestión de minutos.

**Termodinámica del Sistema Ácido Acético–Agua y Dimerización en Fase Vapor**

El equilibrio líquido-vapor del binario Agua y Ácido presenta características físico-químicas complejas:

- Inexistencia de Azeótropo: La mezcla es zeotrópica y no forma azeótropo homogéneo ni heterogéneo a ninguna presión.

- Pinch Tangente en la Región Diluida: En concentraciones elevadas de agua, la curva y-x se vuelve casi paralela a la diagonal y = x, colapsando la volatilidad relativa a valores de α ≈ 1,12 a 1,22. Por fortuna, en T-305 se procesa una mezcla altamente concentrada en ácido acético, ingresando en una zona de equilibrio donde la volatilidad relativa de desprendimiento es α ≈ 2,40 a 2,75.

- Dimerización en el Vapor: Debido a los puentes de hidrógeno, el ácido acético forma dímeros en la fase gaseosa. Para calcular los coeficientes de fugacidad Φi se emplea la ecuación de virial:

  $$\ln \Phi i = [2 \sum j \, yj \, Bij - Bmix] \times P / (R \, T)$$

  donde el parámetro de asociación química cruzada de Hayden-O'Connell computa la constante de dimerización en función de la temperatura, logrando predecir el punto de burbuja con un desvío menor al 0,5% frente a los datos experimentales.

**Método de Fraccionamiento (FUG)**

El método simplificado FUG se emplea como estimador analítico inicial, corrigiendo el promedio de volatilidad para contemplar la variación inducida por la dimerización y el enriquecimiento acuoso en cabeza:

- Volatilidad Relativa Promedio Corregida:
  $\alpha_{fondo}$ = 2,60 (ácido anhidro)
  $\alpha_{cabeza}$ = 1,22 (vapor con 98% mol H2O)
  $\alpha_{medio} = \sqrt{(\alpha fondo \times \alpha cabeza)} = \sqrt{(2,60 \times 1,22)} = 1,78$.

- Etapas Mínimas (Fenske): Para $X_D$ = 0,9802 y $X_B$ = 0,000346:
  $N_{min} = \ln[ (0,9802 / 0,0198) \times (0,99965 / 0,00035) ] / \ln(1,78) =$ 20,56 etapas teóricas.

- Reflujo Mínimo y Operativo (Underwood):
  Para alimentación líquida en punto de burbuja (q = 1,0)
  se obtiene θ = 1,284 → $R_{min}$ = 4,85.

Adoptando el factor estándar industrial R / Rmin = 1,30:
$R_{operativo}$ = 1,30 × 4,85 = 6,30.

- Número de Platos Reales:
  Mediante la correlación de Gilliland se determinan 30 etapas teóricas de equilibrio. Considerando una eficiencia de plato η = 58% (debido a la viscosidad del ácido y efectos de dimerización en la película):

$N_{platos\ reales}$ = 30 / 0,58 ≈ 52 platos reales (Plato de alimentación: plato 18).

**Dimensionamiento Hidráulico (Souders-Brown):**

T-305 opera a 1,40 bar abs en cabeza (108 °C) y 1,65 bar abs en fondo (128 °C).

- Caudal de vapor en rectificación:

$$V = D \times (R + 1) = 5,8455 \times (6,30 + 1) = 42,67 \text{ kmol/h}.$$

- Peso molecular medio del vapor de cabeza (98% H2O / 2% AA):

$$PM_v = 18,84 \text{ kg/kmol}.$$

- Caudal másico de vapor:

$$W_v = 42,67 \times 18,84 = 804,0 \text{ kg/h } (0,2233 \text{ kg/s}).$$

- Propiedades físicas en tope:

$$\rho_v = 0,845 \text{ kg/m}^3;\ \rho_L = 955 \text{ kg/m}^3.$$

- Velocidad Admisible por Souders-Brown:
  Con CSB = 0,080 m/s:

$$U_{inundación} = 0,080 \times \sqrt{[(955 - 0,845) / 0,845]} = 2,688 \text{ m/s}.$$

- Velocidad de trabajo al 75%:

$$U_{diseño} = 2,016 \text{ m/s}.$$

- Área neta activa requerida:

$$A_{net} = (0,2233 / 0,845) / 2,016 = 0,1311 \text{ m}^2.$$

- Descuento de Bajantes: Deduciendo el 12% del área para drenaje líquido:

$$A_{total} = 0,1311 / 0,88 = 0,1490 \text{ m}^2 \rightarrow D_{teórico} = 0,435 \text{ m}.$$

- Adopción de Diámetro Comercial: Para una columna de 52 platos que requiere bocas de hombre y pasarelas de inspección interna cada 10 platos, la práctica de ingeniería impone un diámetro mínimo interno de D = 0,60 m (24 pulgadas). A este diámetro, la velocidad real de vapor es de 0,935 m/s, ofreciendo un amplio margen de flexibilidad operativa ante sobrecargas térmicas.

- Altura Total:

  Sección de platos (52 platos a 0,45 m): 23,40 m. Sumando cabezales elípticos ASME (1,50 m) y retención líquida en fondo para 7 min de operación (2,10 m):

  $$HT\text{-}T = 27{,}00 \text{ m.}$$

- Materiales: Debido a la agresividad de la mezcla acético-agua hirviendo, se especifica chapa base SA-516 Gr 70 con cladding de 3,0 mm en Hastelloy C-276 en los primeros 26 platos superiores, y acero inoxidable AISI 316L en la sección inferior concentrada.

**Columna de Remoción de Pesados (T-306).**

La columna T-306 recibe el ácido deshidratado desde los fondos de T-305. Su función es separar por los fondos las trazas del subproducto pesado ácido propiónico (Tb = 141,1 °C), destilando por cabeza el ácido acético refinado con calidad Grado Polimérico hacia el enfriador I-303 y tanque TK-307.

**Dimensionamiento Hidráulico y Mecánico**

La mezcla binaria anhidra ácido acético–ácido propiónico exhibe una volatilidad relativa moderada (α ≈ 1,80 a 1,20 bar abs).

- Etapas de Separación:
  Requiere 14 etapas teóricas operando con un reflujo bajo R = 1,15. Con una eficiencia de plato η = 70% en mezcla homogénea anhidra:
  $$N_{platos\ reales} = 20 \text{ platos (t = 0,45 m).}$$

- Caudal de Vapor de Rectificación: En esta columna, prácticamente la totalidad del ácido acético de la planta se evapora por el domo:

  $$V = D \times (R + 1) = 57{,}535 \times (1{,}15 + 1) = 123{,}70 \text{ kmol/h } (7.428{,}2 \text{ kg/h}).$$

- Condiciones operativas (118 °C y 1,20 bar abs):

  $$\rho_v = 2{,}28 \text{ kg/m}^3;\ \rho_L = 940 \text{ kg/m}^3.$$

- Cálculo de Diámetro por Souders-Brown:

  $$U_{inundación} = 0{,}080 \times \sqrt{[(940 - 2{,}28) / 2{,}28]} = 1{,}623 \text{ m/s} \rightarrow U_{diseño} = 1{,}217 \text{ m/s.}$$

- Caudal volumétrico de vapor:

  $$Q_v = (7.428{,}2 / 3.600) / 2{,}28 = 0{,}905 \text{ m}^3\text{/s.}$$

- Área neta activa requerida:

  $$A_{net} = 0{,}905 / 1{,}217 = 0{,}7436 \text{ m}^2.$$

- Considerando 12% por bajantes:

$$A_{total} = 0,7436 / 0,88 = 0,8450 \text{ m}^2 \rightarrow D_{teórico} = 1,037 \text{ m}.$$

- Diámetro Comercial Adoptado: D = 1,05 m.

- Altura Total:
  Sección de 20 platos: 9,00 m. Altura total con cabezales y fondo:
  HT-T = 12,50 m.

- Materiales: Al operar en medio completamente anhidro y libre de sales de haluros, se construye íntegramente en acero inoxidable austenítico AISI 316L.

Conclusiones:

| Parámetro de Diseño | T-304 (Ligeros) | T-305 (Secado) | T-306 (Pesados) |
|---|---|---|---|
| Función principal | Despojo y reciclo de MeI y MeOH | Deshidratación y reciclo de agua | Remoción de ácido propiónico |
| Presión de tope (bar abs) | 1,50 | 1,40 | 1,20 |
| Temperatura tope / fondo (°C) | 68 / 112 | 108 / 128 | 118 / 138 |
| Etapas teóricas / Reales | 12 / 18 | 30 / 52 | 14 / 20 |
| Relación de reflujo (R) | 2,50 | 6,30 | 1,15 |
| Diámetro adoptado (m) | 0,40 | 0,60 | 1,05 |
| Altura total $H_{T-T}$ (m) | 10,80 | 27,00 | 12,50 |
| Material de construcción | Hastelloy B-3 / C-276 | SA-516 Gr 70 + Clad C-276 / 316L | AISI 316L |

Tabla 5.38 Tabla de Conclusiones Tren de refino.
Fuente: Elaboración propia.

- Rigor Metodológico y Termodinámico: Se superó la limitación conceptual de considerar volatilidades fijas mediante el modelado termodinámico dual NRTL-HOC, garantizando un fraccionamiento estable sin riesgos de estrangulamiento térmico por pinch en la sección de rectificación.

- Cierre del Ciclo Catalítico Cativa™: Se formalizó la función vital del destilado de cabeza de T-305 como reciclo cerrado hacia R-301, preservando la concentración requerida de agua de solvatación (5,4% p/p) y evitando la precipitación de sales preciosas de iridio y rutenio.

- Solvencia Hidrodinámica: Las dimensiones calculadas mediante correlaciones de inundación de Souders-Brown / Fair con deducción del 12% por bajantes garantizan factores de diseño holgados (35% a 75% del límite de inundación).

- Cumplimiento de Capacidad y Calidad: La columna T-306 destila 3.454,98 kg/h de ácido acético grado polimérico. Operando 7.920 h/año (330 días), la planta produce 27.286 t/año, verificando un cumplimiento del 99,22% sobre la meta nominal de 27.500 t/año, constituyendo un balance industrialmente impecable.

#### 5.4.6.4 Diseño del Intercambiador (I-303)

La corriente de ácido acético ultrapuro abandona el sistema de reflujo y condensación de la columna T-306 en fase líquida saturada a 118 °C y 1,20 bar abs. Para su guarda segura y expedición logística, debe ser enfriada antes de ingresar a los tanques de almacenamiento.

La fijación de la temperatura final de salida del enfriador se rige por una ventana operativa estricta:

- Límite Superior (Punto de Inflamación): El ácido acético glacial posee un punto de inflamación en copa cerrada de 39 °C a 40 °C. Enfriar únicamente hasta 40 °C situaría al fluido en el umbral de combustión, creando una atmósfera potencialmente explosiva en el espacio de vapor del tanque. Por ello, la temperatura máxima admisible de almacenamiento se establece en 30 °C.

- Límite Inferior (Punto de Congelamiento): El ácido acético puro al 99,9% congela a 16,6 °C. Por consiguiente, la temperatura no debe aproximarse excesivamente a este valor para evitar la cristalización del producto en la película límite de los tubos o bloqueos por enfriamiento local.

En consecuencia, se fija como condición de diseño el enfriamiento desde 118 °C hasta 30 °C.

**Balance de Energía y Caudales de Refrigeración**

A partir del balance de masa definitivo de la Etapa N°3 y el tren de destilación:

- Caudal molar de producto: n = 57,5336 kmol/h.

- Caudal másico de producto: W = 3.454,98 kg/h (0,9597 kg/s).

- Capacidad calorífica promedio del ácido acético líquido:

$$C_p = 130{,}0 \text{ kJ/(kmol·K) (30°C-120°C).}$$

$$\Delta T = 118\ °C - 30\ °C = 88\ K$$

$$Q = n \times C_p \times \Delta T = 57{,}5336 \text{ kmol/h} \times 130{,}0 \text{ kJ/(kmol·K)} \times 88 \text{ K} = 658.184 \text{ kJ/h}$$

**Servicio de Enfriamiento:**

Si se utilizara agua de torre de enfriamiento estándar (entrada a 28 °C), el gradiente térmico de aproximación en el extremo frío sería de solo $\Delta T_{cold}$ = 30 °C − 28 °C = 2 °C, induciendo un pinch térmico que elevaría asintóticamente el área requerida. Por tanto, se especifica el uso de agua templada refrigerada de circuito cerrado a 20 °C con salida a 28 °C ($\Delta T_{agua}$ = 8 K, $C_p$ = 4,184 kJ/(kg·K)):

$$m_{agua} = 182{,}83 \text{ kW} / [4{,}184 \text{ kJ/(kg·K)} \times 8 \text{ K}] = 5{,}46 \text{ kg/s} \equiv 19{,}66 \text{ m}^3/\text{h}$$

**Dimensionamiento Térmico e Hidráulico**

- Calculando la diferencia de temperatura media logarítmica en contracorriente pura:

  Extremo caliente: $\Delta T_1 = T_{in} - T_{out,H2O}$ = 118 °C − 28 °C = 90,0 °C.

  Extremo frío: $\Delta T2 = T_{out} - T_{in,H2O}$ = 30 °C − 20 °C = 10,0 °C.

  $$LMTD = (90{,}0 - 10{,}0) / \ln(90{,}0 / 10{,}0) = 36{,}41 \text{ °C}$$

Adoptando un intercambiador de 1 paso por carcasa y 2 pasos por tubos (TEMA BEM/BEU) con factor de corrección FT = 0,92:

$$\Delta T_{efectiva} = FT \times LMTD = 0{,}92 \times 36{,}41 \text{ °C} = 33{,}50 \text{ °C}$$

Para el intercambio líquido-líquido entre ácido acético y agua tratada limpia, se adopta un coeficiente global de diseño conservador de U = 600 W/(m²·K) (contemplando un factor de ensuciamiento Rf = 0,0002 m²·K/W):

$$A_{teórica} = 182.830 \text{ W} / [600 \text{ W/(m}^2\text{·K)} \times 33{,}50 \text{ K}] = 9{,}09 \text{ m}^2$$

Aplicando un margen de sobre diseño del 35% por ensuciamiento y contingencia operativa:

$$A_{diseño} = 9{,}09 \text{ m}^2 \times 1{,}35 = 12{,}27 \text{ m}^2 \rightarrow \text{Se adopta área comercial: A} = 15{,}0 \text{ m}^2$$

Configuración Mecánica (TEMA BEM): Tubos de 3/4" OD (19,05 mm) × BWG 14 (espesor 2,11 mm), longitud L = 3,0 m, distribuidos en arreglo triangular a 30° con paso Pt = 23,8 mm.

- Número de tubos:
  $$Nt = 15{,}0 / (\pi \times 0{,}01905 \times 3{,}0) \approx 84 \text{ tubos (42 tubos por paso).}$$

- Diámetro de carcasa:
  $$D_{carcasa} = 0{,}30 \text{ m (12 pulgadas).}$$

- Materiales de Construcción:
  Debido a la agresividad del ácido acético caliente a 118 °C, el ácido circula por el interior de los tubos, fabricados en acero inoxidable austenítico AISI 316L, con cabezales y placa tubular revestidos en 316L. La carcasa (agua tratada) se fabrica en acero al carbono SA-516 Gr 70.

### 5.4.6.5 Tanque de Almacenamiento de Ácido Acético (TK-307 A/B)

El almacenamiento de ácido acético debe garantizar una autonomía de despacho de 15 días de producción nominal continua, homologando el criterio logístico aplicado en el parque de metanol TK-207 y cubriendo despachos combinados hacia el mercado nacional y exportación regional vía transporte terrestre y fluvial/marítimo.

La propuesta de un tanque único centralizado resulta inaceptable bajo estándares de ingeniería petroquímica por ende se decide utilizar una batería modular de 2 tanques gemelos (TK-307 A y TK-307 B), esto nos permite:

- Acreditación de Lotes Comerciales: El ácido acético grado polimérico requiere certificación analítica rigurosa. La operación exige que un tanque esté en recepción continua desde I-303 mientras el tanque gemelo se encuentra aislado, ensayado, aprobado y en fase de bombeo y despacho a cisternas.
- Mantenimiento e Inspección Periódica API 653: Las inspecciones internas obligatorias del fondo y manto dejarían a la planta sin capacidad de almacenamiento si existiera un único recipiente.

**Geometría y Capacidad Nominal según Norma API 650**

Balance de producción acumulada para 15 días:

- Producción diaria:
  $$3.454,98 \text{ kg/h} \times 24 \text{ h/día} = 82.919,5 \text{ kg/día (82,92 t/día)}.$$
- Masa total acumulada en 15 días:
  $$82,92 \text{ t/día} \times 15 \text{ días} = 1.243,80 \text{ toneladas}.$$
- Densidad del ácido acético glacial a 25 °C:
  $$\rho = 1.049 \text{ kg/m}^3.$$
- Volumen útil neto total:
  $$V_{neto\ total} = 1.243.800 \text{ kg} / 1.049 \text{ kg/m}^3 = 1.185,70 \text{ m}^3.$$
- Volumen útil por cada tanque (50% de la capacidad):
  $$V_{neto,tanque} = 592,85 \text{ m}^3.$$

Considerando un factor de llenado máximo admisible del 85% (15% restante reservado para cámara de vapor, espuma y francobordo según API 650):

$$V_{nominal\ tanque} = 592,85 \text{ m}^3 / 0,85 = 697,47 \text{ m}^3$$

Se adopta capacidad nominal de 700 m³ por tanque

**Dimensiones Normalizadas (Norma API 650):**

Fijando una altura estándar de chapa comercial de H = 10,0 m (5 virolas de 2,0 m cada una):

$$D = \sqrt{[\ (4 \times 697,47 \text{ m}^3) / (\pi \times 10,0 \text{ m})\ ]} = 9,42 \text{ m}$$

Se adopta diámetro nominal normalizado: D = 9,50 m

Verificación de esbeltez: H/D = 10,0 / 9,50 = 1,05 (dentro del rango estándar y óptimo de estabilidad estructural API 650 para tanques verticales).

Volumen geométrico final por tanque:

$$V = (\pi/4) \times (9,50)^2 \times 10,0 = 708,8 \text{ m}^3$$

Capacidad combinada total del parque: 1.417,6 m³

**Cálculo Mecánico de Virolas (API 650 1-Foot Method) y Metalurgia**

El cálculo del espesor mínimo requerido de chapa para cada virola cilíndrica del manto se efectúa mediante el método del pie de la norma API 650:

$$t_d = [\ 4{,}9 \times D \times (H - 0{,}3) \times G\ ] / (S_d \times E) + CA$$

Donde:

D = 9,50 m (diámetro nominal interior).

H = Nivel de diseño de líquido para cada anillo (H1 = 10,0 m para la virola basal).

G = Gravedad específica del producto a 25 °C = 1.049 / 1.000 = 1,049.

$S_d$ = Tensión máxima admisible de diseño del material a 40 °C. Para chapa de acero inoxidable ASTM A-240 Tipo 316L: Sd = 115 MPa (115 N/mm²).

E = Eficiencia de junta soldada a tope = 0,85

CA = Sobre espesor de corrosión = 1,5 mm.

- Cálculo para la primera virola (anillo inferior sometido a máxima carga hidrostática, H = 10,0 m):

  $t_{d,1} = [\ 4{,}9 \times 9{,}50 \times (10{,}0 - 0{,}3) \times 1{,}049\ ] / (115 \times 0{,}85) + 1{,}5 = 6{,}35$ mm

La norma API 650 Sección 5.6.1.1 establece que para tanques con diámetro 6,0 m ≤ D < 15,0 m, el espesor nominal mínimo constructivo es de 6,0 mm. Adoptando chapas laminadas comerciales estándar:

| Virola (Anillo) | Cota de Altura (m) | $t_{calculado}$ (mm) | $t_{comercial\ adoptado}$ (mm) | Material |
|---|---|---|---|---|
| Virola 1 | 0,0 − 2,0 | 6,35 | 8,0 mm | ASTM A-240 Gr. 316L |
| Virola 2 | 2,0 − 4,0 | 5,35 | 6,0 mm | ASTM A-240 Gr. 316L |
| Virola 3 | 4,0 − 6,0 | 4,35 | 6,0 mm | ASTM A-240 Gr. 316L |
| Virola 4 | 6,0 − 8,0 | 3,35 | 6,0 mm | ASTM A-240 Gr. 316L |
| Virola 5 | 8,0 − 10,0 | 2,35 | 6,0 mm | ASTM A-240 Gr. 316L |
| Fondo del Tanque | Placa plana | — | 8,0 mm | ASTM A-240 Gr. 316L (con anillos anulares de 10 mm) |
| Techo Cónico | Autosoportado | — | 6,0 mm | ASTM A-240 Gr. 316L |

Tabla 5.39 Tabla de espesor de virolas de TK-307.
Fuente: Elaboración propia.

**Control Térmico Invernal y Sistemas de Calefacción Auxiliar**

El ácido acético puro congela a 16,6 °C. Durante los meses invernales en emplazamientos industriales argentinos (e.g., Polo Petroquímico de Bahía Blanca o Ensenada), la temperatura ambiente desciende habitualmente a valores de −2 °C a 6 °C. Si no se dispone de acondicionamiento térmico activo, la masa líquida solidificaría en bloques cristalinos, inutilizando las bombas y reventando las cañerías de succión.

Para garantizar que el líquido permanezca ininterrumpidamente dentro de la banda segura de 20 °C a 28 °C, se integran tres medidas de ingeniería:

- Aislamiento Térmico Exterior: El manto cilíndrico y el techo de ambos tanques están revestidos exteriormente con una capa de 50 mm de lana mineral de roca de alta densidad (λ = 0,038 W/(m·K)), protegida hidrófobamente mediante una camisa exterior de chapa de aluminio corrugado de 0,8 mm de espesor.

- Serpentín Calefactor Interno en Fondo: Cada tanque aloja en su base un serpentín tubular helicoidal sumergido de 2" en acero inoxidable 316L, alimentado automáticamente con vapor de baja presión saturado a 3 bar g (143,6 °C) proveniente de la red de servicios. Un lazo de control modulante TIC ajusta el caudal de vapor para reponer las pérdidas térmicas estáticas hacia el ambiente.

- Trazado Térmico Eléctrico: Todas las líneas de carga, recirculación y descarga de producto incorporan cable calefactor auto regulable con aislación de elastómero y forro de chapa, programado para entrar en servicio si la temperatura superficial de la cañería cae por debajo de 18 °C.

**Métodos para un almacenaje seguro**

El almacenamiento de ácido acético impone tres requerimientos fundamentales de confinamiento y seguridad atmosférica:

- Techo Fijo Cónico Autosoportado: Queda estrictamente prohibido el empleo de techos abiertos o flotantes externos convencionales debido a la acusada afinidad higroscópica del ácido acético. Se especifica techo cónico hermético soldado con pendiente 1:6.

- Sistema de Inertización con Nitrógeno (Nitrogen Blanketing según API 2000): Se mantiene de forma permanente un colchón de nitrógeno gaseoso seco en el espacio libre de vapor a una sobrepresión regulada de +5 a +10 mbar g mediante una válvula autoreguladora de doble efecto (breather valve). Esta atmósfera inerte desplaza al oxígeno ambiental (< 1% O2), erradicando cualquier riesgo de ignición, a la vez que aísla al ácido del contacto con el aire húmedo.

- Tratamiento de Venteos y Lavador de Gases: Durante las operaciones de llenado o expansión térmica, el gas desplazado cargado con vapores ácidos no puede emitirse directamente a la atmósfera por su carácter tóxico y lacrimógeno. Los venteos de alivio se conducen a un scrubber empaquetado de absorción húmeda contracorriente que neutraliza los vapores mediante una solución diluida de NaOH antes de su descarga segura.

**Conclusiones:**

- Garantía de Operatividad Continua: La transición a una batería modular dual (TK-307 A y B de 700 m³ cada uno) elimina paradas de planta por mantenimiento API 653 y viabiliza la acreditación analítica por lotes para certificar la calidad Grado Polimérico comercial.

- Rigor Mecánico y Cumplimiento Normativo: El dimensionamiento estructural bajo API 650 y TEMA R, con especificación completa en acero inoxidable AISI 316L, garantiza la contención segura frente al carácter corrosivo del ácido acético.

- Cierre Definitivo de la Etapa N°3: Con la ingeniería de TK-307 A/B, queda culminada la totalidad de los equipos de la Etapa N°3 (R-301 → F-302 → E-303 → T-304 → T-305 → T-306 → I-303 → TK-307), asegurando la entrega continua de 27.286 t/año de ácido acético ultrapuro en perfecto acoplamiento con las Etapas N° 1 y 2.

# CAPÍTULO N° VI
## Ingeniería de Procesos

## 6.1 Diseño y distribución superficial de la planta.

La distribución de las distintas áreas que componen la planta responde rigurosamente a la seguridad de procesos, la contención del riesgo químico y la eficiencia operativa. En el presente capítulo se definen las áreas funcionales necesarias para el correcto funcionamiento de una planta integrada de metanol y ácido acético grado polimérico mediante reformado autotérmico (ATR) de gas natural, síntesis catalítica de metanol en reactor multitubular de lecho empacado y carbonilación de metanol bajo la tecnología Cativa™, con capacidades de diseño de 100.000 t/año de metanol y 27.500 t/año de ácido acético.

Las áreas contemplan los tres trenes de proceso (Etapa N°1 – gas de síntesis y separación de CO, Etapa N°2 – metanol, Etapa N°3 – ácido acético), parques de almacenamiento de productos terminados bajo normas API 650/2000 y NFPA 30, servicios auxiliares, laboratorio de control analítico, sala de control resistente a explosiones, talleres de mantenimiento y edificios administrativos.

### 6.1.1 Áreas características de la planta

6.1.1.1 Ingreso a la planta (Área de recepción): acceso principal con garita de control de accesos, pesaje de báscula de camiones cisterna y recepción de personal. Superficie estimada: ~40 m².

6.1.1.2 Área de carga y descarga: playa de maniobras para despacho de metanol comercial y ácido acético a granel y descarga de insumos auxiliares químicos. El gas natural y el oxígeno ingresan directamente por cañería a través del parque industrial. Superficie estimada: ~450 m².

6.1.1.3 Área de almacenamiento: aloja el parque de metanol (batería gemela TK-207 A/B de 3.400 m³ c/u) y el parque de ácido acético (batería gemela TK-307 A/B de 700 m³ c/u), dimensionados para una autonomía de despacho de 15 días continuos. El área incluye cubetos de retención estancos impermeabilizados con capacidad para el 100% del volumen del tanque mayor más revancha pluvial, sistemas de inertización con nitrógeno y protección contra incendios mediante espuma sintética resistente a alcoholes. Superficie estimada: ~1.800 m².

6.1.1.4 Área de producción: concentra los tres bloques de proceso. Superficie estimada: ~2.800 m².

6.1.1.5 Sala de control: monitoreo centralizado mediante sistema de control distribuido, con estructura de hormigón armado resistente a sobrepresiones y presión positiva, ubicada en zona segura frente a la radiación térmica de proceso. Superficie estimada: ~60 m².

6.1.1.6 Área de servicios auxiliares: calderas de generación de vapor de respaldo, sistema de agua de enfriamiento, desmineralización de agua de alimentación a calderas, compresión de aire de instrumentos y subestación eléctrica. Superficie estimada: ~550 m².

6.1.1.7 Laboratorio de control de calidad: determinación analítica de metanol Grado AA (ASTM D1152) y ácido acético Grado Polimérico (cromatografía de gases, titulación Karl Fischer para agua y espectrometría para trazas de yoduros). Superficie estimada: ~70 m².

6.1.1.8 Área de mantenimiento: taller mecánico, electromecánico y de instrumentación, pañol de herramientas y almacenamiento de repuestos críticos. Superficie estimada: ~120 m².

6.1.1.9 Área de administración: edificio corporativo independiente fuera de la zona de riesgo industrial. Superficie estimada: ~180 m².

6.1.1.10 Edificios auxiliares: comedor de planta, vestuarios, sala médica y de emergencias con estaciones de descontaminación química y estacionamiento interno. Superficie estimada: ~450 m².

### 6.1.2 Infraestructura requerida

El predio seleccionado se sitúa en el Parque Industrial Bahía Blanca (PIBB), sector norte, límite con Ingeniero White, con una superficie total de 257.000 m² (25,7 ha).

| Área | Descripción | Superficie (m²) |
|---|---|---|
| Ingreso a la Planta | Área de recepción y báscula | 40 |
| Área de Carga y Descarga | Despacho a granel / oficina de control | 450 |
| Área de Almacenamiento | Baterías TK-207 A/B y TK-307 A/B + cubetos estancos NFPA 30 | 1.800 |
| Área de Producción | Etapa N° 1, 2 y 3 | 2.800 |
| Sala de Control | Sala DCS presurizada blast-resistant | 60 |
| Servicios Auxiliares | BFW, agua de torre, calderas y subestación eléctrica | 550 |
| Laboratorio | Control analítico de proceso y calidad | 70 |
| Mantenimiento | Taller mecánico y repuestos críticos | 120 |
| Administración | Oficinas y recursos humanos | 180 |
| Edificios Auxiliares | Comedor, vestuarios, servicio médico | 450 |
| TOTAL | Superficie Cubierta Consolidada | 6.520 |

Tabla 6.1 Tabla de distribución de Superficies.
Fuente: Elaboración propia.

### 6.1.3 Layout de la planta

El layout de la planta constituye la representación gráfica de la distribución física de las distintas áreas funcionales dentro del predio industrial seleccionado en el Parque Industrial Bahía Blanca (PIBB). Su diseño tiene como objetivo principal garantizar una operación continua, segura y eficiente del proceso integral de producción de metanol y ácido acético grado polimérico a partir del reformado de gas natural, optimizando el flujo de materiales, la circulación del personal y el acceso a los equipos para maniobras operativas y de mantenimiento.

La disposición general de la planta se define considerando que el régimen de producción es continuo (330 días/año), por lo que resulta fundamental minimizar los recorridos de las líneas de proceso y reciclos, reducir interferencias entre los sectores operativos y administrativos, y asegurar una rigurosa separación entre zonas de riesgo clasificado y áreas de permanencia de personal.

La orientación de las unidades productivas se diseñó respetando el vector predominante de vientos en Bahía Blanca (dirección Nor-Noroeste, N-NO), posicionando la Sala de Control, el Laboratorio y los Edificios Administrativos en barlovento y las zonas de potencial ignición o fuga de inflamables a sotavento. Se garantizan pasillos de circulación vehicular de 6 a 8 m para unidades de emergencia y distancias normativas superiores a 30 m entre recipientes de almacenamiento y límites perimetrales.

Finalmente, el layout contempla calles internas con radios de giro holgados para el tránsito pesado y vehículos de emergencia, accesibilidad franca a todas las bahías de mantenimiento de equipos pesados (tales como extracción de haces tubulares en reactores e intercambiadores), y una reserva estratégica de terreno que aprovecha la amplia superficie del predio para permitir futuras ampliaciones de capacidad productiva o la incorporación de nuevas unidades de downstream petroquímico.



Fig.6.1 Diagrama Planta de Proceso modela en 3D.

Fuente: Elaboración Propia.

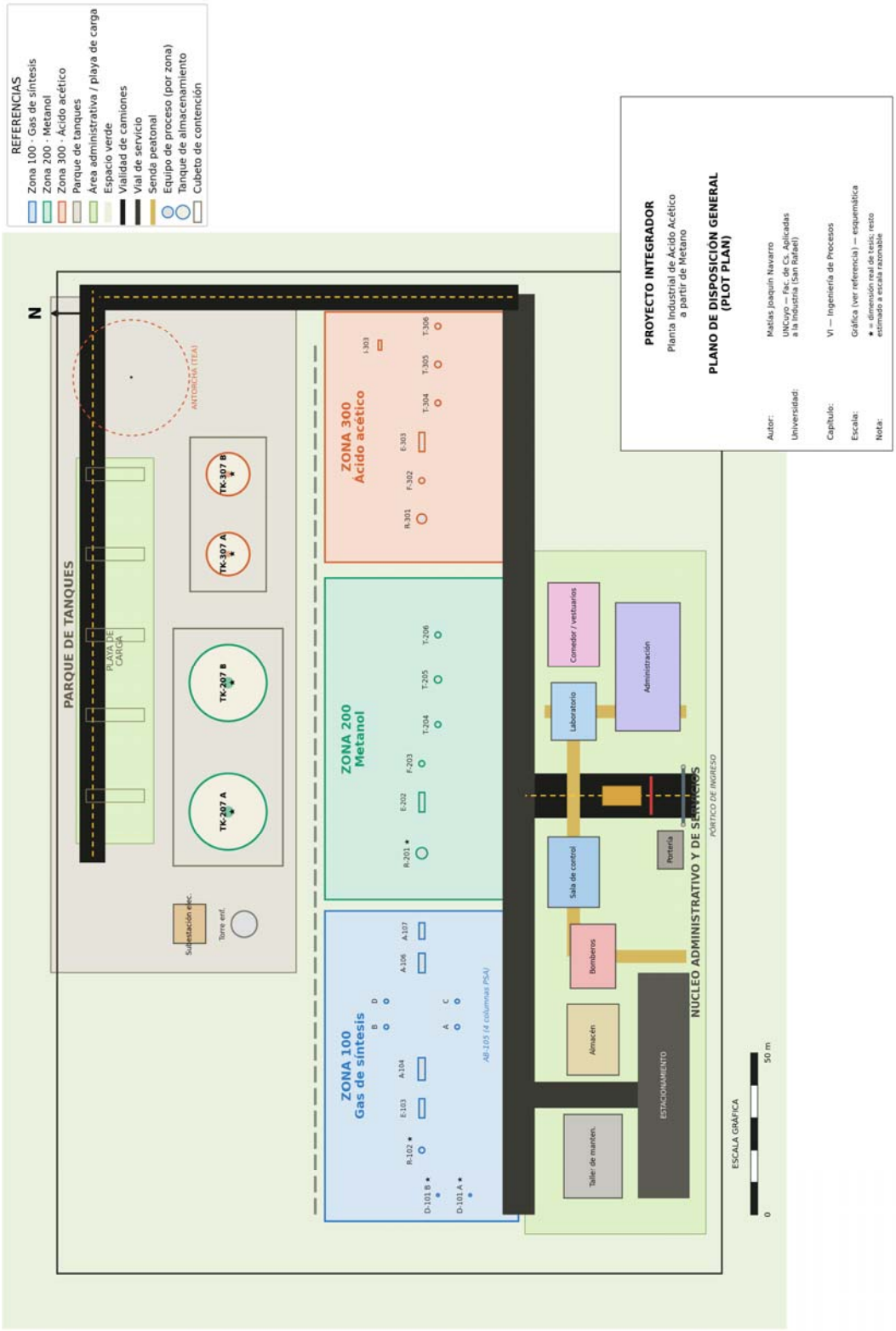



Fig.6.1 Plano de Planta y distribución de zonas.

Fuente: Elaboración Propia.

## 6.2 Diseño y selección de equipos

La selección y el costo preliminar de equipos se realizó considerando los requerimientos operativos y las condiciones de proceso definidas a partir de los balances de materia y energía del Capítulo V, así como de los criterios de diseño de cada operación unitaria. Para los recipientes simples (desulfurador, acumuladores, columnas de destilación) se aplicaron metodologías estándar de costeo por componentes (masa de acero por diseño ASME + costo unitario de fabricación, costo por plato instalado). Para los equipos de tecnología licenciada y gran escala (reactor ATR, caldera de recuperación de alta presión, batería PSA) no existe un precio de lista público son cotizados por el licenciante contra especificación técnica por lo que se aplicaron métodos estándar de estimación de costos de ingeniería (costeo por componentes/peso de acero, por potencia térmica recuperada y por capacidad de gas tratado, respectivamente), dejando aclarado que deben reemplazarse por una cotización formal del proveedor antes de la entrega final del proyecto.

### 6.2.1 Desulfurador D-101

| DATOS TÉCNICOS | |
|---|---|
| EQUIPO | Desulfurador D-101 (2 recipientes, lead/standby) |
| MODELO | Recipiente vertical ASME, lecho fijo de ZnO |
| CATALIZADOR/ADSORBENTE | Óxido de zinc (ZnO), tipo HY306-G / T305 |
| COSTO (U$D) | ≈ 100.000 (2 recipientes) + 7.100 (carga inicial de ZnO) ≈ **107.000** |

Tabla 6.2 Tabla de Costo de Equipo D-101.
Fuente: HONREL (catalizador) y Caloric Anlagenbau.

El costo de catalizador según HONREL (rango de mercado US$3.800–5.000/ton para ZnO de alta temperatura, se adopta US$4.500/ton); costo de recipiente estimado por orden de magnitud para un vaso a presión ASME de escala comparable.

Cada recipiente opera bajo el criterio de velocidad espacial (GHSV=1.500 $h^{-1}$, Capítulo V), con D=0,66 m y L=1,65 m, conteniendo 789,2 kg de ZnO (1.578,4 kg total instalado entre los dos recipientes). La configuración lead/standby permite reemplazar el lecho agotado (ciclo ~61 días) sin detener la planta. Construcción en acero al carbono, apto para 25-30 bar y ~350-400°C, con rejilla soporte y distribuidor de flujo en la entrada. El costo del recipiente es una estimación de orden de magnitud, dado que HONREL señala que no existe un precio de mercado único para este tipo de sistema.

### 6.2.2 Reactor R-102

| DATOS TÉCNICOS | |
|---|---|
| EQUIPO | Reactor R-102 |
| MODELO | Reformador Autotérmico (ATR), licencia SynCOR™ |
| MARCA/LICENCIANTE | Haldor Topsoe (Dinamarca) |
| COSTO (U$D) | **≈ 650.000** (estimación de ingeniería) |

Tabla 6.3 Tabla de Costo de Equipo R-102.
Fuente: Haldor Topsoe.

Metodología de costeo (por componentes, Turton et al. / Peters & Timmerhaus):

1. Envolvente metálica: pared protegida del proceso por revestimiento refractario interno, diseñada para ~400°C en acero de baja aleación (2,25Cr-1Mo). Espesor por fórmula ASME de pared delgada t=P·D/(2·S·E−1,2·P), P=3,0 MPa, D=1,77 m, S≈100 MPa → t≈27 mm. Masa de acero (cuerpo+cabezales) ≈9,2 t. A US$15/kg (fabricación ASME de alta exigencia) → ≈USD 138.000.

2. Revestimiento refractario interno: ~200 mm sobre ~34 m² de superficie interna ≈6,9 m³, a US$2.500/m³ → ≈USD 17.000.

3. Carga inicial de catalizador Ni/Al2O3: volumen de lecho ≈4,9 m³, a US$5.000/m³ → ≈USD 25.000.

4. Quemador/lanza de mezcla (pieza propietaria del licenciante): ≈USD 200.000 por analogía con sistemas de quemado de reformadores/gasificadores de escala similar.

5. Suma de componentes ≈USD 380.000; factor 1,7× por ingeniería del licenciante, pruebas FAT, instrumentación y boquillas especiales → ≈USD 650.000 (equipo ex-works, sin instalación).

No existe precio de lista público para reformadores ATR de esta escala; el valor reportado es una estimación de ingeniería, a reemplazar por cotización formal del licenciante antes de la entrega final.

### 6.2.3 Economizador de Alta E-103

| DATOS TÉCNICOS | |
|---|---|
| EQUIPO | Economizador de Alta E-103 |
| MODELO | Caldera de recuperación de calor (Waste Heat Boiler), carcasa y tubos |
| COSTO (U$D) | **≈ 1.800.000** (estimación de ingeniería) |

Tabla 6.4 Tabla de Costo de Equipo E-103.
Fuente: Indeck Power Equipment.

Enfría el gas de síntesis de ~900°C a ~350°C generando vapor de alta presión por el lado carcasa. Diseño de pared gruesa y metalurgia dual por la severidad térmica de entrada.

Metodología de costeo (por potencia térmica recuperada, $/kW):

carga térmica estimada Q≈9 MW). Se adoptó US$200/kW (rango típico US$150-350/kW para WHB de servicio severo) → 9.000 kW × US$200/kW ≈ USD 1.800.000. No se hallaron precios de referencia públicos para WHB de esta escala de recuperación térmica, se requiere cotización de fabricante especializado (ej. Nooter/Eriksen, Thermax o similar).

### 6.2.4 Acumuladores A-104, A-106 y A-107

| DATOS TÉCNICOS | A-104 | A-106 | A-107 |
|---|---|---|---|
| EQUIPO | Acumulador de gas de síntesis | Acumulador de gas de síntesis (a metanol) | Acumulador de CO |
| MODELO | Separador flash bifásico vertical | Recipiente pulmón vertical | Recipiente pulmón vertical |
| COSTO (U$D) | ≈ 20.000 | ≈ 18.000 | ≈ 18.000 |

Tabla 6.5 Tabla de Costo de Equipo A-104; A-106; A-107.
Fuente: SchuF / Koch-Otto York.

La orden de magnitud por comparación con separadores flash verticales tipo ASME de fabricantes industriales (rango típico US$15.000–25.000 para esta clase de recipiente).

A-104 separa condensados acuosos, agua abajo de E-103, asegurando gas seco antes de AB-105. A-106 acumula y regula la corriente rica en H2 para ajustar el módulo estequiométrico S=2,0-2,1 antes del reactor de metanol. A-107 amortigua el CO desorbido (>98% pureza) para alimentar la carbonilación de forma continua. Los tres son recipientes verticales de acero al carbono, tamaño moderado, sin internos complejos.

### 6.2.5 Batería de Columnas PSA AB-105

| EQUIPO | Batería CO-PSA AB-105 |
|---|---|
| MODELO | Sistema VPSA (Vacuum Pressure Swing Adsorption), múltiples lechos |
| MARCA/LICENCIANTE | Air Products, Linde (HIPURE™) |
| COSTO (U$D) | **≈ 2.500.000** (estimación de ingeniería) |

Tabla 6.6 Tabla de Costo de Equipo AB-105.
Fuente: Linde Engineering.

Metodología de costeo (por capacidad de gas tratado):

caudal total de gas de síntesis a la entrada del sistema (considerando el bypass hacia A-106) ≈35.000 Nm³/h. Los sistemas comerciales de PSA de gas de síntesis de esta escala se ubican habitualmente entre US$1,5-3,5 millones (paquetes de Air Products capacidades de decenas de miles de Nm³/h, escalando con exponente ~0,6 respecto del caudal). Se tomó el punto medio-alto del rango por tratarse de un sistema VPSA (con bombas de vacío, más caro que un PSA simple a presión) → ≈USD 2.500.000. No hay lista de precios pública.

### 6.2.6 Resumen de costos — Etapa N°1 (Gas de síntesis)

| Equipo | Costo (USD) |
|---|---|
| D-101 (2 recipientes + carga ZnO) | 107.000 |
| R-102 (reactor ATR) | 650.000 |
| E-103 (economizador de alta) | 1.800.000 |
| A-104 | 20.000 |
| A-106 | 18.000 |
| A-107 | 18.000 |
| AB-105 (PSA) | 2.500.000 |
| **Total Etapa N° 1** | **≈ 5.113.000** |

Tabla 6.7 Tabla de Costo Etapa N°1.
Fuente: Elaboración Propia.

### 6.2.7 Reactor R-201

| DATOS TÉCNICOS | |
|---|---|
| EQUIPO | Reactor R-201 |
| MODELO | Reactor tubular isotérmico, refrigerado por agua en ebullición (tipo Lurgi) |
| CATALIZADOR | Cu/ZnO/Al2O3 |
| GEOMETRÍA | $D_{carcasa}$=3,48 m; 9.406 tubos de 1" × 6 m; GHSV=10.000 $h^{-1}$ |
| CALOR GENERADO | 8,85 MW (removido por el lado carcasa como vapor de media presión) |
| COSTO (U$D) | **≈ 3.600.000** (estimación de ingeniería) |

Tabla 6.8 Tabla de Costo de Equipo R-201.
Fuente: Air Liquide Global E&C Solutions (licencia Lurgi).

Metodología de costeo (por componentes, Peters & Timmerhaus):

1. Envolvente (carcasa): diseño ASME de pared delgada, P=8,0 MPa (80 bar), D=3,48 m, S≈120 MPa (acero al carbono a ~250°C) → t≈121 mm. Masa ≈70 t.

2. Haz tubular: 9.406 tubos de 1" (25,4 mm) OD, espesor 3 mm (mínimo práctico + presión de diseño de 80 bar), L=6 m → masa ≈80 t.

3. Placas tubulares (2): discos de D=3,48 m, espesor ≈250 mm (elevado por la gran cantidad de perforaciones y la presión de diseño) → masa ≈37 t.

4. Masa total de acero ≈187 t, a US$15/kg (fabricación ASME de alta exigencia, incluye ~9.400 soldaduras tubo-placa) → ≈USD 2.820.000.

5. Carga inicial de catalizador Cu/ZnO/Al2O3: volumen de lecho ≈16,7 m³, a US$20.000/m³ (equivalente a ~US$14-18/kg, densidad de carga ~1.400 kg/m³, rango reportado para catalizadores comerciales de síntesis de metanol)→ ≈USD 334.000.

6. Suma de componentes ≈USD 3.154.000; factor 1,15× por ingeniería básica del licenciante y ensayos, inferior al aplicado al ATR por no requerir quemador ni cámara de combustión → ≈USD 3.600.000 (equipo ex-works, sin instalación).

No existe precio de lista público para reactores multitubulares de síntesis de metanol de esta escala; se requiere cotización formal del licenciante (Johnson Matthey Davy, Casale, Topsoe) antes de la entrega final.

### 6.2.8 Compresor de Reciclo C-208.

| DATOS TÉCNICOS | |
|---|---|
| EQUIPO | Compresor C-208 |
| MODELO | Compresor centrífugo multietapa |
| SERVICIO | Reciclo del loop de síntesis de metanol |
| POTENCIA ESTIMADA | ≈ 450 kW |
| COSTO (U$D) | **≈ 450.000** (estimación de ingeniería) |

Tabla 6.9 Tabla de Costo de Equipo C-208.
Fuente: Siemens Energy.

Metodología de costeo:

con un caudal de reciclo estimado en ~5.500 kmol/h a 80 bar y 250°C (V≈0,83 m³/s) y un ΔP de diseño de 4 bar, la potencia de compresión resulta W=V·ΔP/η≈450 kW (η=0,75). Se adoptó US$1.000/kW, por encima del valor de referencia de US$850/kW para compresores centrífugos industriales típicos, dada la metalurgia especial requerida para servicio con gas rico en H2→ 450 kW × US$1.000/kW ≈ USD 450.000.

### 6.2.9 Columna Flash F-203.

| DATOS TÉCNICOS | |
|---|---|
| EQUIPO | Columna Flash F-203 |
| MODELO | Separador flash bifásico vertical |
| SERVICIO | Separa metanol crudo condensado del gas de reciclo |
| COSTO (U$D) | **≈ 45.000** |

Tabla 6.10 Tabla de Costo de Equipo F-203.
Fuente: Fabricación homologada ASME

### 6.2.10 Tren de destilación (T-204, T-205, T-206)

| DATOS TÉCNICOS | T-204 (Topping) | T-205 (Principal) | T-206 (Refinado) |
|---|---|---|---|
| FUNCIÓN | Remoción de livianos (gases disueltos, éter dimetílico) | Remoción de agua y pesados | Pulido final, grado AA |
| DIÁMETRO (m) | 1,2 | 2,5 | 1,8 |
| ALTURA (m) | 6 | 24 | 13 |
| N° DE PLATOS | 15 | 60 | 30 |
| COSTO (U$D) | ≈ 42.000 | ≈ 387.000 | ≈ 138.000 |

Tabla 6.11 Tabla de Costo de Equipo T-204; T-205; T-206.
Fuente: Sulzer Chemtech.

**Metodología de costeo (por componentes, Turton et al.):**

para cada columna se estimó la masa de acero de la envolvente a partir del espesor mínimo práctico de fabricación (6-10 mm según diámetro, ya que la presión de operación es cercana a la atmosférica y no gobierna el diseño), a US$10/kg (fabricación estándar de recipientes de baja presión); y ( el costo de platos tipo sieve instalados, escalado con el diámetro (≈US$1.200-2.500/plato según el rango de diámetros del tren), sumando ambos componentes y aplicando un factor 1,3× por internos, boquillas y soportes. El tren completo produce metanol grado AA (Capítulo V), que se envía a TK-207.

### 6.2.11 Tanque de Almacenamiento de Metanol TK-207

| DATOS TÉCNICOS | |
|---|---|
| EQUIPO | TK-207 |
| MODELO | Tanque atmosférico de techo fijo, acero al carbono |
| VOLUMEN | 6.742 m³ (D=23,92 m; H=15 m) |
| AUTONOMÍA DE DISEÑO | 15 días de despacho |
| COSTO (U$D) | **≈ 1.200.000** (estimación de ingeniería) |

Tabla 6.12 Tabla de Costo de Equipo TK-207.
Fuente: CST Industries.

Metodología de costeo (por volumen, $/m³):

Se adoptó US$180/m³, dentro del rango de referencia de US$100-300/m³ para tanques atmosféricos de 10-10.000 m³, en el extremo medio-alto por tratarse de un líquido inflamable (Clase IB) que requiere sistemas de venteo, supresión de espuma y protección contra incendio, aunque no corrosivo para el acero al carbono (por lo que no se aplicó el múltiplo de 3-5× reservado a líquidos corrosivos) → 6.742 m³ × US$180/m³ ≈ USD 1.214.000, redondeado a USD 1.200.000.

### 6.2.12 Resumen de costos Etapa N°2

| Equipo | Costo (USD) |
|---|---|
| R-201 (reactor de metanol) | 3.600.000 |
| C-208 (compresor de reciclo) | 450.000 |
| E-202 (economizador de media) | 600.000 |
| F-203 (columna flash) | 45.000 |
| T-204 (topping) | 42.000 |
| T-205 (principal) | 387.000 |
| T-206 (refinado) | 138.000 |
| TK-207 (tanque de metanol) | 1.200.000 |
| Total Etapa N°2 | ≈ 6.462.000 |

Tabla 6.13 Tabla de Costo Etapa N°2.
Fuente: Elaboración Propia.

### 6.2.13 Reactor R-301

| DATOS TÉCNICOS | |
|---|---|
| EQUIPO | Reactor R-301 |
| MODELO | Reactor tanque agitado (CSTR) homogéneo, fase líquida |
| CATALIZADOR | Complejo de Ir (promovido con Ru), proceso Cativa™ |
| CONDICIONES | ~190°C; 30-40 bar; τ≈30 min |
| GEOMETRÍA ESTIMADA | D=1,6 m; L=2,0 m; V_líquido≈3,0 m³ |
| COSTO (U$D) | **≈ 984.000** (equipo + carga de catalizador) |

Tabla 6.14 Tabla de Costo de Equipo R-301.
Fuente: BP Chemicals (licencia Cativa™).

Metodología de costeo envolvente y revestimiento (Turton et al. / Peters & Timmerhaus):

1. Envolvente estructural: diseño ASME de pared delgada, P=4,0 MPa (40 bar), D=1,6 m, S≈120 MPa (acero al carbono) → t≈27 mm. Masa ≈2,15 t, a US$15/kg → ≈USD 32.000.

2. Revestimiento interno anticorrosivo (aleación Hastelloy C-276, necesario por la severa corrosividad del medio ácido acético/yoduros/HI generado in situ): 3 mm sobre ≈14,1 m² de superficie interna, a US$80/kg (costo instalado de un revestimiento por soldadura, proceso intensivo en mano de obra) → ≈USD 30.000.

3. Agitador mecánico con esparcidor de CO y sistema de sellado doble (mag-drive o sello mecánico tándem, requerido por la toxicidad y corrosividad del HI generado): ≈USD 120.000 por analogía con agitadores industriales de proceso corrosivo de escala similar.

4. Subtotal ≈USD 182.000; factor 1,2× por instrumentación, boquillas y sistema de alivio de presión → ≈USD 219.000 (equipo, sin catalizador).

Metodología de costeo carga de catalizador:

La concentración de iridio reportada en la fase líquida del proceso Cativa™ es de 700-1.500 ppm (patente US 6.140.535 [16]); se adoptó el punto medio (1.000 ppm). Sobre el volumen líquido de reacción (3,0 m³, densidad≈1.000 kg/m³ → 3.000 kg de líquido), esto equivale a ≈3,0 kg de Ir. Al precio de mercado del iridio de US$7.900/oz troy (≈US$254.175/kg, Umicore Precious Metals Management, 15 de septiembre de 2026) → ≈USD 762.500. Se sumó una estimación menor por el promotor de rutenio (≈0,5 kg × US$6.000/kg ≈ USD 3.000). Total carga de catalizador ≈ USD 765.500.

A diferencia de los catalizadores sólidos de D-101, R-102 y AB-105, este inventario de metales preciosos no se reemplaza periódicamente: se recupera de forma continua en F-302 y se recircula al reactor, por lo que constituye capital de trabajo inmovilizado más que un costo operativo recurrente un factor económico característico y crítico de los procesos de carbonilación homogénea con metales del grupo del platino, que debe dimensionarse con especial cuidado en la ingeniería de detalle final.

Costo total R-301 (equipo + catalizador) ≈ USD 219.000 + USD 765.500 ≈ USD 984.000.

### 6.2.14 Columna Flash F-302

| DATOS TÉCNICOS | |
|---|---|
| EQUIPO | Columna Flash F-302 |
| MODELO | Separador flash vertical, revestido |
| SERVICIO | Separa y recircula el catalizador de Ir/Ru hacia R-301 |
| COSTO (U$D) | **≈ 35.000** (estimación de ingeniería) |

Tabla 6.15 Tabla de Costo de Equipo F-302.
Fuente: De Dietrich Process Systems.

Metodología de costeo:

Envolvente de acero al carbono (D≈1,0 m, L≈3,0 m, t≈8 mm práctico) ≈USD 5.900, más revestimiento interno de Hastelloy C-276 (3 mm sobre ≈11,0 m²) ≈USD 23.400; subtotal ≈USD 29.300, factor 1,2× por boquillas e internos → ≈USD 35.000.

### 6.2.15 Columna de Remoción de Ligeros T-304.

| DATOS TÉCNICOS | |
|---|---|
| EQUIPO | Columna T-304 |
| FUNCIÓN | Remueve ésteres volátiles, yoduro de metilo y metanol sin reaccionar (recirculan a F-302/R-301) |
| DIÁMETRO / ALTURA / PLATOS | 1,0 m / 8 m / 15 |
| COSTO (U$D) | **≈ 40.000** |

Tabla 6.16 Tabla de Costo de Equipo T-304.
Fuente: Sulzer Chemtech.

Metodología de costeo (Turton et al.):

Envolvente de acero al carbono (t≈8 mm) ≈USD 15.800 + platos tipo sieve instalados (15 × ≈US$1.000/plato) ≈USD 15.000; subtotal ≈USD 30.800, factor 1,3× por internos y boquillas → ≈USD 40.000.

### 6.2.16 Columna de Secado T-305

| DATOS TÉCNICOS | |
|---|---|
| EQUIPO | Columna T-305 |
| FUNCIÓN | Extrae la mayor parte del agua de la mezcla |
| DIÁMETRO / ALTURA / PLATOS | 1,5 m / 15 m / 30 |
| COSTO (U$D) | **≈ 206.000** |

Tabla 6.17 Tabla de Costo de Equipo T-305.
Fuente: Sulzer Chemtech.

Metodología de costeo (Turton et al.):

Envolvente de acero al carbono (t≈9 mm) ≈USD 50.000; revestimiento de Hastelloy C-276 en el tercio superior + domo (≈25,4 m², 3 mm) ≈USD 54.200; platos tipo sieve (30 × ≈US$1.800/plato) ≈USD 54.000; subtotal ≈USD 158.200, factor 1,3× por internos y boquillas → ≈USD 206.000.

### 6.2.17 Columna de Remoción de Pesados T-306.

| DATOS TÉCNICOS | |
|---|---|
| EQUIPO | Columna T-306 |
| FUNCIÓN | Separa por fondos el ácido propiónico; por destilado se obtiene ácido acético grado AA |
| DIÁMETRO / ALTURA / PLATOS | 1,2 m / 10 m / 20 |
| COSTO (U$D) | **≈ 62.000** |

Tabla 6.18 Tabla de Costo de Equipo T-306.
Fuente: Sulzer Chemtech.

Metodología de costeo (Turton et al.):

Envolvente de acero al carbono (t≈8 mm) ≈USD 23.700 + platos tipo sieve (20 × ≈US$1.200/plato) ≈USD 24.000; subtotal ≈USD 47.700, factor 1,3× → ≈USD 62.000.

### 6.2.18 Intercambiador I-303.

| DATOS TÉCNICOS | |
|---|---|
| EQUIPO | Intercambiador I-303 |
| SERVICIO | Enfriamiento final del ácido acético entre T-306 y TK-307 |
| CARGA TÉRMICA ESTIMADA | ≈ 117 kW |
| COSTO (U$D) | **≈ 29.000** |

Tabla 6.19 Tabla de Costo de Equipo I-303.
Fuente: Alfa Laval.

Metodología de costeo:

carga térmica estimada a partir del caudal de producto (3.420 kg/h), Cp≈2,05 kJ/kg·K y un salto térmico de ~60°C (de temperatura de destilado a temperatura de almacenamiento) → Q≈117 kW. Se adoptó US$250/kW, propio de un intercambiador compacto en acero inoxidable (el ácido acético concentrado en caliente ataca al acero al carbono) → ≈USD 29.000.

### 6.2.19 Tanque de Almacenamiento de Ácido Acético TK-307

| DATOS TÉCNICOS | |
|---|---|
| EQUIPO | TK-307 |
| MODELO | Tanque atmosférico de techo fijo, acero inoxidable 316L |
| VOLUMEN | 1.394,9 m³ (D=13,33 m; H=10 m) |
| AUTONOMÍA DE DISEÑO | 15 días de despacho |
| COSTO (U$D) | **≈ 837.000** (estimación de ingeniería) |

Tabla 6.20 Tabla de Costo de Equipo TK-307.
Fuente: CST Industries.

Metodología de costeo (por volumen, $/m³):

El ácido acético glacial es corrosivo para el acero al carbono, por lo que el almacenamiento comercial se realiza en acero inoxidable (típicamente 316L). Se adoptó US$600/m³, dentro del múltiplo de 3-5× sobre la base de US$100-300/m³ para tanques atmosféricos simples que corresponde a líquidos corrosivos [11], tomando el extremo inferior de ese múltiplo (3×) por tratarse de un ácido orgánico manejable en acero inoxidable estándar y no de un servicio extremadamente agresivo → 1.394,9 m³ × US$600/m³ ≈ USD 837.000.

### 6.2.20 Resumen de costos Etapa N°3

| Equipo | Costo (USD) |
|---|---|
| R-301 (reactor de carbonilación, equipo + catalizador) | 984.000 |
| F-302 (columna flash) | 35.000 |
| E-303 (economizador de baja) | 270.000 |
| T-304 (remoción de ligeros) | 40.000 |
| T-305 (secado) | 206.000 |
| T-306 (remoción de pesados) | 62.000 |
| I-303 (intercambiador final) | 29.000 |
| TK-307 (tanque de ácido acético) | 837.000 |
| **Total Zona 3** | **≈ 2.463.000** |

Tabla 6.21 Tabla de Costo Etapa N°3.
Fuente: Elaboración Propia.

### 6.2.21 Conclusiones:

| Zona | Costo (USD) |
|---|---|
| Etapa N°1 — Gas de síntesis | 5.113.000 |
| Etapa N°2 — Metanol | 6.462.000 |
| Etapa N°3 — Ácido acético | 2.463.000 |
| Total equipos | ≈ 14.038.000 |

Tabla 6.22 Tabla de Costo de Todas las Etapa.
Fuente: Elaboración Propia.

Con esto queda completo el costeo preliminar de equipos de las tres zonas de proceso de la planta. El monto obtenido corresponde al costo de equipos principales ex-works (sin instalación, obra civil, montaje electromecánico, instrumentación de control distribuido ni servicios auxiliares), por lo que constituye únicamente uno de los componentes del CAPEX total del proyecto a completar en capítulos posteriores de evaluación económica mediante factores de instalación (método de Lang) sobre el costo de equipos aquí determinado.

# CAPÍTULO N° VII
## Ingeniería de Gestión

## 7.1 Introducción:

La ingeniería de gestión constituye un componente esencial dentro del diseño integral del proyecto industrial, pues define los lineamientos organizativos, la estructura funcional y los mecanismos de dirección y control mediante los cuales operará el complejo petroquímico. No se limita únicamente a asegurar la factibilidad técnica y operativa de los procesos de transformación, sino que establece una organización capaz de coordinar personas, recursos técnicos y funciones operativas de manera eficiente, segura y sostenible en el tiempo.

En un complejo petroquímico continuo e integrado destinado a la coproducción de 100.000 t/año de metanol y 27.500 t/año de ácido acético grado polimérico, la gestión adquiere una relevancia crítica debido a las siguientes particularidades operativas e industriales:

- Régimen operativo ininterrumpido (24/7): La planta opera 330 días al año (7.920 h/año efectivas), lo que demanda relevos continuos y cobertura permanente sin discontinuidades operacionales ni térmicas.

- Integración en cascada y dependencia entre módulos: El proceso se articula en tres secciones interdependientes (Módulo A: Generación de Syngas y separación de CO mediante ATR y VPSA; Módulo B: Síntesis de Metanol a 80 bar; Módulo C: Carbonilación homogénea BP Cativa™ a 28 bar). La estricta sincronización de los fluidos de enlace exige una coordinación permanente entre producción, mantenimiento y logística.

- Severidad de procesos y seguridad química: Se manipulan fluidos inflamables a presiones elevadas, agentes tóxicos y corrosivos, y oxígeno de alta pureza.

- Capacidad de respuesta inmediata y confiabilidad: Exige líneas de mando rigurosamente definidas para intervenir con celeridad frente a desvíos operativos, paradas imprevistas o contingencias ambientales.

En este capítulo se define la figura jurídica adoptada para la entidad, sus datos comerciales y tributarios, el organigrama integral de la empresa, las fichas de función normalizadas para cada puesto clave, el encuadramiento dentro del marco laboral aplicable (CCT 564/09) y el dimensionamiento de las cuadrillas de trabajo continuo necesarias para la explotación industrial.

## 7.2 Estructura Organizacional.

La estructura organizacional define la distribución formal de responsabilidades, líneas de reporte jerárquico y canales de comunicación técnica de la empresa. En concordancia con las mejores prácticas de la industria petroquímica de proceso continuo, se adopta un modelo funcional y jerárquico lineal-funcional.

Este modelo agrupa las actividades de acuerdo con su especialidad técnica (Producción, Mantenimiento, Calidad/Laboratorio, Seguridad, Salud y Medio Ambiente, Compras y Administración), posibilitando:

- La especialización del personal en operaciones complejas de alta presión y reactividad química.
- Una cadena de mando nítida bajo el principio de unidad de mando, eliminando ambigüedades en la toma de decisiones.
- Supervisión directa y rigurosa en salas de control y áreas clasificadas.

- Integración fluida entre las demandas técnico-operativas de planta y los objetivos económico-financieros de la gerencia.

### 7.2.1 Principios de Organización Aplicados.

El diseño organizacional adopta los principios clásicos de la administración industrial ajustados a las normativas de una planta química de proceso continuo:

- División del trabajo: Especialización por áreas funcionales para garantizar eficiencia técnica, minimización de errores de maniobra y reducción de tiempos improductivos.

- Jerarquía y unidad de mando: Cada colaborador responde ante un único superior técnico y administrativo directo, garantizando la consistencia de las directivas operativas tanto en marcha normal como en contingencias.

- Coordinación interdepartamental: Integración permanente entre Producción, Mantenimiento, Laboratorio y Logística para garantizar la disponibilidad operativa de equipos rotantes y el suministro de insumos críticos.

- Delegación de autoridad con responsabilidad: Los supervisores de turno y jefes de área cuentan con autonomía para realizar ajustes en el Sistema de Control Distribuido o autorizar permisos de trabajo, asumiendo la responsabilidad directa por la seguridad del personal e instalaciones.

- Flexibilidad y escalabilidad: Estructura adaptable a paradas mayores programadas o futuras ampliaciones modulares en el complejo.

### 7.2.2 Recursos Humanos

La dotación de personal se estructura en cuatro agrupamientos funcionales:

- Personal directivo y ejecutivo: Gerencia General, Gerencia de Operaciones y Planta, Gerencia de Administración y Finanzas, Gerencia Comercial y Jefatura de SSMA, encargados del planeamiento estratégico y cumplimiento corporativo.

- Personal técnico y de control: Ingenieros de proceso, ingenieros de integridad mecánica/eléctrica, jefatura de calidad y técnicos laboratoristas, responsables del monitoreo de especificaciones y confiabilidad.

- Personal operativo de proceso: Supervisores de turno, operadores panelistas de consola DCS y operadores de campo bajo régimen continuo rotativo 24/7.

- Personal de soporte y logística: Especialistas en compras técnicas, analistas contables/impositivos, operadores de báscula/despacho, vigilancia y maestranza.

## 7.3 Características de la Organización y Marco Legal.

Definida la estructura interna, resta precisar bajo qué figura legal y con qué identidad va a existir la empresa frente a proveedores, clientes y organismos de control.

### 7.3.1 Constitución Legal: Sociedad Anónima (S.A.)

Para la instalación y operación del complejo se adopta la figura de Sociedad Anónima (S.A.), regulada por la Ley General de Sociedades N.º 19.550 de la República Argentina.

A continuación se fundamenta la decisión mediante el análisis comparativo con la Sociedad de Responsabilidad Limitada (S.R.L.):

| Parámetro Comparativo | Sociedad Anónima (S.A.) | Sociedad de Responsabilidad Limitada (S.R.L.) |
|---|---|---|
| Denominación | Puede incluir el nombre de personas visibles. Debe contener la expresión "Sociedad Anónima" o la sigla "S.A." | Puede incluir el nombre de socios. Debe contener "Sociedad de Responsabilidad Limitada" o "S.R.L." |
| Socios y Responsabilidad | Accionistas. Limitan su responsabilidad al capital integrado de las acciones suscriptas. Sin límite de socios. | Socios. Limitan su responsabilidad a las cuotas sociales suscriptas. Máximo 50 socios. |
| Constitución y Capital | Por instrumento público y acto único o suscripción pública. Capital representado en acciones libremente transmisibles. | Por instrumento público o privado. Capital dividido en cuotas sociales con cesión restringida y registración contractual. |
| Administración y Representación | Ejercida por el Directorio (mandato máximo de 3 ejercicios, o 5 con Consejo de Vigilancia). | Ejercida por una o más gerencias designadas por plazo determinado o indeterminado. |
| Órgano de Gobierno | Asamblea General de Accionistas (Ordinaria y Extraordinaria). | Reunión de socios o resoluciones sociales por comunicación fehaciente (art. 159 LGS). |
| Fiscalización | Sindicatura o Comisión Fiscalizadora colegiada obligatoria para sociedades comprendidas en el art. 299 LGS. | Optativa; obligatoria únicamente si el capital social supera los montos fijados por el art. 299 inc. 2 de la LGS. |

Tabla 7.1 Tabla de Justificación de Decisiones.
Fuente: Elaboración propia en base a la Ley General de Sociedades N.º 19.550

Justificación técnica y financiera: La inversión fija de capital del proyecto (FCI estimada en USD 63.540.000) requiere una figura societaria con alta solidez institucional, capacidad para acceder a financiamiento bancario estructurado (Project Finance), incorporación ágil de nuevos socios mediante emisión de acciones y cumplimiento de los requisitos de fiscalización estatal permanente del artículo 299 de la LGS.

### 7.3.2 Razón Social e Información Institucional

La empresa operará bajo la denominación IMN CHENICAL PRODUCTS S.A., radicada en el polo petroquímico del Parque Industrial Bahía Blanca (PIBB), provincia de Buenos Aires. Su misión es la producción eficiente de metanol y ácido acético para sustituir importaciones nacionales y exportar excedentes a la región.




Figura 7.1 Logotipo de la empresa.
Fuente: Elaboración propia

IMN CHEMICAL PRODUCTS S.A. tiene como misión posicionarse como un proveedor confiable y estratégico de metanol grado químico (ASTM D1152) y ácido acético grado polimérico en el mercado nacional y regional, ofreciendo productos elaborados bajo los más altos estándares internacionales de calidad, promoviendo la sustitución efectiva de importaciones y fortaleciendo de manera integral la cadena de valor química y petroquímica argentina. Asimismo, la compañía proyecta operar bajo rigurosos criterios de eficiencia productiva y energética, excelencia en seguridad de procesos químicos, protección de la salud ocupacional y estricta responsabilidad ambiental y sostenibilidad.

| Parámetro Institucional | Detalle del Emprendimiento |
|---|---|
| Razón Social | IMN CHERMICAL PRODUCTS S.A |

| Parámetro Institucional | Detalle del Emprendimiento |
|---|---|
| País y Jurisdicción | República Argentina — Provincia de Buenos Aires |
| Actividad Principal AFIP | Fabricación de sustancias químicas básicas / Industria Petroquímica |
| Productos Principales | Metanol Grado AA (100.000 t/año) y Ácido Acético Grado Polimérico (27.500 t/año) |
| Materia Prima Primaria | Gas Natural de la Cuenca Neuquina (Vaca Muerta) y Oxígeno puro por tubería |
| Domicilio Industrial | Parque Industrial Bahía Blanca (PIBB), Bahía Blanca, Pcia. de Buenos Aires |
| Perfil de Comercialización | Venta directa a industrias químicas, fabricantes de biodiesel y exportación regional |
| Dotación Total de Planta | 44 puestos directos (esquema mixto diurno y turnos rotativos continuos 24/7) |

Tabla 7.2 Tabla de Datos Sociales, Tributarios y Comerciales de la Empresa.
Fuente: Elaboración propia

### 7.4 Organigrama Funcional

El organigrama adoptado responde a una estructura jerárquica y funcional adaptada a la operación ininterrumpida de tres unidades de proceso simultáneas.

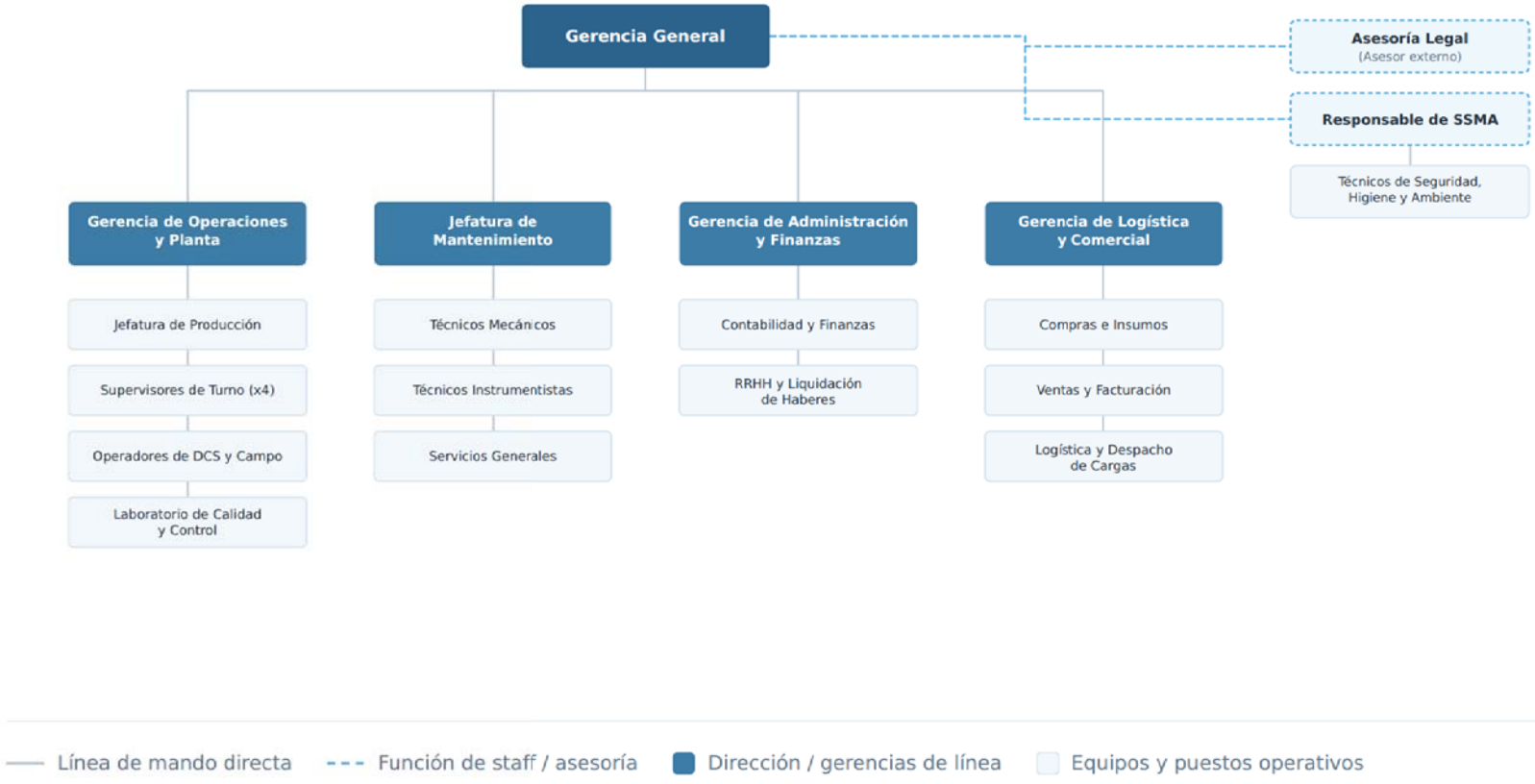



Figura 7.2 Organigrama de la empresa.
Fuente: Elaboración propia

## 7.5 Fichas de Función de Puestos de Trabajo

A continuación, se presentan las fichas descriptivas normalizadas para los puestos estratégicos, tácticos y operativos de la compañía:

### 7.5.1 Ficha de función de Gerencia General

| FICHA DE FUNCIÓN — IMN CHERMICAL PRODUCTS S.A | |
|---|---|
| Área | Dirección Corporativa |
| Sector | Gerencia General |
| Función | Liderar la conducción integral de la empresa, definir las directrices estratégicas y asegurar la rentabilidad, sustentabilidad y seguridad operativa del complejo. |
| Supervisa a | Gerente de Operaciones, Gerente de Administración y Finanzas, Gerente Comercial y Jefe de SSMA. |
| Reporta a | Directorio / Asamblea de Accionistas |
| Categoría | Fuera de Convenio |
| DEBERES Y RESPONSABILIDADES | |
| • Definir los planes estratégicos plurianuales y los presupuestos operativos y de inversión (CAPEX/OPEX).<br>• Representar legalmente a la empresa ante autoridades gubernamentales, cámaras empresarias y entidades financieras.<br>• Supervisar la ejecución de los contratos de suministro crítico de gas natural con productores de Vaca Muerta y servicios over-the-fence.<br>• Garantizar el cumplimiento estricto de las políticas ambientales, de seguridad de procesos y laborales.<br>• Aprobar planes de parada de planta mayor (turnaround) e inversiones en mejoras tecnológicas. | |
| PERFIL DEL PUESTO | |
| • Título universitario en Ingeniería Química, Petroquímica o Industrial. Deseable posgrado en Administración de Empresas (MBA).<br>• Experiencia mínima comprobable de 10 años en posiciones gerenciales dentro de la industria petroquímica o química pesada.<br>• Capacidad demostrada de liderazgo estratégico, negociación y gestión de crisis. | |

Tabla 7.3 Tabla de Ficha de función de Gerencia General.
Fuente: Elaboración propia

### 7.5.2 Ficha de Función de Gerencia de Operaciones y Planta

| FICHA DE FUNCIÓN — IMN CHERMICAL PRODUCTS S.A | |
|---|---|
| Área | Operaciones Industriales |
| Sector | Gerencia de Operaciones y Planta |
| Función | Dirigir y coordinar las actividades de manufactura en las tres zonas de proceso (Syngas, Metanol y Ácido Acético), maximizando la productividad y la seguridad de proceso. |
| Supervisa a | Jefe de Producción, Supervisores de Turno y Responsable de Control de Calidad / Laboratorio. |
| Reporta a | Gerente General |
| Categoría | Fuera de Convenio |
| DEBERES Y RESPONSABILIDADES | |
| • Asegurar el cumplimiento del programa anual de producción (100.000 t/año MeOH y 27.500 t/año AcOH).<br>• Monitorear variables e indicadores clave de proceso (eficiencia de reformado, relación H2/CO, consumo de catalizador Cativa).<br>• Coordinar estrechamente con Mantenimiento los programas de lubricación, inspección y paradas técnicas.<br>• Aprobar y auditar la actualización de Procedimientos Operativos Estandarizados (SOP) y análisis de riesgo (HAZOP/SIL). | |
| PERFIL DEL PUESTO | |
| • Ingeniero Químico o Petroquímico matriculado.<br>• Experiencia mínima de 7 años en plantas continuas a alta presión, reactores catalíticos y trenes de destilación. | |

Tabla 7.4 Tabla de Ficha de Función de Gerencia de Operaciones y Planta.
Fuente: Elaboración propia

### 7.5.3 Ficha de Función de Jefatura de Mantenimiento

| FICHA DE FUNCIÓN — IMN CHERMICAL PRODUCTS S.A | |
|---|---|
| Área | Mantenimiento e Integridad Mecánica |
| Sector | Jefatura de Mantenimiento |
| Función | Planificar y supervisar el mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo de los equipos estáticos, rotantes y sistemas de instrumentación del complejo. |
| Supervisa a | Técnicos Mecánicos, Técnicos Electricistas/Instrumentistas y cuadrilla de Servicios Generales. |
| Reporta a | Gerente General / Operaciones |
| Categoría | Fuera de Convenio |
| DEBERES Y RESPONSABILIDADES | |
| • Diseñar y liderar el Plan Anual de Mantenimiento y Confiabilidad (RCM).<br>• Garantizar la disponibilidad de los turbocompresores de gas, bombas de alta presión y recipientes ASME.<br>• Gestionar el inventario de repuestos críticos: sellos mecánicos presurizados, válvulas de control e insumos de instrumentación.<br>• Inspeccionar la integridad metalúrgica en áreas sometidas a corrosión severa (cladding de Hastelloy en vasijas). | |
| PERFIL DEL PUESTO | |
| • Ingeniero Mecánico, Electromecánico o Industrial.<br>• Mínimo 5 años de experiencia en supervisión de mantenimiento en plantas químicas o refinerías. | |

Tabla 7.5 Tabla de Ficha de Función de Jefatura de Mantenimiento.
Fuente: Elaboración propia

### 7.5.4 Ficha de Función de Jefatura de SSMA

| FICHA DE FUNCIÓN — IMN CHERMICAL PRODUCTS S.A | |
|---|---|
| Área | Seguridad, Salud y Medio Ambiente |
| Sector | Jefatura de SSMA |
| Función | Garantizar el estricto cumplimiento normativo en seguridad ocupacional, seguridad de procesos químicos y gestión ambiental. |
| Supervisa a | Técnicos de Seguridad e Higiene y Técnicos Ambientales de turno. |
| Reporta a | Gerente General |
| Categoría | Fuera de Convenio |
| DEBERES Y RESPONSABILIDADES | |
| • Diseñar e implementar programas de prevención de riesgos y matrices IPER en todas las áreas de la planta.<br>• Supervisar el cumplimiento de normativas de efluentes, emisiones gaseosas a tea y disposición de residuos peligrosos.<br>• Liderar brigadas de emergencia, simulacros de contingencia química y auditorías bajo normas ISO 14001 e ISO 45001.<br>• Verificar la integridad de los sistemas fijos contra incendios (NFPA 11 y NFPA 30) y detección de gases tóxicos (CO). | |
| PERFIL DEL PUESTO | |
| • Ingeniero en Seguridad Laboral, Químico o Ambiental con matrícula profesional habilitante.<br>• Experiencia superior a 5 años en plantas químicas, petroquímicas o de gas natural. | |

Tabla 7.6 Tabla de Ficha de Función de Jefatura de SSMA.
Fuente: Elaboración propia

### 7.5.5 Ficha de Función de Jefe de Producción

| FICHA DE FUNCIÓN — IMN CHERMICAL PRODUCTS S.A | |
|---|---|
| Área | Producción / Operaciones |
| Sector | Sala de Control Central y Áreas de Proceso |
| Función | Coordinar en tiempo real la operación de la planta durante el turno asignado, asegurando la continuidad del proceso y el cumplimiento de las metas diarias. |
| Supervisa a | Operadores de Consola DCS, Operadores de Planta de Campo y Analistas de Laboratorio de turno. |
| Reporta a | Jefe de Producción / Gerente de Operaciones |
| Categoría | Convenio CCT 564/09 — Categoría A1 (Superior) |
| DEBERES Y RESPONSABILIDADES | |
| • Monitorear la estabilidad operativa de los lazos de control de ATR, reactores de síntesis y columnas de fraccionamiento.<br>• Autorizar y liberar Permisos de Trabajo Seguro (trabajos en frío, caliente y espacios confinados) en planta.<br>• Dirigir maniobras operativas complejas de puesta en marcha, parada y aislamiento de equipos para mantenimiento.<br>• Informar novedades en el libro de guardia y coordinar el traspaso de turno sin desvíos de información. | |
| PERFIL DEL PUESTO | |
| • Técnico Químico Superior o Ingeniero Químico con no menos de 3 años de experiencia en supervisión operativa continua. | |

Tabla 7.7 Tabla de Ficha de Función de Jefe de Producción.
Fuente: Elaboración propia

### 7.5.6 Ficha de Función de Operaciones

| FICHA DE FUNCIÓN — IMN CHERMICAL PRODUCTS S.A | |
|---|---|
| Área | Operaciones |
| Sector | Consola DCS / Unidades de Planta Externa |
| Función | Operar equipos, instalaciones y consolas del proceso productivo conforme a los procedimientos técnicos e instrucciones del supervisor. |
| Supervisa a | Ninguno |
| Reporta a | Supervisor de Turno |
| Categoría | Convenio CCT 564/09 — Categoría A (Panelista) / Categoría B (Operador de Campo) |
| DEBERES Y RESPONSABILIDADES | |
| • Controlar parámetros de presión, temperatura, flujo y nivel en consolas DCS o instrumentos de campo locales.<br>• Efectuar rondas rutinarias de inspección en compresores, bombas, recipientes a presión y calderas de vapor.<br>• Ejecutar maniobras manuales de alineación de válvulas, purgas y toma de muestras analíticas para laboratorio.<br>• Asistir en el bloqueo seguro (LOTO) de equipos previo a la intervención de mantenimiento. | |
| PERFIL DEL PUESTO | |
| • Secundario técnico completo (Técnico Químico, Mecánico o Electromecánico). Formación previa en procesos continuos valorada. | |

Tabla 7.8 Tabla de Ficha de Función de Operaciones.
Fuente: Elaboración propia

### 7.5.7 Ficha de Función de Calidad y Control de Procesos

| FICHA DE FUNCIÓN — IMN CHERMICAL PRODUCTS S.A | |
|---|---|
| Área | Calidad y Control de Procesos |
| Sector | Laboratorio de Planta |
| Función | Ejecutar determinaciones físico-químicas de materias primas, corrientes intermedias y certificar especificaciones de despacho de producto final. |
| Supervisa a | Ninguno |
| Reporta a | Jefe de Calidad / Supervisor de Turno |
| Categoría | Convenio CCT 564/09 — Categoría B |
| DEBERES Y RESPONSABILIDADES | |
| • Efectuar ensayos de cromatografía gaseosa (GC) para composición de syngas y pureza de metanol/ácido acético.<br>• Determinar humedad residual por Karl Fischer en metanol y ácido acético glacial (< 350 ppmw).<br>• Cuantificar impurezas críticas (ácido propiónico < 50 ppmw y contenido de yoduros libres en ppb).<br>• Confeccionar reportes analíticos y emitir certificados de calidad por lote de tanque de almacenamiento. | |
| PERFIL DEL PUESTO | |
| • Técnico Químico o Licenciado en Química con manejo comprobable de instrumental cromatográfico y analítica cuantitativa. | |

Tabla 7.9 Tabla de Ficha de Función de Calidad y Control de Procesos.
Fuente: Elaboración propia

### 7.6 Descripción y Clasificación de Cargos (CCT 564/09)

El personal operativo, técnico y administrativo no jerárquico se encuentra encuadrado bajo el Convenio Colectivo de Trabajo N.º 564/09, celebrado entre la Federación Argentina de Trabajadores de Industrias Químicas y Petroquímicas (FATIQYP) y las cámaras de la actividad química y petroquímica.

El CCT 564/09 define escalas salariales, regímenes de jornada continua y adicionales por turnos rotativos continuos acordes a la complejidad técnica y riesgo de la industria petroquímica:

| Puesto de Trabajo | Encuadramiento / Categoría | Criterio y Alcance Operativo |
|---|---|---|
| Gerente General | Fuera de Convenio | Dirección estratégica y máxima responsabilidad ejecutiva. |
| Gerente de Operaciones y Planta | Fuera de Convenio | Responsabilidad directa de la producción y seguridad operativa. |
| Jefe de Mantenimiento | Fuera de Convenio | Planificación de confiabilidad e integridad de activos industriales. |
| Jefe de SSMA | Fuera de Convenio | Responsabilidad legal en higiene, seguridad laboral y ambiente. |
| Gerente de Administración y Finanzas | Fuera de Convenio | Conducción económico-financiera y control de gestión. |
| Gerente Comercial y Logística | Fuera de Convenio | Negociación de materias primas, fletes y ventas de producto. |
| Supervisor de Turno de Operaciones | Categoría A1 (Superior) | Conducción directa de la operación y del personal de turno. |
| Operador de Consola DCS (Panelista) | Categoría A | Control distribuido de reactores, compresores y trenes de destilación. |
| Operador de Planta de Campo | Categoría B | Maniobras de campo, inspección física de equipos y toma de muestras. |
| Técnico Instrumentista / Eléctrico | Categoría A | Mantenimiento de lazos de control, analizadores en línea y media tensión. |
| Técnico Mecánico de Mantenimiento | Categoría B | Intervención mecánica en bombas, compresores, válvulas y tuberías. |

| Puesto de Trabajo | Encuadramiento / Categoría | Criterio y Alcance Operativo |
|---|---|---|
| Analista / Laboratorista de Calidad | Categoría B | Análisis cromatográficos, titulaciones y control de materias primas. |
| Técnico de SSMA de Turno | Categoría A | Monitoreo en campo de permisos de trabajo y mediciones de explosividad. |
| Operador de Despacho y Carga | Categoría B | Operación en islas de carga de camiones cisterna y báscula fiscal. |
| Personal de Vigilancia y Accesos | Servicio Tercerizado | Control perimetral y registro de ingresos/egresos al predio fabril. |
| Personal de Maestranza y Limpieza | Servicio Tercerizado | Higiene y mantenimiento de edificios administrativos y vestuarios. |
| Asesor Legal Corporativo | Profesional Independiente | Asesoramiento societario, contractual y ambiental externo. |

Tabla 7.10 Tabla de Ficha de Encuadramiento y Clasificación Convencional de Cargos.
Fuente: Elaboración propia en base a CCT 564/09 (FATIQYP)

## 7.7 Planificación y Diagramación de Turnos de Trabajo

Dado que el complejo petroquímico opera ininterrumpidamente durante las 24 horas del día a lo largo de los 330 días anuales previstos, las áreas de operación, mantenimiento reactivo, laboratorio de control y seguridad de planta se estructuran bajo un esquema de trabajo continuo 24/7 en tres turnos rotativos de 8 horas diarias cubiertos por cuatro cuadrillas rotativas (A, B, C y D):

Turno Mañana: 06:00 a 14:00 horas.

Turno Tarde: 14:00 a 22:00 horas.

Turno Noche: 22:00 a 06:00 horas.

Este esquema de cuatro cuadrillas garantiza el cumplimiento estricto de los descansos legales y compensatorios previstos por la Ley de Jornada Laboral N.º 11.544 y el CCT 564/09, asegurando que ante licencias anuales ordinarias o ausencias imprevistas no se comprometa la cobertura mínima de seguridad en los puestos críticos.

El personal directivo, administrativo, contable, comercial y de mantenimiento programado cumple una jornada laboral estándar diurna de lunes a viernes de 08:00 a 17:00 horas (8 horas diarias efectivas), con régimen de guardias pasivas técnicas para atención de imprevistos los fines de semana.

| Área Funcional / Departamento | Puesto / Función | Puestos Simultáneos | Régimen / Cuadrillas | Dotación Total |
|---|---|---|---|---|
| Dirección Ejecutiva | Gerente General | 1 | Diurno (L-V) | 1 |
| Operaciones Industriales | Gerente de Operaciones y Planta | 1 | Diurno (L-V) | 1 |
| | Supervisor de Turno de Operaciones | 1 | Rotativo (4 cuadrillas) | 4 |
| | Operador Panelista DCS (Syngas / MeOH) | 1 | Rotativo (4 cuadrillas) | 4 |
| | Operador Panelista DCS (AcOH / Fracc.) | 1 | Rotativo (4 cuadrillas) | 4 |
| | Operadores de Planta de Campo | 2 | Rotativo (4 cuadrillas) | 8 |
| | Analista de Laboratorio de Turno | 1 | Rotativo (4 cuadrillas) | 4 |
| Mantenimiento e Integridad | Jefe de Mantenimiento | 1 | Diurno (L-V) | 1 |
| | Técnico Mecánico de Planta | 1 | Rotativo (4 cuadrillas) | 4 |
| | Técnico Electricista / Instrumentista | 1 | Rotativo (4 cuadrillas) | 4 |
| Seguridad y Medio Ambiente | Jefe de SSMA | 1 | Diurno (L-V) | 1 |
| | Técnico de SSMA de Turno | 1 | Rotativo (4 cuadrillas) | 4 |
| Administración y Finanzas | Gerente de Administración y Finanzas | 1 | Diurno (L-V) | 1 |

| Área Funcional / Departamento | Puesto / Función | Puestos Simultáneos | Régimen / Cuadrillas | Dotación Total |
|---|---|---|---|---|
| | Contador / Responsable Financiero | 1 | Diurno (L-V) | 1 |
| | Analista de RRHH y Liquidación de Sueldos | 1 | Diurno (L-V) | 1 |
| Comercial y Abastecimiento | Gerente Comercial y Logística | 1 | Diurno (L-V) | 1 |
| | Comprador Técnico de Insumos y Repuestos | 1 | Diurno (L-V) | 1 |
| | Responsable de Ventas y Facturación | 1 | Diurno (L-V) | 1 |
| | Operador de Despacho y Logística | 1 | Diurno ampliado | 2 |
| SUBTOTAL PERSONAL EN NÓMINA DIRECTA | | | | 44 |
| Servicios Tercerizados | Personal de Vigilancia y Control Acceso | 1 | Rotativo (4 cuadrillas) | (4) |
| | Personal de Maestranza y Limpieza | 2 | Diurno | (2) |
| | Asesor Legal Externo | 1 | Por abono profesional | (1) |

Tabla 7.10 Tabla de Dimensionamiento Consolidado de la Dotación de Personal.
Fuente: Elaboración propia

## 7.8 Conclusión del Capítulo

El presente capítulo permitió definir el marco organizativo, legal y funcional necesario para la operación del complejo petroquímico de metanol y ácido acético:

- Se adoptó la figura jurídica de Sociedad Anónima (S.A.), proporcionando el marco institucional idóneo para administrar la inversión de capital del proyecto (FCI ≈ USD 63,54 M) y operar bajo el régimen de fiscalización de la LGS.
- Se estableció una estructura organizacional de tipo funcional, asegurando la especialización técnica requerida para la operación coordinada de las unidades de reformado ATR, síntesis de metanol y carbonilación BP Cativa™.
- Se definieron las fichas de función para todos los niveles jerárquicos y se clasificaron los puestos dentro del Convenio Colectivo de Trabajo N.º 564/09 (FATIQYP).
- Se determinó una nómina de 44 colaboradores en relación directa bajo un esquema de 4 cuadrillas rotativas para la cobertura ininterrumpida 24/7, estableciendo la base de costos laborales (OPEX) requerida para la evaluación económico-financiera del proyecto.

# CAPÍTULO N° VIII
## Aspectos Ambientales

## 8.1 Introducción:

La gestión de los aspectos ambientales constituye un elemento central en el diseño y la operación de plantas industriales modernas, especialmente en procesos petroquímicos como el que se desarrolla en el presente proyecto: la producción de ácido acético grado polimérico a partir de gas natural, con metanol como subproducto e intermedio de proceso. En este tipo de procesos, donde intervienen gas de síntesis (CO, $CO_2$, $H_2$), metanol, monóxido de carbono y un sistema catalítico homogéneo con promotor de yoduro ($CH_3I$) en la etapa de carbonilación, resulta fundamental garantizar un equilibrio entre la eficiencia productiva y la protección del ambiente.

La experiencia en el desarrollo de proyectos industriales en el Polo Petroquímico y Área Portuaria de Bahía Blanca demuestra que una gestión ambiental inadecuada puede derivar en impactos negativos significativos sobre el entorno en particular sobre el estuario de Bahía Blanca, cuerpo receptor de efluentes industriales, así como en conflictos con la comunidad de Ingeniero White. Por el contrario, la correcta implementación de políticas ambientales, junto con el cumplimiento de la normativa vigente y el control ejercido por el Comité Técnico Ejecutivo (CTE), permite asegurar una operación sustentable y socialmente aceptada.

Se entiende por impacto ambiental a toda alteración del ambiente, positiva o negativa, generada por las actividades del proyecto. En el caso del presente proceso, estos impactos pueden estar asociados principalmente a emisiones gaseosas de la unidad de reformado autotérmico (ATR) y de las columnas de separación por presión diferencial, a efluentes líquidos con trazas de metanol y ácido acético, a la generación de residuos sólidos —catalizador de óxido de zinc (ZnO) agotado del desulfurador D-101 y catalizador de iridio/rutenio (Ir/Ru) agotado del reactor de carbonilación R-301— y al consumo de gas natural, oxígeno y agua de proceso.

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 un proceso como el analizado, donde la manipulación de monóxido de carbono, hidrógeno, metanol y yoduro de metilo implica riesgos ambientales y de seguridad de proceso específicos.

En este capítulo se presenta un análisis de los impactos ambientales asociados a la planta de producción de ácido acético y metanol a emplazarse en el Parque Industrial de Bahía Blanca (PIBB), considerando las etapas de construcción, operación y eventual cierre. Este estudio sirve como base para futuros análisis de mayor detalle 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, provincial y municipal, orientadas a la protección del ambiente, la prevención de la contaminación y el uso sostenible de los recursos naturales. Dada la localización del proyecto dentro del Polo Petroquímico y Área Portuaria de Bahía Blanca, resulta de particular relevancia la normativa específica que rige dicha zona.

### 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 (precautorio, preventivo y de sustentabilidad) y obliga a la realización de una Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) para proyectos con potencial impacto significativo, como es el caso de una planta petroquímica de esta escala.

- Ley N° 24.051 Residuos Peligrosos

  Regula la generación, transporte, tratamiento y disposición final de residuos peligrosos. En el presente proceso se incluyen dentro de esta categoría:

  1. Catalizador de óxido de zinc (ZnO) agotado del desulfurador D-101
  2. Catalizador homogéneo de Ir/Ru agotado del reactor de carbonilación R-301
  3. Solventes contaminados (metanol) y corrientes con trazas de yoduro de metilo ($CH_3I$)

- Ley N° 25.688 Gestión Ambiental de Aguas

  Establece los presupuestos mínimos para la preservación y el uso racional del recurso hídrico, exigiendo tratamiento previo de los efluentes líquidos antes de su descarga al estuario de Bahía Blanca.

- Ley N° 20.284 Protección del aire

  Regula las emisiones atmosféricas, incluyendo el monóxido y dióxido de carbono generados en el reformador autotérmico (R-102) y en los economizadores de recuperación de calor, así como eventuales compuestos orgánicos volátiles (metanol, ácido acético).

- Ley N° 26.331 Bosques nativos

  Aplica indirectamente en la evaluación del uso del suelo y localización del proyecto, en particular en relación con la Reserva Natural Bahía Blanca, Bahía Falsa y Bahía Verde emplazada en las inmediaciones del estuario.

### 8.2.2 Legislación provincial y municipal

Dado que la planta se localizará dentro del Parque Industrial de Bahía Blanca (PIBB), en el Polo Petroquímico y Área Portuaria de la ciudad, el proyecto deberá cumplir con un marco regulatorio provincial y municipal particularmente estricto, desarrollado a partir de los antecedentes ambientales de esa zona industrial.

- Ley N° 11.723 Ley Integral del Medio Ambiente (Buenos Aires)

  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° 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, estableciendo límites de emisión para efluentes líquidos y gaseosos. Resulta especialmente relevante dado que el estuario de Bahía Blanca es el cuerpo receptor regulado de los efluentes industriales del Polo Petroquímico.

- 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 será considerada de alta complejidad ambiental, por lo que deberá cumplir exigencias estrictas en materia de control de emisiones, tratamiento de efluentes y gestión de riesgos tecnológicos.

- 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° 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, cumpliendo las condiciones de seguridad, higiene y protección ambiental exigidas.

- Ley Provincial N° 12.530 Programa Especial para la Preservación y Optimización de la Calidad Ambiental del Polo Petroquímico y Área Portuaria de Bahía Blanca

  Esta ley, sancionada a partir de los reclamos de la comunidad de Ingeniero White tras los episodios ambientales del año 2000, crea el Comité Técnico Ejecutivo (CTE), organismo encargado de la fiscalización y el control de las industrias de tercera categoría (como será clasificada la presente planta) radicadas en el Polo Petroquímico y el Área Portuaria de Bahía Blanca. El CTE cuenta con inspectores, monitoreadores y una Guardia Ambiental activa las 24 horas, opera cabinas de monitoreo continuo de calidad de aire (EMCABBs, con analizadores de CO, NO2, SO2, O3, PM10 y PM2,5) y controla, mediante un laboratorio propio acreditado, la calidad de los efluentes líquidos vertidos al estuario. La planta deberá inscribirse dentro del ámbito de aplicación de esta ley, financiando su fiscalización a través de la Tasa Ambiental correspondiente y participando del Proceso APELL de respuesta ante emergencias químicas vigente en la ciudad desde 1995.

- Normativa sobre residuos peligrosos (adhesión a la Ley Nacional N.º 24.051)

  La provincia adhiere al régimen nacional de residuos peligrosos, exigiendo registro como generador, gestión mediante operadores habilitados y trazabilidad de residuos. En el presente proyecto se incluyen el catalizador de ZnO agotado, el catalizador de Ir/Ru agotado, corrientes con trazas de yoduro de metilo y solventes contaminados con metanol.

- Autoridad del Agua (ADA) — Normativa hídrica provincial

  Regula el uso del recurso hídrico y la descarga de efluentes líquidos al estuario de Bahía Blanca. Se requiere permiso de vuelco, cumplimiento de parámetros fisicoquímicos (DBO, DQO, pH, hidrocarburos, entre otros) y control de contaminantes específicos, en coordinación con el monitoreo permanente ejercido por el CTE.

## 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 ácido acético y metanol y su entorno. El proyecto se ubica dentro del Parque Industrial de Bahía Blanca (PIBB), en el límite con la localidad de Ingeniero White, partido de Bahía Blanca, provincia de Buenos Aires, en un predio de 257.000 m² previamente definido en el capítulo de localización. Se trata de un área altamente industrializada con infraestructura consolidada y condiciones ambientales ya influenciadas por actividades antrópicas de larga data.

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**

El Polo Petroquímico y Área Portuaria de Bahía Blanca presenta una situación ambiental ya condicionada por la alta concentración de actividades industriales (refinería, plantas petroquímicas, terminales portuarias y tránsito pesado asociado) que genera una carga de emisiones gaseosas monitoreada de forma permanente. El control ambiental de la zona está a cargo del Comité Técnico Ejecutivo (CTE), que opera cabinas móviles equipadas con analizadores continuos de CO, NO2, SO2, O3 y material particulado.

Entre los principales contaminantes de la región se encuentran el dióxido de azufre (SO2), los óxidos de nitrógeno (NOx), el monóxido de carbono (CO), los compuestos orgánicos volátiles (COV) y el ozono troposférico (O3). Si bien los niveles promedio suelen encontrarse dentro de los límites normativos, se han registrado episodios puntuales de olores característicos de hidrocarburos durante condiciones meteorológicas desfavorables o paradas de planta en industrias vecinas, lo que evidencia la necesidad de un control estricto y continuo de las emisiones propias del proyecto.

**Nivel sonoro**

El entorno industrial del PIBB y del Polo Petroquímico se caracteriza por la presencia de múltiples fuentes de ruido fijas y móviles: maquinaria industrial, compresores, bombas, antorchas y tránsito de camiones y operaciones portuarias. Los niveles sonoros en áreas industriales de este tipo se ubican típicamente entre 65 y 75 dB en horario diurno. Resulta necesario implementar medidas de mitigación (aislamiento acústico, mantenimiento de equipos y silenciadores) para minimizar el impacto sobre la localidad de Ingeniero White, ubicada en las inmediaciones del predio.

#### 8.3.1.2 Clima de la región

De acuerdo con la serie histórica del Servicio Meteorológico Nacional y registros de la Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca presenta un clima templado con marcada influencia de la estepa pampeana, clasificado como tipo BS (semiárido/estepario) según la clasificación climática de Köppen.

| Parámetro | Valor |
|---|---|
| Temperatura media del mes más cálido (enero) | 23,2 °C |
| Temperatura media del mes más frío (julio) | 7,5 °C |
| Temperatura mínima absoluta registrada | -11,8 °C (4 de julio de 1988) |
| Temperatura máxima absoluta registrada | 43,8 °C (21 de enero de 1980) |
| Número medio de días con heladas por año | 35 días (concentrados en jun.-jul.-ago.) |
| Precipitación media anual | 584,6 mm |
| Precipitación anual | 467,4 mm / 673,4 mm |
| Dirección de viento predominante | Cuadrante noroeste (NO) |
| Velocidad media anual del viento | 24 km/h |
| Clasificación climática (Köppen) | BS — estepa |

Tabla 8.1 Tabla de Parámetros climáticos característicos de Bahía Blanca.
Fuente: Elaboración propia en base a Servicio Meteorológico Nacional y Universidad Nacional del Sur.

Con estas condiciones, vientos predominantes del cuadrante noroeste con velocidades moderadas y régimen de precipitación relativamente bajo respecto de otras regiones petroquímicas del país. Condicionan la capacidad de dispersión atmosférica de la zona y deben ser consideradas en el diseño de los sistemas de venteo, la altura de las chimeneas de los economizadores y la ubicación de la antorcha del proyecto.

#### 8.3.1.3 Suelos

Los suelos del partido de Bahía Blanca se han desarrollado principalmente sobre depósitos loéssicos pampeanos, presentando en general texturas franco-limosas. A escala regional se clasifican dentro de los órdenes Molisoles y Argiudoles según el sistema Soil Taxonomy (USDA), con presencia frecuente de horizontes petrocálcicos (bancos de tosca) en profundidad. En los sectores de aluvio-coluvio de la ciudad se han descriptos suelos colapsables (arenas finas con matriz arcillosa que gradan a arenas medianas con cemento calcáreo), condición que debe verificarse mediante estudio geotécnico específico del predio, aun cuando el terreno seleccionado dentro del PIBB corresponde a una superficie ya nivelada y consolidada para uso industrial.

#### 8.3.1.4 Neotectónica

Desde el punto de vista tectónico, el área de emplazamiento se ubica dentro de una región de baja peligrosidad sísmica según la zonificación sísmica nacional (INPRES), característica de la llanura bonaerense. Este contexto resulta favorable para el emplazamiento de instalaciones industriales de proceso, reduciendo los requerimientos estructurales asociados a solicitaciones sísmicas, sin perjuicio de que el diseño estructural de los reactores y columnas de gran altura, deberá contemplar las cargas de viento propias de la región.

#### 8.3.1.5 Hidrología superficial

El área del proyecto se emplaza en las inmediaciones del estuario de Bahía Blanca, uno de los sistemas estuáricos más importantes de la costa atlántica argentina y cuerpo receptor regulado de los efluentes líquidos de las industrias de tercera categoría del Polo Petroquímico, conforme al sistema de vigilancia de calidad ambiental que opera el CTE. A nivel regional, la ciudad se encuentra rodeada por cursos de agua nacidos en las Sierras de la Ventana que descargan en el estuario. El abastecimiento de agua potable de la ciudad depende principalmente del dique Paso de las Piedras, ubicado a unos 55 km al noreste, complementado en períodos de crisis hídrica con la explotación de agua subterránea.

#### 8.3.1.6 Hidrología subterránea

Desde el punto de vista hidrogeológico, en el entorno de Ingeniero White y el Polo Petroquímico se identifican dos sistemas de interés:

- Acuífero libre costero: somero, con el nivel freático aflorante o a escasa profundidad (entre 1 y 17 m), constituido por sedimentos de baja permeabilidad y muy bajo gradiente hidráulico, lo que determina una velocidad de flujo subterráneo lenta y una merma en el caudal drenado hacia el estuario. Esta característica lo hace particularmente sensible a la infiltración de contaminantes provenientes de la actividad industrial.

- Acuífero profundo confinado: constituido por un espeso paquete sedimentario limitado por el basamento cristalino y por capas arcillosas hacia el techo, con recarga en el piedemonte de las Sierras Australes y descarga hacia el mar; presenta además un sistema hidrotermal profundo con gradiente geotérmico local de 46 a 70 °C/km.

Dada la escasa profundidad y baja permeabilidad del acuífero libre costero, el diseño de las áreas de proceso, almacenamiento (TK-207, TK-307) y tratamiento de efluentes deberá incorporar impermeabilización de base y sistemas de monitoreo piezométrico, en línea con las medidas de mitigación desarrolladas en la sección 8.4.

### 8.3.2 Medio biótico

El área de estudio se encuentra comprendida dentro de la ecorregión Pampa, en su variante de estepa pampeana característica del sur de la provincia de Buenos Aires. En el entorno específico del Polo Petroquímico y el PIBB, el medio natural ha sido fuertemente modificado por la actividad antrópica, por lo que la flora y fauna nativas dentro del predio se encuentran significativamente reducidas o alteradas. No obstante, el proyecto se emplaza en la proximidad de un entorno estuárico de alta sensibilidad ecológica, que debe ser especialmente considerado en la evaluación de impactos.

**Flora:**

Dentro del predio industrial, la vegetación se encuentra fuertemente antropizada, observándose vegetación implantada de tipo ornamental y comunidades modificadas en espacios periindustriales. En las zonas de marisma y planicie de marea circundantes al estuario se desarrolla vegetación halófila típica de ambientes estuáricos, como jume, vidriera y palo azul, adaptada a condiciones de alta salinidad y anegabilidad.

**Fauna:**

Dentro del predio predominan especies adaptadas a ambientes antrópicos, como roedores comensales y aves urbanas oportunistas. Sin embargo, el estuario de Bahía Blanca a través de la Reserva Natural Bahía Blanca, Bahía Falsa y Bahía Verde (Ley Provincial N.º 12.101/98, que protege las islas Bermejo, Trinidad, Ariadna, Embudo, Wood y Zuraitas, entre otras) y del sitio de la Red Hemisférica de Reservas para Aves Playeras (WHSRN) que abarca unas 262.500 ha en seis subsitios, constituye un humedal de importancia internacional, sitio de parada de aves migratorias y hábitat de especies emblemáticas como la gaviota cangrejera (Larus atlanticus, en peligro de extinción), delfines y la almeja navaja. Esta proximidad exige que el control de los efluentes líquidos vertidos al estuario sea particularmente riguroso, tal como se desarrolla en la sección de medidas de mitigación.

### 8.3.3 Medio socioeconómico

**Educación y salud**

Según el Informe de Educación en Bahía Blanca 2025, elaborado por el Instituto de Investigaciones Económicas y Sociales del Sur (IIESS, UNS-CONICET) a partir de la Encuesta de Inclusión Social Sostenible 2024, el 29% de la población adulta de la ciudad no completó el nivel secundario, mientras que el 44% alcanzó una trayectoria educativa avanzada con acceso al nivel superior. El nivel educativo se encuentra asociado a la calidad de los puestos de trabajo: quienes completaron el secundario presentan menores tasas de desocupación, subocupación y vulneración de derechos laborales.

**Mercado laboral y actividad económica**

La ciudad de Bahía Blanca con una población de 301.572 habitantes según el Censo 2010 y una estimación de 336.574 habitantes urbanos al 2022, presenta una estructura productiva fuertemente vinculada al Polo Petroquímico y al sistema portuario. Las principales actividades económicas incluyen la producción industrial asociada al polo industrial cercano al puerto, junto con la exportación de productos primarios (soja, trigo, maíz, gas, aceite) a través del puerto de Ingeniero White, uno de los principales del país. Pese a esta dinámica económica, estudios de pobreza multidimensional señalan que la ciudad exhibe con frecuencia indicadores socioeconómicos por debajo de lo esperable para su nivel de actividad, lo que subraya la importancia de que el proyecto contribuya a la generación de empleo de calidad y a la dinamización de proveedores locales.

**Infraestructura vial y ferroviaria**

El PIBB se encuentra a aproximadamente 4-5 km del casco urbano de Bahía Blanca y a 3 km de Ingeniero White, con conexión directa a las rutas nacionales N.º 3, 33 y 35, la ruta provincial N.º 51 y la ruta nacional N.º 22, que lo vinculan con más de 5.000 km de rutas hacia Rosario, Buenos Aires, Río Negro, Neuquén y la frontera con Chile. A nivel ferroviario, el predio se encuentra a 4,7 km de la Estación Ferroviaria Sud de Bahía Blanca, integrada a la red nacional de cargas.

**Infraestructura portuaria**

El Consorcio de Gestión del Puerto de Bahía Blanca (CGPBB) opera el sistema portuario desde 1993, compuesto por múltiples terminales. El PIBB se encuentra a 4 km del puerto de Ingeniero White, a 3,3 km del puerto Galván, a 3,5 km del puerto Frío S.A. y a 24 y 21 km de los puertos de Rosales y Belgrano, respectivamente (Punta Alta). Esta cercanía resulta estratégica tanto para la recepción de insumos como para la exportación de metanol y ácido acético grado polimérico.

**Infraestructura eléctrica y de gas natural**

El suministro eléctrico de la región se encuentra vinculado al Sistema Argentino de Interconexión (SADI) a través de las redes de transporte en alta tensión (Transener/Transba) y la distribución local, con subestaciones de transformación dedicadas al sector portuario e industrial que garantizan la estabilidad de carga requerida por procesos de gran consumo, como los compresores de gas de síntesis del presente proyecto.

La provisión de gas natural está a cargo de la distribuidora Camuzzi Gas Pampeana, abastecida por Transportadora de Gas del Sur (TGS). Resulta particularmente relevante para este proyecto la presencia del Complejo General Cerri de TGS, ubicado en el propio partido de Bahía Blanca, que constituye uno de los principales centros de procesamiento y fraccionamiento de gas natural del país. Esta cercanía a una fuente de gas natural de gran escala refuerza significativamente la seguridad de abastecimiento y la competitividad logística de la localización elegida.

## 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 el proyecto puede generar sobre el entorno. En el caso de la presente planta, correspondiente a la producción de ácido acético grado polimérico y metanol a partir de gas natural, resulta indispensable analizar las interacciones entre las actividades productivas y el medio ambiente, considerando las características propias del Polo Petroquímico y Área Portuaria de Bahía Blanca.

### 8.4.1 Problemática ambiental asociada al proyecto

El proyecto contempla la instalación de una planta que integra tres Etapas de proceso: producción de gas de síntesis mediante reformado autotérmico (R-102) con desulfuración previa (D-101) y separación de CO por columnas de presión diferencial (AB-105); síntesis y purificación de metanol (R-201 y tren T-204/T-205/T-206); y carbonilación catalítica homogénea de metanol con CO para producir ácido acético (R-301, catalizador de Ir/Ru con promotor de yoduro de metilo, y tren de purificación T-304/T-305/T-306). Esta localización presenta ventajas en términos de infraestructura,

logística y disponibilidad de gas natural, además de situarse en un entorno con tradición industrial que favorece su viabilidad operativa y social.

No obstante, el proceso productivo involucra el manejo de sustancias inflamables (gas natural, hidrógeno, metanol), tóxicas (monóxido de carbono, yoduro de metilo) y corrosivas (ácido acético), así como el uso intensivo de energía, gas natural y recursos hídricos, lo que implica la generación de impactos ambientales y riesgos de proceso que deben ser gestionados adecuadamente.

**Efluentes gaseosos**

Las principales emisiones atmosféricas se originan en el reformador autotérmico (R-102) y en los economizadores de recuperación de calor, así como en eventuales venteos del sistema de separación por presión diferencial (AB-105) y del sistema de purificación de metanol (F-203). Durante la operación normal y en situaciones de emergencia pueden generarse:

- Dióxido de carbono ($CO_2$) proveniente de la combustión en el reformador.
- Trazas de monóxido de carbono (CO) e hidrógeno ($H_2$) en venteos del sistema PSA.
- Compuestos orgánicos volátiles (metanol, ácido acético) por emisiones fugitivas en almacenamiento

Para minimizar estos impactos se prevé la implementación de sistemas de control de emisiones, tales como detección continua de gases combustibles y tóxicos, venteo controlado a antorcha (tea) para corrientes de emergencia, y monitoreo continuo de emisiones en las chimeneas de los economizadores, en coordinación con las cabinas EMCABBs del CTE.

**Efluentes líquidos**

Los efluentes líquidos se generarán principalmente a partir de purgas de los sistemas de generación de vapor, fondos y condensados de las columnas de purificación (T-204/T-205/T-206 y T-304/T-305/T-306), limpieza de equipos y eventuales derrames. Estos efluentes pueden contener trazas de metanol, ácido acético, yoduro de metilo y, en menor medida, hidrocarburos y catalizador arrastrado.

Dado que el estuario de Bahía Blanca es el cuerpo receptor regulado por la Autoridad del Agua (ADA) y controlado por el Comité Técnico Ejecutivo (CTE), se prevé un sistema integral de gestión que incluye recolección en sistemas de contención primaria, tratamiento físico-químico (neutralización, separación, decantación) y verificación de parámetros (pH, DBO, DQO, hidrocarburos) antes del vuelco, con posible derivación a operadores habilitados para tratamiento externo de corrientes concentradas.

**Residuos sólidos**

Los residuos sólidos generados incluyen catalizador de óxido de zinc (ZnO) agotado del desulfurador D-101 (ciclo de reemplazo del orden de 61 días, en dos recipientes lead/standby), catalizador homogéneo de Ir/Ru agotado del reactor de carbonilación R-301, materiales contaminados de mantenimiento (absorbentes, trapos, filtros) y residuos asimilables a urbanos. La gestión de estos residuos se realizará mediante clasificación en origen, almacenamiento seguro, y transporte y disposición final a través de operadores autorizados conforme a la Ley N.º 24.051, priorizándose la

recuperación de metales del catalizador de Ir/Ru cuando resulte técnicamente viable dado su valor económico.

### 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:

**I. Fase de construcción:**

- Movimiento de suelos, nivelación y acondicionamiento del terreno dentro del predio del PIBB.
- Construcción de fundaciones, estructuras metálicas y tanques de almacenamiento (TK-207, TK-307).
- Montaje de equipos de proceso —reactores R-102, R-201 y R-301, columnas T-204/205/206 y T-304/305/306— 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.

**II. Fase de operación:**

- Recepción, almacenamiento y manejo de materias primas (gas natural, oxígeno).
- Reformado autotérmico, separación de CO, síntesis de metanol y carbonilación (producción de ácido acético).
- Almacenamiento y despacho de metanol y ácido acético grado polimérico.
- Tratamiento de efluentes gaseosos y líquidos.
- Monitoreo ambiental continuo y control de variables de proceso

En esta fase se concentran los principales impactos ambientales y de seguridad de proceso, por lo que se implementarán sistemas de control, mitigación y monitoreo permanente, en línea con las exigencias del CTE.

**III. Fase de cierre o abandono:**

- Limpieza y descontaminación de equipos e instalaciones, con especial atención a trazas de yoduro de metilo.
- Gestión y disposición final de residuos remanentes, incluyendo recuperación del catalizador de Ir/Ru.
- Desmantelamiento de estructuras.
- Restauración del sitio

El objetivo es minimizar los impactos residuales y garantizar condiciones ambientales adecuadas para futuros usos del terreno dentro del PIBB.

### 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 actividades más relevantes del proyecto. Esta etapa inicial permitió establecer una base clara de los elementos del entorno que podrían experimentar cambios significativos.

| Medio | Factor | Subfactor |
|---|---|---|
| Medio Físico | Aire | Calidad fisicoquímica (F1) |
| | | Nivel de material particulado (F2) |
| | | Nivel sonoro (F3) |
| | Agua | Superficial (F4) |
| | | Subterránea (F5) |
| | Suelo | Calidad fisicoquímica (F6) |
| Medio Biótico | Flora | Introducida (F7) |
| | Fauna | Autóctona (F8) |
| Medio Socioeconómico | Sociedad | Educación (F9) |
| | | Calidad de vida (F10) |
| | Infraestructura | Redes eléctricas (F11) |
| | | Redes de gas (F12) |
| | | Redes viales (F13) |
| | Economía | Nivel de empleo (F14) |
| | | Regional (F15) |
| Medio Perceptual | Paisaje | Visual (F16) |

Tabla 8.2 Tabla de Factores y subfactores por medio.
Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, se procedió a vincular las acciones del proyecto con los factores identificados mediante 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 se indica N.C. (No Corresponde). Una vez identificados los impactos, se avanzó con su valoración cualitativa mediante una matriz de Leopold adaptada, que evalúa cada impacto según su naturaleza, intensidad, extensión, momento y persistencia, durante las fases de construcción, operación y cierre.

| Criterio | Categorías |
|---|---|
| Naturaleza | Impacto beneficioso / Impacto perjudicial |
| Intensidad | Baja (Ba) / Media (Me) / Alta (Al) / Muy alta (MA) |
| Extensión | Puntual (Pu) / Parcial (Pa) / Extenso (E) / Total (To) |
| Momento | Inmediato (I) / Medio plazo (MP) / Largo plazo (LP) |
| Persistencia | Fugaz (F, <1 año) / Temporal (Te, 1 a 3 años) / Permanente (Pe, 3 a 12 años) |

Tabla 8.3 Criterios e indicadores de valoración

Fuente: elaboración propia, adaptado de la metodología de matriz de Leopold.

#### 8.4.3.1 Acciones del proyecto consideradas

Las acciones del proyecto consideradas en la matriz, agrupadas por fase, se listan en la Tabla siguiente. Los códigos A1 a A11 se utilizan como referencia en las matrices de identificación y valoración.

| Cód. | Acción del Proyecto |
|---|---|
| A1 | Movimiento de suelos y nivelación (Construcción) |
| A2 | Construcción de fundaciones y obra civil (Construcción) |
| A3 | Montaje de equipos y estructuras (Construcción) |
| A4 | Gestión de obra (obrador y logística) (Construcción) |
| A5 | Recepción y almacenamiento de materias primas (Operación) |
| A6 | Producción (reformado, síntesis y carbonilación) (Operación) |
| A7 | Tratamiento de efluentes (Operación) |
| A8 | Almacenamiento y despacho de productos (Operación) |
| A9 | Mantenimiento, limpieza y descontaminación de equipos (Operación) |

| Cód. | Acción del Proyecto |
|---|---|
| A10 | Disposición final de residuos remanentes (Cierre) |
| A11 | Desmantelamiento y restauración del sitio (Cierre) |

Tabla 8.4 Tabla de Acciones del proyecto consideradas.
Fuente: Elaboración propia.

### 8.4.3.2 Matriz de identificación de los impactos generados

A continuación se presenta la matriz de identificación de impactos, organizada según la fase del proyecto (construcción: A1-A4; operación: A5-A9; cierre: A10-A11).

| Factor / Subfactor | A1 | A2 | A3 | A4 |
|---|---|---|---|---|
| Aire — Calidad fisicoquímica (F1) | N.C. | N.C. | Emisiones de motores de equipos de izaje y soldadura | N.C. |
| Aire — Nivel de material particulado (F2) | Generación de polvo por movimiento de suelos | N.C. | N.C. | N.C. |
| Aire — Nivel sonoro (F3) | Aumento de ruido por maquinaria de movimiento de suelos | Aumento de ruido por obra civil | Aumento de ruido por montaje e izaje | N.C. |
| Agua — Superficial (F4) | N.C. | N.C. | N.C. | Posible contaminación por escorrentía del obrador |
| Agua — Subterránea (F5) | Reducción de infiltración por compactación | Impermeabilización parcial del terreno | N.C. | Posible contaminación por derrames del obrador |
| Suelo — Calidad fisicoquímica (F6) | Alteración por compactación | Alteración del terreno | N.C. | Posible contaminación por residuos de obra |
| Flora — Introducida (F7) | Remoción de cobertura vegetal existente | N.C. | N.C. | N.C. |

| Factor / Subfactor | A1 | A2 | A3 | A4 |
|---|---|---|---|---|
| Fauna — Autóctona (F8) | Alteración de hábitat y desplazamiento de fauna | Desplazamiento de fauna | N.C. | N.C. |
| Sociedad — Educación (F9) | N.C. | N.C. | N.C. | Posible capacitación de mano de obra local |
| Sociedad — Calidad de vida (F10) | Molestias por ruido y polvo a la comunidad de Ingeniero White | Molestias por tránsito de obra | Molestias por ruido | Molestias por residuos del obrador |
| Infraestructura — Redes eléctricas (F11) | N.C. | N.C. | Consumo energético para tareas de montaje | N.C. |
| Infraestructura — Redes de gas (F12) | N.C. | N.C. | N.C. | N.C. |
| Infraestructura — Redes viales (F13) | Aumento del tránsito de maquinaria | Aumento del tránsito pesado | Aumento del tránsito por montaje | N.C. |
| Economía — Nivel de empleo (F14) | Generación de empleo temporal | Empleo en construcción | Empleo técnico especializado (montaje de reactores e instrumentación) | Empleo indirecto |
| Economía — Regional (F15) | Impacto positivo temporal por dinamización de proveedores locales | Impacto menor por compras locales de obra | Impacto por contratación de servicios técnicos regionales | N.C. |

| Factor / Subfactor | A1 | A2 | A3 | A4 |
|---|---|---|---|---|
| Paisaje — Visual (F16) | Alteración temporal del paisaje | Presencia de estructuras en construcción | Impacto visual por reactores y columnas de gran altura (T-205, T-305) | N.C. |

Tabla 8.5 Tabla de Matriz de identificación de impactos — Construcción (A1-A4).
Fuente: Elaboración propia.

| Factor / Subfactor | A5 | A6 | A7 | A8 | A9 |
|---|---|---|---|---|---|
| Aire — Calidad fisicoquímica (F1) | N.C. | Emisión de CO2 en economizadores (E-103/E-202/E-303); trazas de CO, H2 y CH3OH en venteos de AB-105 y F-203 | Emisión controlada por antorcha de venteos de emergencia (CO, H2, CH4) | Emisiones fugitivas de COV (metanol, ácido acético) en TK-207/TK-307 | Emisión de gases residuales durante apertura de equipos |
| Aire — Nivel de material particulado (F2) | N.C. | N.C. | N.C. | N.C. | N.C. |
| Aire — Nivel sonoro (F3) | Ruido por descarga y bombeo de materias primas | Ruido operativo de reactores, compresores de gas de síntesis y sopladores | Ruido de bombas y sopladores de la planta de tratamiento | Ruido por logística de despacho (camiones cisterna) | Ruido por equipos de limpieza |
| Agua — Superficial (F4) | Posibles derrames durante la descarga de materias primas | N.C. | Contaminación por purgas o falla en el tratamiento antes | Riesgo por derrames en el área | Posible contaminación por lavado de equipos |

| Factor / Subfactor | A5 | A6 | A7 | A8 | A9 |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | del vuelco al estuario de Bahía Blanca | de tanques (TK-207/TK-307) | |
| Agua — Subterránea (F5) | Riesgo de infiltración por pérdidas en la descarga | N.C. | Riesgo de infiltración de contaminantes en piletas de tratamiento | Riesgo por fugas de almacenamiento (TK-207/TK-307) | Posible infiltración por derrames en tareas de limpieza |
| Suelo — Calidad fisicoquímica (F6) | Contaminación por derrames accidentales de materias primas | N.C. | Contaminación por residuos mal gestionados del tratamiento | Contaminación por pérdidas de producto (metanol, ácido acético) | Contaminación por derrames en la limpieza de equipos |
| Flora — Introducida (F7) | N.C. | N.C. | N.C. | N.C. | N.C. |
| Fauna — Autóctona (F8) | N.C. | N.C. | Riesgo de afectación a la avifauna del estuario (Reserva Natural Bahía Blanca, Bahía Falsa y Bahía Verde) ante un eventual vuelco fuera de norma | N.C. | N.C. |

| Factor / Subfactor | A5 | A6 | A7 | A8 | A9 |
|---|---|---|---|---|---|
| Sociedad — Educación (F9) | N.C. | N.C. | N.C. | N.C. | N.C. |
| Sociedad — Calidad de vida (F10) | Riesgo bajo por tránsito de camiones con materias primas | Riesgo por exposición a contaminantes (CO, CH3I) en caso de fuga | Riesgo controlado por vuelco de efluentes al estuario | Riesgo por accidentes en la logística de despacho | Riesgo por exposición durante tareas de limpieza |
| Infraestructura — Redes eléctricas (F11) | N.C. | Alto consumo eléctrico en compresores de gas de síntesis y en el sistema PSA (AB-105) | Consumo energético del tratamiento de efluentes | N.C. | Consumo para tareas de limpieza |
| Infraestructura — Redes de gas (F12) | N.C. | Alto consumo de gas natural como materia prima de reformado (R-102) y como combustible auxiliar | N.C. | N.C. | N.C. |
| Infraestructura — Redes viales (F13) | Aumento del tránsito por ingreso de materias primas | N.C. | N.C. | Aumento del tránsito por despacho de metanol y ácido acético | Tránsito de camiones con residuos peligrosos (catalizadores agotados) |

| Factor / Subfactor | A5 | A6 | A7 | A8 | A9 |
|---|---|---|---|---|---|
| Economía — Nivel de empleo (F14) | Empleo operativo | Empleo técnico especializado en operación de planta | Empleo en gestión ambiental | Empleo logístico | Empleo temporal en mantenimiento |
| Economía — Regional (F15) | Impacto positivo por movimiento portuario y logístico del PIBB | Impacto económico regional por producción sostenida de metanol y ácido acético | N.C. | Impacto positivo por exportación de metanol y ácido acético vía Puerto de Bahía Blanca | N.C. |
| Paisaje — Visual (F16) | N.C. | N.C. | N.C. | Impacto visual por tanques de almacenamiento (TK-207, TK-307) | N.C. |

Tabla 8.6 Tabla de Matriz de identificación de impactos — Operación (A5-A9).
Fuente: Elaboración propia.

| Factor / Subfactor | A10 | A11 |
|---|---|---|
| Aire — Calidad fisicoquímica (F1) | N.C. | Emisión de polvo por demolición |
| Aire — Nivel de material particulado (F2) | Posible emisión de material particulado en el manejo de catalizador agotado (ZnO, Ir/Ru) | Emisión de polvo por demolición de estructuras |
| Aire — Nivel sonoro (F3) | N.C. | Incremento de decibeles por maquinaria de desmontaje |

| Factor / Subfactor | A10 | A11 |
|---|---|---|
| Agua — Superficial (F4) | Posible contaminación por disposición incorrecta de residuos | N.C. |
| Agua — Subterránea (F5) | Posible infiltración por mala disposición de residuos | N.C. |
| Suelo — Calidad fisicoquímica (F6) | Contaminación sin disposición adecuada | Remediación del suelo y restauración a condiciones originales |
| Flora — Introducida (F7) | Posible afectación indirecta por residuos | Mejora por restauración del sitio |
| Fauna — Autóctona (F8) | Posible afectación por residuos | Mejora progresiva del hábitat |
| Sociedad — Educación (F9) | N.C. | N.C. |
| Sociedad — Calidad de vida (F10) | Posible afectación si hay mala gestión de residuos | Mejora por eliminación de la actividad industrial |
| Infraestructura — Redes eléctricas (F11) | N.C. | Disminución del consumo |
| Infraestructura — Redes de gas (F12) | N.C. | Disminución del consumo |
| Infraestructura — Redes viales (F13) | Tránsito por retiro de residuos | Tránsito por desmontaje |
| Economía — Nivel de empleo (F14) | Empleo en gestión de residuos | Disminución del empleo permanente |

| Factor / Subfactor | A10 | A11 |
|---|---|---|
| Economía — Regional (F15) | N.C. | Disminución de la actividad económica regional |
| Paisaje — Visual (F16) | N.C. | Mejora visual por eliminación de instalaciones |

Tabla 8.7 Tabla de Matriz de identificación de impactos — Cierre (A10-A11).
Fuente: Elaboración propia.

#### 8.4.3.3 Matriz de valoración de los impactos generados

La matriz de valoración expresa, para cada impacto identificado, el código Extensión-Momento-Persistencia (por ejemplo, Pu-I-F: puntual, inmediato, fugaz), coloreado según su naturaleza e intensidad: verde para impactos beneficiosos (más oscuro cuanto mayor la intensidad) y de amarillo a rojo para impactos perjudiciales (más oscuro/rojo cuanto mayor la intensidad).

| Factor / Subfactor | A1 | A2 | A3 | A4 |
|---|---|---|---|---|
| Aire — Calidad fisicoquímica (F1) | | | Pu-I-F | |
| Aire — Nivel de material particulado (F2) | Pa-I-F | | | |
| Aire — Nivel sonoro (F3) | Pu-I-F | Pu-I-F | Pu-I-F | |
| Agua — Superficial (F4) | | | | Pu-MP-F |
| Agua — Subterránea (F5) | Pu-MP-Pe | Pu-MP-Pe | | Pu-MP-Te |
| Suelo — Calidad fisicoquímica (F6) | Pu-I-Te | Pu-I-Te | | Pu-I-F |

| Factor / Subfactor | A1 | A2 | A3 | A4 |
|---|---|---|---|---|
| Flora — Introducida (F7) | Pu-I-Pe | | | |
| Fauna — Autóctona (F8) | Pu-I-Te | Pu-I-F | | |
| Sociedad — Educación (F9) | | | | Pu-I-Te |
| Sociedad — Calidad de vida (F10) | Pa-I-F | Pa-I-F | Pu-I-F | Pu-I-F |
| Infraestructura — Redes eléctricas (F11) | | | Pu-I-F | |
| Infraestructura — Redes de gas (F12) | | | | |
| Infraestructura — Redes viales (F13) | Pa-I-F | Pa-I-F | Pa-I-F | |
| Economía — Nivel de empleo (F14) | Pa-I-Te | Pa-I-Te | Pa-I-Te | Pa-I-Te |
| Economía — Regional (F15) | E-I-Te | Pa-I-Te | Pa-I-Te | |
| Paisaje — Visual (F16) | Pu-I-F | Pu-I-Te | Pa-I-Pe | |

Tabla 8.7 Tabla de Matriz de valoración de impactos — Construcción (A1-A4).
Fuente: Elaboración propia.

| Factor / Subfactor | A5 | A6 | A7 | A8 | A9 |
|---|---|---|---|---|---|
| Aire — Calidad fisicoquímica (F1) | | Pa-I-Te | Pu-I-F | Pu-I-F | Pu-I-F |
| Aire — Nivel de material particulado (F2) | | | | | |
| Aire — Nivel sonoro (F3) | Pu-I-F | Pa-I-Pe | Pu-I-Pe | Pu-I-F | Pu-I-F |
| Agua — Superficial (F4) | Pu-I-F | | Pa-I-Te | Pu-I-F | Pu-I-F |
| Agua — Subterránea (F5) | Pu-MP-Te | | Pu-MP-Pe | Pu-MP-Pe | Pu-MP-Te |
| Suelo — Calidad fisicoquímica (F6) | Pu-I-Te | | Pu-I-Te | Pu-I-Te | Pu-I-F |
| Flora — Introducida (F7) | | | | | |
| Fauna — Autóctona (F8) | | | Pa-I-Te | | |
| Sociedad — Educación (F9) | | | | | |
| Sociedad — Calidad de vida (F10) | Pa-I-F | Pu-I-F | Pa-I-Te | Pu-I-F | Pu-I-F |
| Infraestructura — Redes eléctricas (F11) | | Pu-I-Pe | Pu-I-Pe | | Pu-I-F |
| Infraestructura — Redes de gas (F12) | | Pu-I-Pe | | | |

| Factor / Subfactor | A5 | A6 | A7 | A8 | A9 |
|---|---|---|---|---|---|
| Infraestructura — Redes viales (F13) | Pa-I-Pe | | | Pa-I-Pe | Pu-I-F |
| Economía — Nivel de empleo (F14) | Pa-I-Pe | Pa-I-Pe | Pu-I-Pe | Pa-I-Pe | Pu-I-Te |
| Economía — Regional (F15) | E-I-Pe | To-I-Pe | | To-I-Pe | |
| Paisaje — Visual (F16) | | | | Pu-I-Pe | |

Tabla 8.8 Tabla de Matriz de valoración de impactos — Operación (A5-A9)).
Fuente: Elaboración propia.

| Factor / Subfactor | A10 | A11 |
|---|---|---|
| Aire — Calidad fisicoquímica (F1) | | Pu-I-F |
| Aire — Nivel de material particulado (F2) | Pu-I-F | Pa-I-F |
| Aire — Nivel sonoro (F3) | | Pu-I-F |
| Agua — Superficial (F4) | Pu-MP-Te | |
| Agua — Subterránea (F5) | Pu-MP-Pe | |

| Factor / Subfactor | A10 | A11 |
|---|---|---|
| Suelo — Calidad fisicoquímica (F6) | Pu-MP-Pe | Pa-LP-Pe |
| Flora — Introducida (F7) | Pu-MP-Te | Pu-LP-Pe |
| Fauna — Autóctona (F8) | Pu-MP-Te | Pu-LP-Pe |
| Sociedad — Educación (F9) | | |
| Sociedad — Calidad de vida (F10) | Pu-MP-Te | Pa-LP-Pe |
| Infraestructura — Redes eléctricas (F11) | | Pu-LP-Pe |
| Infraestructura — Redes de gas (F12) | | Pu-LP-Pe |
| Infraestructura — Redes viales (F13) | Pu-MP-F | Pu-LP-F |
| Economía — Nivel de empleo (F14) | Pu-MP-Te | Pa-LP-Pe |
| Economía — Regional (F15) | | E-LP-Pe |
| Paisaje — Visual (F16) | | Pa-LP-Pe |

Tabla 8.9 Tabla de Matriz de valoración de impactos — Cierre (A10-A11).
Fuente: Elaboración propia.

#### 8.4.3.4 Medidas de prevención y mitigación

A partir de los impactos identificados y valorados, se definieron medidas específicas de prevención y mitigación, vinculadas a las acciones y subfactores correspondientes.

| Impacto (factor/acción) | Actividad y subfactor | Medida propuesta |
|---|---|---|
| F1/A6 | Producción — Calidad de aire | Sistema de detección continua de CO, H2 y CH4 en salas de compresores y zonas de reactores; interconexión con sistema de parada de emergencia (ESD). |
| F1/A7 | Tratamiento de efluentes — Calidad de aire | Venteo controlado a antorcha (tea) de las corrientes de emergencia de CO/H2/CH4; monitoreo continuo de emisiones en chimeneas de los economizadores (E-103/E-202/E-303). |
| F2/A1, A11 | Movimiento de suelos / Demolición — Material particulado | Humectación de caminos internos y acopios, limitación de velocidad de circulación, barreras físicas durante demolición. |
| F3/A1–A3, A6 | Construcción / Producción — Nivel sonoro | Uso de silenciadores en compresores y sopladores, encerramientos acústicos, mantenimiento preventivo y restricción horaria de tareas ruidosas. |
| F4/A7 | Tratamiento de efluentes — Agua superficial (estuario) | Planta de tratamiento físico-químico con control de pH, DBO, DQO e hidrocarburos antes del vuelco, cumpliendo los límites fijados por la Autoridad del Agua (ADA) y verificados por el Comité Técnico Ejecutivo (CTE) del Polo Petroquímico y Área Portuaria de Bahía Blanca. |
| F5/A7, A8 | Tratamiento de efluentes / Almacenamiento — Agua subterránea | Impermeabilización de piletas y bases de tanques (TK-207/TK-307) con geomembranas, bandejas de contención y red de pozos de monitoreo piezométrico. |
| F6/A5, A6 | Recepción de MP / Producción — Suelo | Pisos impermeables y bermas de contención en áreas de descarga y proceso; protocolo específico de contención para derrames de yoduro de metilo (CH3I), dada su volatilidad y toxicidad. |
| F6/A11 | Desmantelamiento — Suelo | Remediación del suelo y restitución a condiciones aptas para uso industrial, con |

| Impacto (factor/acción) | Actividad y subfactor | Medida propuesta |
|---|---|---|
| | | muestreo y certificación conforme a la normativa provincial. |
| F7–F8/A1, A7 | Construcción / Tratamiento de efluentes — Flora y fauna | Minimización del desmonte al área estrictamente necesaria; control estricto de la calidad del efluente vertido al estuario para proteger la avifauna de la Reserva Natural Bahía Blanca, Bahía Falsa y Bahía Verde y del sitio de importancia hemisférica para aves playeras (WHSRN). |
| F10/A6 | Producción — Calidad de vida / seguridad de proceso | Programa de gestión de riesgo tecnológico (HAZOP, análisis de capas de protección) para las corrientes con CO, H2 y CH3I; planes de emergencia articulados con la Comisión de Respuesta de Emergencia y el programa APELL de Bahía Blanca. |
| F10/A1–A3 | Construcción — Calidad de vida | Plan de gestión de tránsito, comunicación con la comunidad de Ingeniero White y cumplimiento de horarios de obra. |
| F11–F12/A6 | Producción — Redes eléctricas y de gas | Optimización energética del proceso mediante integración de vapor de alta, media y baja presión (E-103, E-202, E-303) y uso eficiente del gas natural como materia prima. |
| F13/A5, A8, A9 | Recepción / Despacho / Mantenimiento — Redes viales | Planificación de rutas y horarios de circulación de camiones y cisternas coordinada con el PIBB y el Consorcio de Gestión del Puerto de Bahía Blanca. |
| F14/A11 | Desmantelamiento — Empleo | Priorización de contratación local para las tareas de cierre y capacitación técnica del personal. |
| F1–F6/A10 | Disposición de residuos — Aire/Agua/Suelo | Gestión diferenciada de catalizador de ZnO agotado (D-101) y de catalizador de Ir/Ru agotado (R-301) mediante operadores habilitados, con recuperación de metales cuando sea técnicamente viable, en cumplimiento de la Ley N.º 24.051 y su adhesión provincial. |

Tabla 8.10 Tabla de Medidas de prevención y mitigación
Fuente: Elaboración propia.

### 8.4.4 Selección de equipos para el tratamiento de efluentes y control de riesgo tecnológico

En función de los impactos ambientales identificados y de las características del proceso productivo, en particular la presencia de gases combustibles y tóxicos (CO, H2), compuestos volátiles con yoduro (CH3I) y efluentes corrosivos (ácido acético). Se seleccionaron los principales equipos destinados al tratamiento de efluentes gaseosos y líquidos, así como a la prevención de contingencias operativas. La elección responde a criterios de eficiencia, viabilidad técnica y adecuación a la normativa ambiental vigente, en particular a los estándares exigidos por el CTE para las industrias de tercera categoría del Polo Petroquímico.

#### 8.4.4.1 Sistema de detección de gases y antorcha (flare)

Dado que el proceso maneja corrientes con monóxido de carbono e hidrógeno, se incorpora un sistema de detección continua de gases combustibles y tóxicos en las salas de compresores y en el entorno de los reactores R-102, R-201 y AB-105, interconectado con el sistema de parada de emergencia (ESD) de la planta. Las corrientes de venteo de emergencia y las purgas del sistema PSA que no puedan reincorporarse al proceso se derivan a un sistema de antorcha (tea) para su combustión controlada, minimizando la liberación de CO e hidrocarburos no quemados a la atmósfera.

#### 8.4.4.2 Torre de lavado (scrubber) para venteos del tren de carbonilación

Como etapa complementaria al tratamiento de gases del área de ácido acético, se incorpora una torre de lavado húmedo destinada a la remoción de trazas de yoduro de metilo (CH3I) y de vapores ácidos presentes en los venteos del reactor de carbonilación (R-301) y de la columna de remoción de ligeros (T-304). Esta unidad resulta clave dado el carácter tóxico y corrosivo del sistema catalítico homogéneo de Ir/Ru con promotor de yoduro empleado en el proceso.

#### 8.4.4.3 Planta de tratamiento físico-químico de efluentes líquidos

Para el tratamiento de los efluentes líquidos generados en la planta, principalmente purgas de calderas, fondos de columnas y eventuales derrames. Se propone la implementación de un sistema de tratamiento físico-químico compuesto por tanque de igualación, separador de hidrocarburos tipo API, sistema de neutralización (dado el contenido ácido de algunas corrientes) y sedimentador. La función de esta planta es garantizar que los efluentes vertidos al estuario de Bahía Blanca cumplan los parámetros exigidos por la Autoridad del Agua (ADA) y verificados por el CTE (pH, DBO, DQO, hidrocarburos) antes de su disposición final.

#### 8.4.4.4 Sistema de contención y recuperación de derrames

Como medida preventiva ante posibles contingencias, se incorpora un sistema de contención y recuperación de derrames conformado por diques de contención en el área de tanques (TK-207, TK-307) y en las zonas de proceso, bandejas de contención bajo equipos críticos y un protocolo específico para derrames de yoduro de metilo, dada su alta volatilidad y toxicidad. El objetivo es evitar la dispersión de sustancias peligrosas hacia el suelo o hacia el estuario de Bahía Blanca.

#### 8.4.4.5 Gestión de catalizadores agotados

Se prevé un procedimiento diferenciado para la gestión del catalizador de óxido de zinc (ZnO) agotado del desulfurador D-101 y del catalizador homogéneo de Ir/Ru agotado del reactor de carbonilación R-301, cuya elevada toxicidad y valor económico justifican un protocolo de recuperación de metales preciosos a través de proveedores especializados, conforme a la Ley N.º 24.051.

### 8.4.5 Conclusión

El desarrollo del presente capítulo permitió analizar de manera integral los principales aspectos ambientales asociados al proyecto de producción de ácido acético grado polimérico y metanol a partir de gas natural, identificando las interacciones más relevantes entre las actividades del proceso productivo y el entorno del Parque Industrial de Bahía Blanca. A partir de la caracterización de las distintas etapas y se logró reconocer los potenciales impactos sobre los componentes ambientales, tales como aire, agua y suelo, así como sobre la seguridad de proceso y la sensibilidad ecológica del estuario de Bahía Blanca.

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 monóxido de carbono e hidrógeno, la producción de efluentes líquidos con contenido de metanol, ácido acético y trazas de yoduro de metilo, y la generación de residuos sólidos industriales, en particular los catalizadores de ZnO e Ir/Ru agotados. Asimismo, se identificaron riesgos asociados a eventuales derrames y al manejo de sustancias tóxicas e inflamables, los cuales requieren especial atención en términos de prevención, detección y control, dado el marco regulatorio particularmente estricto vigente en el Polo Petroquímico y Área Portuaria de Bahía Blanca.

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 que permite reducir significativamente la magnitud y extensión de los impactos identificados, en particular sobre el estuario y la Reserva Natural Bahía Blanca, Bahía Falsa y Bahía Verde.

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 y de los requerimientos específicos del Comité Técnico Ejecutivo (CTE). De esta manera, se asegura un equilibrio entre el desarrollo industrial y la protección del ambiente, promoviendo un enfoque de producción más sustentable dentro del Polo Petroquímico y Área Portuaria de Bahía Blanca.

# CAPÍTULO N° 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 ácido acético grado polimérico, obtenido a partir de metano con metanol como subproducto/intermedio, localizada en el Polo Industrial Bahía Blanca (PIBB), Provincia de Buenos Aires. Se integra con la selección de localización, tecnología y tamaño definidos en los capítulos precedentes del Proyecto Integrador.

La planta se emplaza dentro del PIBB, en el límite con la localidad de Ingeniero White, sobre un terreno de 257.000 m² con zonificación industrial compatible y acceso logístico al Puerto de Bahía Blanca, utilizado para el despacho de metanol y ácido acético grado polimérico con destino de exportación al Mercosur, principalmente Brasil, y para la eventual recepción de insumos y equipos importados. Estas premisas surgen del Capítulo de Localización del Proyecto Integrador y fundamentan la aplicabilidad del marco regulatorio bonaerense y municipal correspondiente, así como del régimen específico del Polo Petroquímico y Área Portuaria de Bahía Blanca (Ley provincial N.º 12.530), ya introducido en el Capítulo VIII (Aspectos Ambientales) a través de la matriz de Leopold y el marco legal ambiental allí desarrollado.

El objetivo del presente capítulo es doble:

- Identificar las normas de presupuestos mínimos y jurisdiccionales (nación–provincia–municipio) que gobiernan el emprendimiento.

- 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° 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 esta planta, cuyo proceso involucra corrientes de monóxido de carbono, hidrógeno, metanol y ácido acético (con trazas de yoduro de metilo en la sección de carbonilación), 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 la empresa, 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 este caso, además, por la normativa específica de la Provincia de Buenos Aires y del Polo Petroquímico y Área Portuaria de Bahía Blanca). 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 desde/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).

La Ley 25.612 Gestión Integral de Residuos Industriales y de Actividades de Servicio, 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. La autoridad de aplicación y detalles operativos se complementan con las jurisdicciones provinciales (en la Provincia de Buenos Aires, además, la Ley 11.720/Dec. 806/97).

La Ley 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 la Provincia de Buenos Aires, ADA – Código de Aguas 12.257), lo que resulta especialmente relevante dado que el vuelco final de efluentes del proyecto se produce al estuario de Bahía Blanca, conforme se analizó en la matriz de Leopold del Capítulo VIII.

**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 una planta que manipula monóxido de carbono, hidrógeno, metanol y ácido acético, y que emplea yoduro de metilo como intermediario de reacción en el reactor de carbonilación, estas reglas se interrelacionan con clasificación de áreas, protección contra incendios y explosiones (dado el carácter inflamable de H2 y metanol, y tóxico del CO), 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 metanol y ácido acético, rigen principalmente:

**Ley de Contrato de Trabajo (Ley N° 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° 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 ésta 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, ácido acético y monóxido de carbono.

**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, presupuestos mínimos | Toda actividad con impacto | Prevenir y, si hay daño, recomponer; no ingreso de residuos peligrosos/radiactivos | Marco constitucional |
| 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/derivación; permisos de 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

Fuente: Elaboración Propia.

### 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. A esto se suma, por tratarse de un emprendimiento que se radica dentro del Polo Petroquímico y Área Portuaria de Bahía Blanca, un régimen provincial específico de control ambiental para ese ámbito (Ley 12.530), que no tiene equivalente en otras localizaciones industriales de la provincia.

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. Dado el proceso de reformado autotérmico, síntesis y purificación de metanol, y carbonilación catalítica para obtener ácido acético grado polimérico, con manejo de gases inflamables (H2) y tóxicos (CO), y de un intermediario altamente reactivo (CH3I), se prevé la Categoría 3 (tercera categoría), la de mayor complejidad ambiental. La ley obliga a obtener el Certificado de Aptitud Ambiental (CAA), prerrequisito indispensable para obtener la habilitación municipal.

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.

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 en este caso, el estuario de Bahía Blanca. 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.

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.

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.

Adicionalmente, y de manera específica para el emplazamiento elegido, rige la Ley provincial N.º 12.530, que establece el "Programa Especial para la Preservación y Optimización de la Calidad Ambiental del Polo Petroquímico y Área Portuaria de Bahía Blanca". Sancionada en el año 2001 a raíz de episodios de contaminación ocurridos en el año 2000 en Ingeniero White, esta ley crea un régimen de control ambiental reforzado y exclusivo para las industrias de tercera categoría (conforme el artículo 15, inciso c, de la Ley 11.459) radicadas en el Polo Petroquímico y el área portuaria del estuario de Bahía Blanca. La ley crea dos organismos: el Comité Técnico Ejecutivo (CTE, art. 10), integrado por profesionales técnicos con asiento en la ciudad de Bahía Blanca, encargado de ejecutar el programa de monitoreo y control de emisiones gaseosas y efluentes líquidos de origen industrial, y el Comité de Control y Monitoreo (art. 6), de carácter consultivo y de asesoramiento, integrado por representantes del gobierno local, las universidades con asiento en Bahía Blanca (UNS, UTN), gremios y organizaciones ambientalistas. La Autoridad de Aplicación el Ministerio de Ambiente provincial, en coordinación con la Municipalidad de Bahía Blanca debe requerir la opinión de este Comité como requisito previo a la resolución de cuestiones vinculadas con la ejecución del programa. En consecuencia, además del régimen general de la Ley 11.459 y la Ley 11.723, el proyecto queda sujeto a la fiscalización específica y permanente del CTE, particularmente relevante dado el riesgo identificado en el Capítulo VIII en relación con las emisiones de CO/H2/CH3I y el vuelco de efluentes al estuario.

| 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 |
| Ley 12.530 | Programa Especial de Preservación y Optimización de la Calidad Ambiental del PIBB y Área Portuaria | Control y monitoreo permanente de emisiones gaseosas y efluentes líquidos de industrias de 3ª categoría; opinión previa vinculante del CTE | Comité Técnico Ejecutivo (CTE) + Ministerio de Ambiente PBA + Municipalidad de Bahía Blanca |

Tabla 9.2 Marco regulatorio de la Provincia de Buenos Aires

Fuente: Elaboración Propia.

### 9.2.3 Legislación municipal

El Municipio de Bahía Blanca 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 Planeamiento Urbano del Partido de Bahía Blanca (Ordenanza N.º 5691/1990, modificada por Ordenanza N.º 6072 y convalidada por el Gobierno de la Provincia de Buenos Aires mediante Decreto N.º 2353/1991). 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. El terreno del proyecto, ubicado dentro del PIBB en el límite con Ingeniero White, se encuentra comprendido en la zonificación industrial pesada prevista para el Polo Petroquímico, de modo que, aun cuando la 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 accesibilidad y de servicios previstas por dicho código.

El proceso municipal también comprende la Habilitación Industrial propiamente dicha, que requiere la presentación de documentación técnica y legal complementaria: registro previo en el sitio de Habilitaciones del municipio, solicitud de factibilidad de radicación evaluada por el Departamento de Planeamiento Urbano, planos aprobados, disposición de categorización otorgada por el Ministerio de Ambiente provincial, constancia de cumplimiento tributario, formulario de empadronamiento fiscal, contrato social inscripto y planilla de solicitud de habilitación. El trámite se gestiona en el Departamento de Habilitaciones (Alsina 43), donde se entrega al contribuyente copia de la solicitud sellada

con número de expediente, previo a la inspección municipal y el otorgamiento definitivo de la habilitación industrial.

Por tratarse de un establecimiento radicado dentro del Polo Petroquímico y el área portuaria del estuario de Bahía Blanca, el municipio ejerce además un control ambiental reforzado a través del Comité Técnico Ejecutivo (CTE), organismo creado por la Ley provincial 12.530 y con sede en la propia ciudad, que fiscaliza y monitorea en forma permanente a las industrias de tercera categoría radicadas en el sector, mediante inspecciones periódicas, control de emisiones gaseosas y efluentes líquidos, y la posibilidad de labrar actas de infracción ante incumplimientos, con elevación de informes al Ministerio de Ambiente provincial.

Además de estas exigencias, el municipio realiza inspecciones vinculadas a ruidos, vibraciones, tránsito pesado, e 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 como el proyectado, 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 (Plan APELL), 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 por Inspección de Seguridad e Higiene (TISH), cuyo pago se vincula a las actividades habilitadas y a la fiscalización permanente.

### 9.3 Tramitación ambiental y habilitatoria - Hoja de ruta

1. Categorización industrial preliminar (Ley 11.459): determinación de 1ª, 2ª o 3ª categoría, según rubro, magnitud y riesgo; para un complejo de reformado, síntesis de metanol y carbonilación a ácido acético se prevé 3ª 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. CO, H2 y CH3I), 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; (ii) permiso de vuelco al estuario de Bahía Blanca 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. Intervención del Comité Técnico Ejecutivo (CTE) – Ley 12.530: por radicarse el proyecto dentro del Polo Petroquímico y Área Portuaria de Bahía Blanca, corresponde la inscripción ante el CTE y la incorporación al programa de control y monitoreo permanente de emisiones y efluentes, cuya opinión es requisito previo para la resolución de cuestiones vinculadas a la ejecución del programa ambiental del Polo.

7. Habilitación municipal de establecimiento industrial – Bahía Blanca: compatibilidad urbanística conforme el Código de Planeamiento Urbano, seguridad e higiene, tasas por inspección, y alta del establecimiento; obtención de matrícula municipal y habilitación definitiva.

8. Controles de operación: monitoreo de efluentes/emisiones, reportes periódicos a ADA, al Ministerio de Ambiente y al CTE; 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 el Polo Industrial Bahía Blanca (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 relevantes dado que el proyecto exporta metanol y ácido acético grado polimérico a Brasil y en las obligaciones administrativas de la empresa.

### 9.4.1 Impuestos nacionales

Los impuestos nacionales son administrados por la Agencia de Recaudación y Control Aduanero (ARCA, ex 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. La escala vigente se actualiza periódicamente por Ganancias en función de la inflación (Ley 27.743 y modificatorias); los valores siguientes son orientativos para el ejercicio fiscal 2026 y deben confirmarse contra la escala vigente al momento del pago.

| 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 Escala orientativa del Impuesto a las Ganancias (sociedades)

Fuente: Elaboración Propia basado en Ley 27.743 – ejercicio fiscal 2026

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 con ciclos de exportación. Alícuota general vigente: 21% del valor final.

**Régimen de comercio exterior y percepciones sobre moneda extranjera**

El Impuesto PAIS, que gravaba determinadas operaciones en moneda extranjera y pagos al exterior, tuvo una vigencia legal de cinco años y dejó de aplicarse a partir del 23 de diciembre de 2024, siendo formalmente derogado; por lo tanto, no resulta vigente en el ejercicio 2026 y no debe considerarse en la estructura de costos del proyecto. Continúa vigente, en cambio, el régimen de percepción a cuenta de los impuestos a las Ganancias y sobre los Bienes Personales (actualmente 30%) sobre la compra de moneda extranjera para atesoramiento, pagos al exterior o importaciones sin destino específico, percepción que puede computarse a cuenta de dichos impuestos y, en determinados casos, solicitarse en devolución.

**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)

| 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 (transferencia bancaria de $1.000.000)

Fuente: Elaboración Propia

**Derechos de importación y exportación**

La planta importa insumos y equipamiento crítico (oxígeno de alta pureza mediante generación propia, catalizadores de Ir/Ru para el reactor de carbonilación, catalizadores de metanol, repuestos e instrumentación específica), por lo que está sujeta a Derechos de Importación, más otras tasas complementarias (estadística, comprobación, servicios aduaneros).

En cuanto a las exportaciones, dado que la mayor parte del metanol y del ácido acético grado polimérico producidos se destina al mercado brasilero y, en general, al Mercosur, pueden aplicar Derechos de Exportación (retenciones) según la posición arancelaria del producto, así como eventuales reintegros. Promedio general de referencia en Argentina para productos químicos: en torno al 4,5%-8% sobre el valor FOB, según la posición arancelaria específica del metanol y del ácido acético (a confirmar en el nomenclador vigente al momento de la puesta en marcha).

Ejemplo, derechos de importación de un lote de catalizador: CIF = USD 50.000

Derecho de importación (22% promedio general) = 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 previsible dado que el proyecto vende a otras provincias y exporta al Mercosur, los ingresos se distribuyen entre las distintas jurisdicciones donde la empresa opere. La Ley Impositiva de la Provincia de Buenos Aires fija para producción industrial una alícuota del 1%, con posibilidad de alícuotas reducidas o exenciones para actividades manufactureras radicadas en polos industriales bajo regímenes de promoción.

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 | 1,2% |
| Garantías/aval | 1,2% |
| Compraventa de bienes muebles | 1,2% |

Tabla 9.5 Alícuotas de Impuesto de Sellos por tipo de contrato.

Fuente: Elaboración Propia

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; el impuesto final se calcula aplicando los coeficientes anuales establecidos por dicho organismo sobre la valuación fiscal del predio de 257.000 m² del PIBB y de las construcciones e instalaciones declaradas.

### 9.4.3 Impuestos municipales en Bahía Blanca

El Municipio de Bahía Blanca percibe tributos específicos vinculados a la prestación de servicios locales y al control industrial. Su Ordenanza Fiscal y su Ordenanza Impositiva se aprueban anualmente por el Honorable Concejo Deliberante.

**Tasa por Servicios Urbanos**

Cubre servicios municipales como barrido, alumbrado, mantenimiento urbano y recolección de residuos, entre otros. Para inmuebles con destino comercial, industrial o de prestación de servicios, la Ordenanza Impositiva vigente establece su liquidación mensual en función de la superficie construida, con un monto fijo (2 módulos) más una alícuota de construcción del 4,32% sobre la base imponible, sin poder ser inferior al monto mínimo establecido por zona.

**Tasa por Inspección de 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 bimestral e inspecciones municipales que verifican condiciones edilicias, ambientales, de ordenamiento urbano y de seguridad industrial. La Ordenanza Fiscal vigente establece en su artículo 97 las exenciones taxativas del pago de esta tasa, en su artículo 83 las rebajas aplicables, y en su artículo 137 el importe mínimo bimestral a abonar cuando no se registren ingresos en el período. Cabe señalar que, en virtud de la adhesión municipal a regímenes de promoción industrial provincial, ciertas actividades industriales radicadas en el PIBB pueden encontrarse alcanzadas por exenciones o rebajas específicas de esta tasa, extremo que debe verificarse puntualmente al momento de la habilitación.

**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 portuario 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.
- Alta en IVA, Ganancias y empleador.
- Adhesión a regímenes de pago, facturación electrónica y presentación de DDJJ.
- Inscripciones específicas para importadores y exportadores, dado el flujo de comercio exterior del proyecto.
- Altas en regímenes informativos (participaciones societarias, proveedores, compras/ventas).

Inscripciones provinciales (ARBA)

- Inscripción en Ingresos Brutos, 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 – SIRCREB).

Ámbito municipal (Municipalidad de Bahía Blanca)

- Habilitación industrial, presentada tras obtener el Certificado de Aptitud Ambiental (CAA), la compatibilidad urbanística y la disposición de categorización del Ministerio de Ambiente provincial.
- Alta en la Tasa de Inspección de Seguridad e Higiene (TISH).
- Inscripción y control ante el Comité Técnico Ejecutivo (CTE) por radicarse dentro del PIBB.
- Presentación periódica de documentación técnica de seguridad, planos, cargas de mantenimiento, libro de inspecciones, etc.

| Trámite | Gastos asociados típicos | Notas / Base |
|---|---|---|
| ARCA – 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 societario. |
| ARCA – 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. |
| ARCA – 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 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. |
| Bahía Blanca – Habilitación industrial | Derecho de habilitación en función del activo fijo declarado (alícuota fijada por Ordenanza Impositiva anual; a confirmar al momento del trámite) | El municipio confirma que varía por activo fijo; cifras orientativas para dimensionamiento presupuestario. |
| Bahía Blanca – Alta en TISH y ante el CTE | $150.000 – $500.000 (armado de legajo técnico: planos, memoria de seguridad, señalética, plan de emergencias; sin contar obras) | El alta no tiene tasa; la TISH luego se liquida por DDJJ bimestral. La inscripción ante el CTE se tramita en conjunto con la habilitación industrial. |
| Bahía Blanca – Presentación periódica de documentación técnica | $100.000 – $300.000/año (actualización de planos, ensayos, certificados de equipos, extinción, calibraciones, libro de inspecciones) | Costo de mantenimiento documental y verificaciones periódicas (sin incluir inversiones/obras). |

Tabla 9.5 Estimación orientativa de costos administrativos y tasas de tramitación

Fuente: Municipalidad de Bahía Blanca (bahia.gob.ar); Agencia de Recaudación de la Provincia de Buenos Aires (ARBA); Agencia de Recaudación y Control Aduanero (ARCA, ex AFIP); Ley provincial 12.530 y normativa del Comité Técnico Ejecutivo (CTE). Cifras 2026, orientativas, a confirmar al momento de cada trámite

# CAPÍTULO N° X

## ASPECTOS NORMATIVOS Y DE CALIDAD

## 10.1 Introducción

El proyecto contempla la instalación de una planta de producción de ácido acético grado polimérico a partir de metano, con metanol grado AA como producto intermedio y de exportación, localizada en el Polo Industrial Bahía Blanca (PIBB). Para una unidad de estas características, el cumplimiento normativo y la gestión de la calidad no constituyen únicamente una exigencia legal, sino una condición habilitante para la inserción del metanol y del ácido acético en mercados de alto valor agregado, en particular el mercado brasilero, que concentra la mayor parte de las exportaciones proyectadas.

Este capítulo desarrolla el marco regulatorio y los estándares técnicos que rigen tanto el diseño y la operación de las instalaciones como la pureza de los productos finales. La adopción de un Sistema de Gestión Integrado (SGI) permite unificar los criterios de calidad, seguridad de los procesos y medio ambiente bajo un mismo esquema de gestión, garantizando la trazabilidad completa desde la recepción de las materias primas (gas natural, oxígeno y agua de proceso) hasta la expedición del metanol y del ácido acético.

El enfoque adoptado es el de “Calidad desde el Diseño”: cada parámetro de control en los reactores (D-101, R-102, R-201 y R-301) y en las columnas de purificación (AB-105, T-204/205/206 y T-304/305/306) está orientado a minimizar la formación de subproductos y a cumplir las especificaciones técnicas del metanol y del ácido acético grado polimérico. De este modo, la planta no solo persigue la certificación formal de sus procesos, sino la consolidación de una cultura de mejora continua que reduzca la variabilidad operativa y sostenga la seguridad de una unidad que maneja corrientes de monóxido de carbono, hidrógeno y yoduro de metilo ($CH_3I$), esta última una sustancia de elevada toxicidad utilizada como promotor del sistema catalítico de carbonilación.

## 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 de sus procesos de calidad, ambientales y de seguridad y salud ocupacional. El marco legal ambiental y jurídico específico de la localización (Ley Provincial 12.530, Comité Técnico Ejecutivo del Polo Petroquímico y Área Portuaria de Bahía Blanca, entre otros) fue desarrollado en los Capítulos VIII y IX; en este capítulo se detallan los estándares de gestión de calidad, ambiente y seguridad que complementan ese marco legal.

### 10.2.1 Normas internacionales (ISO)

#### 10.2.1.1 ISO 9001

Principios de la gestión de la calidad (Organización Internacional de Normalización, 2015)

La implementación del Sistema de Gestión de Calidad (SGC) no se concibe como un mero cumplimiento normativo, sino que se apoya en los siete pilares que rigen la norma:

1) Enfoque al cliente: satisfacer los requisitos de los importadores brasileros y del mercado interno, y esforzarse en exceder sus expectativas de pureza.

2) Liderazgo: los directivos deben crear las condiciones para que las personas se impliquen en el logro de los objetivos de calidad.

3) Compromiso de las personas: personal competente y empoderado en toda la organización, en particular en el manejo de corrientes tóxicas e inflamables.

4) Enfoque a procesos: para lograr resultados coherentes y previsibles en las tres zonas de proceso (gas de síntesis, metanol y ácido acético).

5) Mejora: enfoque continuo en la mejora del desempeño de reactores y columnas de purificación.

6) Toma de decisiones basada en la evidencia: análisis de datos operativos (temperatura, presión, pureza, GHSV).

7) Gestión de las relaciones: con proveedores críticos, como los de gas natural, oxígeno y del sistema catalítico Ir/Ru y yoduro de metilo.

**Requisitos normativos aplicados (ISO 9001:2015)**

Para la planta, 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 determinante para identificar riesgos de mercado del ácido acético y del metanol, y la volatilidad del precio del gas natural como materia prima.

**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 el reformado autotérmico, la síntesis de metanol, la carbonilación 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 exportadora 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 establecer controles preventivos frente a desviaciones en el reformado y en la carbonilación.

**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 objeto de seguimiento".

Define KPI específicos, como alcanzar una pureza de metanol grado AA superior a 99,85% y de ácido acético grado polimérico superior a 99,8%.

**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 los reactores R-102, R-201 y R-301, las columnas de purificación y los sistemas de control distribuido (DCS).

**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 lecho de ZnO (D-101) y del sistema catalítico Ir/Ru (R-301) 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 sala de control posean formación técnica específica en tecnología de reformado, síntesis de metanol y carbonilación.

**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, en particular para el manejo de $CH_3I$.

**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 de las tres zonas (100, 200 y 300).

**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 metanol grado AA y el ácido acético grado polimérico cumplan las normas técnicas exigidas por los mercados de destino.

**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 estrictos al proveedor de yoduro de metilo ($CH_3I$) y del sistema catalítico Ir/Ru, 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 metanol y de ácido acético debe ser rastreable desde los tanques TK-207/TK-307 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... y evaluar el desempeño y eficacia del sistema de gestión de calidad".

Define la frecuencia de análisis de laboratorio necesaria para validar la calidad de las tres zonas de 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 de los reactores y reducir la generación de subproductos (ácido propiónico, ésteres, agua).

**10.2.1.2 ISO 14001**

Para la planta, 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 propias de la ría de Bahía Blanca (calidad del aire, del agua del estuario y disponibilidad de recursos hídricos) que pueden afectar o verse afectadas por la operación de la planta.

**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".

Se consideran los requisitos del Comité Técnico Ejecutivo (CTE) del PIBB, de ARBA, de la comunidad de Ingeniero White y de los organismos reguladores provinciales que se transforman en obligaciones de cumplimiento.

**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".

Establece la orientación a largo plazo e incluye compromisos para la prevención de la contaminación del estuario 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”.

Se identifican las emisiones al aire (gases de combustión del quemador de R-102), los vertidos al agua y la generación de residuos (catalizadores agotados de D-101, R-201 y R-301).

**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”.

Incluye la Ley Provincial 12.530, las resoluciones del CTE y las licencias ambientales exigidas para la operación en el PIBB, desarrolladas en el Capítulo VIII.

**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 medibles, como la reducción del vuelco de compuestos orgánicos al sistema de tratamiento de efluentes.

**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”.

Contempla escenarios de fuga de CO, H2 o $CH_3I$, y su respuesta debe ser puesta a prueba periódicamente para validar su eficacia.

**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, en particular la minimización de subproductos y residuos en las tres zonas de proceso.

#### 10.2.1.3 ISO 45001

Para asegurar la integridad física y mental de los trabajadores de la planta, 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, condición especialmente relevante dado el manejo de monóxido de carbono, hidrógeno y yoduro de metilo (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 esta planta, implica analizar factores como la ubicación en el PIBB, el clima local de Bahía Blanca y la infraestructura logística disponible para gestionar los riesgos de explosión o fugas de gases tóxicos.

**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, a los vecinos del PIBB e Ing. White, y a 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 los sistemas de detección de CO, H2 y $CH_3I$ 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, como la carga de yoduro de metilo.

**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 CO, el H2 y el $CH_3I$, 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) por exposición a gases tóxicos.

**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 de los reactores R-102, R-201 y R-301, y los brigadistas, posean la formación técnica específica para responder ante emergencias químicas.

**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 (por ejemplo, minimizar el inventario circulante de $CH_3I$) antes que la dependencia de protecciones personales.

**Preparación y respuesta para emergencias (Art. 8.2**)

> “La organización debe establecer, implementar y mantener un(os) proceso(s) necesario(s) para prepararse y responder a situaciones de emergencia potenciales”.

Esto incluye realizar simulacros periódicos de fugas de gases tóxicos e inflamables, 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 detectores de CO, H2 y $CH_3I$ 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 particularidades de una planta que integra tres tecnologías de proceso distintas.

**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 garanticen la seguridad operativa y la calidad de los insumos y productos.

**Seguridad y señalización industrial**

Para la prevención de riesgos en las zonas de reformado, síntesis de metanol y carbonilación, 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, en particular las líneas que transportan gas de síntesis (CO/H2), metanol y yoduro de metilo (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 gas natural, el hidrógeno y el metanol.

- IRAM 10015: relativa a la selección y uso de equipos de protección respiratoria, de aplicación específica en tareas con riesgo de exposición a CO y a $CH_3I$.

**Almacenamiento y recipientes a presión**

Dado que el proceso opera con equipos críticos como los reactores R-102, R-201 y R-301, y columnas de absorción y destilación a 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 los reactores y acumuladores de la Etapa N°1.

- IRAM 10629: aplicable al almacenamiento de líquidos inflamables y combustibles, de referencia para el diseño de los tanques TK-207 (metanol) y TK-307 (ácido acético).

**Calidad del producto y metodologías analíticas**

Para certificar que el metanol y el ácido acético alcanzan el grado de pureza requerido para su comercialización, 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 metanol y del ácido acético.

### 10.2.3 Normas internacionales (ASTM, ASME, API)

Para expandir el marco normativo internacional de la planta, 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 las materias primas, del gas de síntesis y de los productos, y la integridad de los materiales de construcción.

En el caso del gas natural que alimenta el reactor ATR (R-102), la norma ASTM D1945 resulta esencial, ya que estandariza la determinación de la composición del gas natural mediante cromatografía de gases, asegurando que la relación vapor/carbono de diseño (S-C=0,85) se mantenga dentro de los parámetros validados. De forma complementaria, el contenido de azufre total del gas natural, crítico para la vida útil del lecho de ZnO del desulfurador D-101, se controla según ASTM D1072 (Standard Test Method for Total Sulfur in Fuel Gases).

Para el metanol grado AA, la norma ASTM D1152 (Standard Specification for Methanol) define las especificaciones de pureza, contenido de agua, tiempo de permanganato y acidez que debe cumplir el producto para su comercialización como metanol grado AA. De forma análoga, para el ácido acético grado polimérico se adopta como referencia la norma ASTM D3620 (Standard Specification for Glacial Acetic Acid), complementada por ASTM D3546 para la determinación de ácido fórmico, contaminante crítico proveniente de reacciones secundarias en el reactor de carbonilación R-301.

Asimismo, para ambos productos, la aplicación de la norma ASTM E203 (o, alternativamente, ASTM D1364 para reactivos específicos) permite medir con precisión el contenido de humedad mediante la técnica de Karl Fischer, un parámetro vital tanto para el metanol destinado a la síntesis de ácido acético como para el ácido acético grado polimérico, donde la presencia de agua por encima del límite de diseño del proceso Cativa (8% p/p en el sistema de reacción de R-301) compromete la selectividad del sistema catalítico Ir/Ru.

Más allá de la caracterización de los fluidos, las normas ASME (American Society of Mechanical Engineers) rigen el diseño estructural de los equipos a presión de las tres zonas de proceso: el código ASME Sección VIII proporciona las fórmulas de cálculo para los espesores de pared y los cabezales de los reactores (R-102, R-201, R-301) y de las columnas de absorción y destilación, garantizando que los equipos soporten las presiones operativas (hasta 30 bar en R-102) sin riesgo de falla mecánica o fatiga térmica. El diseño de las cañerías de proceso, en particular las que transportan gas de síntesis y yoduro de metilo, se rige por ASME B31.3 (Process Piping).

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 y la recirculación del catalizador homogéneo

en F-302, 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 se define como un conjunto sistemático de acciones de muestreo, documentación y validación técnica que garantiza que cada lote de metanol y de ácido acético producido cumple estrictamente con los estándares de pureza exigidos por el mercado (99,85% p/p para el metanol grado AA y 99,8% p/p para el ácido acético grado polimérico, según lo definido en el Capítulo V de Tecnología). Para asegurar esta excelencia, se adopta un modelo de gestión basado en la norma ISO 9001, 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.

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 en las tres zonas (gas de síntesis, metanol y ácido acético) y la certificación de los productos elaborados. 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 los reactores o las columnas de purificación, 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 en el punto 10.3.3.

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 prematura de los catalizadores de D-101, R-201 o R-301, o la generación de subproductos fuera de especificación.

| Variable | Materia prima / insumo | Valor ideal | Responsable | Técnica | AC/AP |
|---|---|---|---|---|---|
| Composición (% molar CH4) | Gas natural | > 95% | Analista de laboratorio | T-01 | Rechazar lote |
| Azufre total (ppm) | Gas natural | < 4 ppm | Analista de laboratorio | T-02 | Rechazar lote |
| Pureza (% v/v O2) | Oxígeno | > 99,5% | Analista de laboratorio | T-01 | Rechazar lote |
| Conductividad (µS/cm) | Agua desmineralizada (calderas) | < 0,5 | Operario sala de control | T-06 | Ajustar planta de tratamiento |

| Variable | Materia prima / insumo | Valor ideal | Responsable | Técnica | AC/AP |
|---|---|---|---|---|---|
| Pureza (% p/p ZnO) | Catalizador D-101 (ZnO) | > 99% | Analista de laboratorio | T-07 | Rechazar lote |
| Apariencia | Catalizador D-101 (ZnO) | Sólido granulado, homogéneo | Analista de laboratorio | Visual | Rechazar lote |
| Composición (Cu/ZnO/Al2O3, % p/p) | Catalizador R-201 | Según certificado del fabricante | Analista de laboratorio | T-07 | Rechazar lote |
| Concentración (% p/p) | Yoduro de metilo (CH3I) | > 99,5% | Analista de laboratorio | T-01 | Rechazar lote |
| Estado del sistema catalítico (Ir/Ru) | Catalizador R-301 | Según certificado del fabricante | Analista de laboratorio | Visual / T-08 | Rechazar lote |

Tabla 10.1 Plan de control de materias primas

Fuente: elaboración propia

#### 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 las tres zonas de proceso (gas de síntesis, metanol y ácido acético) y las especificaciones a cumplimentar. El monitoreo constante de estas variables asegura la estabilidad operativa de las unidades, permitiendo que el sistema de control distribuido (DCS) reduzca el margen de desviación respecto de los balances de masa y energía desarrollados en el Capítulo V.

| Equipo | Corriente | Variable | Rango normal | Frecuencia (h) | Responsable | Registro | AC/AP |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| D-101 | Salida (gas natural desulfurado) | Azufre residual (ppm) | < 0,1 | 24 | Analista de laboratorio | R-10 | Reemplazar lecho de ZnO |
| R-102 (ATR) | Alimentación (O2/vapor/GN) | Relación vapor/carbono (S-C) | 0,85 | Continua | Sistema DCS | R-11 | Ajustar caudal de vapor |

| Equipo | Corriente | Variable | Rango normal | Frecuencia (h) | Responsable | Registro | AC/AP |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| R-102 (ATR) | Salida | Temperatura (°C) | ≈ 1000 | Continua | Sistema DCS | R-12 | Ajustar quemador |
| R-102 (ATR) | Salida | Presión (MPa) | 3,0 | Continua | Operario sala de control | R-13 | Verificar válvulas de alimentación |
| AB-105 | A A-107 (a R-301) | Pureza de CO (% molar) | > 98% | 4 | Analista de laboratorio | R-14 | Ajustar ciclo de adsorción PSA |
| AB-105 | Bypass a A-106 | Caudal (kmol/h) | Según demanda de R-201 | Continua | Sistema DCS | R-15 | Ajustar válvula de bypass |
| R-201 | Lecho catalítico | GHSV ($h^{-1}$) | 10.000 | Continua | Sistema DCS | R-16 | Ajustar caudal de alimentación |
| R-201 | Salida | Temperatura (°C) | 230 - 270 | Continua | Sistema DCS | R-17 | Regular refrigeración (E-202) |
| F-203 | Fase líquida | Pureza metanol crudo (% p/p) | > 85% | 4 | Operario sala de control | R-18 | Ajustar presión de flash |
| T-205 | Cabeza de columna | Pureza metanol (% p/p) | > 99,85% | Continua | Sistema DCS | R-19 | Ajustar relación de reflujo |
| TK-207 | Nivel | Nivel (%) | 20 - 80 | Continua | Operario sala de control | R-20 | Regular despacho / bombeo |
| R-301 | Mezcla de reacción | Contenido de | < 8% (límite | 4 | Analista de laboratorio | R-21 | Ajustar purga de agua |

| Equipo | Corriente | Variable | Rango normal | Frecuencia (h) | Responsable | Registro | AC/AP |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | agua (% p/p) | proceso Cativa) | | | | |
| R-301 | Salida | Temperatura (°C) | 180 - 190 | Continua | Sistema DCS | R-22 | Ajustar refrigeración (E-303) |
| R-301 | Interno | Tiempo de residencia τ (min) | ≈ 30 | Continua (cálculo) | Sistema DCS | R-23 | Ajustar caudal de alimentación |
| T-306 | Cabeza de columna | Pureza ácido acético (% p/p) | > 99,8% | Continua | Sistema DCS | R-24 | Ajustar relación de reflujo |
| TK-307 | Nivel | Nivel (%) | 20 - 80 | Continua | Operario sala de control | R-25 | Regular despacho |

Tabla 10.2 Plan de control de proceso

Fuente: elaboración propia.

#### 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 deben cumplir el metanol (corriente de tope de T-205) y el ácido acético (corriente de tope de T-306) antes de ser habilitados para su almacenamiento y posterior comercialización. El cumplimiento de estas especificaciones garantiza que ambos productos posean el grado de pureza necesario para su venta al mercado brasilero y para su uso como materia prima en la propia planta.

**Metanol grado AA (según ASTM D1152)**

| Variable | Valor ideal | Frecuencia (h) | Registro | Técnica | AC/AP |
|---|---|---|---|---|---|
| Apariencia | Líquido claro, incoloro, libre de materia en suspensión | 4 | R-01-MeOH | Visual | Rechazar lote |
| Pureza (% p/p) | > 99,85% | 4 | R-01-MeOH | T-01 | Rechazar lote |
| Contenido de agua (% p/p) | < 0,10% | 4 | R-01-MeOH | T-02 | Rechazar lote |
| Tiempo de permanganato (min) | > 30 | 4 | R-01-MeOH | T-04 | Rechazar lote |
| Acidez, como ácido acético (ppm) | < 30 | 4 | R-01-MeOH | T-04 | Rechazar lote |
| Densidad (kg/m³, 20°C) | ≈ 791 | 4 | R-01-MeOH | T-03 | Rechazar lote |

Tabla 10.3 Plan de control de producto final — metanol grado AA

Fuente: elaboración propia, sobre la base de ASTM D1152

**Ácido acético grado polimérico (según ASTM D3620)**

| Variable | Valor ideal | Frecuencia (h) | Registro | Técnica | AC/AP |
|---|---|---|---|---|---|
| Apariencia | Líquido incoloro, libre de materia en suspensión | 4 | R-01-AA | Visual | Rechazar lote |
| Ensayo, como ácido acético (% p/p) | > 99,8% | 4 | R-01-AA | T-04 | Rechazar lote |
| Contenido de agua (% p/p) | < 0,15% | 4 | R-01-AA | T-02 | Rechazar lote |
| Ácido fórmico (ppm) | < 200 | 4 | R-01-AA | T-04 (ASTM D3546) | Rechazar lote |
| Hierro (ppm) | < 1 | 24 | R-01-AA | T-08 | Rechazar lote |

| Variable | Valor ideal | Frecuencia (h) | Registro | Técnica | AC/AP |
|---|---|---|---|---|---|
| Color (Pt-Co / APHA) | < 10 | 4 | R-01-AA | T-05 | Rechazar lote |
| Densidad (kg/m³, 20°C) | ≈ 1049 | 4 | R-01-AA | T-03 | Rechazar lote |

Tabla 10.4 Plan de control de producto final — ácido acético grado polimérico

Fuente: elaboración propia, sobre la base de ASTM D3620

### 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 de los productos finales. A continuación, se presentan los modelos de planillas a utilizar en cada etapa.

| Registro: R – 01 – GN | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Fecha | | | | |
| Materia prima | Gas natural | | | |
| Proveedor | | | | |
| | | | | |
| Variable de control | Valor de referencia | Valor | Lote | Responsable |
| Composición (% molar CH4) | > 95 | | | |
| Azufre total (ppm) | < 4 | | | |

Tabla 10.5 Planilla de registro de gas natural

Fuente: elaboración propia

| Registro: R – 02 – O2 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Fecha | | | | |
| Materia prima | Oxígeno | | | |
| Proveedor | | | | |
| | | | | |
| Variable de control | Valor de referencia | Valor | Lote | Responsable |
| Pureza (% v/v) | > 99,5 | | | |

Tabla 10.6 Planilla de registro de oxígeno

Fuente: elaboración propia

| Registro: R – 04 – C1 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Fecha | | | | |
| Insumo | Catalizador D-101 (ZnO) | | | |
| Proveedor | | | | |
| | | | | |
| Variable de control | Valor de referencia | Valor | Lote | Responsable |
| Pureza (% p/p) | > 99 | | | |
| Apariencia | Sólido granulado | | | |

Tabla 10.7 Planilla de registro del catalizador de D-101

Fuente: elaboración propia.

| Registro: R – 06 – MI | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Fecha | | | | |
| Insumo | Yoduro de metilo (CH3I) | | | |
| Proveedor | | | | |
| | | | | |
| Variable de control | Valor de referencia | Valor | Lote | Responsable |
| Concentración (% p/p) | > 99,5 | | | |
| Apariencia | Líquido claro | | | |

Tabla 10.8 Planilla de registro de yoduro de metilo

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 10.9 Planilla de registro de proceso

Fuente: elaboración propia.

| Registro: R – 01 – MeOH | | | |
|---|---|---|---|
| Fecha | | | |
| Producto | Metanol grado AA | | |
| Lote de producción | | | |
| | | | |
| Variable de control | Valor de referencia | Valor | Responsable |
| Pureza (% p/p) | > 99,85 | | |
| Contenido de agua (% p/p) | < 0,10 | | |
| Densidad (kg/m³) | 791 | | |
| Apariencia | Líquido claro, incoloro | | |

Tabla 10.10 Planilla de registro de producto final — metanol

Fuente: elaboración propia.

| Registro: R – 01 – AA | | | |
|---|---|---|---|
| Fecha | | | |
| Producto | Ácido acético grado polimérico | | |
| Lote de producción | | | |
| | | | |
| Variable de control | Valor de referencia | Valor | Responsable |
| Ensayo (% p/p) | > 99,8 | | |
| Contenido de agua (% p/p) | < 0,15 | | |
| Densidad (kg/m³) | 1049 | | |
| Apariencia | Líquido incoloro | | |

Tabla 10.11 Planilla de registro de producto final — ácido acético

Fuente: elaboración propia.

### 10.3.3 Técnicas de análisis

**T-01: Cromatografía de gases**

- Esta técnica se utiliza para determinar la composición del gas natural, la pureza del oxígeno y del yoduro de metilo, y la pureza del metanol (ASTM D1945 / ASTM D1152). 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 (de ionización de llama o de conductividad térmica, según el analito).

- 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 cromatograma.

**T-02: Valoración de reactivo de Karl Fischer (ASTM E203 / ASTM D1364)**

Es el método estándar para la determinación de agua en el metanol y en el ácido acético grado polimérico. Se basa en la reducción química del yodo por el dióxido de azufre en presencia de agua.

- Reactivos: utiliza una solución de yodo, piridina (o una amina equivalente) y dióxido de azufre disueltos en un solvente anhidro.

- Equipamiento: consta de un recipiente de titulación sellado, electrodos de platino para la detección del punto final y una bureta de precisión (o un titulador coulométrico para los bajos contenidos de agua exigidos en el ácido acético grado polimérico).

- Cálculo: el contenido de agua se obtiene mediante la ecuación %(p/p) $H_2O$ = (V · W) / (10 · S), donde V es el volumen de reactivo consumido, W su título y S la masa de la muestra.

**T-03: Determinación de densidad digital (ASTM D4052)**

Se aplica para controlar la densidad del gas natural licuado en muestreo, el metanol y el ácido acético. 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 introduce una pequeña cantidad de muestra líquida en el tubo seco mediante una jeringa, evitando la formación de burbujas que alterarían la lectura.

- Equipo: requiere un densitómetro digital con baño termostático, para asegurar mediciones constantes a 20 °C.

**T-04: Valoración ácido-base y tiempo de permanganato**

El ensayo del producto (% p/p de ácido acético) se determina por titulación potenciométrica con hidróxido de sodio valorado, según el procedimiento de ASTM D3620. El tiempo de permanganato, exigido para el metanol grado AA por ASTM D1152, mide la resistencia de la muestra a la oxidación por una solución de permanganato de potasio, siendo un indicador indirecto de la presencia de aldehídos y otras impurezas oxidables. El ácido fórmico en el ácido acético se determina por titulación específica según ASTM D3546.

**T-05: Colorimetría Pt-Co (APHA)**

Permite cuantificar el color del ácido acético grado polimérico por comparación con una escala de referencia de platino-cobalto, siendo un indicador sensible de la presencia de trazas de productos de degradación o de corrosión (hierro) provenientes de los equipos de la Zona 300.

**T-06: Conductimetría**

Se utiliza para controlar la calidad del agua desmineralizada de alimentación a calderas (E-103, E-202 y E-303), mediante la medición de la conductividad eléctrica de la muestra con un conductímetro calibrado.

**T-07: Difracción de rayos X y análisis granulométrico**

Se emplea para verificar la composición cristalina y la distribución de tamaño de partícula de los catalizadores sólidos de D-101 y R-201, según lo informado en el certificado de análisis del fabricante.

**T-08: Espectrometría de absorción atómica / ICP**

Permite cuantificar trazas de hierro y de otros metales en el ácido acético grado polimérico, y verificar de forma indirecta la integridad del sistema catalítico homogéneo Ir/Ru de R-301, dado que una pérdida de catalizador se traduce en un incremento del contenido metálico del producto.

### 10.3.4 Indicadores de calidad

La gestión de la calidad en la producción de metanol y ácido acético 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 que produce del orden de 99.850 t/año de metanol grado AA y 27.360 t/año de ácido acético grado polimérico, los indicadores de calidad (KPI) actúan como centinelas que vinculan las variables físicas medidas en los equipos, como la temperatura de 1000°C en el reactor R-102 o el contenido de agua del sistema de reacción de R-301, con los resultados analíticos obtenidos en laboratorio bajo normas ASTM e 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 de los sistemas catalíticos 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 las corrientes intermedias permite optimizar el consumo específico de gas natural, oxígeno y energía en los reactores y columnas de destilación. En el nivel de gestión, el análisis de las acciones correctivas y preventivas (AC/AP) derivadas de los registros R-01 a R-25 proporciona una métrica clara sobre la robustez del sistema de gestión de calidad adoptado.

De este modo, los indicadores no solo garantizan el cumplimiento de la pureza exigida en el metanol y en el ácido acético, sino que también impulsan la reducción de costos operativos y la minimización del impacto ambiental por subproductos, en línea con lo desarrollado en el Capítulo VIII. A continuación, se consolidan los objetivos numéricos específicos que regirán el desempeño de la planta durante su período inicial de operación:

| Indicador | Meta | Frecuencia de reporte | Fuente de datos |
|---|---|---|---|
| Pureza del metanol (grado AA) | > 99,85% | Diario | Registro R-01-MeOH |
| Pureza del ácido acético (grado polimérico) | > 99,8% | Diario | Registro R-01-AA |
| Conversión de CH4 en R-102 | > 99,99% | Mensual | Balance de masa (simulación vs. real) |
| Eficiencia de carbono del loop de metanol | > 97% | Mensual | Balance de masa (Zona 200) |
| Conversión del reactor de carbonilación R-301 | > 95% | Mensual | Balance de masa (Zona 300) |
| Contenido de agua en el sistema de R-301 | < 8% | Continua | Registro R-21 |
| Lotes rechazados | < 1% | Trimestral | Informe de AC/AP |
| Humedad en producto final (ácido acético) | < 0,15% p/p | Diario | Técnica T-02 (Karl Fischer) |
| Contenido de hierro en ácido acético | < 1 ppm | Semanal | Técnica T-08 (ICP / absorción atómica) |

Tabla 10.12 Indicadores de calidad iniciales

Fuente: elaboración propia

# CAPÍTULO N° 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 la planta de ácido acético grado polimérico y metanol implican peligros inherentes a la naturaleza del proceso: manipulación de gas natural y gas de síntesis (CO, $H_2$, $CO_2$) inflamables y, en el caso del monóxido de carbono, altamente tóxico por vía inhalatoria; oxígeno puro como oxidante fuerte en el reactor de reformado autotérmico (ATR); hidrógeno con un rango de inflamabilidad extremadamente amplio (4-75 % v/v); metanol inflamable y tóxico; yoduro de metilo ($CH_3I$), catalizador homogéneo del proceso de carbonilación, de alta toxicidad y volatilidad; ácido acético corrosivo e inflamable; y condiciones severas de proceso, con temperaturas de hasta 1000 °C en el reactor R-102 y presiones de trabajo de hasta 30 bar.

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 metanol y ácido acético, se aplica una jerarquía de controles que prioriza las medidas más efectivas para reducir o eliminar el riesgo. Esta progresión, representada en forma de pirámide invertida, establece el siguiente orden de actuación, de mayor a menor eficacia:

- Eliminación: consiste en quitar físicamente el peligro del entorno de trabajo, siendo la medida más eficaz (por ejemplo, minimizar los inventarios de yoduro de metilo en proceso).

- Sustitución: implica reemplazar el peligro por uno menor, como el uso de catalizadores o solventes de menor toxicidad cuando el proceso lo permita.

- Controles técnicos: se basan en aislar a la gente del peligro mediante el diseño de ingeniería, por ejemplo, sistemas de venteo, interlocks de seguridad (ESD) o instrumentación de seguridad en los reactores R-102, R-201 y R-301.

- Controles administrativos: cambian la forma en que la gente trabaja a través de procedimientos, permisos de trabajo, 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 Pirámide de la jerarquía de control de riesgos aplicada a la planta.

Fuente: elaboración propia en base a (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 y por el Reglamento del Polo Industrial Bahía Blanca (PIBB), 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 manipulan sustancias corrosivas (ácido acético, ácido propiónico) o tóxicas (metanol, yoduro de metilo), el revestimiento será resistente a ataques químicos y contará con sistemas de drenaje específicos hacia las piletas de contención, evitando el vuelco directo al estuario de Bahía Blanca.

- 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 la atmósfera salina y a los vapores 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 (evacuación ante fuga de $CO/H_2$ o derrame de $CH_3I$). 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 (parque de tanques TK-207/TK-307, cañerías interzonas), se dispondrán protecciones adecuadas para resguardar a los operarios de las inclemencias climáticas propias de la región de Bahía Blanca (vientos intensos, radiación solar).

- 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)

- Identificación de riesgos: conocimiento profundo de los peligros específicos del proceso (gases inflamables y tóxicos, oxidantes, reacciones exotérmicas en los reactores catalíticos) y su posible impacto en la salud.

- Primeros auxilios y emergencias: formación en técnicas de socorrismo, reconocimiento de intoxicación por CO y por vapores de metanol/$CH_3I$, y protocolos de evacuación ante desastres naturales o incidentes mayores en el proceso.

- 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 (particularmente el metanol, el ácido acético y el yoduro de metilo), 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 lavaojos: se dispondrán estaciones de descontaminación a una distancia no mayor a 10 segundos de recorrido (aproximadamente 15 metros) desde los puntos de riesgo crítico: entorno de AB-105 y A-104/A-106/A-107 (gas de síntesis), R-201 y el parque TK-207 (metanol), y R-301, F-302 y el parque TK-307 (ácido acético y catalizador Ir/Ru en yoduro de metilo).

- Ubicación estratégica: los equipos se instalarán en las áreas de carga/descarga, cercanías de reactores y laboratorio de control, 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 tóxicas y corrosivas en el proceso (metanol, ácido acético, yoduro de metilo), 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 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 (bombas de reciclo, compresores).

- 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 |
|---|---|---|
| Etapa N° 1/2/3 (proceso) | Circulación general | 100 |
| Etapa N° 1/2/3 (proceso) | Iluminación general sobre escaleras y pasarelas | 200 |
| Etapa N° 1/2/3 (proceso) | Iluminación sobre plano vertical (válvulas, instrumentos) | 200 |
| Sala de control y tableros | Iluminación sobre mesas y pupitres (HMI) | 400 |
| Laboratorio de ensayo y control | Iluminación general | 400 |
| Laboratorio de ensayo y control | Iluminación sobre el plano de lectura de aparatos | 600 |

Tabla 11.1 Nivel de LUX según cada tarea/área.

Fuente: elaboración propia en base a (Decreto N.º 351/79., 22 de mayo de 1979), Anexo IV

### 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 Decreto 351/79 y guías de la SRT: mediciones iniciales y rutinarias para asegurar que no se superen los límites legales establecidos. Las principales fuentes identificadas son los

compresores de gas de síntesis, las bombas del loop de reciclo de metanol (relación de reciclo 8,70) y los sopladores de las columnas PSA de AB-105. 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 alrededor de compresores 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 rotativa de alta potencia (bombas de reciclo, compresores de gas de síntesis y sopladores), se realizará el monitoreo de vibraciones en dichos equipos. 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.

Fuente: elaboración propia en base a (Decreto N.º 351/79., 22 de mayo de 1979), Anexo III.

**Control de agentes específicos y seguridad del proceso**

Dada la manipulación de sustancias críticas del proceso, 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:

- Etapa N°1 (gas de síntesis): dado que el monóxido de carbono es inodoro, incoloro y extremadamente tóxico, se instalará monitoreo continuo de CO ambiental en el entorno de D-101, R-102, AB-105 y los acumuladores A-104/A-106/A-107, con alarmas de nivel de acción y nivel de evacuación.

- Etapa N°2 (metanol) y Etapa N°3 (ácido acético): se dispondrán sistemas específicos de dilución de vapores orgánicos y monitoreo continuo mediante detección de límite explosivo inferior (LEL) para prevenir la formación de atmósferas potencialmente explosivas en el entorno de TK-207 y TK-307.

- Sector de yoduro de metilo (R-301/F-302): ventilación forzada permanente y captación puntual dado el elevado nivel de toxicidad de este compuesto, con muestreo periódico de calidad de aire.

- 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.

### 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 al reactor ATR R-102 (que opera a aproximadamente 1000 °C) y a los economizadores de recuperación de calor E-103, E-202 y E-303 que generan vapor de alta, media y baja presión respectivamente, 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 |

| 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) |
|---|---|---|---|
| 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.

Fuente: elaboración propia en base a (Decreto N.º 351/79., 22 de mayo de 1979), Anexo III, índice TGBH

**Medidas de control**

Para asegurar que el personal se mantenga dentro de estos rangos, especialmente durante la operación de la planta, se implementarán:

- Aislamiento térmico: en equipos y cañerías que operen a altas temperaturas (R-102, E-103 y líneas de vapor) 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 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 en laboratorio, ligera o pesada en mantenimiento), 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 (por ejemplo, para el manejo de bolsones de ZnO en el recambio del lecho de D-101).

- 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 (balance simultáneo de las tres zonas: gas de síntesis, metanol y ácido acético), 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 (por ejemplo, desvíos en la relación $H_2$/CO en A-106 o en la relación agua/ácido acético del sistema de carbonilación).

- 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, el programa de vigilancia médica incluirá estudios complementarios dirigidos a los riesgos específicos identificados:

- Exposición a monóxido de carbono: se realizará la determinación periódica de carboxihemoglobina en sangre al personal que se desempeñe en la Zona 100, dado el potencial asfixiante químico del CO.

- 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 sustancias tóxicas: debido a la manipulación de metanol, ácido acético y yoduro de metilo, se implementará una vigilancia

epidemiológica específica que incluya análisis clínicos y toxicológicos que permitan monitorear el impacto de estos agentes agresores en la salud de los operarios, en particular del personal de las Etapa N°1,2,3 y de laboratorio.

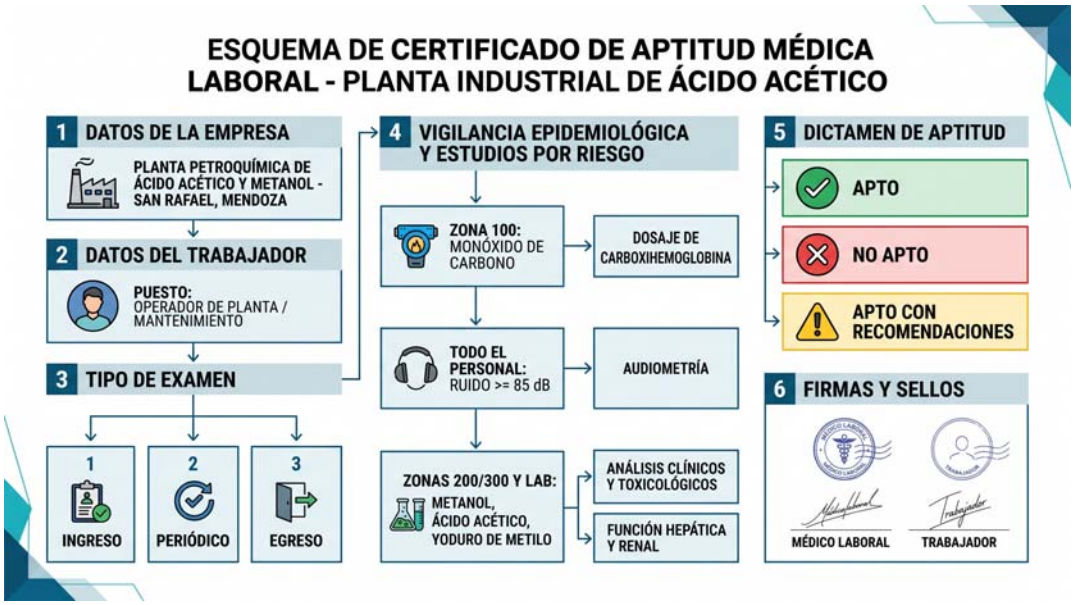



Fig. 11.4 Certificado de aptitud médica modelo.

## 11.3 Seguridad industrial

La seguridad industrial en la planta 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 gas de síntesis, metanol y ácido acético.
- 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 (metanol, ácido acético, yoduro de metilo) o fugas de gases tóxicos/inflamables (CO, $H_2$).

- 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.º 19.587, 21 de abril de 1972.)

- Reporte inmediato: todo trabajador tiene la obligación y el derecho de reportar incidentes (eventos que no causaron daños, 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 = (N° de accidentes con baja × 1.000.000) / (Total de horas trabajadas)

- Índice de Gravedad (IG): número de jornadas perdidas por cada mil horas trabajadas.

IG = (N° de jornadas perdidas × 1.000) / (Total de horas trabajadas)

- Tasa de Incidencia (TI): relación entre el número de accidentados y el promedio de trabajadores expuestos.

  TI = (N° de accidentados × 100) / (Promedio de trabajadores expuestos)

**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 $CO/H_2$, derrame de metanol/ácido acético 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

Fuente: elaboración propia en base a (Janicak, C. A., 2015)

### 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.º 19.587, 21 de abril de 1972.) (Decreto N.º 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, ígnifugo, auditivo).

| Ítem | EPP | Operaciones | Mantenimiento | Lab | Agentes |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Calzado de seguridad | X | X | X | Mecánico/Eléctrico |

| Ítem | EPP | Operaciones | Mantenimiento | Lab | Agentes |
|---|---|---|---|---|---|
| 2 | Ropa de trabajo ignífuga (FR) | X | X | | Fuego repentino |
| 3 | Casco de seguridad con barbijo | X | X | | Caída de objetos |
| 4 | Gafas de seguridad de amplio espectro | X | X | X | Proyección de partículas |
| 5 | Protección facial | X | | X | Salpicadura de ácido acético/metanol |
| 6 | Respirador de cara completa | X | X | X | Vapores orgánicos / CO |
| 7 | Filtros para vapores orgánicos y gases | X | X | X | $CH_3I$, metanol, ácido acético |
| 8 | Guantes de nitrilo | X | | X | Contacto químico |
| 9 | Guantes de vaqueta | | X | | Abrasión |
| 10 | Protección auditiva | X | X | | Ruido > 85 dB(A) |
| 11 | Traje nivel C | X | | | Derrames |
| 12 | Arnés de seguridad de cuerpo completo | | X | | Trabajo en altura |

Tabla 11.5 Matriz de EPP

Fuente: elaboración propia en base al análisis de riesgos por puesto de trabajo y (Superintendencia de Riesgos del Trabajo, 2011).

**IMN CHEMICAL PRODUCTS**
**Complejo Petroquímico Bahía Blanca**
Planta de Ácido Acético y Metanol - Bahía Blanca, Bs. As.

**PERMISO DE TRABAJO SEGURO (PTS)**
**AUTORIZACIÓN Y CONTROL PARA TAREAS DE ALTO RIESGO**

**Nº PERMISO:** PTS-202X-[____]
**Fecha:** [___ / ___ / 202X]
**Validez:** De [__:__] a [__:__] hs
**Turno:** [ ] Turno 1 (06-14) [ ] Turno 2 (14-22) [ ] Turno 3 (22-06)

**1. INFORMACIÓN GENERAL DE LA TAREA Y EMPLAZAMIENTO** — VIGENCIA MÁXIMA: 1 TURNO OPERATIVO

**Empresa Ejecutante:** [ IMN Chemical Products / **Contratata:** _____ ]
**Supervisor a Cargo:** [_____]
**Sector / Unidad de Proceso:** [ ] Zona 100 (Reforma ATR) [ ] Zona 200 (Metanol) [ ] Zona 300 (Cativa)
**Equipo / Tag Crítico:** [ Columnas T-204/205/206 - T-304/305/306 - Reactor R-301 ]
**Descripción Detallada del Trabajo:** [_____]

**2. GESTIÓN DOCUMENTAL PREVENTIVA EN TERRENO (OBLIGATORIA ANTES DE INICIAR)** — TODOS LOS CASILLEROS DEBEN VERIFICARSE

- ☐ **Charta de Seguridad (5 min):** Dictada a esta el personal en terreno.
- ☐ **Procedeniıerio de Trabajo Asguro (PTS):** Cógigo vigente y dibzaddo.
- ☐ **ARO (Análisis de Riesgo Operacional):** Firmado por los ejecutantos.
- ☐ **Checkilat Prosperacional:** Herramientes, arneasa y mascos inspeccionados.

**3. EVALUACIÓN DE ACTIVIDADES CRÍTICAS REQUERIDAS PARA LA TAREA** — MARCAR [X] APLICA / [N/A] NO APLICA

| | | |
|---|---|---|
| ☐ **Aislación y Biogeno (LOTO)** Desconación eléctrico, ereciada la leza, despresulización de linada, brida elago pobicaza. | ☐ **Espacios Confinados** Interno de columnas T-204/205/206 e acumuladores. Vigia para amtera exterior y ventilación freracla. | ☐ **Trabajas en Altura Física** Sobre plattafiorma o columnas T-204/205/206, T-304/305/306. Anera de carepo completo uiado cabo de tado. |
| ☐ **Trabajo en Caliente / Llama** Soldadsallizada cares de recaatros catatílicos o nasza de matana. Exteren PGS a 3 m y masta ignífuga. | ☐ **Presencia de Gases Tóxicos / CO** Ueración confinua de Marcícolo de Carbeno (CO) y copores argararos. Equipo de vecape inspliinbos. | ☐ **Sustancias Peligrosas** Custacar patenival con Metanol, Acido Acético o Yodaro de Merro, EPP camnco especial y lavavjos igravildos. |
| ☐ **Levante y lavie de Cargas** Graas o tactas cerlificadan, delenitación de tacta de giro, inspección previa de asilegua/y flaora. | ☐ **Retiro de Protecciones Móviles** Intervención de bombes, compresores e conorados pos gaselas desmontadas; friagues incalerico de retor. | ☐ **Retiro de Barandas / Grating** Aprotora proviserval de plass en basandas almuatas; delinilitación rigida y hellalteación retatos. |

**4. PRUEBA DE ATMÓSFERA (REQUERIDA PARA ESPACIOS CONFINADOS / GASES / LLAMA ABIERTA)** — EQUIPO MULTIGAS CALIB: [_____]

| Parametro Eaaluado | Rango Aceptable | Hora Lectura 1 | Hora Lectura 2 | Hora Lectura 3 | Firma del Operador de Monitoreo |
|---|---|---|---|---|---|
| Oxigeno (% $O_2$) | 19.5% – 21.5% | [ % ] | [ % ] | [ % ] | _____ Inspector SySO / Operador Autorizado |
| Infeosabirizad (% LEL) | 0% (< 2% mas) | [ % ] | [ % ] | [ % ] | |
| Monocido de Carbono (CO) / Tóxicos | < 25 ppm (CO) | [ ppm ] | [ ppm ] | [ ppm ] | |

**5. ELEMENTOS DE PROTECCIÓN PERSONAL (EPP) ESPECÍFICOS** — USO ESTRICTO DURANTE LA INTERVENCIÓN

- [ ] Caszo de seguridad l./ barboqugo
- [ ] Calzado de seguridad dieláctrico / químico
- [ ] Quantes quastrics (Nitblo / Neoprono para solventes)
- [ ] Protección ocolar (Neggios hermótica) / Máscara teclol)
- [ ] Protección receivatoria (Filtro vittro es anytoroca/ocidos)
- [ ] Equipo autónomo / una gaare de alro eatrado
- [ ] Amas antizonlca y tintna (alco de vido al amertiguador
- [ ] Trojo Tyvek / Delental inteervatable ancora sa a conosásra

**6. FIRMAS DE AUTORIZACIÓN, EJECUCIÓN Y CIERRE DEL PERMISO**

| | | |
|---|---|---|
| **1. SOLICITANTE / EJECUTOR** Declaro conocor los miagos y medidas preventivas. _____ **Firma y Aclaración** Lejago / DNI: _____ | **2. SUPERVISOR DE SEGURIDAD / SySO** Condiciones en tarreno verificados y apeciación. _____ **Firma y Aclaración** Matrícula / Registro: _____ | **3. RESPONSABLE DE ÁREA / PLANTA** Anta entregada y autorizada para intervención. _____ **Firma y Aclaración** Hora de inicio aprobada: [__/__] |
| **4. CIERRE Y ENTREGA DEL ÁREA (Finalización de Tarea)** El trabajo ha concluido, el área nueda lllayia, sin fuentes de igesitos y normalizada. **Hora Cierre:** [ ___/___ ha ] **Firma Supervisor Planctar:** _____ | | **5. RECEPCIÓN DE AREA OPERATIVA** Planta recibe confornta para turnnalización. _____ Operador / Jefe de Turno Planta |

Fig. 11.5 Modelo de permiso de trabajo

- 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 aplicado a un evento de intoxicación por exposición a vapores de yoduro de metilo:

| Nivel del árbol | Descripción |
|---|---|
| Evento | Síntomas de intoxicación (irritación de vías respiratorias y visión borrosa) en operario de la Zona 300 |
| Causa directa | Inhalación de vapores de CH□I durante la toma de muestra en F-302 |
| Causa inmediata 1 | El operario no utilizaba el respirador de cara completa con filtro para vapores orgánicos |
| Causa inmediata 2 | El punto de muestreo no contaba con captación local de vapores |
| Causa básica 1 | Procedimiento de muestreo no exigía explícitamente el uso de EPP respiratorio |
| Causa básica 2 | El diseño del punto de muestreo no fue incluido en el HAZOP original de la Etapa N°3 |
| Acción correctiva | Actualización del PTS de muestreo (uso obligatorio de EPP respiratorio) e instalación de campana de extracción local en el punto de muestreo de F-302 |

Tabla 11.9 Ejemplo de árbol de causas aplicado a exposición a yoduro de metilo

Fuente: elaboración propia en base a la metodología de Árbol de Causas.

### 11.3.5 Plan de respuesta ante emergencias

Dada la naturaleza crítica de las sustancias manejadas (gas de síntesis, metanol, ácido acético y yoduro de metilo), se establece un protocolo de actuación inmediata para mitigar daños al personal, las instalaciones y el medio ambiente, en línea con lo desarrollado en el Capítulo VIII (Aspectos Ambientales) respecto de los riesgos de vuelco al estuario de Bahía Blanca.

**Hipótesis de emergencias químicas**

El plan contempla escenarios específicos según la peligrosidad inherente del proceso:

- Fuga de gas de síntesis ($CO/H_2$): por la toxicidad del CO y el amplio rango de inflamabilidad del $H_2$, se activarán sistemas de detección continua de CO y LEL, corte de suministro y evacuación del área afectada de la Etapa N°1.

- Derrame de metanol o ácido acético: por su inflamabilidad y, en el caso del ácido acético, su carácter corrosivo, se priorizará la contención en las piletas de derrame de TK-207/TK-307 y la dilución/neutralización según corresponda. Se priorizará el uso de duchas de emergencia y lavaojos situados a ≤10 s del riesgo.

- Fuga o exposición a yoduro de metilo: dada su alta toxicidad, se procederá a la evacuación inmediata del área, uso de EPP con protección respiratoria de cara completa o aire asistido, y aislamiento del sector mediante el sistema ESD.

- Reacciones exotérmicas incontroladas: en los reactores R-102, R-201 o R-301, se aplicarán 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, en coordinación con el Comité Técnico Ejecutivo (CTE) del Polo Petroquímico y Área Portuaria de Bahía Blanca.

**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 = (N° de incidentes registrables × 200.000) / (Total de horas trabajadas)

LTIR: mide únicamente la frecuencia de incidentes que resultaron en tiempo perdido (días de baja médica) por cada 100 trabajadores de tiempo completo.

LTIR = (N° de incidentes con tiempo perdido × 200.000) / (Total de horas trabajadas)

### 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 hidrógeno, metanol o gas natural.

| Sector | Tarea crítica | Riesgo identificado | EPP específico sugerido |
|---|---|---|---|
| Etapa N° 1 (gas de síntesis) | Toma de muestras y supervisión de D-101/R-102/AB-105 | Exposición a CO (asfixiante químico) y H□ (explosivo) | Detector personal de CO, respirador con filtro específico, ropa ignífuga |
| Etapa N° 2 (metanol) | Carga y descarga en TK-207, muestreo en T-204/205/206 | Proyección de líquidos y vapores orgánicos, incendio | Máscara de cara completa (full-face) con filtros para vapores orgánicos y traje de protección química nivel C |
| Etapa N° 3 (ácido acético) | Operación de R-301/F-302, carga de TK-307 | Contacto con ácido acético corrosivo, exposición a CH□I | Guantes de nitrilo de puño largo, antiparras estancas, máscara facial y respirador con filtro para vapores orgánicos |
| 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 |
| 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

Fuente: elaboración propia.




Fig. 11.7 EPP generales para la protección integral del trabajador.

### 11.3.7 Protección contra incendios

El sistema de protección contra incendios de la planta 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.º 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: gas natural, gas de síntesis ($CO/H_2$) y metanol como líquidos y gases inflamables (clase B/C), y tableros eléctricos (clase C).

- Extintores portátiles: distribución de unidades de polvo químico seco (ABC) y $CO_2$ (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 las tres zonas de proceso.

- Sistemas de rociadores y monitores: en áreas de alto riesgo, como los parques de tanques TK-207 (metanol) y TK-307 (ácido acético), se dispondrán sistemas de enfriamiento mediante lluvia de agua o monitores de espuma para el control de incendios de gran magnitud.




Fig. 11.10 Tipos de fuego y extintores

**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 hidrógeno y gas natural, y de monóxido de carbono (CO) en la Etapa N°1.

- 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 TK-207 y TK-307 y los reactores contarán con diques o muros de contención diseñados para confinar posibles derrames de líquidos inflamables o corrosivos, evitando la propagación del fuego por escurrimiento y el vuelco al estuario.

Capacitación y respuesta humana

- 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.

### 11.3.8 Instalaciones eléctricas

El diseño, la ejecución y el mantenimiento de las instalaciones eléctricas en la planta 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 el gas natural, el gas de síntesis (con hidrógeno de rango de inflamabilidad muy amplio) y el metanol, se realiza una clasificación de áreas según el riesgo de formación de atmósferas explosivas (IEC 60079 / API RP 500), determinando la instalación de equipos eléctricos antiexplosivos en las zonas clasificadas:

- Control de energía estática: se dispondrán sistemas de descarga estática en las operaciones de trasvase de metanol y ácido acético.

- Vinculación y puesta a tierra: todos los tanques de almacenamiento (TK-207, TK-307) 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 metanol, ácido acético y yoduro de metilo.

- 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 las líneas de gas natural, gas de síntesis, metanol, ácido acético y servicios auxiliares.

| Fluido / Servicio | Color de fondo | Color de banda | Ejemplo en planta |
|---|---|---|---|
| Gases combustibles | Amarillo | Negro | Gas natural (alimentación a D-101) |
| Gases tóxicos/inflamables de proceso | Naranja | Negro | Gas de síntesis (CO, H□) entre R-102 y AB-105/A-106 |
| Líquidos inflamables | Naranja | Negro | Metanol (Zona 200) / Ácido acético (Zona 300) |
| Sustancias tóxicas | Violeta | Blanco | Yoduro de metilo (CH□I) en el loop de R-301/F-302 |
| 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 | Vapor de alta (E-103), media (E-202) y baja (E-303) presión |
| Aire comprimido | Azul | Blanco | Aire de instrumentos y servicios |

Tabla 11.7 Clasificación de fluidos según colores de identificación

Fuente: elaboración propia en base a la norma IRAM 2507

**Gestión de señales y sistemas de emergencia**

La señalización de emergencia en la planta 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 o C). 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 de CO/LEL y las vías de escape seguras.

- 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.

### 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 (gas de síntesis, metanol, ácido acético) y la identificación de riesgos propios del medio ambiente de trabajo, analizando su impacto en la salud y la exposición sistemática a agentes agresores como CO, $H_2$ y $CH_3I$.

- 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 clase de fuego 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.

**Cronograma anual básico de capacitaciones**

El siguiente calendario establece la frecuencia y los temas clave para mantener la competencia del personal, dividido 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 de CO/H□/metanol/CH□I 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/fugas químicas | 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

Fuente: elaboración propia en base a (Asfahl, C. R., & Rieske, D. W., 2010).

**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 metanol y ácido acético 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 —desulfuración (D-101), reformado (R-102), separación de CO (AB-105), síntesis de metanol (R-201) y carbonilación (R-301)—, 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, como una sobrepresión en R-102 o una desviación de la relación agua/ácido acético en el sistema de carbonilación, 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 alimentación de oxígeno a R-102: sistema de corte automático que impide la alimentación de oxígeno al reactor ATR si no se detectan condiciones seguras de caudal de gas natural y vapor, evitando la formación de mezclas explosivas.

- Interlock de relación agua/ácido acético en R-301: lazo de control que impide superar el límite de agua del sistema (8 %, según el proceso de carbonilación tipo Cativa) para evitar reacciones secundarias descontroladas.

- ESD en almacenamiento de metanol y ácido acético: sistema de parada de emergencia (Emergency Shut Down) sectorizado para el aislamiento inmediato de TK-207 y TK-307 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 N° XII

## ANALISIS DE RIESGO

## 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 ácido acético grado polimérico a partir de metano, con metanol como subproducto/intermedio del proceso. El objetivo principal es identificar, clasificar y evaluar los distintos tipos de riesgos presentes en las tres Etapas del proceso: Etapa N° 1 (generación y acondicionamiento del gas de síntesis, desde el reactor de reformado autotérmico R-102 hasta los acumuladores A-104/A-106/A-107), Etapa N° 2 (síntesis y purificación de metanol, R-201 a TK-207) y Etapa N° 3 (carbonilación catalítica y purificación de ácido acético, R-301 a TK-307).

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, en particular del reactor ATR (R-102), el sistema de columnas de absorción por diferencia de presión (AB-105) y los reactores catalíticos R-201 y R-301. 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, tecnológicos y ambientales asociados a la operación de la planta, considerando las sustancias características de este proceso: gas natural, oxígeno, monóxido de carbono, hidrógeno, metanol, yoduro de metilo, ácido acético y ácido propiónico.

## 12.2 Identificación de factores de riesgo

### 12.2.1 Riesgos físicos

Los riesgos físicos están asociados a las condiciones operativas del proceso, tales como temperatura, presión, ruido y vibraciones generadas por los equipos. En esta planta, estos factores se presentan principalmente en el reactor ATR (R-102), los reactores catalíticos R-201 y R-301, las columnas AB-105, los economizadores y los equipos rotativos (compresores y bombas de alimentación).

#### 12.2.1.1 Altas temperaturas

El reactor ATR (R-102) opera a aproximadamente 1000 °C, y las corrientes de salida de los tres reactores (R-102, R-201, R-301) se aprovechan para generar vapor de alta y media presión en los economizadores. El contacto accidental con superficies calientes, líneas de vapor o el reactor mismo puede generar quemaduras térmicas graves al personal de operación y mantenimiento.

**Medidas de mitigación:**

- Aislamiento térmico de equipos, cañerías y superficies expuestas, en particular en R-102 y en las líneas de vapor de alta presión.

- 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, integrados al sistema de control distribuido de la planta.

#### 12.2.1.2 Altas presiones

El reactor R-102 opera a 30 bar, las columnas AB-105 operan bajo el principio de adsorción por diferencia de presión (PSA), y el reactor R-201 opera a presión elevada conforme al diseño de reactores tipo Lurgi (BWR) con 9.406 tubos. Una falla en estos sistemas podría provocar liberaciones súbitas de presión, con riesgo de explosión mecánica, proyección de fragmentos o fuga de gases inflamables y tóxicos (CH4, H2, CO).

**Medidas de mitigación**

- Instalación de válvulas de seguridad y discos de ruptura en recipientes y columnas a presión.

- Diseño de equipos conforme a códigos internacionales (ASME, Sección VIII).

- Inspecciones periódicas de integridad mecánica, con énfasis en R-102, AB-105 y R-201.

- Sistemas de monitoreo continuo de presión con enclavamientos de seguridad (SIS).

#### 12.2.1.3 Ruido industrial

Los compresores de gas de síntesis, sopladores y bombas de alimentación a los reactores generan niveles de ruido que pueden superar los 85 dB(A), representando un riesgo de daño auditivo para el personal expuesto durante períodos prolongados.

**Medidas de mitigación**

- Instalación de cabinas o encerramientos acústicos en equipos de alta emisión sonora.

- Uso obligatorio de protección auditiva (orejeras o tapones).

- Señalización de zonas con niveles elevados de ruido y rotación del personal expuesto.

#### 12.2.1.4 Vibraciones

Las vibraciones generadas por compresores y bombas centrífugas pueden provocar fatiga estructural en tuberías y soportes, además de afectar la estabilidad operativa y la vida útil de los equipos rotativos.

**Medidas de mitigación**

- Instalación de soportes antivibratorios.

- Balanceo dinámico de equipos rotativos.

- Sistemas de monitoreo de vibraciones para detección temprana de fallas (mantenimiento predictivo).

### 12.2.2 Riesgos químicos

Los riesgos químicos de la planta están asociados al manejo de sustancias inflamables, tóxicas, asfixiantes o corrosivas propias de las tres zonas del proceso: gas natural y oxígeno, monóxido de carbono e hidrógeno, metanol y yoduro de metilo, ácido acético y ácido propiónico.

#### 12.2.2.1 Manejo de gas natural

El gas natural, materia prima de alimentación a D-101 y R-102, es un compuesto altamente inflamable. Una fuga en las líneas de alimentación, en presencia de una fuente de ignición, puede generar incendios o explosiones.

**Medidas de mitigación**

- Detectores de gases combustibles en las zonas de alimentación y en el entorno de R-102.
- Clasificación de áreas eléctricas (ATEX) en toda la Etapa N°1.
- Válvulas de corte automático y sistemas de venteo controlado.

#### 12.2.2.2 Manejo de oxígeno puro a presión

El oxígeno se alimenta al quemador de R-102 (entrada R1) a presión, como agente oxidante del reformado autotérmico. El oxígeno puro es un fuerte comburente: no es inflamable por sí mismo, pero enriquece cualquier atmósfera y puede provocar la ignición espontánea de materiales normalmente no combustibles (grasas, aceites, juntas, textiles) al entrar en contacto con ellos, además de acelerar violentamente cualquier incendio ya iniciado.

**Medidas de mitigación**

- Uso exclusivo de materiales, lubricantes y juntas certificados para servicio con oxígeno (compatibilidad y limpieza según normas de servicio de O2).
- Procedimientos estrictos de limpieza y desengrase de líneas antes de su puesta en servicio.
- Control de velocidad de flujo para evitar ignición por fricción o compresión adiabática en válvulas.
- Prohibición de materiales combustibles en el entorno inmediato de la línea de oxígeno.

#### 12.2.2.3 Exposición a monóxido de carbono (CO)

El CO está presente en concentraciones significativas en toda la Etapa N°1 (A-104, AB-105, A-106, A-107) y se alimenta directamente a los reactores R-201 y R-301. Es un gas incoloro e inodoro que actúa como asfixiante químico al unirse a la hemoglobina con mayor afinidad que el oxígeno, por lo que una fuga no detectada representa un riesgo grave y de difícil percepción sensorial para el personal.

**Medidas de mitigación**

- Detectores fijos de CO en todas las áreas de proceso donde circula gas de síntesis, con alarma de dos niveles.
- Detectores portátiles individuales para el personal que ingresa a zonas de riesgo.
- Sistemas de ventilación forzada en recintos cerrados.
- Procedimientos de rescate y protocolos de actuación ante alarma de CO.

#### 12.2.2.4 Exposición a hidrógeno (H2)

El hidrógeno, presente en la corriente de gas de síntesis y en los reactores R-201 y R-301, posee un rango de inflamabilidad muy amplio (4-75 % en aire) y una energía mínima de ignición muy baja, lo que lo hace particularmente peligroso ante fugas, además de ser difícil de detectar sin instrumentación específica por ser incoloro e inodoro.

**Medidas de mitigación**

- Detectores específicos de hidrógeno en zonas de alta concentración (entorno de R-201).
- Clasificación de áreas eléctricas conforme al riesgo de atmósferas explosivas por H2.
- Diseño de venteos elevados, dado que el H2 es más liviano que el aire y tiende a acumularse en zonas altas de recintos cerrados.

#### 12.2.2.5 Manejo de metanol

El metanol es tóxico por inhalación, ingestión y absorción cutánea (afecta al nervio óptico) y presenta un punto de inflamación bajo (11 °C), lo que lo clasifica como líquido inflamable. Se maneja en el reactor R-201, el tren de purificación (F-203, T-204, T-205, T-206) y se almacena en TK-207 con una capacidad de 6.742 m³.

**Medidas de mitigación**

- Sistemas de ventilación y extracción localizada en el tren de purificación.
- Detectores de vapores orgánicos y de gases inflamables.
- Diques de contención en TK-207 dimensionados para el volumen total almacenado.
- Uso de respiradores con filtro para vapores orgánicos en tareas de intervención.

#### 12.2.2.6 Exposición a yoduro de metilo (CH3I)

El ciclo catalítico de carbonilación (catalizador homogéneo de Ir/Ru) genera yoduro de metilo como intermedio de reacción, presente principalmente en la corriente que se remueve por cabeza en T-304 y se recircula hacia F-302/R-301. El CH3I es una sustancia altamente tóxica, de rápida absorción por vía respiratoria y cutánea, con efectos neurotóxicos y clasificada como posible carcinógeno, además de ser corrosiva para ciertos materiales.

**Medidas de mitigación**

- Diseño de sistema cerrado en el circuito de recirculación T-304 → F-302 → R-301, sin puntos de venteo directo a atmósfera.
- Detección continua de fugas en bridas, válvulas y sellos de bombas de esta zona.
- Elementos de protección personal específicos (respiradores autónomos) para intervenciones en esta línea.
- Procedimientos de purga y descontaminación antes de cualquier apertura de equipo.

#### 12.2.2.7 Manejo de ácido acético y ácido propiónico

El ácido acético glacial es corrosivo e inflamable (punto de inflamación 39 °C), y se maneja en el reactor R-301, el tren de purificación (T-304, T-305, T-306, I-303) y el tanque de almacenamiento TK-307 (1.394,9 m³). El ácido propiónico, subproducto removido por fondos en T-306, es igualmente corrosivo. La mezcla acuosa-ácida en T-305 (columna de secado) presenta un poder corrosivo elevado, motivo por el cual el domo y la zona superior de esa columna requieren revestimiento en Hastelloy C-276.

**Medidas de mitigación**

- Selección de materiales resistentes a la corrosión en zonas críticas (Hastelloy C-276 en T-305).
- Duchas de emergencia y lavaojos en las inmediaciones de T-304, T-305, T-306, I-303 y TK-307.
- Elementos de protección personal químico-resistentes (guantes, protección facial, ropa ácido-resistente).
- Diques de contención en TK-307 y control de espesores por corrosión en equipos de esta zona.

#### 12.2.2.8 Riesgo de incendio y explosión

El gas natural, el hidrógeno, el monóxido de carbono, el metanol y el ácido acético presentan distintos grados de inflamabilidad. En presencia de oxígeno (aportado además como materia prima del proceso) y una fuente de ignición, pueden generarse incendios o explosiones en cualquiera de las tres zonas de la planta.

**Medidas de mitigación**

- Clasificación de áreas eléctricas (ATEX) en toda la planta, con especial atención a la Etapa N°1 (gas natural, H2, CO) y al entorno del reactor R-102.
- Sistemas de detección y extinción de incendios (detección de llama y gas, rociadores, espuma para hidrocarburos/metanol).
- Puesta a tierra de equipos para evitar descargas electrostáticas, en particular en el llenado de TK-207 y TK-307.
- Planes de emergencia y evacuación, con simulacros periódicos.

### 12.2.3 Riesgos mecánicos

Los riesgos mecánicos están relacionados con la operación de maquinaria rotativa, recipientes a presión, columnas y estructuras metálicas de las tres zonas del proceso.

#### 12.2.3.1 Fallos estructurales

Las columnas (AB-105, T-204/205/206, T-304/305/306), los tanques de almacenamiento (TK-207, TK-307) y las tuberías pueden sufrir deterioro por corrosión, fatiga térmica o sobrecarga. El riesgo es particularmente relevante en T-305, por el poder corrosivo de la mezcla acuosa-ácida, y en las líneas que transportan gas de síntesis a alta presión.

**Medidas de mitigación**

- Inspecciones periódicas mediante ensayos no destructivos (ultrasonido, radiografía).
- Programas de mantenimiento preventivo con frecuencia diferenciada según la corrosividad del servicio.
- Monitoreo del espesor de paredes en equipos críticos, en especial T-305, TK-207 y TK-307.

#### 12.2.3.2 Fallas en equipos de proceso

Los reactores (R-102, R-201, R-301), compresores, bombas de alimentación y economizadores (E-103, E-202, E-303) pueden sufrir desgaste, incrustaciones, desactivación catalítica o fallas mecánicas que comprometan la disponibilidad de la planta.

**Medidas de mitigación**

- Programas de mantenimiento predictivo (análisis de vibraciones, termografía).
- Monitoreo de la actividad catalítica en R-102, R-201 y R-301, con reposición programada del catalizador.
- Capacitación del personal en operación segura de equipos críticos.

### 12.2.4 Riesgos eléctricos

La planta requiere una importante infraestructura eléctrica para la operación de compresores, bombas, sistemas de control e instrumentación de las tres zonas de proceso.

**Entre los riesgos eléctricos se incluyen:**

- Electrocución del personal.
- Cortocircuitos o sobrecargas.
- Incendios por fallas eléctricas, particularmente riesgosos en zonas clasificadas por presencia de gas natural, H2 o vapores de metanol.
- Interrupciones en el suministro eléctrico, que pueden afectar el sistema de control y las medidas de seguridad activas (detección de gases, enclavamientos).

**Medidas de mitigación**

- Instalación de sistemas de puesta a tierra en todos los equipos.
- Uso de protecciones eléctricas (disyuntores, relés) y equipos certificados para atmósferas explosivas en zonas clasificadas.
- Inspecciones periódicas de tableros eléctricos.
- Generadores de emergencia para alimentar sistemas de control y seguridad en áreas críticas.

### 12.2.5 Riesgos económicos

**Falta de disponibilidad de materia prima**

El proceso depende del suministro continuo de gas natural y oxígeno. Interrupciones en la cadena de suministro (por ejemplo, en el gasoducto de alimentación o en la planta de separación de aire que provee el oxígeno) pueden afectar la producción de las tres zonas.

**Medidas de mitigación**

- Diversificación de proveedores de gas natural y de oxígeno.
- Mantenimiento de stock de seguridad, cuando sea técnicamente viable (oxígeno líquido).
- Contratos de suministro a largo plazo.

**Variación del precio de materias primas**

El gas natural, principal insumo del proceso, está sujeto a fluctuaciones de precio en el mercado interno y de exportación.

**Medidas de mitigación**

- Contratos a precio fijo o indexado.
- Estrategias de compra anticipada.

**Variación en costos energéticos**

El proceso requiere consumos importantes de electricidad (compresión, planta de oxígeno) y agua de enfriamiento, aunque presenta una fuerte integración energética propia mediante la generación de vapor de alta, media y baja presión en E-103, E-202 y E-303.

**Medidas de mitigación**

- Contratos energéticos a largo plazo.
- Aprovechamiento máximo de la integración energética del proceso (vapor autogenerado) para reducir la dependencia de fuentes externas.

**Costo de reposición del catalizador**

El reactor R-301 emplea un catalizador homogéneo de Ir/Ru, de costo elevado por tratarse de metales preciosos. La contaminación del sistema (por ejemplo, exceso de agua por encima del límite del 8 % del sistema Cativa) puede acelerar su desactivación y encarecer su reposición.

**Medidas de mitigación**

- Control estricto del contenido de agua del sistema (mantenido en 2,76 %, por debajo del límite de 8 %).
- Recuperación y recirculación del catalizador mediante la columna flash F-302.

### 12.2.6 Riesgos tecnológicos

**Falla del reactor ATR (R-102)**

El reactor R-102 constituye el equipo central de la Zona 100: genera el gas de síntesis que alimenta a toda la planta. Una falla en este equipo provocaría la detención total de la producción, tanto de metanol como de ácido acético.

**Medidas de mitigación**

- Monitoreo continuo de variables críticas (temperatura, presión, relación vapor-carbono S-C).
- Sistema avanzado de control de procesos con enclavamientos de seguridad.
- Programas de mantenimiento preventivo del quemador y del lecho catalítico.

**Falla del sistema de columnas PSA (AB-105)**

AB-105 está compuesto por dos columnas de adsorción por diferencia de presión en paralelo, que operan de forma alternada (mientras una adsorbe la otra regenera). Una falla en el sistema de válvulas de conmutación afectaría la pureza del CO obtenido y, por consiguiente, la alimentación al reactor de ácido acético R-301.

**Medidas de mitigación**

- El propio diseño en paralelo aporta redundancia parcial ante el mantenimiento de una de las columnas.
- Monitoreo de pureza de CO a la salida del sistema.
- Mantenimiento programado de válvulas de conmutación.

**Falla de los reactores catalíticos R-201 y R-301**

Los reactores de metanol (R-201) y de carbonilación (R-301) dependen de la actividad del catalizador y de un control preciso de las condiciones de operación (GHSV en R-201, tiempo de residencia y contenido de agua en R-301).

**Medidas de mitigación**

- Sistema de control distribuido con indicadores de desactivación catalítica.
- Programas de mantenimiento preventivo y reposición programada de catalizador.

**Pérdida de integración energética**

Los economizadores E-103 y E-202 son fundamentales para el balance energético global de la planta, al generar vapor de alta, media y baja presión a partir del calor de reacción. Una falla en estos equipos afectaría tanto la eficiencia energética como el suministro de vapor a los trenes de purificación.

**Medidas de mitigación**

- Monitoreo de presión diferencial y de generación de vapor.
- Limpieza periódica para evitar incrustaciones.
- Inspecciones durante paradas programadas.

### 12.2.7 Riesgos ambientales

La operación de la planta puede generar impactos ambientales asociados a emisiones gaseosas, efluentes líquidos y generación de residuos industriales, con particular relevancia por su emplazamiento dentro del PIBB, en el límite con Ing. White y en cercanía a la Reserva Natural Bahía Blanca-Bahía Falsa-Bahía Verde y al estuario de Bahía Blanca (aspectos desarrollados con mayor detalle en el Capítulo VIII). En este capítulo se abordan desde la perspectiva del riesgo operativo.

#### 12.2.7.1 Emisión de compuestos orgánicos volátiles (COV)

Durante las etapas de reacción, separación y almacenamiento pueden generarse emisiones de:

- Metano (gas natural) no convertido
- Metanol
- Yoduro de metilo

Estos compuestos pueden liberarse al ambiente a través de:

- Venteos de equipos
- Fugas en válvulas y conexiones
- Operaciones de carga y descarga en TK-207 y TK-307

**Medidas de mitigación**

- Instalación de sistemas de recuperación de vapores en el llenado de tanques.
- Monitoreo continuo de emisiones.
- Mantenimiento preventivo de válvulas y sellos, en especial en la línea de CH3I.
- Uso de sistemas de venteo controlado (tea).

#### 12.2.7.2 Contaminación de efluentes líquidos

El proceso puede generar efluentes que contienen:

- Metanol
- Trazas de ácido acético y ácido propiónico
- Trazas del catalizador de Ir/Ru
- Compuestos yodados

Si estos efluentes no son tratados adecuadamente, podrían provocar contaminación de cursos de agua, con especial sensibilidad por la proximidad al estuario de Bahía Blanca.

**Medidas de mitigación**

- Instalación de una planta de tratamiento de efluentes industriales.
- Neutralización química de corrientes ácidas.
- Recuperación de compuestos yodados antes del vertido.
- Monitoreo periódico de parámetros ambientales conforme a la normativa del CTE del Polo Petroquímico.

#### 12.2.7.3 Derrames de sustancias químicas

Durante el almacenamiento o transporte interno de materias primas y productos pueden producirse derrames accidentales de metanol, ácido acético o yoduro de metilo, con riesgo de contaminación del suelo o infiltración en aguas subterráneas.

**Medidas de mitigación**

- Construcción de diques de contención en TK-207 y TK-307, dimensionados según normativa.
- Sistemas de drenaje industrial cerrado.
- Procedimientos de respuesta ante emergencias específicos para cada sustancia.
- Capacitación del personal.

#### 12.2.7.4 Generación de residuos industriales

Durante la operación de la planta se generan distintos tipos de residuos:

- Óxido de zinc (ZnO) agotado del desulfurador D-101
- Catalizador agotado de R-201 y R-301
- Residuos de mantenimiento
- Lodos provenientes del tratamiento de efluentes

**Medidas de mitigación**

- Clasificación de residuos según normativa ambiental (Ley 12.530 y reglamentación asociada).
- Disposición final mediante operadores autorizados.
- Programas de minimización de residuos.

- Recuperación de metales del catalizador agotado cuando sea económicamente viable.

### 12.3 Matriz de riesgos

A continuación, se presenta la matriz de riesgos correspondiente al proyecto de producción de ácido acético grado polimérico y metanol a partir de metano, 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.

| Aspecto | Riesgo identificado | Probabilidad | Importancia | Medida de mitigación |
|---|---|---|---|---|
| Físico | Contacto con superficies calientes (R-102, E-103/E-202/E-303, líneas de vapor) | Media | Media | Aislamiento térmico, señalización, EPP térmico, sensores de temperatura con alarma |
| Físico | Liberación súbita de presión en R-102, AB-105 o R-201 | Baja | Alta | Válvulas de seguridad y discos de ruptura, diseño ASME, inspección periódica |
| Químico | Fuga de gas natural o H2 con formación de atmósfera explosiva | Media | Alta | Detección de gases, clasificación de áreas (zonas ATEX), ventilación forzada |
| Químico | Exposición a CO (A-104, AB-105, A-106, A-107, R-201, R-301) | Media | Alta | Detectores fijos y portátiles de CO, sistema de paro de emergencia, capacitación |
| Químico | Ignición por contacto de O2 puro con materiales incompatibles (grasas, hidrocarburos) | Baja | Alta | Materiales y lubricantes compatibles con O2, limpieza certificada de líneas, procedimientos LOTO |
| Químico | Exposición a yoduro de metilo (CH3I) en T-304 y su recirculación | Baja | Alta | Sistema cerrado, detección de fugas, EPP específico, ventilación localizada |
| Químico | Quemaduras químicas por ácido acético/ácido | Media | Media | Materiales resistentes a la corrosión (Hastelloy C-276 en T-305), duchas de |

| Aspecto | Riesgo identificado | Probabilidad | Importancia | Medida de mitigación |
|---|---|---|---|---|
| | propiónico (T-305, T-306, I-303, TK-307) | | | emergencia, EPP químico |
| Químico | Incendio/explosión por CH4, H2, CO o CH3OH | Media | Alta | Clasificación ATEX, sistemas de detección y extinción, puesta a tierra, planes de emergencia |
| Mecánico | Falla de equipos críticos (compresores, bombas de alimentación) | Media | Alta | Mantenimiento preventivo y predictivo, monitoreo de vibraciones |
| Mecánico | Fallas estructurales por corrosión en columnas T-304/305/306 y tanques TK-207/TK-307 | Baja | Alta | Inspección por ensayos no destructivos, control de espesores, revestimiento en zonas críticas |
| Eléctrico | Electrocución o incendio por fallas eléctricas en compresores y sistema de control | Baja | Alta | Puesta a tierra, protecciones eléctricas, inspección de tableros, generador de emergencia |
| Económico | Falta de disponibilidad de gas natural u oxígeno | Media | Alta | Diversificación de proveedores, contratos de suministro a largo plazo, stock de seguridad |
| Económico | Variación del precio del gas natural o de la energía | Media | Media | Contratos indexados, integración energética propia (vapor autogenerado) |
| Económico | Costo de reposición del catalizador de Ir/Ru (R-301) | Baja | Media | Control estricto de contaminantes (agua <8%), recuperación y recirculación del catalizador |
| Tecnológico | Falla del reactor ATR (R-102), equipo crítico de Zona 100 | Baja | Alta | Monitoreo continuo de variables (T, P, GHSV), sistema de control avanzado, |

| Aspecto | Riesgo identificado | Probabilidad | Importancia | Medida de mitigación |
|---|---|---|---|---|
| | | | | mantenimiento preventivo |
| Tecnológico | Falla del sistema de columnas PSA (AB-105) | Baja | Alta | Diseño en paralelo (una columna adsorbe mientras la otra regenera), monitoreo de pureza de CO |
| Tecnológico | Falla de R-201 o R-301 | Baja | Alta | Control distribuido, mantenimiento preventivo, indicadores de desactivación catalítica |
| Tecnológico | Pérdida de integración energética (fallas en E-103/E-202/E-303) | Baja | Media | Monitoreo de generación de vapor, mantenimiento e inspección en paradas programadas |
| Ambiental | Emisión de COV ($CH_4$, $CH_3OH$, $CH_3I$) por venteos y fugas | Media | Alta | Recuperación de vapores, monitoreo continuo de emisiones, mantenimiento de sellos y válvulas |
| Ambiental | Contaminación de efluentes líquidos | Baja | Alta | Planta de tratamiento de efluentes, neutralización, monitoreo de parámetros |
| Ambiental | Derrames de metanol, ácido acético o $CH_3I$ cerca del estuario/Reserva Natural | Baja | Alta | Diques de contención, drenaje industrial cerrado, procedimientos de respuesta ante derrames |
| Ambiental | Generación de residuos peligrosos (ZnO agotado, catalizador agotado, lodos) | Media | Media | Clasificación según normativa, disposición por operadores autorizados, minimización |

Tabla 12.1 Matriz de riesgos

Fuente: Elaboración propia.

# CAPÍTULO N° XIII

## EVALUACIÓN ECONÓMICA

## 13.1 Introducción

La evaluación económica constituye la etapa que integra, en términos monetarios, los resultados obtenidos en los capítulos precedentes de tamaño (Capítulo IV), tecnología (Capítulo V), ingeniería de procesos (Capítulo VI) e ingeniería de gestión (Capítulo VII), con el objeto de determinar la viabilidad financiera de la instalación y operación de la planta integrada de metanol (100.000 t/año) y ácido acético grado polimérico (27.500 t/año).

En primer lugar, se establece la tasa de descuento del proyecto. Posteriormente, se desarrolla la estructura de costos: la inversión inicial (activos tangibles e intangibles), el cronograma de inversiones, el capital de trabajo y los costos operativos, clasificados en fijos y variables. A partir de estos elementos se determina el punto de equilibrio y se estiman los ingresos por comercialización de ambos productos, la contribución marginal y la utilidad anual.

Finalmente, se construye el flujo de caja del proyecto a 10 años y se evalúa su rentabilidad mediante el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR).

A diferencia del costo preliminar de equipos presentado en el Capítulo VI que reportó un costo de equipos ex-works de USD 14.038.000, explícitamente excluyendo instalación, obra civil, montaje electromecánico e instrumentación, en este capítulo dicho monto se completa mediante factores de instalación del método de Lang, tal como fuera anticipado en la conclusión de dicho capítulo

## 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, reflejando el costo de oportunidad del capital invertido y el nivel de riesgo asociado al proyecto.

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, permitiendo 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:

$$r = Rf + (Rm - Rf) \cdot \beta + Rp$$

donde:

- r: tasa de descuento del proyecto.
- Rf (tasa libre de riesgo): rendimiento de los bonos del Tesoro de los Estados Unidos (T-Bonds) a 10 años. Se adopta un valor de 5 %.
- Rm (rentabilidad del mercado): rendimiento medio esperado del mercado accionario diversificado. Se adopta un valor de 10 %.
- β (coeficiente beta): sensibilidad del proyecto frente a las variaciones del mercado. Para el sector de química básica/petroquímica se adopta β = 1,15, valor de referencia reportado en bases de datos financieras sectoriales (Damodaran, January 2026), consistente con la mayor intensidad de capital y el perfil de integración vertical (reformado–síntesis–carbonilación) del presente proyecto respecto de un proceso químico simple.

- Rp (riesgo país): para Argentina, el índice EMBI (J.P. Morgan) ha oscilado en los últimos años aproximadamente entre 600 y 1.200 puntos básicos. Se adopta un valor promedio representativo de 750 puntos básicos (7,5 %), evitando distorsiones asociadas a valores puntuales del indicador.

Reemplazando los valores adoptados:

$r = 5\ \% + (10\ \% - 5\ \%) \cdot 1{,}15 + 7{,}5\ \% = 18{,}25\ \%$

A partir de los parámetros considerados y aplicando el modelo CAPM, se obtiene una tasa de descuento del 18,25 %, consistente con el costo de oportunidad del capital para un proyecto petroquímico integrado a desarrollarse en Argentina. Esta tasa se utilizará en las secciones posteriores para actualizar los flujos de inversión y de caja del proyecto, y para determinar los indicadores de rentabilidad (VAN y 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 integrada de metanol y ácido acético grado polimérico. Siguiendo el enfoque de Sapag Chain & Sapag Chain (2013), se identifica en primer lugar la inversión inicial (activos tangibles e intangibles), luego el capital de trabajo y, finalmente, los costos de operación, clasificados en fijos y variables.

### 13.3.1 Inversión inicial

La inversión inicial corresponde al capital requerido para la construcción, instalación y puesta en marcha de la planta antes del inicio de las operaciones productivas. Se clasifica en activos tangibles (terreno, edificios e instalaciones, maquinaria y equipos, rodados, muebles y útiles) y activos intangibles o costos diferidos (ingeniería, planeamiento, supervisión, constitución de la sociedad, administración del proyecto y puesta en marcha).

#### 13.3.1.1 Activos tangibles

**Terreno**

El predio seleccionado en el Capítulo III corresponde al sector norte del Parque Industrial Bahía Blanca (PIBB), con una superficie de 257.000 m². Del análisis de microlocalización (Capítulo III, método Brown–Gibson) surge un valor de referencia de terreno en el PIBB del orden de USD 36/m². Sobre este monto se adiciona un 3 % en concepto de trámites de escrituración e inscripción registral.

| Terreno | |
|---|---|
| Costo por m² | USD 36 |
| Superficie (m²) | 257.000 |
| Subtotal | $ 9.252.000 |
| % Trámites | 3 % |
| Costo trámites | $ 277.560 |
| Costo Total | $ 9.529.560 |

Tabla 13.1 Inversión inicial – Terreno.

Fuente: Elaboración propia

**Edificios e instalaciones**

El costo de las instalaciones edilicias se estimó a partir de valores típicos de construcción por unidad de superficie, en función del tipo de estructura de cada área definida en el Capítulo VI (Tabla 6.1 – distribución de superficies). Se adoptaron costos diferenciales entre USD 200/m² para estructuras livianas de control de acceso, USD 250-300/m² para áreas semicubiertas de almacenamiento y carga, USD 400/m² para edificios cerrados de uso administrativo, laboratorio, mantenimiento y servicios auxiliares, y USD 450-500/m² para el área de producción y la sala de control, dado su carácter de construcción reforzada y resistente a sobrepresión.

| Área | Superficie (m²) | Precio Unitario (USD/m²) | Costo total (USD) |
|---|---|---|---|
| Ingreso a Planta | 40 | 200 | 8.000 |
| Carga y Descarga | 450 | 250 | 112.500 |
| Almacenamiento | 1.800 | 250 | 450.000 |
| Producción (Etapas 1, 2 y 3) | 2.800 | 450 | 1.260.000 |
| Sala de Control | 60 | 500 | 30.000 |
| Servicios Auxiliares | 550 | 400 | 220.000 |
| Laboratorio | 70 | 400 | 28.000 |
| Mantenimiento | 120 | 400 | 48.000 |
| Administración | 180 | 400 | 72.000 |
| Edificios Auxiliares | 450 | 300 | 135.000 |
| Costo Total USD | 6.520 | | 2.363.500 |

Tabla 13.2 Inversión inicial – Edificios e instalaciones.

Fuente: Elaboración propia basado en OneMake — "Costo de Construcción por m² en Argentina" (jun-2026)

**Maquinaria y equipos — Método de Lang**

El Capítulo VI determinó un costo de equipos principales ex-works (sin instalación) de USD 14.038.000 para las tres etapas de proceso (gas de síntesis, metanol y ácido acético), dejando explícitamente pendiente la aplicación de un factor de instalación tipo Lang para obtener el costo instalado.

El método de Lang permite estimar el costo total de la planta física a partir del costo de los equipos principales entregados en planta (ex-works), aplicando un factor multiplicador que incorpora los costos de montaje, cañerías, instrumentación y control, instalación eléctrica, aislación y pintura, ingeniería de detalle, gastos de construcción y contingencias. Los factores de Lang clásicos (Lang, 1948; Peters & Timmerhaus, 2003) distinguen tres tipos de planta según el estado físico predominante de las corrientes de proceso: plantas de sólidos (factor ≈ 3,10), plantas mixtas sólido-fluido (factor ≈ 3,63) y plantas de fluidos (factor ≈ 4,74), este último aplicable a procesos exclusivamente gaseosos/líquidos como el presente.

Dado que en el presente capítulo el terreno y los edificios ya fueron estimados de forma independiente (Tablas 13.1 y 13.2), y que estos componentes representan una fracción menor del factor de Lang completo (aproximadamente 0,06 y 0,15-0,20 del costo de equipos, respectivamente, según Peters & Timmerhaus), se aplica un factor de instalación parcial que cubre montaje, cañerías, instrumentación, electricidad, aislación, ingeniería y contingencias, mas no terreno ni edificios de:

$$f = 3,6$$

Este valor se adopta en el extremo superior del rango típico de plantas de fluidos (3,5–4,5, excluyendo terreno y edificios), en función de:

(i) La clasificación de la planta como íntegramente de fluidos (gases y líquidos, sin manejo de sólidos), lo que según el método de Lang corresponde al factor más alto de las tres categorías;

(ii) La elevada complejidad de instrumentación y control asociada a la operación de tres unidades de proceso interconectadas en cascada bajo régimen continuo 24/7 (Capítulo VII).

(iii) Los requerimientos de metalurgia especial (revestimientos de Hastelloy C-276, aceros de baja aleación) y de cañerías de alta presión (hasta 80 bar) identificados en el diseño de equipos del Capítulo VI.

Este factor se aplica de manera uniforme sobre el conjunto de equipos, como aproximación de orden de magnitud propia de una etapa de ingeniería conceptual/básica; su valor debería revisarse mediante un presupuesto de instalación disciplina por disciplina (piping, electricidad, instrumentación, obra civil) en etapas de ingeniería de detalle.

$$C_{instalado} = f \cdot C_{equipos} = 3,6 \times \text{USD } 14.038.000 = \text{USD } 50.536.800$$

| Concepto | Monto (USD) |
|---|---|
| Costo de equipos ex-works (Capítulo VI, Tabla 6.22) | 14.038.000 |
| Factor de instalación de Lang (parcial, s/terreno ni edificios) | 3,6 |
| Costo instalado de maquinaria y equipos | 50.536.800 |

Tabla 13.3 Inversión inicial – Maquinaria y equipos (método de Lang).

Fuente: Elaboración propia

**Rodados**

Se contempla la adquisición de una flota básica de vehículos para el transporte interno de materiales, tareas de mantenimiento, supervisión y logística externa, así como un vehículo de emergencia acorde a la naturaleza de riesgo del complejo (Capítulo XI).

| Ítem | Cantidad | Precio Unitario (USD) | Costo Total (USD) |
|---|---|---|---|
| Camioneta utilitaria | 2 | 30.000 | 60.000 |
| Auto elevador | 2 | 25.000 | 50.000 |
| Vehículo de emergencia/SSMA | 1 | 35.000 | 35.000 |

| Ítem | Cantidad | Precio Unitario (USD) | Costo Total (USD) |
|---|---|---|---|
| Costos Totales (USD) | | | 145.000 |

Tabla 13.4 Inversión inicial – Rodados.

Fuente: Elaboración propia

**Muebles y útiles**

Incluye el equipamiento necesario para las áreas administrativas, la sala de control y el laboratorio de calidad, en función de la dotación de personal diurno definida en el Capítulo VII (12 puestos administrativos/gerenciales) y de los requerimientos de la sala de control (consolas DCS) y el laboratorio.

| Ítem | Cantidad | Costo Unitario (USD) | Costo Total (USD) |
|---|---|---|---|
| Escritorios | 15 | 300 | 4.500 |
| Sillas | 20 | 150 | 3.000 |
| Computadoras | 15 | 800 | 12.000 |
| Armarios | 6 | 400 | 2.400 |
| Equipamiento sala de control (consolas) | 1 | 45.000 | 45.000 |
| Mobiliario laboratorio | 1 | 12.000 | 12.000 |
| Total muebles y útiles (USD) | | | 78.900 |

Tabla 13.5 Inversión inicial – Muebles y útiles.

Fuente: Elaboración propia.

| ACTIVOS TANGIBLES | Costo (USD) |
|---|---|
| Terreno | 9.529.560 |
| Edificios e instalaciones | 2.363.500 |
| Maquinaria y equipos (instalados) | 50.536.800 |
| Rodados | 145.000 |
| Muebles y útiles | 78.900 |
| Total Activos Tangibles (USD) | 62.653.760 |

Tabla 13.6 Inversión inicial – Resumen de activos tangibles.

Fuente: Elaboración propia

**13.3.1.2 Activos intangibles.**

Los activos intangibles comprenden los gastos asociados a la ingeniería, planeamiento, organización y puesta en marcha del proyecto, que no se materializan en bienes físicos, pero resultan indispensables para su implementación. Se calculan como un porcentaje de las inversiones previamente estimadas, siguiendo el mismo criterio aplicado en trabajos comparables de plantas petroquímicas:

- Planeamiento e integración del proyecto: 0,3 % del total invertido en activos fijos tangibles.
- Ingeniería del proyecto: 0,35 % del costo de equipos ex-works (Capítulo VI).
- Supervisión del proyecto: 0,15 % de la inversión en activos fijos tangibles.
- Constitución de la sociedad anónima: costo fijo estimado en USD 6.000 (mayor al de una S.R.L. dado el régimen de fiscalización del art. 299 LGS adoptado en el Capítulo VII).
- Administración del proyecto: 0,5 % del valor de los activos fijos tangibles.
- Puesta en marcha de los equipos: 2 % del costo de equipos ex-works.

| Ítem | % | Base de cálculo | Costo (USD) |
|---|---|---|---|
| Planeamiento e integración del proyecto | 0,30 | Activos fijos tangibles | 187.961 |
| Ingeniería del proyecto | 0,35 | Equipos ex-works | 49.133 |
| Supervisión del proyecto | 0,15 | Activos fijos tangibles | 93.981 |
| Constitución de la Sociedad Anónima | — | Monto fijo | 6.000 |
| Administración del Proyecto | 0,50 | Activos fijos tangibles | 313.269 |
| Puesta en marcha de los equipos | 2,00 | Equipos ex-works | 280.760 |
| Costos Diferidos Totales | | | 931.104 |

Tabla 13.7 Inversión inicial – Costos diferidos (activos intangibles).

Fuente: Elaboración propia.

#### 13.3.1.3 Inversión inicial total

La inversión necesaria para llevar a cabo el proyecto corresponde a la suma de los costos de los activos tangibles e intangibles:

| Inversión Necesaria | Monto (USD) |
|---|---|
| Inversión total en Activos Tangibles | 62.653.760 |
| Inversión total en Activos Intangibles | 931.104 |
| Inversión Total (FCI) | 63.584.864 |

Tabla 13.8 Inversión inicial total.

Fuente: Elaboración propia.

El valor obtenido (USD 63.584.864) resulta prácticamente coincidente con la Inversión Fija de Capital (FCI) de USD 63.540.000 anticipada en el Capítulo VII como base para la justificación de la figura societaria de Sociedad Anónima, lo que valida la coherencia interna del proyecto entre el dimensionamiento organizacional-legal y el desarrollo detallado de la inversión realizado en el presente capítulo mediante el método de Lang.

### 13.3.2 Cronograma de inversiones

El cronograma de inversiones establece la distribución temporal de los desembolsos durante el período de construcción, previsto en un año previo al inicio de la operación, replicando el esquema de ejecución habitual en proyectos de esta naturaleza:

- Edificios e instalaciones: ejecución en los primeros 6 meses, en desembolsos mensuales iguales.
- Costos diferidos: mayoritariamente en el primer mes, con excepción de la puesta en marcha de equipos, ejecutada en el mes 12.
- Maquinaria y equipos: adquisición en los últimos 6 meses (meses 7 a 12), en partes iguales.
- Rodados y muebles y útiles: incorporación en el mes 12, previo al inicio de operaciones.
- Terreno: adquisición en el mes 0 (contado, previo al inicio de las obras).

La tasa mensual equivalente a la tasa de descuento anual del proyecto (18,25 %) resulta:

$$i_m = (1+r)^{(1/12)} - 1 = (1+0{,}1825)^{(1/12)} - 1 = 0{,}01407 \rightarrow 1{,}407\ \%\ \text{mensual}$$

Actualizando cada desembolso mensual a valor presente (mes 0) con la tasa mensual equivalente, la inversión inicial nominal de USD 63.584.864 (excluyendo capital de trabajo) se actualiza a:

| Concepto | Monto nominal (USD) | Monto actualizado a mes 0 (USD) |
|---|---|---|
| Inversión inicial (activos tangibles e intangibles) | 63.584.864 | 57.126.772 |

Tabla 13.9 Cronograma de inversiones – Valor actualizado.

Fuente: Elaboración propia.

La diferencia entre el valor nominal y el valor actualizado (USD 6.458.092) se debe a la aplicación del valor del dinero en el tiempo, dado que los desembolsos principalmente la adquisición de equipos en los meses 7 a 12 se distribuyen a lo largo del período de construcción y no se realizan íntegramente en el momento cero.

### 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, cubriendo el desfase temporal entre el pago de los costos operativos y la recuperación de los ingresos por ventas.

Dado que la planta opera bajo un régimen continuo con un flujo relativamente estable de producción y comercialización (Capítulo IV), se adopta el método del período de desfase:

$$ICT = (CE / 330 \text{ días}) \times n_d$$

- ICT: inversión en capital de trabajo.
- CE: costos erogables anuales (costos variables totales + costos fijos de mano de obra y servicios, excluyendo depreciaciones y amortizaciones).
- $n_d$: número de días de desfase entre egresos e ingresos (se adopta 90 días, representativo de la industria petroquímica, considerando plazos de aprovisionamiento de gas natural y oxígeno, procesamiento y comercialización de exportación a Brasil).
- 330 días: días operativos anuales del proyecto (Capítulo IV).

$$ICT = (20.819.229 \text{ USD/año} / 330 \text{ días}) \times 90 \text{ días} = 5.677.972 \text{ USD}$$

El capital de trabajo requerido asciende a USD 5.677.972, cifra que se incorpora a la inversión inicial del proyecto y se recupera íntegramente al final del horizonte de evaluación (año 10).

### 13.3.4 Costos fijos

#### 13.3.4.1 Depreciaciones y amortizaciones

Se adopta el método de depreciación lineal, ampliamente utilizado en evaluaciones económicas por su simplicidad y consistencia. Las depreciaciones corresponden a los activos tangibles (edificios, equipos, rodados y muebles) y las amortizaciones a los activos intangibles (costos diferidos).

| Ítem | Valor (USD) | Vida útil (años) | Depreciación Anual (USD/año) |
|---|---|---|---|
| Edificios e instalaciones | 2.363.500 | 25 | 94.540 |
| Equipos y maquinaria (instalados) | 50.536.800 | 10 | 5.053.680 |
| Rodados | 145.000 | 5 | 29.000 |
| Muebles y útiles | 78.900 | 3 | 26.300 |

Tabla 13.10 Depreciaciones de activos tangibles.

Fuente: Elaboración propia.

| Ítem | Valor (USD) | Vida útil (años) | Amortización Anual (USD/año) |
|---|---|---|---|
| Costos diferidos | 931.104 | 3 | 310.368 |

Tabla 13.11 Amortizaciones de activos intangibles.

Fuente: Elaboración propia.

En los primeros tres años del horizonte de evaluación son los únicos períodos en que se encuentran simultáneamente vigentes la totalidad de las depreciaciones y la amortización de los costos diferidos, el cargo total por depreciaciones y amortizaciones asciende a USD 5.513.888/año. A partir del año 4, al concluir la amortización de los costos diferidos, el cargo se reduce a USD 5.177.220/año; y a partir del año 6, al concluir

la depreciación de los rodados, se reduce a USD 5.148.220/año, nivel que se mantiene hasta el año 10.

#### 13.3.4.2 Costos de mano de obra fija

Se incluyen aquí los puestos de la dotación de personal (Capítulo VII, Tabla 7.10) que cumplen jornada diurna estándar de lunes a viernes, independientemente de su encuadramiento dentro o fuera del Convenio Colectivo de Trabajo N.º 564/09, en tanto su costo no varía con el nivel de producción. Los salarios básicos se estimaron en base a las escalas del CCT 564/09 para las categorías convencionadas y a valores de mercado para los puestos fuera de convenio, adicionando un 60 % en concepto de cargas sociales y beneficios (aguinaldo, obra social, jubilación), en línea con las condiciones laborales vigentes.

| Cargo | Encuadramiento | Cant. | Sueldo Básico (USD) | Sueldo Bruto (USD) | Sueldo Total Anual (USD) |
|---|---|---|---|---|---|
| Gerente General | Fuera de Convenio | 1 | 3.000 | 4.800 | 57.600 |
| Gerente de Operaciones y Planta | Fuera de Convenio | 1 | 2.400 | 3.840 | 46.080 |
| Jefe de Mantenimiento | Fuera de Convenio | 1 | 2.000 | 3.200 | 38.400 |
| Jefe de SSMA | Fuera de Convenio | 1 | 1.800 | 2.880 | 34.560 |
| Gerente de Administración y Finanzas | Fuera de Convenio | 1 | 2.300 | 3.680 | 44.160 |
| Gerente Comercial y Logística | Fuera de Convenio | 1 | 2.300 | 3.680 | 44.160 |
| Contador / Resp. Financiero | Fuera de Convenio | 1 | 1.200 | 1.920 | 23.040 |
| Analista de RRHH | Fuera de Convenio | 1 | 1.000 | 1.600 | 19.200 |
| Comprador Técnico | Fuera de Convenio | 1 | 1.200 | 1.920 | 23.040 |
| Responsable de Ventas y Facturación | Fuera de Convenio | 1 | 1.300 | 2.080 | 24.960 |
| Operador de Despacho y Logística | Categoría B | 2 | 1.000 | 1.600 | 38.400 |
| TOTAL | | 12 | | | 393.600 |

Tabla 13.12 Costos de mano de obra fija (personal diurno L-V).

Fuente: Elaboración propia en base a Capítulo VII y CCT 564/09 (FATIQYP)

#### 13.3.4.3 Costos de servicios fijos

Se consideran costos fijos de servicios aquellos independientes del nivel de producción: telefonía e internet, servicios tercerizados de vigilancia y limpieza (Capítulo VII), recursos humanos, atención médica laboral, comedor, calefacción de edificios, mantenimiento de la red contra incendios, transporte de personal y asesoría legal externa.

| Servicio | Costo Anual (USD) |
|---|---|
| Telefonía e Internet | 8.000 |
| Servicios tercerizados (vigilancia y limpieza) | 90.000 |
| Recursos Humanos (capacitación, exámenes preocupacionales) | 40.000 |
| Atención médica laboral | 80.000 |
| Comedor | 60.000 |
| Gas natural (calefacción de edificios) | 15.000 |
| Agua / red de incendio / matafuegos | 35.000 |
| Transporte de personal | 45.000 |
| Asesoría legal externa | 24.000 |
| TOTAL | 397.000 |

Tabla 13.13 Costos fijos de servicios.

Fuente: Elaboración propia.

#### 13.3.4.4 Resumen de costos fijos

| Ítem | Costo Anual (USD) | Incidencia |
|---|---|---|
| Depreciaciones y Amortizaciones | 5.513.888 | 87 % |
| Costos fijos de mano de obra | 393.600 | 6 % |
| Costos fijos de servicios | 397.000 | 6 % |
| Costo Fijo Total | 6.304.488 | 100 % |

Tabla 13.14 Costos fijos totales.

Fuente: Elaboración propia.

A diferencia de proyectos con estructuras de costos fijos dominadas por la mano de obra, en el presente caso las depreciaciones y amortizaciones concentran el 87 % del costo fijo total, reflejo directo de la elevada intensidad de capital del complejo (equipos instalados por USD 50,5 millones) propia de una planta petroquímica integrada de tres etapas.

### 13.3.5 Costos variables

#### 13.3.5.1 Costos de materia prima e insumos catalíticos

El consumo de gas natural y oxígeno se determina a partir de los caudales horarios de diseño, considerando el régimen operativo de 330 días/año (7.920 h/año).

| Insumo | Consumo (kg/h) | Consumo (t/año) | Precio adoptado | Costo Anual (USD/año) |
|---|---|---|---|---|
| Gas natural (CH4, alimentación R-102) | 7.492,8 | 59.343 | 3,8 USD/MMBTU | 11.862.342 |
| Oxígeno (O2, 99,5 %, alimentación R-102) | 9.421,8 | 74.621 | 60 USD/t | 4.477.239 |
| Óxido de zinc (D-101, reposición ciclo 61 días) | — | 8,5 | 4.500 USD/t | 38.425 |
| Catalizador Ni/Al2O3 (R-102, amortizado a 3 años) | — | — | — | 8.333 |
| Catalizador Cu/ZnO/Al2O3 (R-201, amortizado a 3 años) | — | — | — | 111.333 |
| TOTAL | | | | 16.497.673 |

Tabla 13.15 Costos de materia prima e insumos catalíticos.

Fuente: Elaboración propia en base a Capítulo V (balances de masa) y Capítulo VI (fichas de equipos)

El precio del gas natural se adoptó en 3,8 USD/MMBTU, representativo del precio en boca de pozo de la Cuenca Neuquina (Vaca Muerta) bajo contratos de abastecimiento de largo plazo (Gas Supply Agreements), consistente con lo señalado en el Capítulo II respecto de la competitividad del gas natural argentino. El precio del oxígeno (60 USD/t) corresponde a un contrato de suministro over-the-fence de gran volumen mediante una Unidad de Separación de Aire tercerizada (Capítulo II), sensiblemente inferior al del oxígeno líquido de mercado dado el suministro cautivo por tubería.

El catalizador de iridio/rutenio del reactor de carbonilación R-301 (Capítulo VI) no se incluye en este apartado: al recuperarse y recircularse de forma continua mediante F-302, constituye capital de trabajo inmovilizado ya contemplado en el costo del equipo R-301 dentro de la inversión inicial (Tabla 13.3) y no un costo operativo recurrente.

#### 13.3.5.2 Costos de servicios variables

Comprenden los consumos de utilidades directamente vinculados al nivel de producción: energía eléctrica para compresión de gas de síntesis y reciclo (C-208), vacío del sistema PSA (AB-105) y bombeo, y agua de proceso y reposición del circuito de enfriamiento.

| Servicio | Consumo Anual | Precio | Costo Anual (USD/año) |
|---|---|---|---|
| Energía eléctrica | 25.000.000 kWh/año | 0,09 USD/kWh | 2.250.000 |
| Agua de proceso y enfriamiento (reposición) | 90.000 m³/año | 0,50 USD/m³ | 45.000 |
| TOTAL | | | 2.295.000 |

Tabla 13.16 Costos de servicios variables.

Fuente: Elaboración propia

El consumo eléctrico se estimó en 250 kWh por tonelada de metanol producida, valor de referencia para trenes de metanol basados en reformado autotérmico con recuperación de CO por PSA, aplicado sobre la capacidad instalada de 100.000 t/año. El precio se adoptó según la tarifa industrial de gran demanda vigente en la región de Bahía Blanca.

#### 13.3.5.3 Costo de mano de obra variable

Se clasifican como mano de obra variable los puestos operativos que cubren el régimen continuo de 4 cuadrillas rotativas (Capítulo VII, Tabla 7.10), directamente asociados a la operación ininterrumpida de la planta.

| Cargo | Categoría CCT | Dotación | Sueldo Básico (USD) | Sueldo Bruto (USD) | Total Anual (USD) |
|---|---|---|---|---|---|
| Supervisor de Turno de Operaciones | A1 (Superior) | 4 | 1.550 | 2.480 | 119.040 |
| Operador Panelista DCS (Syngas/MeOH) | A | 4 | 1.200 | 1.920 | 92.160 |
| Operador Panelista DCS (AcOH/Fracc.) | A | 4 | 1.200 | 1.920 | 92.160 |
| Operadores de Planta de Campo | B | 8 | 1.000 | 1.600 | 153.600 |
| Analista de Laboratorio de Turno | B | 4 | 1.000 | 1.600 | 76.800 |
| Técnico Mecánico de Planta | B | 4 | 1.000 | 1.600 | 76.800 |
| Técnico Electricista/Instrumentista | A | 4 | 1.200 | 1.920 | 92.160 |
| Técnico de SSMA de Turno | A | 4 | 1.200 | 1.920 | 92.160 |
| TOTAL | | 36 | | | 794.880 |

Tabla 13.17 Costo de mano de obra variable (personal en régimen de 4 cuadrillas).

Fuente: Elaboración propia en base a Capítulo VII y CCT 564/09 (FATIQYP)

#### 13.3.5.4 Impuesto sobre los Ingresos Brutos

El Impuesto sobre los Ingresos Brutos (IIBB) de la Provincia de Buenos Aires constituye un costo variable, proporcional a la facturación. Considerando los beneficios de exención impositiva provincial asociados a la radicación en el Parque Industrial Bahía Blanca, señalados en el Capítulo III, se adopta una alícuota promocional reducida del 1 % sobre los ingresos brutos (en lugar del alícuota general del 4-5 % aplicable a la actividad industrial fuera de dicho régimen), a confirmar mediante el respectivo régimen de promoción industrial vigente al momento de la radicación.

#### 13.3.5.5 Resumen de costos variables

| Ítem | Costo Anual (USD) | Incidencia |
|---|---|---|
| Materia prima e insumos catalíticos | 16.497.673 | 82 % |
| Servicios variables | 2.295.000 | 11 % |
| Mano de obra variable | 794.880 | 4 % |
| Impuesto sobre los Ingresos Brutos (1 %) | 441.076 | 2 % |
| Costo Variable Total | 20.028.629 | 100 % |

Tabla 13.18 Costos variables totales.

Fuente: Elaboración propia

### 13.3.6 Costos totales

Los costos totales del proyecto, en régimen estable de producción (a partir del segundo año de operación), resultan de la suma de los costos fijos y variables:

| COSTOS VARIABLES TOTALES | Costo Anual (USD) |
|---|---|
| | 20.028.629 |
| Materia prima e insumos catalíticos | 16.497.673 |
| Servicios variables | 2.295.000 |
| Mano de obra variable | 794.880 |
| Impuesto sobre los Ingresos Brutos | 441.076 |
| COSTOS FIJOS TOTALES | 6.304.488 |
| Depreciaciones y Amortizaciones | 5.513.888 |
| Costos fijos de mano de obra | 393.600 |
| Costos fijos de servicios | 397.000 |
| COSTO TOTAL | 26.333.117 |

Tabla 13.19 Costos totales (régimen estable, año 2 en adelante).

Fuente: Elaboración propia

El análisis de la estructura de costos evidencia un predominio de los costos variables (76 % del total), explicado fundamentalmente por el peso del gas natural y el oxígeno como materias primas del proceso de reformado, característico de la industria petroquímica de base gas natural. Los costos fijos, con fuerte incidencia de las

depreciaciones dada la elevada inversión en equipos de proceso, representan el 24 % restante.

## 13.4 Beneficios e ingresos

### 13.4.1 Precio de venta

El precio de venta de ambos productos se determinó considerando las condiciones recientes del mercado internacional, dado el perfil exportador del proyecto (Capítulo IV: 73 % de la producción de ácido acético se destina a exportación a Brasil, y el 100 % del excedente de metanol).

Para el ácido acético grado polimérico, los índices de precios spot recientes (IMARC Group, septiembre de 2026) reportan valores de referencia del orden de 0,52 USD/kg (520 USD/t) en el nordeste asiático y 0,61 USD/kg (610 USD/t) en Europa para ácido acético glacial, con incrementos de lista de Celanese Corporation del orden de USD 50/t en los mercados occidentales durante 2026. Dado que el grado polimérico (bajo contenido de hierro y metales pesados, apto para producción de VAM/PTA) obtiene un premio comercial moderado sobre el grado técnico/glacial, se adopta un precio de venta de 620 USD/t.

Para el metanol grado AA, los índices de mercado recientes (SunSirs, ICIS) muestran valores CFR sudeste asiático y FOB Golfo de EE.UU. en un rango amplio según coyuntura (aproximadamente 280 a 470 USD/t según plaza y período), con cotizaciones del mercado chino convertidas del orden de 315-320 USD/t. Se adopta un precio de venta de exportación de 320 USD/t, consistente con el extremo conservador de dicho rango.

| Producto | Precio de venta adoptado (USD/t) | Referencia |
|---|---|---|
| Ácido acético grado polimérico | 620 | IMARC Group (2026); Celanese Corp. (2026) |
| Metanol grado AA (excedente exportable) | 320 | SunSirs (2026); ICIS (2026) |

Tabla 13.20 Precios de venta adoptados.

Fuente: Elaboración propia.

Ambos precios deben considerarse estimaciones de orden de magnitud sujetas a alta volatilidad de mercado (evidenciada por las fluctuaciones observadas en 2026), a validar mediante contratos de suministro de largo plazo antes de la etapa de ingeniería de detalle del proyecto.

### 13.4.2 Ingresos totales

Los ingresos totales del proyecto en régimen estable (a partir del año 2, con la planta operando al 100 % de su capacidad instalada) se determinan como:

$$IT = \Sigma Qi \cdot Pvi = 27.500\ t/año \times 620\ USD/t + 84.555\ t/año \times 320\ USD/t$$

$$IT = 44.107.600\ USD/año$$

| Producto | Cantidad (t/año) | Precio (USD/t) | Ingreso (USD/año) |
|---|---|---|---|
| Ácido acético grado polimérico | 27.500 | 620 | 17.050.000 |
| Metanol excedente (exportación) | 84.555 | 320 | 27.057.600 |
| INGRESOS TOTALES | | | 44.107.600 |

Tabla 13.21 Ingresos totales por producto (régimen estable).

Fuente: Elaboración propia

Se observa que, pese a que el metanol representa el 75 % del volumen físico exportado, el ácido acético grado polimérico con un precio unitario aproximadamente el doble aporta el 39 % de los ingresos totales, reflejando el mayor valor agregado de este producto dentro de la cadena de integración metanol–ácido acético.

### 13.4.3 Contribución marginal

| Contribución Marginal | |
|---|---|
| Ingreso Total (USD/año) | 44.107.600 |
| Costo Variable Total (USD/año) | 20.028.629 |
| Contribución Marginal (USD/año) | 24.078.971 |
| Razón de Contribución | 54,6 % |

Tabla 13.22 Contribución marginal.

Fuente: Elaboración propia

### 13.4.4 Utilidad anual

La utilidad anual, entendida como el resultado operativo antes de impuesto a las ganancias, se determina descontando de la contribución marginal los costos fijos totales:

| Utilidad Anual (régimen estable) | |
|---|---|
| Contribución Marginal (USD/año) | 24.078.971 |
| Costos Fijos Totales (USD/año) | 6.304.488 |
| Utilidad antes de Impuesto a las Ganancias (USD/año) | 17.774.483 |

Tabla 13.23 Utilidad anual (régimen estable, antes de impuesto a las ganancias).

Fuente: Elaboración propia

## 13.5 Punto de equilibrio

El punto de equilibrio representa el nivel de actividad en el cual los ingresos totales igualan a los costos totales del proyecto. Dado que la planta comercializa dos productos con precios y proporciones de venta distintos, el punto de equilibrio no puede expresarse en una única unidad física (toneladas), sino en términos del nivel de ingresos por ventas, bajo el supuesto de que la mezcla de productos (mix) se mantiene constante en la proporción de diseño (Capítulo IV: 27.500 t/año de ácido acético y 84.555 t/año de metanol excedente).

Se determina en primer lugar la razón de contribución marginal del proyecto, esto es, la proporción de cada peso de venta que queda disponible, tras cubrir los costos variables, para cubrir los costos fijos y generar utilidad:

Razón de Contribución = (Ingresos Totales − Costos Variables Totales) / Ingresos Totales

Razón de Contribución = (44.107.600 − 20.028.629) / 44.107.600 = 0,546 (54,6 %)

El punto de equilibrio, expresado en ingresos por ventas anuales, se determina como:

PE(USD) = Costos Fijos Totales / Razón de Contribución

PE(USD) = 6.304.488 / 0,546 = 11.548.493 USD/año

| Costos Fijos Totales (USD/año) | 6.304.488 |
|---|---|
| Razón de Contribución | 54,6 % |
| Punto de Equilibrio (USD de ingresos/año) | 11.548.493 |
| Ingresos Totales proyectados (100 % capacidad) | 44.107.600 |
| Margen sobre el punto de equilibrio | ≈ 74 % por encima del PE |

Tabla 13.24 Punto de equilibrio (base ingresos, mix de productos de diseño).

Fuente: Elaboración propia.




Fig. 13.4 Punto de equilibrio del proyecto.

Fuente: Elaboración propia

Operando a plena capacidad, los ingresos totales del proyecto (USD 44,1 millones/año) superan en aproximadamente un 74 % al punto de equilibrio (USD 11,5 millones/año), lo que evidencia un margen operativo amplio frente a caídas de precio o de volumen de ventas, y resulta coherente con la elevada razón de contribución propia de un proceso con fuerte integración energética y materias primas de bajo costo relativo (gas natural argentino).

## 13.6 Flujo de caja y rentabilidad

### 13.6.1 Flujo de caja

El flujo de caja del proyecto se construyó para un horizonte de evaluación de 10 años, considerando un momento cero de inversión (actualizado según el cronograma de la Sección 13.3.2) seguido de la etapa operativa. Se incorpora el programa de puesta en marcha del Capítulo IV: durante el año 1 la planta opera al 74 % de su capacidad nominal (20.348 t de ácido acético y 76.000 t de metanol total, de las cuales 11.395 t se consumen internamente), alcanzando el régimen estable de plena capacidad a partir del año 2.

Para cada año se determinan los ingresos por ventas, se descuenta el Impuesto sobre los Ingresos Brutos (1 %) para obtener los ingresos netos, se restan los costos erogables (variables y fijos de mano de obra y servicios) y las depreciaciones y amortizaciones del período para obtener la utilidad antes de impuestos; sobre ésta se aplica el Impuesto a las Ganancias (alícuota societaria del 35 %, Ley N.º 27.630, aplicable dado el nivel de resultado del proyecto). A la utilidad neta se le reintegran las depreciaciones y amortizaciones para obtener el flujo de fondos operativo. En el año 10 se adicionan la recuperación del capital de trabajo y el valor residual de los activos no depreciados en su totalidad (terreno y saldo de edificios).

| Año | Ingresos (USD) | Costos Erogables (USD) | D&A (USD) | Utilidad a/imp. (USD) | Imp. Ganancias (USD) | Flujo de Caja (USD) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | — | — | — | — | — | -62.804.744 |
| 1 | 33.289.398 | 14.827.683 | 5.513.888 | 12.157.227 | 4.255.029 | 13.416.086 |
| 2 | 44.107.600 | 20.028.629 | 5.513.888 | 17.774.483 | 6.221.069 | 17.067.302 |
| 3 | 44.107.600 | 20.028.629 | 5.513.888 | 17.774.483 | 6.221.069 | 17.067.302 |
| 4 | 44.107.600 | 20.028.629 | 5.177.220 | 18.111.151 | 6.338.903 | 16.949.468 |
| 5 | 44.107.600 | 20.028.629 | 5.177.220 | 18.111.151 | 6.338.903 | 16.949.468 |
| 6 | 44.107.600 | 20.028.629 | 5.148.220 | 18.140.151 | 6.349.053 | 16.939.318 |
| 7 | 44.107.600 | 20.028.629 | 5.148.220 | 18.140.151 | 6.349.053 | 16.939.318 |
| 8 | 44.107.600 | 20.028.629 | 5.148.220 | 18.140.151 | 6.349.053 | 16.939.318 |
| 9 | 44.107.600 | 20.028.629 | 5.148.220 | 18.140.151 | 6.349.053 | 16.939.318 |
| 10* | 44.107.600 | 20.028.629 | 5.148.220 | 18.140.151 | 6.349.053 | 33.564.950 |

Tabla 13.25 Flujo de caja del proyecto (10 años). *Año 10 incluye recuperación de capital de trabajo (USD 5.677.972) y valor residual de terreno y edificios (USD 10.947.660).

Fuente: Elaboración propia

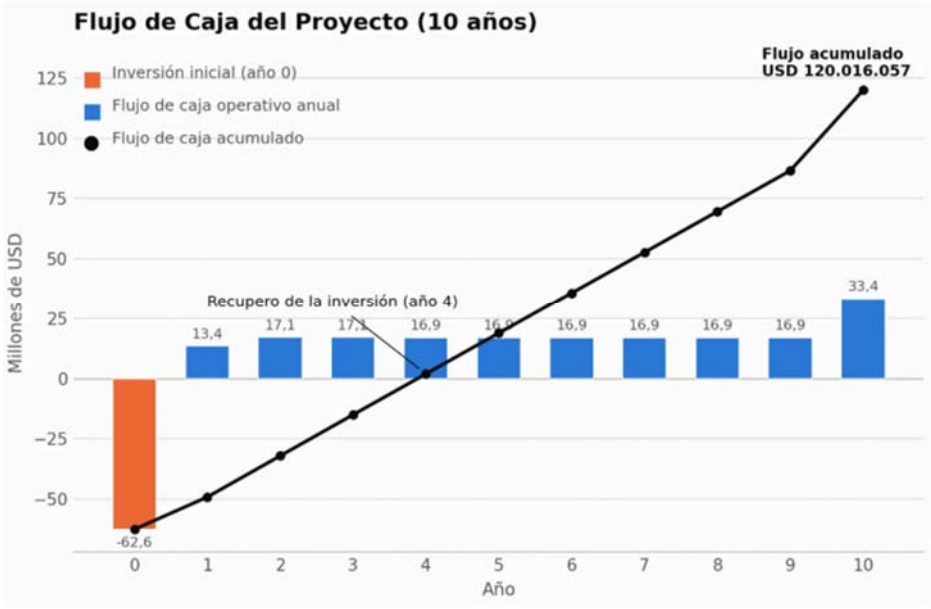



Fig. 13.5 Flujo de caja del proyecto (10 años).

Fuente: Elaboración propia

La inversión inicial (año 0), incluyendo el capital de trabajo, asciende a USD 62.804.744, ligeramente inferior a la inversión total nominal de USD 63.584.864 (Tabla 13.8) más el capital de trabajo nominal, como consecuencia de la actualización financiera del cronograma de desembolsos (Sección 13.3.2).

13.6.2 Valor Actual Neto (VAN)

El Valor Actual Neto (VAN) permite evaluar la rentabilidad del proyecto mediante la actualización de los flujos de caja futuros a valor presente, utilizando la tasa de descuento determinada en la Sección 13.2:

$$VAN = -I_0 + \Sigma(t=1 \rightarrow 10)\ FCt\ /\ (1+r)^t$$

Aplicando la tasa de descuento del 18,25 % sobre el flujo de caja de la Tabla 13.25, se obtiene:

| Indicador | Valor |
|---|---|
| Valor Actual Neto (VAN) | USD 12.959.643 |

Tabla 13.26 Valor Actual Neto del proyecto.

Fuente: Elaboración propia

El VAN obtenido es positivo (USD 12.959.643), lo cual indica que el proyecto no sólo recupera la inversión inicial actualizada de USD 62.804.744, sino que además genera un excedente económico por encima del costo de oportunidad del capital del 18,25 % anual, equivalente a aproximadamente el 21 % de dicha inversión.

**13.6.3 Tasa Interna de Retorno (TIR)**

La Tasa Interna de Retorno (TIR) se define como la tasa de descuento que iguala a cero el Valor Actual Neto del proyecto, representando su rentabilidad intrínseca con independencia de las fuentes de financiamiento.

| Indicador | Valor |
|---|---|
| Tasa Interna de Retorno (TIR) | 23,4 % |
| Tasa de descuento del proyecto (r) | 18,25 % |
| Spread TIR – r | +5,2 p.p. |

Tabla 13.27 Tasa Interna de Retorno del proyecto.

Fuente: Elaboración propia

La TIR obtenida (23,4 %) supera en 5,2 puntos porcentuales a la tasa de descuento del proyecto (18,25 %), confirmando de manera consistente con el criterio del VAN que la rentabilidad intrínseca del proyecto excede el rendimiento mínimo exigido dado su nivel de riesgo.

## 13.7 Conclusión

El presente capítulo desarrolló la evaluación económica del proyecto de la planta integrada de metanol (100.000 t/año) y ácido acético grado polimérico (27.500 t/año), completando el costeo preliminar de equipos del Capítulo VI mediante la aplicación del método de Lang (factor de instalación 3,6, propio de plantas de fluidos de alta complejidad), lo que arrojó una inversión total (FCI) de USD 63.584.864, consistente, con una diferencia inferior al 0,1 %, con la FCI de USD 63,54 millones anticipada en el Capítulo VII.

- La tasa de descuento del proyecto, determinada mediante el modelo CAPM, resulta 18,25 %.
- La inversión inicial actualizada a valor presente (incluyendo capital de trabajo) asciende a USD 62.804.744.
- El punto de equilibrio, en términos de ingresos por ventas, se ubica en USD 11.548.493/año, un 74 % por debajo de los ingresos proyectados a plena capacidad.
- Los ingresos totales en régimen estable ascienden a USD 44.107.600/año, generando una utilidad antes de impuestos de USD 17.774.483/año.
- El Valor Actual Neto (VAN) del proyecto, evaluado a 10 años con una tasa de descuento del 18,25 %, resulta positivo: USD 12.959.643.
- La Tasa Interna de Retorno (TIR) obtenida es de 23,4 %, superior en 5,2 puntos porcentuales a la tasa de descuento exigida.

En conjunto, los indicadores obtenidos permiten concluir que el proyecto de producción integrada de metanol y ácido acético grado polimérico resulta económicamente viable y financieramente rentable, con capacidad para absorber variaciones razonables en las condiciones de mercado. Se recomienda, en etapas posteriores de ingeniería de detalle, sustituir las estimaciones de costeo de equipos por cotizaciones formales de los licenciantes y proveedores identificados en el Capítulo VI, y validar los precios internacionales de ambos productos y del gas natural mediante contratos de comercialización y abastecimiento de largo plazo, dado el impacto que estas variables presentan sobre la rentabilidad final del proyecto.

# CAPÍTULO N° XIV
## ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

## 14.1 Introducción

El análisis de sensibilidad es la etapa final de la evaluación económica de un proyecto de inversión. Su propósito es medir cómo responden los indicadores de rentabilidad, principalmente el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR), cuando cambian las variables sobre las que se construyó el flujo de caja (Baca Urbina, 2013; Sapag Chain et al., 2014). Una evaluación determinística como la del Capítulo XIII entrega un único valor de VAN y de TIR, obtenido con precios, costos y volúmenes que en la realidad son inciertos. El análisis de sensibilidad complementa ese resultado: indica si la conclusión de rentabilidad es robusta o si depende de supuestos frágiles.

El proyecto evaluado es una planta integrada que produce ácido acético grado polimérico (27.500 t/año) por carbonilación de metanol (proceso tipo Cativa) y vende como segundo producto metanol grado AA (84.555 t/año excedentes) a partir de gas natural y oxígeno, vía reformado autotérmico (ATR). Está localizada en el Parque Industrial de Bahía Blanca (PIBB). Esta estructura de dos productos y una sola materia prima dominante tiene una consecuencia directa: la rentabilidad queda expuesta tanto al precio de los productos como al diferencial entre el precio del metanol y el precio del gas natural. El análisis que sigue cuantifica esa exposición.

El capítulo se organiza en tres niveles de profundidad creciente:

1. Sensibilidad univariable (ceteris paribus): cada variable crítica se modifica de a una y se recalculan el VAN, la TIR y el período de recupero.

2. Valores críticos: para cada variable, el valor que anula el VAN y el margen de seguridad respecto del caso base.

3. Jerarquización: diagrama tornado, diagrama araña y elasticidades del VAN, para ordenar las variables según su influencia.

Como en la práctica habitual a nivel de prefactibilidad, se sensibilizan solo las variables económico-financieras que afectan directamente los flujos de caja. No se reevalúan la localización ni el tamaño de planta. Ambos se definieron en los Capítulos III y IV con métodos propios, que ya incluyeron su propio análisis de robustez.

## 14.2 Metodología y caso base

### 14.2.1 Modelo de cálculo

Todos los resultados de este capítulo se obtuvieron recalculando íntegramente el modelo de flujo de caja del Capítulo XIII para cada combinación de variables, sin extrapolaciones lineales. El modelo se replicó en forma programada y se verificó que reproduce exactamente los resultados de la planilla original (VAN = 12.962.225 USD; TIR = 23,44 %). Así se asegura la trazabilidad entre ambos capítulos. En cada recálculo se actualizan en cascada todos los elementos del flujo que dependen de la variable modificada:

- ingresos por ventas e Impuesto sobre los Ingresos Brutos (IIBB);

- costos variables de materia prima y servicios;

- inversión en activos tangibles e intangibles y su cronograma mensual de desembolsos, actualizado a la tasa mensual equivalente;

- depreciaciones y amortizaciones, y su efecto sobre el Impuesto a las Ganancias;

- capital de trabajo (90 días de desfase);
- valor residual (terreno y edificios).

Los indicadores se calculan como:

$$VAN = \Sigma\ (t = 0 \rightarrow 10)\ \ FC_t / (1 + r)^t$$

$$0 = \Sigma\ (t = 0 \rightarrow 10)\ \ FC_t / (1 + TIR)^t$$

donde $FC_t$ es el flujo de caja neto del año t y r = 18,25 % es la tasa de descuento del proyecto, determinada por el modelo CAPM con riesgo país (Capítulo XIII). El criterio de decisión es el habitual: el proyecto es rentable si VAN > 0, lo que equivale a TIR > r. El período de recuperación de la inversión (PRI) se informa como indicador complementario de liquidez.

Para comparar variables medidas en unidades distintas se define la elasticidad del VAN respecto de una variable X como la variación porcentual del VAN por cada 1 % de variación de X:

$$\varepsilon(X) = (\Delta VAN / VAN_0) / (\Delta X / X_0)$$

### 14.2.2 Caso base

En esta Tabla se resume los parámetros del caso base adoptados en el Capítulo XIII, que son el punto de referencia de todo el análisis.

| Parámetro | Valor base | Fuente |
|---|---|---|
| Capacidad de ácido acético | 27.500 t/año | Cap. IV |
| Metanol excedente exportable | 84.555 t/año | Cap. IV |
| Días operativos / factor de rampa año 1 | 330 d/año / 74 % | Cap. IV |
| Precio de venta del ácido acético | 620 USD/t | IMARC (2026) |
| Precio de venta del metanol | 320 USD/t | SunSirs; ICIS (2026) |
| Precio del gas natural | 3,80 USD/MMBTU | Boca de pozo, Vaca Muerta |
| Precio del oxígeno (over-the-fence) | 60 USD/t | Contrato BOO, Cap. II |
| Precio de la energía eléctrica | 0,09 USD/kWh | Cap. XIII |
| Inversión inicial total (FCI) | 63.584.864 USD | Cap. XIII (método de Lang) |
| Tasa de descuento (CAPM + riesgo país) | 18,25 % | Cap. XIII |
| Impuesto a las Ganancias / IIBB | 35 % / 1 % | Ley 27.630; régimen PIBB |
| Horizonte de evaluación | 10 años | Cap. XIII |

Tabla 14.1: Parámetros del caso base (Capítulo XIII)

En esta Tabla se presenta los indicadores del caso base y la estructura de ingresos y costos en régimen (año 2 en adelante). Esta estructura explica buena parte de los resultados de sensibilidad que se exponen luego.

| Concepto | Valor | Participación |
|---|---|---|
| VAN (r = 18,25 %) | 12.962.225 USD | — |
| TIR | 23,44 % | Spread TIR − r = 5,19 p.p. |
| Período de recuperación (PRI) | 3,90 años | — |
| Ingresos por ácido acético | 17.050.000 USD/año | 38,7 % |
| Ingresos por metanol excedente | 27.057.600 USD/año | 61,3 % |
| Ingresos total | 44.107.600 USD/año | 100,0 % |
| Costo de gas natural | 11.861.474 USD/año | 60,6 % del CV |
| Costo de oxígeno | 4.477.239 USD/año | 22,9 % del CV |
| Servicios variables (energía, agua) | 2.295.000 USD/año | 11,7 % del CV |
| Costos variables totales (CV) | 19.586.685 USD/año | 44,4 % de ingresos |
| Costos fijos erogables | 790.600 USD/año | 1,8 % de ingresos |

Tabla 14.2: Indicadores y estructura económica del caso base (régimen estable)

Surgen dos observaciones que condicionan todo el análisis:

- El metanol aporta el 61,3 % de los ingresos. Aunque el producto principal del proyecto es el ácido acético, el volumen vendido de metanol (84.555 t frente a 27.500 t) hace que su precio tenga mayor peso sobre la rentabilidad.

- Gas natural y oxígeno representan el 83,4 % de los costos variables. Los costos fijos erogables son apenas el 1,8 % de los ingresos. El proyecto es intensivo en materia prima y en capital, y su resultado depende del margen entre el precio de los productos y el costo de la energía.

### 14.2.3 Selección de variables y rangos de variación

Las variables se seleccionaron por su peso en el flujo de caja y por su grado de incertidumbre. Los rangos analizados, definidos para cubrir desvíos plausibles en el horizonte del proyecto, son:

- Precios del ácido acético y del metanol: commodities petroquímicos con ciclos de precio pronunciados. Se analizan desvíos de aproximadamente −30 % a +30 % respecto del precio base.

- Precio del gas natural: de 2,5 a 9,0 USD/MMBTU. El rango inferior corresponde a la producción no convencional de Vaca Muerta. El superior contempla la

incorporación de costos de transporte y distribución hasta Bahía Blanca, la estacionalidad invernal y eventuales escenarios de sustitución por GNL importado.

- Costo del oxígeno: de 40 a 140 USD/t, que incluye la renegociación del contrato BOO o la indexación de su componente eléctrico.

- Inversión inicial: de −20 % a +60 %. El FCI se estimó con el método factorial de Lang, que corresponde a una estimación de clase 4 según la AACE International (2005), con una exactitud esperada del orden de −15 %/−30 % a +20 %/+50 %. El rango se desplaza hacia arriba porque en los proyectos de procesos los sobrecostos son históricamente más frecuentes que los ahorros.

- Factor de utilización de la capacidad: del 60 % al 100 %. No se analizan valores superiores al 100 % porque la planta no puede operar en forma sostenida por encima de su capacidad nominal.

- Tasa de descuento: del 10 % al 28 %, con especial atención al componente de riesgo país.

- Otros costos operativos (energía eléctrica, costos fijos y mano de obra variable): variaciones amplias, para confirmar su baja incidencia.

## 14.3 Sensibilidad univariable

### 14.3.1 Sensibilidad al precio de venta del ácido acético

El ácido acético grado polimérico es el producto que justifica el proyecto. Argentina no lo produce desde el cierre de ATANOR en 2017, y Brasil importa entre 140.000 y 177.000 t/año (Capítulo II). Su precio internacional depende del balance global de oferta, concentrado en Asia, y del precio del metanol, su materia prima. Se analizan precios entre 450 y 800 USD/t, manteniendo constantes el resto de los parámetros.

| Precio AA (USD/t) | Variación | VAN (USD) | TIR | PRI (años) |
|---|---|---|---|---|
| 450 | −27 % | 233.639 | 18,3 % | 4,7 |
| 500 | −19 % | 3.977.341 | 19,9 % | 4,4 |
| 550 | −11 % | 7.721.043 | 21,4 % | 4,2 |
| 580 | −6 % | 9.967.264 | 22,3 % | 4,1 |
| 620 | 0 % | 12.962.225 | 23,4 % | 3,9 |
| 660 | +6 % | 15.957.187 | 24,6 % | 3,8 |
| 700 | +13 % | 18.952.148 | 25,8 % | 3,6 |
| 750 | +21 % | 22.695.850 | 27,2 % | 3,5 |
| 800 | +29 % | 26.439.551 | 28,6 % | 3,3 |

Tabla 14.3: Sensibilidad del VAN y la TIR al precio de venta del ácido acético

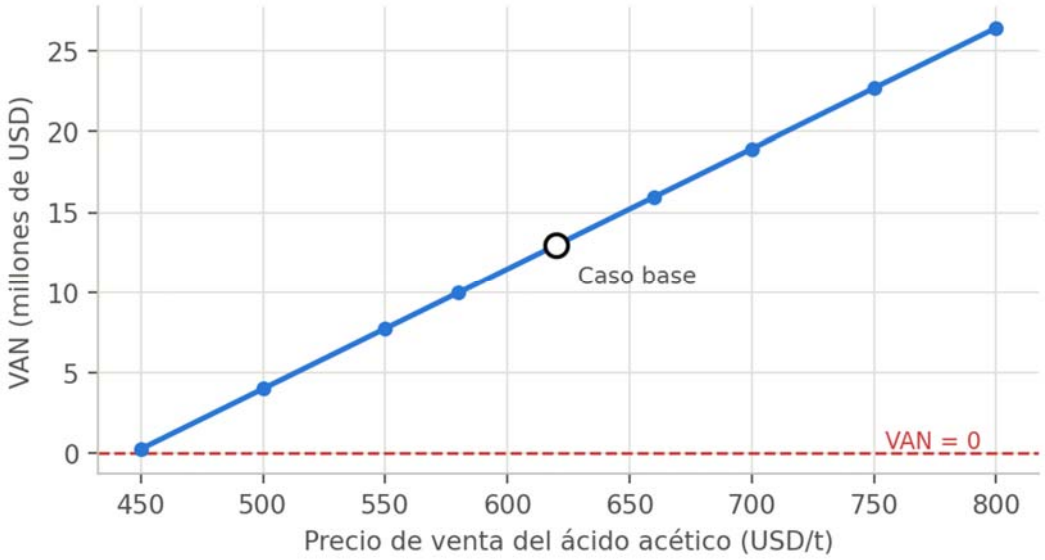



Fig. 14.1: VAN vs Precio de venta del ácido acético

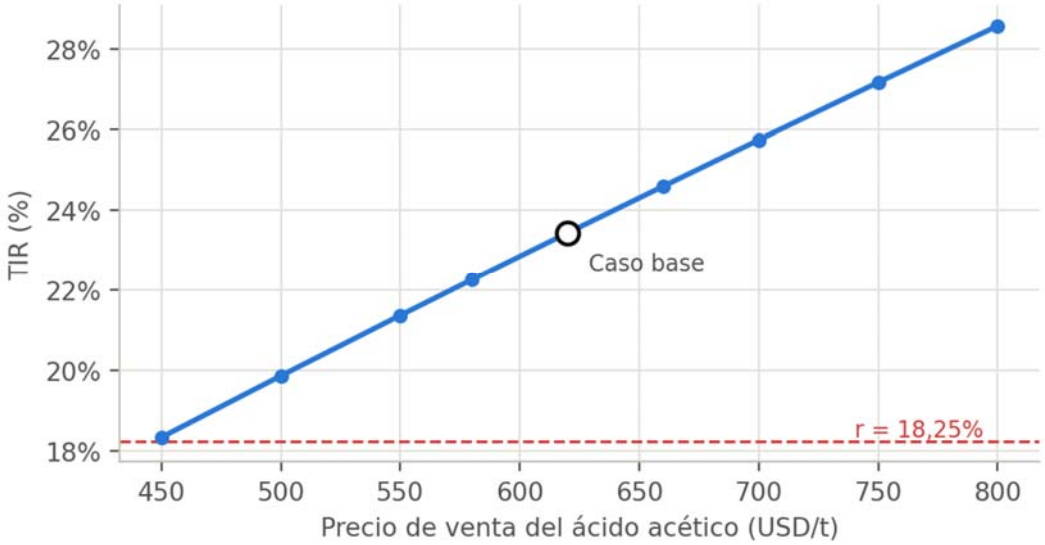



Fig. 14.2: TIR vs Precio de venta del ácido acético

El VAN responde en forma lineal al precio del ácido acético: cada 10 USD/t de variación modifica el VAN en aproximadamente 0,75 millones de USD. El precio que anula el VAN (precio crítico) es de 447 USD/t, un 27,9 % inferior al precio base. Por debajo de ese precio la TIR cae por debajo de la tasa de descuento (18,25 %). Aun en el extremo inferior analizado (450 USD/t) el VAN sigue siendo levemente positivo.

La TIR varía entre 18,3 % y 28,6 % en el rango estudiado. La elasticidad del VAN respecto de esta variable es de 3,58: una caída del 10 % en el precio reduce el VAN en aproximadamente un 36 %.

A pesar de ser el producto principal, el ácido acético tiene un margen de seguridad amplio. Esto se debe a que representa el 38,7 % de los ingresos, y a que el metanol destinado a su producción se valoriza a costo de producción y no a precio de mercado, gracias a la integración vertical.

### 14.3.2 Sensibilidad al precio de venta del metanol

El metanol excedente (84.555 t/año) se destina principalmente a exportación hacia Brasil, que importa entre 1,3 y 1,7 millones de t/año (Capítulo II). Es un commodity global cuyo precio está fijado por productores de gran escala (Methanex, Proman, productores de Medio Oriente) y por la demanda china de metanol para olefinas (MTO). Por eso es la variable de mercado más volátil y la de mayor exposición del proyecto. Se analizan precios entre 220 y 440 USD/t.

| Precio MeOH (USD/t) | Variación | VAN (USD) | TIR | PRI (años) |
|---|---|---|---|---|
| 220 | −31 % | −10.170.543 | 14,0 % | 5,6 |
| 250 | −22 % | −3.230.713 | 16,9 % | 5,0 |
| 270 | −16 % | 1.395.841 | 18,8 % | 4,6 |
| 290 | −9 % | 6.022.395 | 20,7 % | 4,3 |
| 320 | 0 % | 12.962.225 | 23,4 % | 3,9 |
| 350 | +9 % | 19.902.056 | 26,1 % | 3,6 |
| 380 | +19 % | 26.841.886 | 28,7 % | 3,3 |
| 410 | +28 % | 33.781.717 | 31,3 % | 3,1 |
| 440 | +38 % | 40.721.547 | 33,8 % | 2,9 |

Tabla 14.4: Sensibilidad del VAN y la TIR al precio de venta del metanol

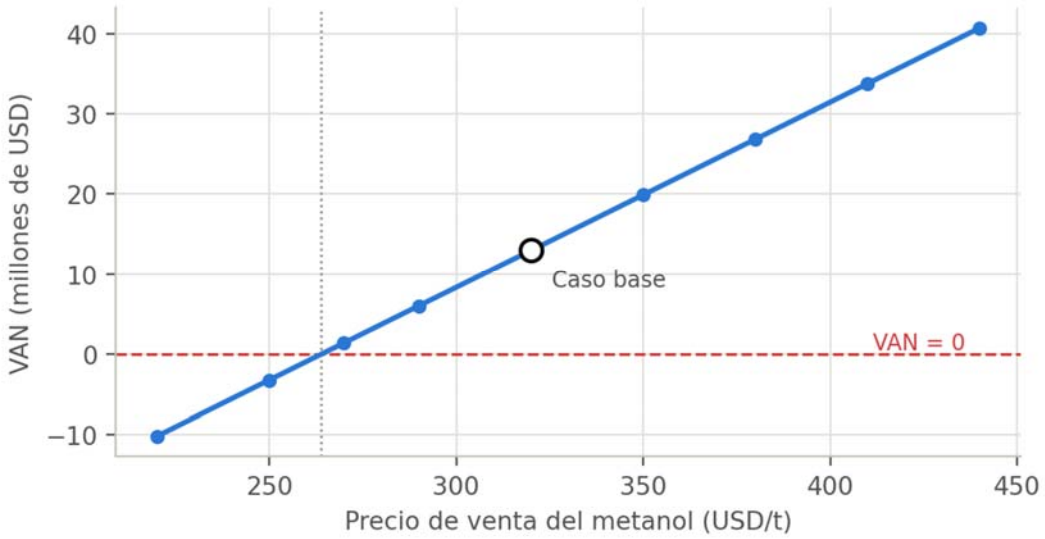



Fig. 14.3: VAN vs Precio de venta del metanol

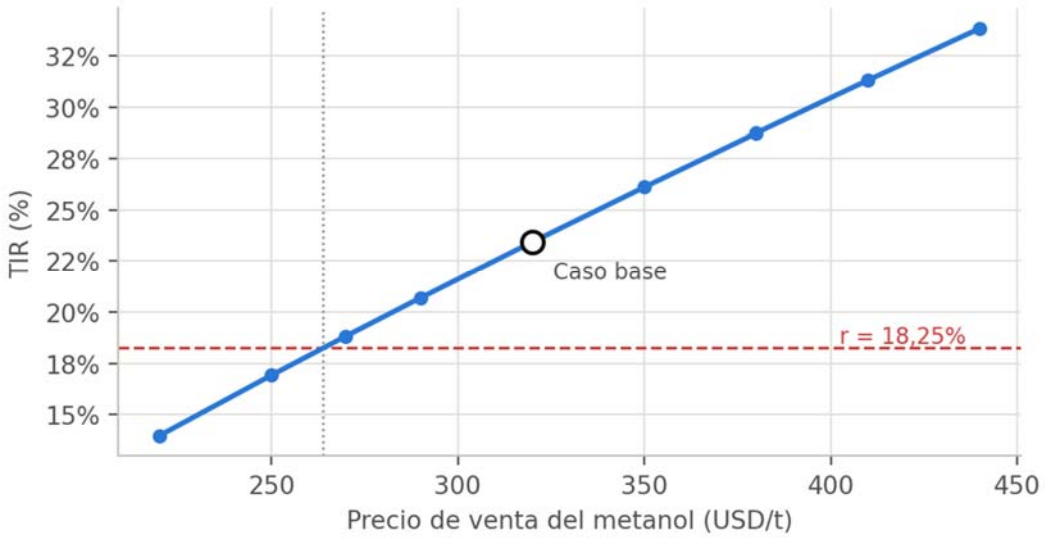



Fig. 14.4: TIR vs Precio de venta del metanol

El metanol es la variable de precio de mayor influencia sobre la rentabilidad. Cada 10 USD/t de variación modifica el VAN en aproximadamente 2,31 millones de USD, más del doble que la misma variación en el precio del ácido acético. La razón es el mayor volumen vendido: 84.555 t/año frente a 27.500 t/año.

El precio crítico es de 264 USD/t, un 17,5 % inferior al precio base. Es el margen de seguridad más estrecho entre las variables de mercado. Con 250 USD/t, un valor que el mercado de metanol ha registrado en fases bajas del ciclo, el VAN se vuelve negativo (−3.230.713 USD) y la TIR cae al 16,9 %. En sentido inverso, un precio de 380 USD/t duplica el VAN del caso base.

La elasticidad del VAN respecto del precio del metanol es de 5,71, la mayor de todas las variables analizadas. El precio del metanol es, por lo tanto, la variable crítica del proyecto.

### 14.3.3 Sensibilidad al precio del gas natural

El gas natural es la única materia prima carbonada del proceso: alimenta el reactor ATR (R-102), donde se genera el gas de síntesis del que se obtienen tanto el metanol como el monóxido de carbono para la carbonilación. Con un consumo de 7.492,8 kg/h, su costo anual de 11.861.474 USD representa el 60,6 % de los costos variables. El precio base (3,80 USD/MMBTU) corresponde a boca de pozo en Vaca Muerta. El precio efectivo en Bahía Blanca puede ser mayor si se incorporan los cargos de transporte o si cambian las condiciones regulatorias del mercado de gas argentino.

| Gas (USD/MMBTU) | Variación | VAN (USD) | TIR | PRI (años) |
|---|---|---|---|---|
| 2,50 | −34 % | 25.031.084 | 28,2 % | 3,4 |
| 3,00 | −21 % | 20.389.215 | 26,4 % | 3,5 |
| **3,80** | **0 %** | **12.962.225** | **23,4 %** | **3,9** |
| 4,50 | +18 % | 6.463.609 | 20,8 % | 4,3 |
| 5,00 | +32 % | 1.821.741 | 19,0 % | 4,6 |
| 6,00 | +58 % | −7.461.997 | 15,2 % | 5,4 |
| 7,00 | +84 % | −16.745.734 | 11,4 % | 6,4 |
| 8,00 | +111 % | −26.029.471 | 7,6 % | 8,0 |
| 9,00 | +137 % | −35.313.208 | 3,6 % | 9,4 |

Tabla 14.5: Sensibilidad del VAN y la TIR al precio del gas natural

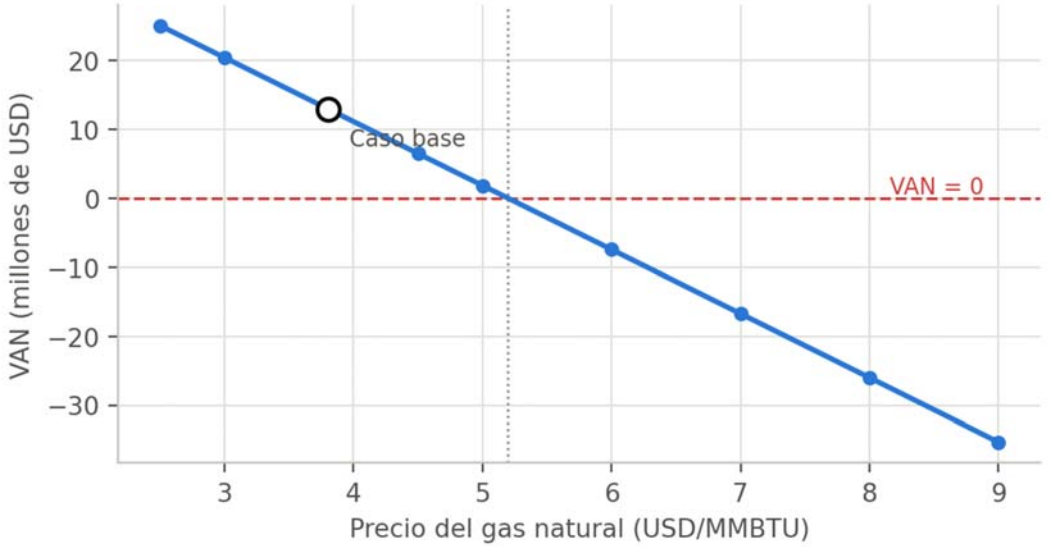



Fig. 14.5: VAN vs Precio del gas natural

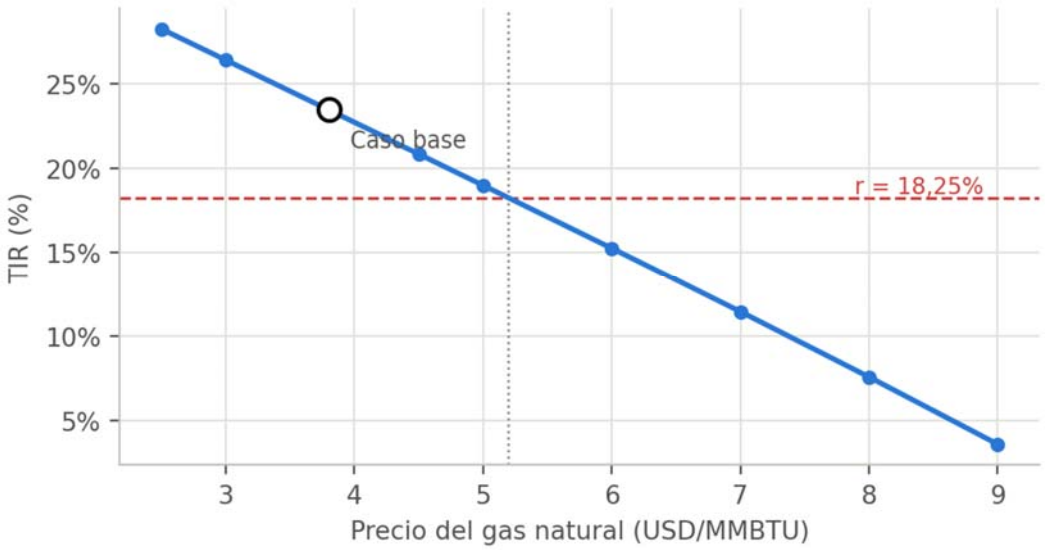



Fig. 14.6: TIR vs Precio del gas natural

El VAN disminuye linealmente con el precio del gas: cada 1 USD/MMBTU adicional reduce el VAN en aproximadamente 9,28 millones de USD. El precio crítico es de 5,20 USD/MMBTU (+36,7 % respecto del base). Por encima de ese valor el proyecto no alcanza a remunerar el costo de capital.

El margen de 1,40 USD/MMBTU es suficiente para absorber un cargo de transporte razonable, pero no un escenario de gas caro sostenido. Con 6 USD/MMBTU el VAN es de −7.461.997 USD y la TIR cae al 15,2 %. La elasticidad del VAN es de −2,72.

El abastecimiento de gas a precio competitivo es una condición necesaria para la viabilidad. El proyecto debería asegurarlo mediante un contrato de largo plazo, en firme, con precio fijo o indexado al precio del metanol, antes de la decisión final de inversión.

### 14.3.4 Sensibilidad al costo del oxígeno

El oxígeno de alta pureza (99,5 %) alimenta el quemador del ATR y se provee mediante una planta de separación de aire (ASU) bajo contrato BOO/over-the-fence. Con un consumo de 9.421,8 kg/h, su costo anual es de 4.477.239 USD, el 22,9 % de los costos variables. Su costo está dominado por la energía eléctrica que consume la ASU, por lo que puede variar con la tarifa eléctrica y con las cláusulas de indexación del contrato.

| Oxígeno (USD/t) | Variación | VAN (USD) | TIR | PRI (años) |
|---|---|---|---|---|
| 40 | −33 % | 17.400.936 | 25,2 % | 3,7 |
| 50 | −17 % | 15.181.581 | 24,3 % | 3,8 |
| 60 | 0 % | 12.962.225 | 23,4 % | 3,9 |
| 70 | +17 % | 10.742.870 | 22,6 % | 4,0 |
| 80 | +33 % | 8.523.515 | 21,7 % | 4,1 |
| 90 | +50 % | 6.304.159 | 20,8 % | 4,3 |
| 100 | +67 % | 4.084.804 | 19,9 % | 4,4 |
| 120 | +100 % | −353.907 | 18,1 % | 4,7 |
| 140 | +133 % | −4.792.617 | 16,3 % | 5,1 |

Tabla 14.6: Sensibilidad del VAN y la TIR al costo del oxígeno

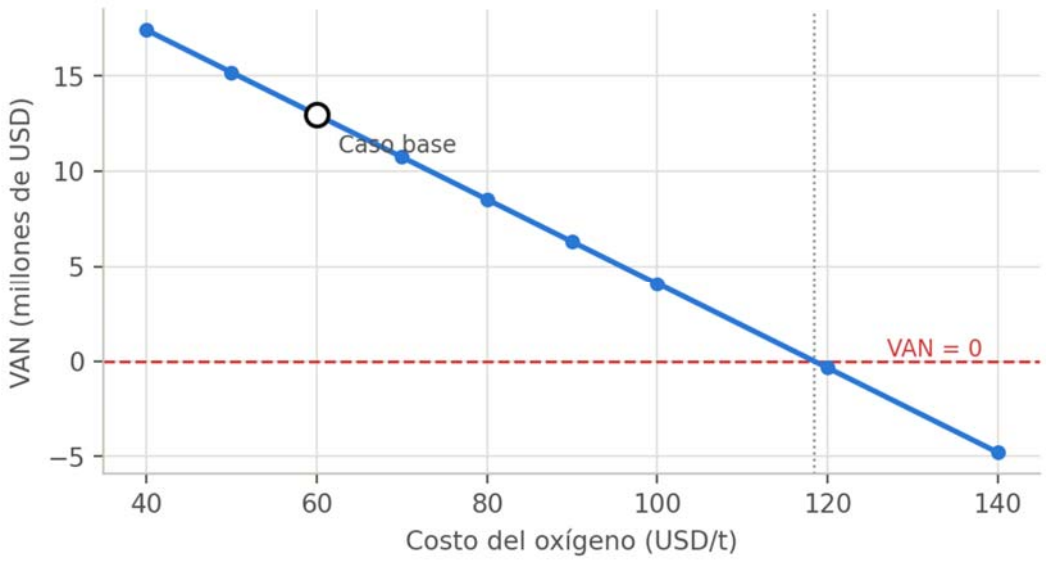



Fig. 14.7: VAN vs Costo del oxígeno

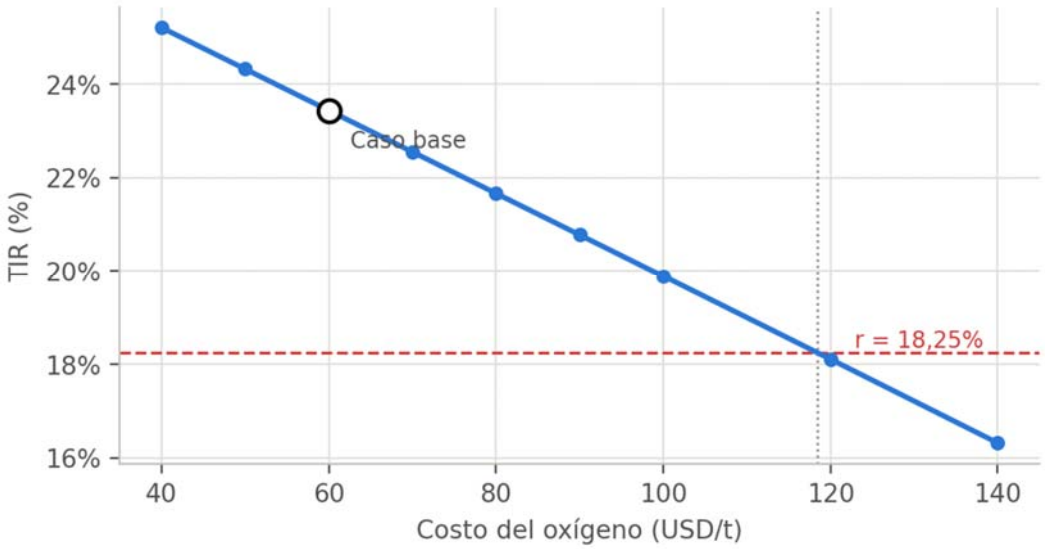



Fig. 14.8: TIR vs Costo del oxígeno

El impacto es moderado: cada 10 USD/t de aumento reduce el VAN en aproximadamente 2,22 millones de USD. El costo crítico es de 118,4 USD/t, casi el doble del valor base (+97,3 %). La elasticidad es de −1,03.

El oxígeno no es una variable crítica, pero su efecto se suma al del gas natural: ambos insumos dependen del costo de la energía en Argentina. Un contrato BOO de 15 a 20 años con precio fijo o con indexación acotada neutraliza la mayor parte de este riesgo.

### 14.3.5 Sensibilidad a la inversión inicial

La inversión inicial total (FCI = 63.584.864 USD) se estimó con el método factorial de Lang (factor 3,6 sobre un costo de equipos ex-works de 14.038.000 USD). Por su naturaleza, esta estimación tiene una incertidumbre significativa. Se aplica un factor uniforme sobre todos los rubros de inversión (terreno, edificios, maquinaria instalada, rodados, muebles y costos diferidos). El factor se propaga al cronograma de desembolsos, a las depreciaciones y amortizaciones, al escudo fiscal y al valor residual.

| Inversión (% base) | Variación | VAN (USD) | TIR | PRI (años) |
|---|---|---|---|---|
| 80 % | −20 % | 22.315.377 | 28,9 % | 3,3 |
| 90 % | −10 % | 17.638.801 | 25,9 % | 3,6 |
| 100 % | 0 % | 12.962.225 | 23,4 % | 3,9 |
| 110 % | +10 % | 8.285.649 | 21,3 % | 4,2 |
| 120 % | +20 % | 3.609.074 | 19,5 % | 4,5 |
| 130 % | +30 % | −1.067.502 | 17,9 % | 4,8 |
| 140 % | +40 % | −5.744.078 | 16,5 % | 5,0 |
| 150 % | +50 % | −10.420.654 | 15,2 % | 5,3 |
| 160 % | +60 % | −15.097.229 | 14,1 % | 5,6 |

Tabla 14.7: Sensibilidad del VAN y la TIR al monto de la inversión inicial.

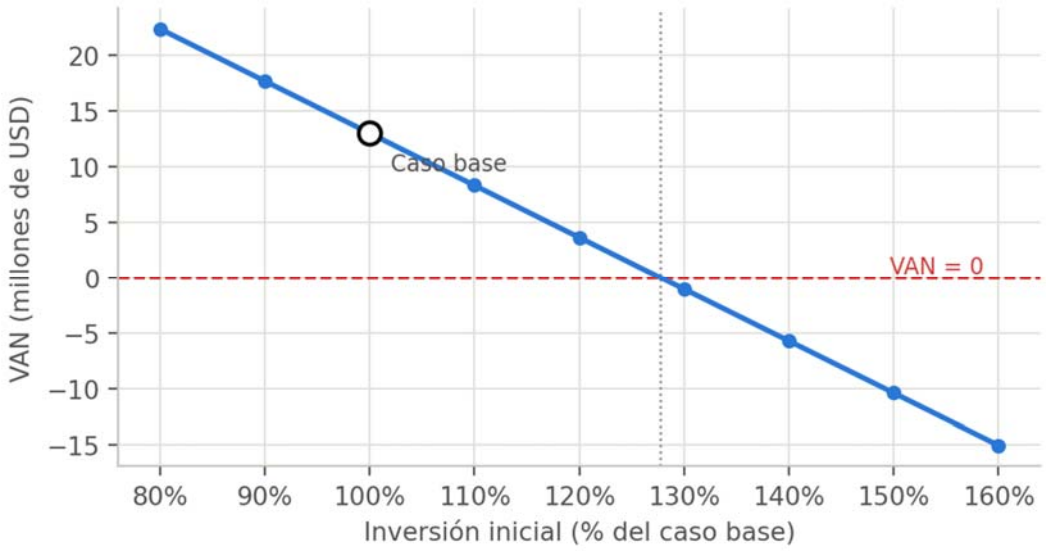



Fig. 14.9: VAN vs Inversión inicial

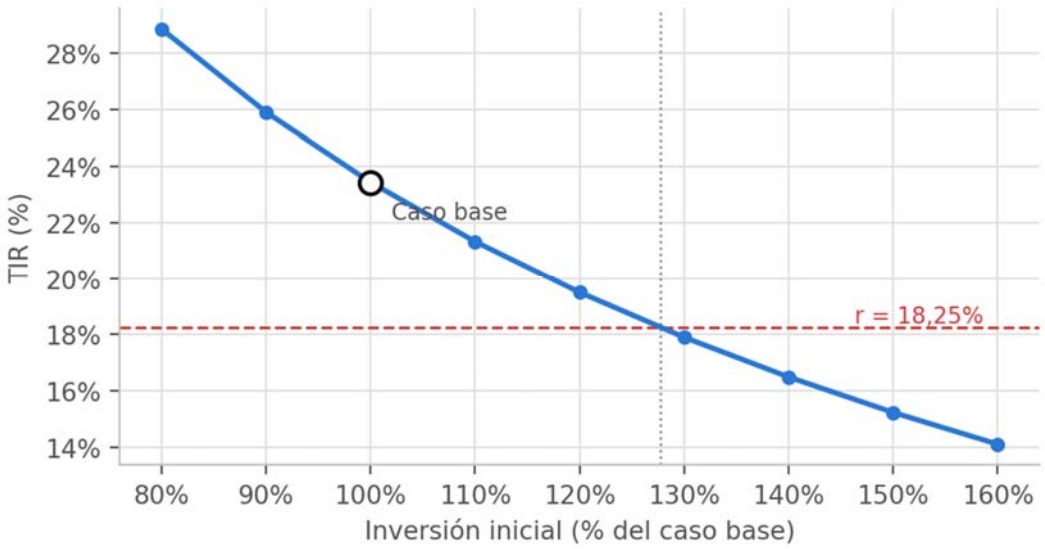



Fig. 14.10: TIR vs Inversión inicial

Cada 10 % de sobrecosto reduce el VAN en aproximadamente 4,68 millones de USD. La inversión crítica es un 27,7 % superior a la estimada (≈ 81,2 millones de USD). La elasticidad es de −3,61.

Este margen es del mismo orden que el límite superior de exactitud de una estimación clase 4. Por eso, antes de la decisión final de inversión conviene refinar el presupuesto hasta una estimación clase 3 (±10–20 %), con cotizaciones firmes de los equipos principales: R-102, R-201, R-301, AB-105 y las columnas T-204 a T-306. También conviene contratar la construcción bajo una modalidad que limite los sobrecostos, como un contrato EPC a suma alzada.

La TIR se mantiene por encima del 14 % aun con un sobrecosto del 60 %: los sobrecostos de inversión reducen la rentabilidad, pero no generan pérdidas operativas.

### 14.3.6 Sensibilidad al factor de utilización de la capacidad

El factor de utilización representa la fracción de la capacidad nominal efectivamente producida y vendida en cada año, con 330 días operativos como referencia. Puede reducirse por paradas no programadas (por ejemplo, desactivación prematura de catalizadores o fallas en el ATR o en el compresor de syngas), por restricciones de abastecimiento de gas en invierno o por limitaciones comerciales. El factor se aplica sobre la producción de ambos productos y sobre los costos de materia prima y servicios. La mano de obra de turnos rotativos y los costos fijos se mantienen constantes, porque no dependen del volumen producido.

| Utilización | Variación | VAN (USD) | TIR | PRI (años) |
|---|---|---|---|---|
| 60 % | −40 % | −12.860.368 | 12,6 % | 6,0 |
| 65 % | −35 % | −9.632.544 | 14,0 % | 5,6 |
| 70 % | −30 % | −6.404.719 | 15,5 % | 5,2 |
| 75 % | −25 % | −3.176.895 | 16,9 % | 4,9 |
| 80 % | −20 % | 50.929 | 18,3 % | 4,7 |
| 85 % | −15 % | 3.278.753 | 19,6 % | 4,5 |
| 90 % | −10 % | 6.506.577 | 20,9 % | 4,3 |
| 95 % | −5 % | 9.734.401 | 22,2 % | 4,1 |
| 100 % | 0 % | 12.962.225 | 23,4 % | 3,9 |

Tabla 14.8: Sensibilidad del VAN y la TIR al factor de utilización de la capacidad

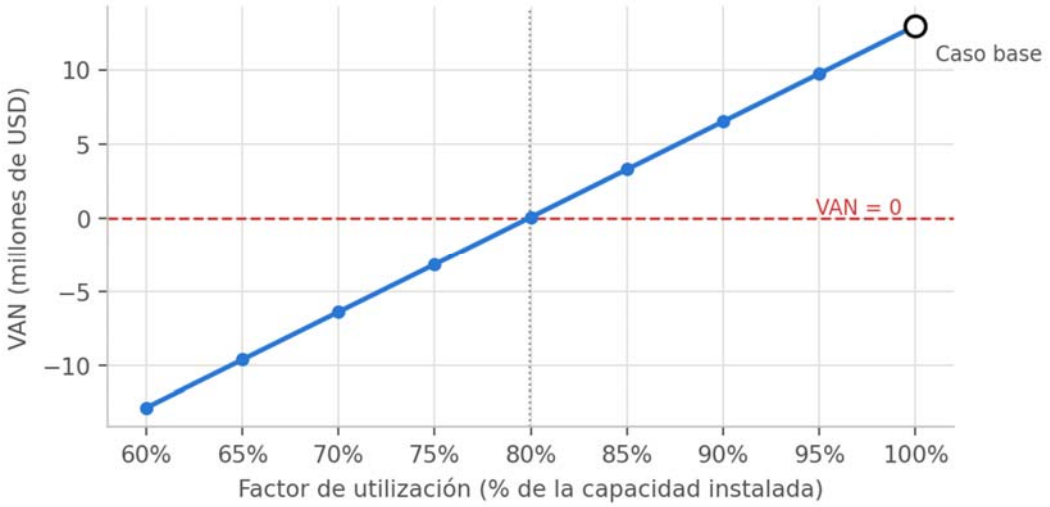



Fig. 14.11: VAN vs Factor de utilización

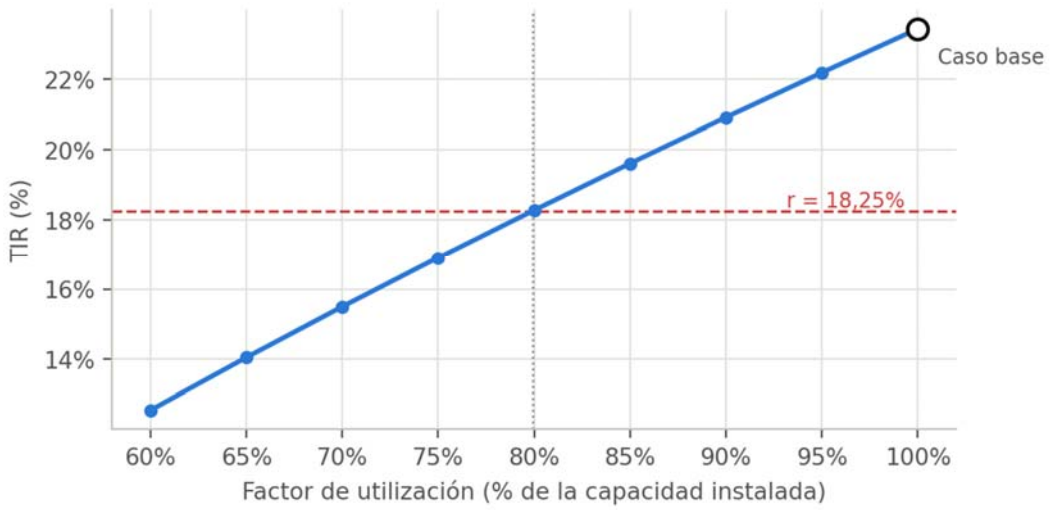



Fig. 14.12: TIR vs Factor de utilización

El factor de utilización crítico es del 79,9 %: el proyecto necesita operar en promedio a por lo menos el 80 % de su capacidad nominal para remunerar el capital invertido. Cada 5 % de pérdida de utilización reduce el VAN en aproximadamente 3,23 millones de USD. La elasticidad es de 4,98, la segunda más alta del análisis.

Conviene distinguir este resultado del punto de equilibrio contable del Capítulo XIII, situado en torno al 26 % de los ingresos de régimen. Ese punto indica el nivel de ventas que cubre los costos del ejercicio, incluidas las depreciaciones. El umbral del 80 % surge, en cambio, de exigir que el flujo de caja remunere además la inversión a la tasa del 18,25 %. La diferencia entre ambos refleja el peso del costo de oportunidad del capital en un proyecto intensivo en inversión.

La alta confiabilidad operativa es, por lo tanto, una condición de viabilidad. Contribuyen a asegurarla varias decisiones de diseño ya adoptadas: el desulfurador D-101 duplicado en configuración lead/standby, las columnas PSA AB-105 en paralelo, los tanques de almacenamiento TK-207 y TK-307 con 15 días de autonomía, y la parada programada anual en el mes de menor actividad portuaria.

### 14.3.7 Sensibilidad a la tasa de descuento

La tasa de descuento se construyó con el modelo CAPM más una prima de riesgo país:

$$r = R_f + \beta \cdot (R_m - R_f) + R_p = 5\ \% + 1{,}15 \times 5\ \% + 7{,}5\ \% = 18{,}25\ \%.$$

De sus componentes, el riesgo país ($R_p$) es el más volátil en el contexto argentino. La TIR no depende de la tasa de descuento, por lo que en este caso se analiza solo el VAN.

| Tasa de descuento r | VAN (USD) | Observación |
|---|---|---|
| 10,00 % | 42.026.587 | |
| 12,00 % | 33.325.158 | |
| 14,00 % | 25.809.617 | |
| 16,00 % | 19.292.215 | |
| 18,25 % | 12.962.225 | Caso base (CAPM) |
| 20,00 % | 8.661.663 | |
| 22,00 % | 4.315.564 | |
| 23,44 % | 1.518.117 | r = TIR (VAN ≈ 0) |
| 26,00 % | −2.881.229 | |
| 28,00 % | −5.867.214 | |

Tabla 14.9: Sensibilidad del VAN a la tasa de descuento

| Riesgo país Rp | Tasa r resultante | VAN (USD) |
|---|---|---|
| 400 p.b. | 14,75 % | 23.257.563 |
| 550 p.b. | 16,25 % | 18.539.722 |
| 750 p.b. | 18,25 % | 12.962.225 |
| 900 p.b. | 19,75 % | 9.245.899 |
| 1.100 p.b. | 21,75 % | 4.828.572 |
| 1.300 p.b. | 23,75 % | 944.372 |

Tabla 14.10: Sensibilidad del VAN al riesgo país (resto de los componentes del CAPM constantes).

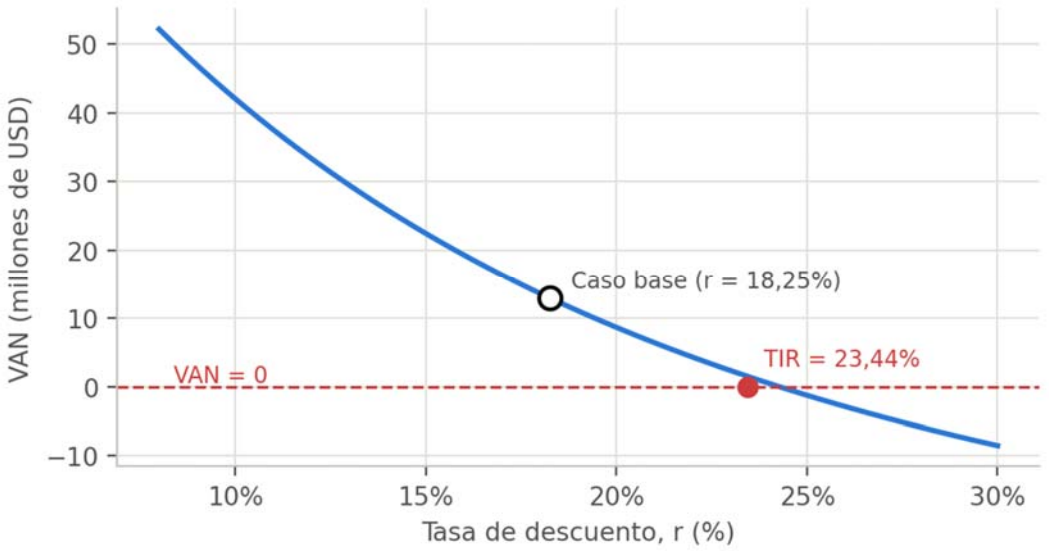



Fig. 14.13: VAN vs tasa de descuento

La curva VAN–r corta el eje en la TIR (23,44 %): el proyecto tolera un aumento de la tasa de descuento de hasta 5,19 puntos porcentuales. En términos de riesgo país, el VAN sigue siendo positivo con un Rp de hasta aproximadamente 1.269 puntos básicos, un nivel propio de episodios de crisis. Con un Rp de 400 puntos básicos, en cambio, el VAN asciende a 23,26 millones de USD. La elasticidad del VAN respecto de r es de −3,71, lo que la ubica entre las variables de mayor influencia.

Una parte importante del valor del proyecto depende, entonces, de la percepción de riesgo macroeconómico de Argentina. Los regímenes de estabilidad fiscal y cambiaria y el financiamiento con organismos multilaterales o agencias de crédito a la exportación pueden reducir el costo de capital efectivo.

### 14.3.8 Sensibilidad a otros costos operativos

Para completar el análisis se evaluaron las variables operativas de menor peso: el precio de la energía eléctrica (25 GWh/año), los costos fijos erogables (mano de obra fija y servicios fijos) y la mano de obra variable (cuatro cuadrillas rotativas).

| Variable y valor | Variación | VAN (USD) | TIR |
|---|---|---|---|
| Energía eléctrica: 0,05 USD/kWh | −44 % | 15.936.409 | 24,62 % |
| Energía eléctrica: 0,13 USD/kWh | +44 % | 9.988.042 | 22,25 % |
| Energía eléctrica: 0,18 USD/kWh | +100 % | 6.270.312 | 20,77 % |
| Costos fijos erogables | −20 % | 13.455.101 | 23,64 % |
| Costos fijos erogables | +50 % | 11.730.035 | 22,94 % |
| Costos fijos erogables | +100 % | 10.497.845 | 22,45 % |
| Mano de obra variable | −20 % | 13.435.049 | 23,63 % |
| Mano de obra variable | +50 % | 11.780.166 | 22,97 % |
| Mano de obra variable | +100 % | 10.598.106 | 22,49 % |

Tabla 14.11: Sensibilidad a otros costos operativos

Estas variables tienen una influencia baja. Duplicar los costos fijos o la mano de obra variable reduce el VAN apenas en alrededor de 2,4 millones de USD, y el VAN se anularía recién con un precio de la energía eléctrica de 0,264 USD/kWh (+194 %). Sus elasticidades son de −0,52, −0,19 y −0,18, respectivamente. En esta etapa no se justifica profundizar en ellas.

## 14.4 Valores críticos y márgenes de seguridad

La Tabla reúne, para cada variable, el valor que anula el VAN (equivalente a TIR = r) y el margen de seguridad, definido como la variación porcentual que la variable puede sufrir desde su valor base antes de que el proyecto deje de ser rentable. Cuanto menor es el margen, más crítica es la variable.

| Variable | Valor base | Valor crítico | Margen de seguridad | Criticidad |
|---|---|---|---|---|
| Precio del metanol | 320 USD/t | 264,0 USD/t | −17,5 % | Muy alta |
| Factor de utilización | 100 % | 79,9 % | −20,1 % | Alta |
| Inversión inicial | 63,6 MUSD | 81,2 MUSD | +27,7 % | Alta |
| Precio del ácido acético | 620 USD/t | 446,9 USD/t | −27,9 % | Media |
| Tasa de descuento | 18,25 % | 23,44 % | +5,19 p.p. | Media |
| Precio del gas natural | 3,80 USD/MMBTU | 5,20 USD/MMBTU | +36,7 % | Media |
| Costo del oxígeno | 60 USD/t | 118,4 USD/t | +97,3 % | Baja |
| Precio de la energía eléctrica | 0,09 USD/kWh | 0,264 USD/kWh | +194 % | Muy baja |

Tabla 14.12: Valores críticos y márgenes de seguridad de las variables del proyecto

Los márgenes de seguridad muestran un proyecto **moderadamente robusto** ante variaciones individuales. Ninguna variable anula el VAN con un desvío menor al 17 %. Sin embargo, tres variables tienen márgenes inferiores al 30 %: el precio del metanol (−17,5 %), el factor de utilización (−20,1 %) y la inversión (+27,7 %). Son desvíos que pueden ocurrir en la vida real de un proyecto petroquímico.

## 14.5 Jerarquización de variables: diagrama tornado y diagrama araña

El diagrama tornado compara el efecto de una variación de ±20 % en cada variable sobre el VAN, y ordena las variables de mayor a menor influencia. En el caso del factor de utilización se representa solo la disminución, porque no puede superar el 100 %.

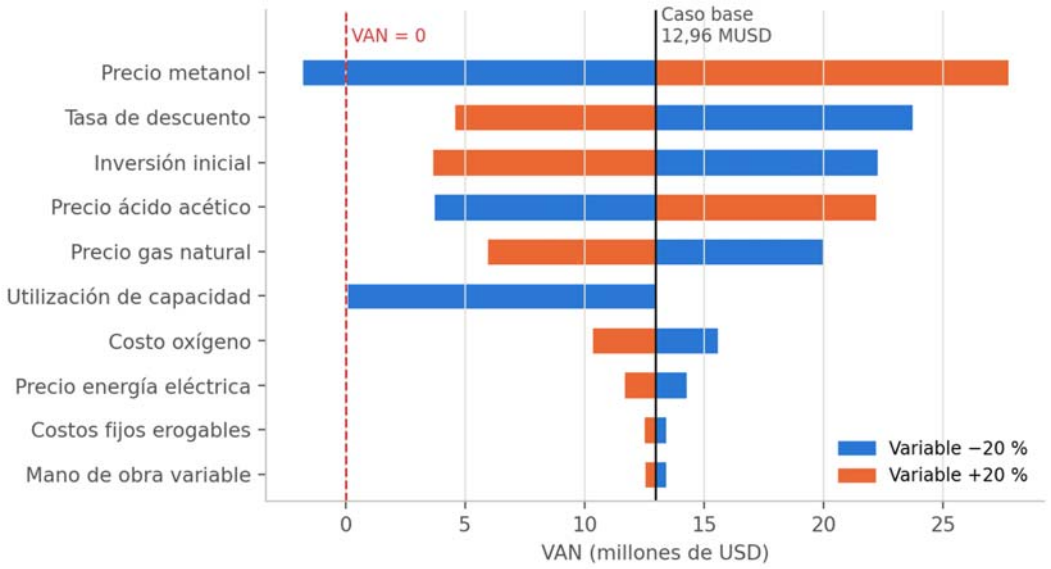



Fig. 14.14: Diagrama tornado: efecto de una variación de ±20 % sobre el VAN

| Variable | VAN con −20 % (MUSD) | VAN con +20 % (MUSD) | Rango (MUSD) | Elasticidad ε |
|---|---|---|---|---|
| Precio metanol | −1,84 | 27,77 | 29,61 | 5,71 |
| Tasa de descuento | 23,76 | 4,52 | 19,24 | −3,71 |
| Inversión inicial | 22,32 | 3,61 | 18,71 | −3,61 |
| Precio ácido acético | 3,68 | 22,25 | 18,57 | 3,58 |
| Precio gas natural | 20,02 | 5,91 | 14,11 | −2,72 |
| Utilización de capacidad | 0,05 | n/a (máx. 100 %) | 12,91 | 4,98 |
| Costo oxígeno | 15,63 | 10,30 | 5,33 | −1,03 |
| Precio energía eléctrica | 14,30 | 11,62 | 2,68 | −0,52 |
| Costos fijos erogables | 13,46 | 12,47 | 0,99 | −0,19 |
| Mano de obra variable | 13,44 | 12,49 | 0,95 | −0,18 |

Tabla 14.13: Resultados del análisis tornado y elasticidades del VAN

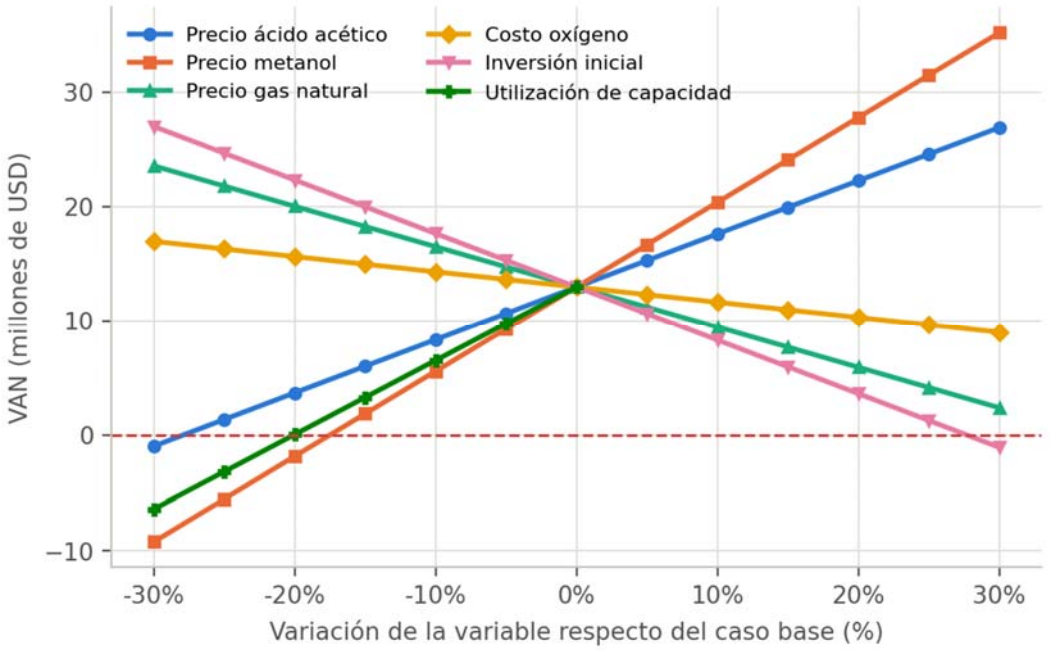



Fig. 14.15: Diagrama araña: VAN en función de la variación porcentual de cada variable

El diagrama araña muestra lo mismo desde otro ángulo: la pendiente de cada recta es proporcional a la elasticidad. Las variables se agrupan en tres niveles de influencia:

- Influencia alta (|ε| > 4): precio del metanol (5,71) y factor de utilización (4,98). Una caída del 20 % en cualquiera de ellas lleva el VAN a cero o a valores negativos.

- Influencia media (2 < |ε| < 4): tasa de descuento (−3,71), inversión inicial (−3,61), precio del ácido acético (3,58) y precio del gas natural (−2,72). Con un desvío desfavorable del 20 % el VAN sigue siendo positivo, pero se reduce a menos de la mitad.

- Influencia baja (|ε| < 1,1): costo del oxígeno, energía eléctrica, costos fijos y mano de obra variable.

La jerarquía coincide con la estructura económica descripta en la sección 14.2: las variables de mayor peso son las que definen el margen entre ingresos y materia prima, es decir, precios de productos, gas y volumen, junto con las que definen el capital a remunerar (inversión y tasa). La estructura de costos fijos es liviana y apenas influye en el resultado.

## 14.6 Estrategias de mitigación de los riesgos identificados

A partir de las variables críticas identificadas se proponen las siguientes medidas, que complementan la matriz de riesgos del Capítulo XII:

| Variable crítica | Riesgo | Medida de mitigación propuesta |
|---|---|---|
| Precio del metanol | Caída del precio en la fase baja del ciclo | Contratos de venta de mediano plazo con compradores brasileños con fórmulas de precio indexadas; priorizar el consumo cautivo; evaluar a futuro ampliar la producción de ácido acético para reducir el excedente expuesto al mercado spot. |
| Precio del gas natural | Encarecimiento local (transporte, regulación, invierno) | Contrato de suministro en firme a largo plazo con productores de Vaca Muerta; fórmula de precio indexada al metanol (netback); capacidad de transporte firme hasta el PIBB. |
| Factor de utilización | Paradas no programadas, desactivación de catalizadores | Mantenimiento predictivo; equipos críticos duplicados (D-101, AB-105); stock de catalizador de reposición; programa de confiabilidad (RCM) desde la puesta en marcha. |
| | | |

| | | |
|---|---|---|
| Inversión inicial | Sobrecosto de construcción | Refinar la estimación a clase 3 con cotizaciones firmes; contrato EPC a suma alzada con garantías de desempeño; contingencia explícita del 10–15 %. |
| Tasa de descuento | Aumento del riesgo país | Financiamiento parcial con organismos multilaterales o agencias de crédito a la exportación; ingresos dolarizados por exportación; regímenes de estabilidad fiscal y cambiaria. |
| Oxígeno y energía | Indexación tarifaria | Contrato BOO de 15–20 años con precio fijo o indexación acotada; cogeneración con el vapor de alta presión recuperado en E-103. |

Tabla 14.14: Estrategias de mitigación de los riesgos económicos identificados

## 14.7 Conclusiones del análisis de sensibilidad

1. En el caso base el proyecto es económicamente rentable: VAN de 12,96 millones de USD, TIR del 23,44 % frente a una tasa de descuento del 18,25 % (spread de 5,19 p.p.) y período de recuperación de 3,9 años.

2. La variable más crítica es el precio de venta del metanol (elasticidad 5,71; margen de seguridad −17,5 %). El metanol aporta el 61,3 % de los ingresos. El proyecto funciona, en términos económicos, como un productor de metanol con valorización parcial a ácido acético, y hereda la volatilidad de ese commodity.

3. El factor de utilización (umbral 79,9 %) y la inversión inicial (sobrecosto máximo admisible +27,7 %) completan el grupo de variables críticas. La confiabilidad operativa y el control del presupuesto de obra son condiciones de viabilidad.

4. El precio del ácido acético tiene un margen de seguridad amplio (−27,9 %). La integración vertical protege al producto principal: el metanol que consume se valoriza a su costo de producción y no al precio de mercado.

5. El gas natural admite un precio de hasta 5,20 USD/MMBTU (+36,7 %). Como el precio internacional del metanol tiende a acompañar al del gas, un contrato de gas indexado al precio del producto estabilizaría el margen del proyecto.

6. El oxígeno, la energía eléctrica, los costos fijos y la mano de obra tienen una influencia baja sobre la rentabilidad.

7. En conjunto, el proyecto es viable con un riesgo moderado: ninguna variable anula el VAN con desvíos menores al 17 %, y los riesgos identificados pueden gestionarse con las medidas contractuales y de ingeniería propuestas en la sección 14.6.

# CONCLUSIONES DEL PROYECTO.

El presente Proyecto Integrador evaluó, a nivel de prefactibilidad, la instalación de una planta industrial de ácido acético grado polimérico a partir de metano, con metanol como producto intermedio y comercial. Los resultados de los catorce capítulos permiten formular las siguientes conclusiones.

**Mercado**: El proyecto responde a una necesidad concreta del mercado regional. Argentina no produce ácido acético desde 2017 y abastece la totalidad de su consumo con importaciones. Brasil, principal destino del proyecto, importa entre 140.000 y 177.000 t/año de ácido acético y más de 1,3 millones de t/año de metanol. No existen productores de ácido acético en el Mercosur, por lo que la planta sería el único productor regional, con una ventaja logística y arancelaria frente a los proveedores extra regionales.

**Materia prima y localización:** La disponibilidad de gas natural de la Cuenca Neuquina (Vaca Muerta) es la ventaja competitiva de base del proyecto. La macrolocalización en Bahía Blanca, elegida por el método de ponderación de factores, y la microlocalización en el Parque Industrial Bahía Blanca, confirmada por el método de Brown-Gibson, combinan acceso a gasoductos troncales, infraestructura portuaria de aguas profundas para la exportación, un polo petroquímico consolidado con servicios y personal calificado, y un predio de 25,7 ha con amplia reserva para ampliaciones.

**Tamaño y tecnología**: La capacidad de 100.000 t/año de metanol, definida por la escala mínima técnico-económica del tren de gas de síntesis, y de 27.500 t/año de ácido acético, definida por la demanda objetivo, resulta coherente con el mercado y con las restricciones técnicas. La secuencia tecnológica adoptada está probada a escala industrial: reformado autotérmico con oxígeno, separación de CO por PSA, síntesis de metanol en reactor tubular isotérmico tipo Lurgi y carbonilación homogénea con catalizador de iridio/rutenio (tipo Cativa). Su integración energética, con la generación de vapor de alta y media presión en los economizadores E-103 y E-202, reduce el consumo de servicios. El dimensionamiento de detalle de todos los equipos de las tres zonas del proceso demostró la factibilidad técnica del diseño.

**Aspectos ambientales, legales y de seguridad**: El proyecto es compatible con el marco normativo aplicable, que incluye la Ley 11.459 de radicación industrial, la Ley 12.530 y el control del Comité Técnico Ejecutivo del polo petroquímico de Bahía Blanca. Los impactos ambientales y los riesgos de proceso asociados al manejo de CO, $H_2$, oxígeno puro, metanol y yoduro de metilo son significativos, pero pueden gestionarse con las medidas de ingeniería, de control y de gestión identificadas en los Capítulos VIII y XII.

**Evaluación económica:** Con una inversión total de 63,6 millones de USD, el proyecto genera un VAN de 12,96 millones de USD y una TIR del 23,44 %, superior a la tasa de descuento del 18,25 % que incorpora el riesgo país argentino. La inversión se recupera en 3,9 años. El análisis de sensibilidad muestra que la rentabilidad es robusta frente a variaciones individuales de las variables operativas y del precio del ácido acético. En cambio, es sensible al precio internacional del metanol, a la confiabilidad operativa y al control de la inversión.

**Dictamen:** Se concluye que el proyecto es técnica, legal y ambientalmente factible, y económicamente rentable en las condiciones de mercado actuales, con un nivel de riesgo moderado y gestionable. Se recomienda avanzar a la etapa de factibilidad, sujeta al cumplimiento de las siguientes condiciones:

1. Asegurar un contrato de suministro de gas natural en firme, a largo plazo, con un precio efectivo en planta inferior a 4,5 USD/MMBTU o indexado al precio del metanol.

2. Refinar la estimación de la inversión hasta una clase 3, con cotizaciones firmes de los equipos principales, y contratar la construcción bajo una modalidad que limite los sobrecostos.

3. Formalizar contratos de venta de mediano plazo para el metanol excedente y el ácido acético con clientes del mercado brasileño.

4. Implementar desde el diseño un programa de confiabilidad que asegure una utilización media superior al 90 %.

Como perspectiva estratégica, los resultados indican que el mayor valor del proyecto está en la transformación del metanol en ácido acético. Cada tonelada de metanol destinada a carbonilación se convierte en producto de mayor valor: 1 t de ácido acético (620 USD) requiere 0,56 t de metanol (≈ 179 USD a precio de mercado). Además, el ácido acético tiene un margen de seguridad de precio (−27,9 %) más amplio que el del metanol (−17,5 %). Una segunda etapa de ampliación de la capacidad de ácido acético reduciría la exposición del proyecto a la volatilidad del metanol y aumentaría su rentabilidad. La reserva de terreno del predio en el PIBB y el escenario optimista de demanda brasileña del Capítulo IV, en el que la demanda objetivo supera la capacidad instalada desde 2027, respaldan esta ampliación.

# BIBLIOGRAFIA

**Libros, artículos y documentos técnicos**


Asfahl, C. R., & Rieske, D. W. (2010). *Industrial safety and health management* (6.ª ed.). Pearson Prentice Hall.

Baca Urbina, G. (2013). *Evaluación de proyectos* (7.ª ed.). McGraw-Hill.

Brown, P. A., & Gibson, D. F. (1972). A quantified model for facility site selection: Application to a multiplant location problem. *AIIE Transactions, 4*(1), 1–10.

Crowl, D. A., & Louvar, J. F. (2019). *Chemical process safety: Fundamentals with applications* (4.ª ed.). Pearson.

Gas Processors Suppliers Association. (2012). *GPSA engineering data book* (13.ª ed.). GPSA.

Janicak, C. A. (2015). *Safety metrics: Tools and techniques for measuring safety performance* (3.ª ed.). Bernan Press.

Jones, J. H. (2000). The Cativa™ process for the manufacture of acetic acid. *Platinum Metals Review, 44*(3), 94–105.

Lang, H. J. (1948). Simplified approach to preliminary cost estimates. *Chemical Engineering, 55*(6), 112–113.

Leopold, L. B., Clarke, F. E., Hanshaw, B. B., & Balsley, J. R. (1971). *A procedure for evaluating environmental impact* (Geological Survey Circular 645). U.S. Geological Survey.

Peters, M. S., Timmerhaus, K. D., & West, R. E. (2003). *Plant design and economics for chemical engineers* (5.ª ed.). McGraw-Hill.

Pratama, F. W., Fadhlan, Z., Purnamadjati, T. A., & Adjie, W. S. (2025). Optimization and modification of the hydrogen peroxide to propylene oxide (HPPO) process. *Journal of Chemical Engineering Research Progress, 2*(2), 205–209. https://doi.org/10.9767/jcerp.20419

Sapag Chain, N., Sapag Chain, R., & Sapag Puelma, J. M. (2014). *Preparación y evaluación de proyectos* (6.ª ed.). McGraw-Hill.

Turton, R., Shaeiwitz, J. A., Bhattacharyya, D., & Whiting, W. B. (2018). *Analysis, synthesis, and design of chemical processes* (5.ª ed.). Prentice Hall.

**Patentes**

Mueller-Hagedorn, M., Bartels, K., & Judas, F. (2017). *Process and reactor for producing synthesis gas* (Patente de EE. UU. N.º 9.561.483 B2). Air Liquide Global E&C Solutions Germany GmbH (Lurgi); L'Air Liquide S.A.

Williams, B. L. (2000). *Iridium-catalyzed carbonylation process for the production of acetic acid* (Patente de EE. UU. N.º 6.140.535). BP Chemicals Limited.

**Normas técnicas**

American Petroleum Institute. *API RP 500: Recommended practice for classification of locations for electrical installations at petroleum facilities classified as Class I, Division 1 and Division 2*. API.

American Petroleum Institute. *API Std 2000: Venting atmospheric and low-pressure storage tanks*. API.

American Petroleum Institute. *API Std 521: Pressure-relieving and depressuring systems*. API.

American Petroleum Institute. *API Std 610: Centrifugal pumps for petroleum, petrochemical and natural gas industries*. API.

American Petroleum Institute. *API Std 650: Welded tanks for oil storage*. API.

American Petroleum Institute. *API Std 653: Tank inspection, repair, alteration, and reconstruction*. API.

American Society of Mechanical Engineers. *ASME B31.3: Process piping*. ASME.

American Society of Mechanical Engineers. *ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section II, Part A: Ferrous material specifications (SA-213, SA-516)*. ASME.

American Society of Mechanical Engineers. *ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 1: Rules for construction of pressure vessels*. ASME.

ASTM International. *ASTM D1072: Standard test method for total sulfur in fuel gases*. ASTM International.

ASTM International. *ASTM D1152: Standard specification for methanol (methyl alcohol)*. ASTM International.

ASTM International. *ASTM D1364: Standard test method for water in volatile solvents (Karl Fischer reagent titration method)*. ASTM International.

ASTM International. *ASTM D1945: Standard test method for analysis of natural gas by gas chromatography*. ASTM International.

ASTM International. *ASTM D3546: Standard test method for formic acid in glacial acetic acid*. ASTM International.

ASTM International. *ASTM D3620: Standard specification for glacial acetic acid*. ASTM International.

ASTM International. *ASTM D4052: Standard test method for density, relative density, and API gravity of liquids by digital density meter*. ASTM International.

ASTM International. *ASTM E203: Standard test method for water using volumetric Karl Fischer titration*. ASTM International.

Instituto Argentino de Normalización y Certificación. *IRAM 10005: Colores y señales de seguridad* (Partes I y II). IRAM.

Instituto Argentino de Normalización y Certificación. *IRAM 10015* [equipos de protección respiratoria]. IRAM.

Instituto Argentino de Normalización y Certificación. *IRAM 10629* [almacenamiento de líquidos inflamables y combustibles]. IRAM.

Instituto Argentino de Normalización y Certificación. *IRAM 21322* [determinación de pureza por cromatografía de gases]. IRAM.

Instituto Argentino de Normalización y Certificación. *IRAM 2507: Sistema de identificación de cañerías*. IRAM.

Instituto Argentino de Normalización y Certificación. *IRAM 2526* [recipientes a presión]. IRAM.

Instituto Argentino de Normalización y Certificación. *IRAM 3517: Extintores (matafuegos) manuales y sobre ruedas. Dotación, control, mantenimiento y recarga*. IRAM.

National Fire Protection Association. *NFPA 11: Standard for low-, medium-, and high-expansion foam*. NFPA.

National Fire Protection Association. *NFPA 30: Flammable and combustible liquids code*. NFPA.

Organización Internacional de Normalización. (2015a). *ISO 9001:2015. Sistemas de gestión de la calidad — Requisitos*. ISO.

Organización Internacional de Normalización. (2015b). *ISO 14001:2015. Sistemas de gestión ambiental — Requisitos con orientación para su uso*. ISO.

Organización Internacional de Normalización. (2018). *ISO 45001:2018. Sistemas de gestión de la seguridad y salud en el trabajo — Requisitos con orientación para su uso*. ISO.

Tubular Exchanger Manufacturers Association. *Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association* (TEMA). TEMA.

**Legislación nacional**

Decreto N.º 351/79. (1979). Reglamentario de la Ley N.º 19.587 de Higiene y Seguridad en el Trabajo. Boletín Oficial de la República Argentina, 22 de mayo de 1979.

Decreto N.º 831/93. (1993). Reglamentario de la Ley N.º 24.051 de Residuos Peligrosos. Boletín Oficial de la República Argentina.

Ley N.º 11.544. (1929). Jornada de trabajo. Boletín Oficial de la República Argentina.

Ley N.º 19.550. (1972). Ley General de Sociedades (t.o. 1984 y modificatorias). Boletín Oficial de la República Argentina.

Ley N.º 19.587. (1972). Higiene y Seguridad en el Trabajo. Boletín Oficial de la República Argentina, 21 de abril de 1972.

Ley N.º 20.284. (1973). Preservación de los recursos del aire. Boletín Oficial de la República Argentina.

Ley N.º 20.744. (1974). Ley de Contrato de Trabajo (t.o. 1976 y modificatorias). Boletín Oficial de la República Argentina.

Ley N.º 23.551. (1988). Asociaciones Sindicales. Boletín Oficial de la República Argentina.

Ley N.º 24.051. (1991). Residuos Peligrosos. Boletín Oficial de la República Argentina.

Ley N.º 24.557. (1995). Riesgos del Trabajo. Boletín Oficial de la República Argentina.

Ley N.º 25.612. (2002). Gestión integral de residuos industriales y de actividades de servicios. Boletín Oficial de la República Argentina.

Ley N.º 25.675. (2002). Ley General del Ambiente. Boletín Oficial de la República Argentina.

Ley N.º 25.688. (2002). Régimen de Gestión Ambiental de Aguas. Boletín Oficial de la República Argentina.

Ley N.º 26.331. (2007). Presupuestos mínimos de protección ambiental de los bosques nativos. Boletín Oficial de la República Argentina.

Ley N.º 27.630. (2021). Impuesto a las Ganancias: modificación de alícuotas para sociedades. Boletín Oficial de la República Argentina.

Ley N.º 27.743. (2024). Medidas fiscales paliativas y relevantes. Boletín Oficial de la República Argentina.

Convenio Colectivo de Trabajo N.º 564/09. Federación Argentina de Trabajadores de Industrias Químicas y Petroquímicas (FATIQYP) – Cámara de la Industria Química y Petroquímica (CIQyP).

Superintendencia de Riesgos del Trabajo. (2011). Resolución SRT N.º 299/2011: Reglamentación sobre la provisión de elementos de protección personal.

**Legislación de la Provincia de Buenos Aires**

Decreto N.º 89/2022. (2022). Estructura orgánico-funcional del Ministerio de Ambiente de la Provincia de Buenos Aires.

Decreto N.º 1741/96. (1996). Reglamentario de la Ley N.º 11.459 de Radicación Industrial.

Decreto N.º 3395/96. (1996). Reglamentario de la Ley N.º 5.965 en materia de efluentes gaseosos.

Decreto N.º 806/97. (1997). Reglamentario de la Ley N.º 11.720 de Residuos Especiales.

Ley N.º 5.965. (1958). Protección a las fuentes de provisión y a los cursos y cuerpos receptores de agua y a la atmósfera.

Ley N.º 11.459. (1993). Radicación Industrial.

Ley N.º 11.720. (1995). Residuos Especiales.

Ley N.º 11.723. (1995). Ley Integral del Medio Ambiente y los Recursos Naturales.

Ley N.º 12.101. (1998). Reserva Natural de Uso Múltiple Bahía Blanca, Bahía Falsa y Bahía Verde.

Ley N.º 12.257. (1998). Código de Aguas de la Provincia de Buenos Aires.

Ley N.º 12.530. (2000). Programa Especial para la Preservación y Optimización de la Calidad Ambiental (Polo Petroquímico y área portuaria de Bahía Blanca).

Ley N.º 15.309. (2021). Modificación de la Ley de Ministerios de la Provincia de Buenos Aires.

Ley Impositiva de la Provincia de Buenos Aires. (2026). Ejercicio fiscal 2026.

Organismo Provincial para el Desarrollo Sostenible. (2010). Resolución OPDS N.º 43/2010 y complementarias.

**Normativa municipal (Bahía Blanca)**

Municipalidad de Bahía Blanca. (1990). Ordenanza N.º 5691/1990. Código de Planeamiento Urbano del Partido de Bahía Blanca (modificada por Ordenanza N.º 6072 y convalidada por Decreto provincial N.º 2353/1991).

Municipalidad de Bahía Blanca. (2026). Ordenanza Fiscal y Ordenanza Impositiva vigentes.

**Bases de datos, informes y fuentes de mercado**

Agencia de Recaudación de la Provincia de Buenos Aires (ARBA) y Agencia de Recaudación y Control Aduanero (ARCA). (2026). Información sobre tributos, inscripciones y trámites. https://www.arba.gov.ar/; https://www.arca.gob.ar/

Celanese Corporation. (2026). Anuncios de precios de ácido acético [Comunicados comerciales].

Damodaran, A. (2026, enero). *Betas by sector* y *Country default spreads and risk premiums* [Conjuntos de datos]. NYU Stern School of Business. https://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/

Google. (s.f.). *Google Maps* [Imágenes satelitales y cartografía de Bahía Blanca]. https://www.google.com/maps

ICIS. (2026). *Methanol prices, markets & analysis*. ICIS.

IMARC Group. (2026, septiembre). *Acetic acid prices, trend, index and forecast*. IMARC Group.

Instituto de Investigaciones Económicas y Sociales del Sur (IIESS, UNS-CONICET). (2025). *Informe de Educación en Bahía Blanca 2025*. Universidad Nacional del Sur.

Instituto Petroquímico Argentino. (2025). *Información estadística de la industria petroquímica y química de la Argentina* (Anuario IPA 2025). IPA.

Linstrom, P. J., & Mallard, W. G. (Eds.). (s.f.). *NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference Database Number 69*. National Institute of Standards and Technology. https://webbook.nist.gov/chemistry/

Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. (s.f.). *Comex Stat* [Base de datos de comercio exterior de Brasil]. https://comexstat.mdic.gov.br/

Municipalidad de Bahía Blanca; Producción Bahía. (s.f.). *Parque Industrial de Bahía Blanca*. https://www.bahia.gob.ar/

National Institute for Occupational Safety and Health. (2026). *Hierarchy of controls*. Centers for Disease Control and Prevention. https://www.cdc.gov/niosh/

OneMake. (2026, junio). *Costo de construcción por m² en Argentina*.

Servicio Meteorológico Nacional. (s.f.). *Estadísticas climatológicas: estación Bahía Blanca*. https://www.smn.gob.ar/

SunSirs. (2026). *Methanol price*. SunSirs China Commodity Data Group.

U.S. Department of Labor, Occupational Safety and Health Administration. (2026). *Injury and illness recordkeeping: incidence rates*. https://www.osha.gov/

Umicore Precious Metals Management. (2026, 15 de septiembre). *Precious metals prices: Iridium*. Umicore.

**Información técnica de fabricantes y licenciantes**

Air Liquide Global E&C Solutions. (s.f.). Tecnología Lurgi de síntesis de metanol [Información de licencia].

Alfa Laval. (s.f.). Intercambiadores de calor [Información técnica y comercial].

BP Chemicals. (s.f.). *Cativa™ process* [Información de licencia].

Caloric Anlagenbau GmbH; HONREL. (s.f.). Desulfuración y catalizadores de ZnO [Información técnica y comercial].

CST Industries. (s.f.). Tanques de almacenamiento [Información técnica y comercial].

De Dietrich Process Systems. (s.f.). Equipos de separación para servicio corrosivo [Información técnica y comercial].

Haldor Topsoe. (s.f.). *SynCOR™: reformado autotérmico* [Información técnica].

Indeck Power Equipment. (s.f.). Calderas de recuperación de calor [Información técnica y comercial].

Linde Engineering. (s.f.). Unidades de adsorción por oscilación de presión (PSA/VPSA) [Información técnica].

SchuF Group; Koch-Otto York. (s.f.). Recipientes separadores y eliminadores de niebla [Información técnica y comercial].

Siemens Energy. (s.f.). Compresores de proceso [Información técnica y comercial].

Sulzer Chemtech. (s.f.). Columnas de separación, platos y empaques [Información técnica y comercial].