



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA QUÍMICA  
E INDUSTRIAS EXTRACTIVAS



Maestría en  
Ingeniería de Hidrocarburos  
y sus Energéticos Asociados

---

---

***Desarrollo de un modelo matemático  
para la optimización de los beneficios económicos  
de los procesos de etileno***

Por:

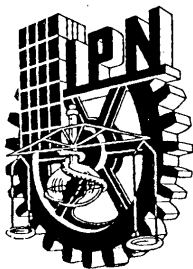
Nad Ja Ali Shantal Zavala Salazar

Asesores:

Dr. Edgar Ramírez Jiménez

M. en A. José James Mena de la Rosa

Ciudad de México, febrero de 2021.



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**CARTA CESION DE DERECHOS**

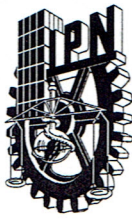
En la Ciudad de México el día -25- del mes enero del año 2021, la que suscribe C. Nad Ja Ali Shantal Zavala Salazar alumna del Programa de Maestría en Ingeniería de Hidrocarburos y sus Energéticos Asociados con número de registro A181053, adscrita a la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del M. en A. José James Mena de la Rosa y el Dr. Edgar Ramírez Jiménez, cede los derechos del trabajo intitulado “Desarrollo de un modelo matemático para la optimización de los beneficios económicos de los procesos de etileno“, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección Unidad Profesional Adolfo López Mateos, s/n ESIQIE, Edif. 8 3er. Piso SEPI, Col. San Pedro Zacatenco, Alcaldía Gustavo A. Madero C.P. 07738, Tel. (55)57 29 60 00, Ext. 55113/55124 y al Correo Electrónico: [nad.ja.zavala@pemex.com](mailto:nad.ja.zavala@pemex.com). Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Nad Ja Ali Shantal Zavala Salazar

---

Nombre y firma



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

## SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

### ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México siendo las 12:00 horas del día 22 del mes de enero del 2021 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Posgrado de: E.S.I.Q.I.E. para examinar la tesis titulada:

"Desarrollo de un modelo matemático para la optimización de los beneficios económicos de los procesos de etileno"

del (la) alumno (a):

Apellido Paterno:	ZAVALA	Apellido Materno:	SALAZAR	Nombre (s):	NAD JA ALI SHANTAL
-------------------	--------	-------------------	---------	-------------	--------------------

Número de registro: A 1 8 1 0 5 3

Aspirante del Programa Académico de Posgrado: Maestría en ingeniería en Hidrocarburos y sus Energéticos Asociados

Una vez que se realizó un análisis de similitud de texto, utilizando el software antiplagio, se encontró que el trabajo de tesis tiene 6 % de similitud. **Se adjunta reporte de software utilizado.**

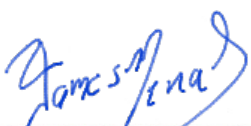
Después que esta Comisión revisó exhaustivamente el contenido, estructura, intención y ubicación de los textos de la tesis identificados como coincidentes con otros documentos, concluyó que en el presente trabajo **SI**  **NO**  **SE CONSTITUYE UN POSIBLE PLAGIO.**


**JUSTIFICACIÓN DE LA CONCLUSIÓN:** *[Por ejemplo, el % de similitud se localiza en metodologías adecuadamente referidas a fuente original]*  
La coincidencias encontradas se consideran mínimas y de referencia común en textos

**\*\*Es responsabilidad del alumno como autor de la tesis la verificación antiplagio, y del Director o Directores de tesis el análisis del % de similitud para establecer el riesgo o la existencia de un posible plagio.**

Finalmente y posterior a la lectura, revisión individual, así como el análisis e intercambio de opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR**  **SUSPENDER**  **NO APROBAR**  la tesis por **UNANIMIDAD**  o **MAYORÍA**  en virtud de los motivos siguientes:  
Con atención a las observaciones realizadas en la revisión

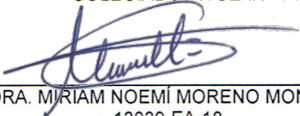
### COMISIÓN REVISORA DE TESIS

  
M. en A. JOSÉ JAMES MENA DE LA ROSA  
DIRECTOR DE TESIS  
(EXTERNO - PEMEX)

  
DR. EDGAR RAMÍREZ JIMÉNEZ  
2º DIRECTOR DE TESIS  
13074-EA-18  
COLEGIADO TITULAR

  
DR. DAIMLER NEFTALI JUSTO GARCÍA  
13042-EA-18  
COLEGIADO TITULAR

  
DR. JOSÉ ANTONIO DOMINGO MUÑOZ  
MOYA  
(EXTERNO - IMP)

  
DRA. MIRIAM NOEMÍ MORENO MONTIEL  
13039-EA-18  
COLEGIADO TITULAR

  
DRA. GUADALUPE SILVA  
PRESIDENTA DEL COLEGIO DE PROFESORES



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA  
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA QUÍMICA  
DIRECCIÓN

# Índice General

<b>Índice General</b>	<b>2</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>5</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>9</b>
<b>Resumen</b>	<b>11</b>
<b>Abstract</b>	<b>12</b>
<b>Introducción</b>	<b>13</b>
Objetivo general	14
Objetivos específicos	14
<b>Capítulo I. Marco teórico de los procesos de desintegración para la obtención de etileno</b>	<b>15</b>
<i>1.1. Infraestructura de los procesos de etileno en Petróleos Mexicanos</i>	<i>16</i>
<i>1.2. Descripción de los diferentes procesos para la obtención de los productos petroquímicos en los Complejos La Cangrejera y Morelos</i>	<i>18</i>
Proceso en la planta de Etileno	18
Proceso en la planta de Polietileno de Baja Densidad (PEBD)	20
Proceso en la planta de Polietileno de Alta Densidad (PEAD)	22
Proceso en la planta de Polietileno Lineal de Baja Densidad	23
Proceso en la planta de Óxido de Etileno y Glicoles Etilénicos	25
Servicios Principales	27
Planta de Generación de Vapor	27
Planta de Generación Eléctrica	27
Planta para el Tratamiento de Efluentes	28
Planta de Tratamiento de Aguas	28
<b>Capítulo II. Marco metodológico para el desarrollo del Modelo de Optimización de los procesos de Etileno (MOETI)</b>	<b>29</b>
<i>II.1. Desarrollo del Modelo Matemático</i>	<i>29</i>
Balances de materia y Matrices de rendimientos, Complejo Petroquímico La Cangrejera (CQ)	31
Planta de Etileno (ETL-q1)	32
Plantas de Oxígeno (OX1-q6 y OX2-q7)	34
Planta de Oxígeno - Tren 1 (OX1-q6)	34
Planta de Oxígeno - Tren 2 (OX2-q7)	34
<i>Planta de Óxido de Etileno (OXE-q2)</i>	<i>35</i>
Plantas de Polietileno de Baja Densidad (PB1-q3, PB2-q4 y PB3-q5)	37
Planta de Polietileno de Baja Densidad (PB1-q3)	37
Planta de formulación y aditivación (PF1-qe)	38
Planta de Polietileno de Baja Densidad (PB2-q4)	40
Planta de formulación y aditivación (PF2-qf)	41
Planta de Polietileno de Baja Densidad (PB3-q5)	43
Planta de formulación y aditivación (PF3-qg)	44
Balances de materia y Matrices de rendimientos, Complejo Petroquímico Morelos (QM)	46



Planta de Etileno (ETL-r1)	47
Planta de Oxígeno (OX1-r9)	50
Plantas de Óxido de Etileno (OXE-r2 y OXE-rh)	51
Planta de Óxido de Etileno (OXE-r2)	52
Planta de Óxido de Etileno (OXE-rh)	53
Planta de Glicoles (GCL-r3)	55
Planta de Polietileno Lineal de Baja Densidad (PLB-r4)	57
Área de formulación y aditivación del PELBD	58
Plantas de Polietileno de Alta Densidad (PAA-r5, PAB-r6, PMA-r7 y PMB-r8)	63
Planta de Polietileno de Alta Densidad, proceso Asahi (PAA-r5)	63
Área de formulación y aditivación del PEAD (PAA-r5)	65
Planta de Polietileno de Alta Densidad, proceso Asahi (PAB-r6)	67
Área de formulación y aditivación del PEAD (PAB-r6)	68
<i>Balance de materia del Proceso de Polietileno de Alta Densidad, Proceso Mitsui</i>	70
Planta de Polietileno de Alta Densidad, proceso Mitsui (PMA-r7)	71
Área de formulación y aditivación del PEAD (PMA-r7)	72
Planta de Polietileno de Alta Densidad, proceso Mitsui (PMB-r8)	74
Área de formulación y aditivación del PEAD (PMB-r8)	75
<i>Servicios Principales</i>	77
<i>II.2. Formulación del Modelo</i>	81
Variables de decisión	81
Restricciones del Modelo	81
Función Objetivo	82
<i>II.3. Método de solución</i>	82
<b>Capítulo III. Implementación del MOETI y análisis de resultados</b>	<b>85</b>
<i>III.1. Validación del Modelo</i>	85
Escenarios de sensibilidad en los procesos de etileno	87
<i>III.2. Evaluación consumo de etano importado en los procesos de etileno (ETI)</i>	88
<i>III.3. Evaluación en la distribución del etano nacional entre los procesos de etileno (ETI) y Braskem Idesa (BI)</i>	93
<i>III.4. Punto de equilibrio entre los casos 1 y 2</i>	97
<b>Conclusiones</b>	<b>101</b>
<b>Referencias bibliográficas</b>	<b>103</b>
<b>Nomenclatura</b>	<b>105</b>
Corrientes de entrada	105
CPQ Cangrejera (QC)	105
CPQ Morelos (QM)	108
Plantas de operación	113
Equipos	113
<b>Abreviaturas</b>	<b>115</b>

<b>Factores de conversión utilizados</b>	<b>115</b>
<b>Peso específico de productos seleccionados</b>	<b>115</b>
<b>Anexo 1. Diagrama de bloques general de los procesos considerados en MOETI</b>	<b>116</b>
<b>Anexo 2. Balances de materia de los procesos de etileno en el complejo La Cangrejera</b>	<b>118</b>
<b>Anexo 3. Balances de materia de los procesos de etileno en el complejo Morelos</b>	<b>123</b>
<b>Anexo 4. Flujos máximos y mínimos empleados en el desarrollo del caso base</b>	<b>127</b>

## Índice de Figuras

<b>Figura 1.</b> Módulos funcionales de una planta de etileno. Fuente: Proyecto IMP (2003). Licenciador Lummus, Ingeniería de diseño: Instituto Mexicano del Petróleo.	19
<b>Figura 2.</b> Diagrama de bloques con las entradas y salidas de la planta de etileno en el complejo petroquímico La Cangrejera.	20
<b>Figura 3.</b> Diagrama de bloques con las entradas y salidas de la planta de etileno en el complejo petroquímico Morelos.	20
<b>Figura 4.</b> Módulos funcionales de una planta de polietileno de baja densidad. Fuente: Descripción de Procesos, Petróleos Mexicanos (2020). Licenciador Imperial, Ingeniería básica y de detalle: SIM-CHEM (Union Carves LTD).	21
<b>Figura 5.</b> Diagrama de bloques con las entradas y salidas de la planta de polietileno de baja densidad en el complejo petroquímico La Cangrejera.	21
<b>Figura 6.</b> Módulos funcionales de una planta de polietileno de alta densidad. Fuente: Descripción de Procesos, Petróleos Mexicanos (2020). Licenciador Asahi Chemical y Mitsui Petrochemical.	22
<b>Figura 7.</b> Diagrama de bloques con las entradas y salidas del proceso de polietileno de alta densidad, proceso Asahi, en el complejo petroquímico Morelos.	23
<b>Figura 8.</b> Diagrama de bloques con las entradas y salidas del proceso de polietileno de alta densidad, proceso Mitsui, en el complejo petroquímico Morelos.	23
<b>Figura 9.</b> Módulos funcionales de una planta de polietileno lineal de baja densidad. Fuente: Descripción de Procesos, Petróleos Mexicanos (2020). Licenciador Univation.	24
<b>Figura 10.</b> Diagrama de bloques con las entradas y salidas del proceso de polietileno lineal de baja densidad, proceso Swing, en el complejo petroquímico Morelos.	24
<b>Figura 11.</b> Módulos funcionales de una planta de óxido de etileno en el complejo petroquímico Cangrejera. Fuente: Descripción de Procesos, Petróleos Mexicanos (2020). Licenciador Scientific Design Company, Inc.	26
<b>Figura 12.</b> Módulos funcionales de una planta de óxido de etileno en el complejo petroquímico Morelos. Fuente: Descripción de Procesos, Petróleos Mexicanos (2020). Licenciador Scientific Design Company, Inc.	26
<b>Figura 13.</b> Diagrama de bloques con las entradas y salidas del proceso de óxido de etileno en el complejo petroquímico La Cangrejera.	26
<b>Figura 14.</b> Diagrama de bloques con las entradas y salidas del proceso de óxido de etileno y planta de glicoles en el complejo petroquímico Morelos.	27
<b>Figura 15.</b> Producción anual de etano 2012 a 2019 y promedio enero-octubre 2020. Fuente: Base de Datos Institucional de Petróleos Mexicanos, 2020.	30
<b>Figura 16.</b> Diagrama de bloques con las entradas y salidas a proceso en la planta de Etileno en el complejo petroquímico La Cangrejera.	31
<b>Figura 17.</b> Diagrama de bloques con las entradas y salidas de los trenes 1 y 2, correspondientes a la planta de Oxígeno en el complejo petroquímico La Cangrejera.	34
<b>Figura 18.</b> Diagrama de bloques con las entradas y salidas al proceso de la planta de Óxido de etileno en el complejo petroquímico La Cangrejera.	35
<b>Figura 19.</b> Diagrama de bloques con las entradas y salidas en el proceso de Polietileno de Baja Densidad, tren 1, complejo petroquímico La Cangrejera.	37

<b>Figura 20.</b> Diagrama de bloques con las entradas y salidas en el proceso de Polietileno de Baja Densidad, tren 2, complejo petroquímico La Cangrejera.	40
<b>Figura 21.</b> Diagrama de bloques con las entradas y salidas en el proceso de Polietileno de Baja Densidad, tren 3, complejo petroquímico La Cangrejera.	43
<b>Figura 22.</b> Diagrama de bloques con las entradas y salidas a proceso en la planta de Etileno en el complejo petroquímico Morelos.	46
<b>Figura 23.</b> Diagrama de bloques con la distribución del hidrógeno dentro del complejo petroquímico Morelos.	49
<b>Figura 24.</b> Diagrama de bloques con las entradas y salidas de la planta de Oxígeno en el complejo petroquímico Morelos.	50
<b>Figura 25.</b> Diagrama de bloques con las entradas y salidas de los trenes 1 y 2, correspondientes a la planta de Óxido de etileno en el complejo petroquímico Morelos.	51
<b>Figura 26.</b> Diagrama de bloques con las entradas y salidas de la planta de glicoles etilénicos en el complejo petroquímico Morelos.	55
<b>Figura 27.</b> Diagrama de bloques con las entradas y salidas de la planta de Polietileno Lineal de Baja Densidad en el complejo petroquímico Morelos.	57
<b>Figura 28.</b> Diagrama de bloques con las entradas y salidas, proceso Asahi, tren A y B, de la planta de Polietileno de Alta Densidad en el complejo petroquímico Morelos.	64
<b>Figura 29.</b> Diagrama de bloques con las entradas y salidas, proceso Mitsui, tren A, planta de Polietileno de Alta Densidad en el complejo petroquímico Morelos.	71
<b>Figura 30.</b> Diagrama de bloques con las entradas y salidas, proceso Mitsui, tren B, planta de Polietileno de Alta Densidad en el complejo petroquímico Morelos.	74
<b>Figura 31.</b> Diagrama de flujo con los pasos a seguir para la optimización de un escenario de mediano plazo.	84
<b>Figura 32.</b> Comparativo mensual de la producción neta de los principales productos petroquímicos (óxido de etileno, PEAD, PEBD y PELBD) con los que se valida el funcionamiento del modelo matemático desarrollado, bajo los criterios para la elaboración de un programa operativo y financiero.	86
<b>Figura 33.</b> Comparativa mensual de los resultados de operación, con los que se valida el cumplimiento de la función objetivo para un análisis a mediano plazo.	86
<b>Figura 34.</b> Comparativo mensual del consumo de etano nacional e importado entre los valores iniciales del SA y los resultados óptimos de MOETI.	88
<b>Figura 35.</b> Producción estimada de los principales productos petroquímicos en el SA, que servirán como valores iniciales en la optimización de los resultados de operación en el MOETI.	89
<b>Figura 36.</b> Escenario de producción óptima de los principales productos petroquímicos en MOETI, con base en los valores iniciales del SA.	90
<b>Figura 37.</b> Resultados de MOETI. Incentivos de operación de los diferentes procesos de etileno en el mes de septiembre (POFAT v.401).	90
<b>Figura 38.</b> Resultados de MOETI. Incentivos de operación de los diferentes procesos de etileno en el mes de octubre (POFAT v.401).	91
<b>Figura 39.</b> Comparativo de los resultados de operación obtenidos para el análisis a mediano plazo de la rentabilidad en el consumo de etano importado para la operación de los procesos de etileno.	92

<b>Figura 40.</b> Producciones estimadas de los principales productos petroquímicos en el SA, bajo la premisa de solo consumir etano nacional.	94
<b>Figura 41.</b> Producción óptima de los principales productos petroquímicos en MOETI, con base en los valores iniciales del SA.	94
<b>Figura 42.</b> Resultados de MOETI. Incentivos de operación de los diferentes procesos de etileno en el mes de septiembre (POFAT v.402).	95
<b>Figura 43.</b> Comparativo de los resultados de operación que tienen por objetivo evaluar la distribución de la materia prima en los procesos de etileno.	95
<b>Figura 44.</b> Margen obtenido por la diferencia entre los resultados de operación (RO) obtenidos en MOETI y el monto correspondiente al pago de las penalizaciones por incumplimiento en la entrega de etano a BI.	96
<b>Figura 45.</b> Producciones estimadas de los principales productos petroquímicos en el SA.	97
<b>Figura 46.</b> Producción óptima en MOETI de los principales productos petroquímicos.	98
<b>Figura 47.</b> Resultados de MOETI. Incentivos de operación de los diferentes procesos de etileno en el mes de agosto (POFAT v.403).	98
<b>Figura 48.</b> Resultados de MOETI. Incentivos de operación de los diferentes procesos de etileno en el mes de septiembre (POFAT v.403).	99
<b>Figura 49.</b> Resultados MOETI. Incentivos en la compra de materia prima para consumo en los procesos de etileno en el mes de octubre (POFAT v.403).	99
<b>Figura 50.</b> Comparativo de los resultados de operación obtenidos en el SA y MOETI, buscando el óptimo operativo entre el uso de etano nacional e importado.	100
<b>Figura 51.</b> Margen obtenido con base en la diferencia entre los resultados de operación (RO) obtenidos en MOETI y el monto correspondiente al pago de las penalizaciones por incumplimiento en la entrega de etano a BI.	100
<b>Fig. A1. 1</b> Diagrama de bloques de los procesos en el Complejo Petroquímico La Cangrejera.	116
<b>Fig. A1. 2.</b> Diagrama de bloques de los procesos en el Complejo Petroquímico Morelos.	117
<b>Fig. A2. 1.</b> Diagrama de bloques de la planta de etileno con el balance de materia y distribución de sus productos, Complejo Petroquímico La Cangrejera.	118
<b>Fig. A2. 2.</b> Diagrama de bloques de la planta de oxígeno con el balance de materia y distribución de sus productos, Complejo Petroquímico La Cangrejera.	119
<b>Fig. A2. 3.</b> Diagrama de bloques del tren 1 de la planta de polietileno de baja densidad (PEBD) con el balance de materia y distribución de sus productos.	120
<b>Fig. A2. 4.</b> Diagrama de bloques del tren 2 de la planta de polietileno de baja densidad (PEBD) con el balance de materia y distribución de sus productos.	121
<b>Fig. A2. 5.</b> Diagrama de bloques del tren 3 de la planta de polietileno de baja densidad (PEBD) con el balance de materia y distribución de sus productos.	122
<b>Fig. A3. 1.</b> Diagrama de bloques de la planta de etileno con el balance de materia y distribución de sus productos, Complejo Petroquímico Morelos.	123
<b>Fig. A3. 2.</b> Diagrama de bloques de la planta de oxígeno con el balance de materia y distribución de sus productos, Complejo Petroquímico Morelos.	124
<b>Fig. A3. 3.</b> Diagrama de bloques de la planta de óxido de etileno con el balance de materia y distribución de sus productos, Complejo Petroquímico Morelos.	125
<b>Fig. A3. 4.</b> Diagrama de bloques de la planta de polietileno lineal de baja densidad con el balance de materia y distribución de sus productos.	126



<b>Fig. A4. 1</b> Flujos máximos y mínimos de insumos establecidos en el caso base.	127
<b>Fig. A4. 2.</b> Flujos máximos y mínimos establecidos para la venta de productos petroquímicos para el caso base.	128
<b>Fig. A4. 3.</b> Flujos máximos y mínimos de transferencia y capacidades en los procesos petroquímicos para el caso base.	129

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Plantas de proceso de la cadena de etano en los Complejos Petroquímicos. Fuente: Oficio PEMEX-ETI-DG-GPECF-20-2019, Memoria de labores 1992 y 2011, Petróleos Mexicanos.	16
<b>Tabla 2.</b> Almacenamiento disponible para diferentes productos petroquímicos. Fuente: Memoria de labores 2011, Petróleos Mexicanos.	17
<b>Tabla 3.</b> Poliductos para el transporte de productos petroquímicos. Fuente: Memoria de labores 1992 y 2011, Petróleos Mexicanos.	17
<b>Tabla 4.</b> Nomenclatura empleada en la elaboración de los diagramas de bloques.	30
<b>Tabla 5.</b> Matriz de rendimientos de producción de la planta de etileno, complejo La Cangrejera.	32
<b>Tabla 6.</b> Matriz de rendimientos de producción de la planta de Óxido de etileno, complejo La Cangrejera.	36
<b>Tabla 7.</b> Matriz de rendimientos para la obtención de PEBD puro en la planta de PEBD, Tren 1.	37
<b>Tabla 8.</b> Matriz de rendimientos de producción y formulación de PEBD, Tren 1.	38
<b>Tabla 9.</b> Estrategia de comercialización en la elaboración de los diferentes grados de PEBD, Tren 1.	38
<b>Tabla 10.</b> Matriz de rendimientos para la obtención de PEBD puro en la planta de PEBD, Tren 2.	40
<b>Tabla 11.</b> Matriz de rendimientos de producción y formulación de PEBD, Tren 2.	41
<b>Tabla 12.</b> Estrategia de comercialización en la elaboración de los diferentes grados de PEBD, Tren 2.	41
<b>Tabla 13.</b> Matriz de rendimientos para la obtención de PEBD puro en la planta de PEBD, Tren 3.	43
<b>Tabla 14.</b> Matriz de rendimientos de producción y formulación de PEBD, Tren 3.	44
<b>Tabla 15.</b> Estrategia de comercialización en la elaboración de los diferentes grados de PEBD, Tren 3.	44
<b>Tabla 16.</b> Matriz de rendimientos de producción de la planta de etileno, complejo Morelos.	47
<b>Tabla 17.</b> Matriz de rendimientos de producción de la planta de Óxido de etileno, Tren 1, complejo Morelos.	52
<b>Tabla 18.</b> Matriz de rendimientos de producción de la planta de Óxido de etileno, Tren 2, complejo Morelos.	53
<b>Tabla 19.</b> Matriz de rendimientos de producción en la planta de glicoles etilénicos.	55
<b>Tabla 20.</b> Matriz de rendimientos para la obtención de PELBD puro en la planta Swing.	57
<b>Tabla 21.</b> Matriz de rendimientos de producción y formulación de PELBD.	59
<b>Tabla 22.</b> Estrategia de comercialización en la elaboración de los diferentes grados de PELBD.	59
<b>Tabla 23.</b> Matriz de rendimientos para la obtención de PEAD puro en la planta Asahi, Tren A.	64
<b>Tabla 24.</b> Matriz de rendimientos de producción y formulación de PEAD, planta Asahi, Tren A.	65
<b>Tabla 25.</b> Estrategia de comercialización en la elaboración de los diferentes grados de PEAD, planta Asahi, Tren A.	65
<b>Tabla 26.</b> Matriz de rendimientos para la obtención de PEAD puro en la planta Asahi, Tren B.	67
<b>Tabla 27.</b> Matriz de rendimientos de producción y formulación de PEAD, planta Asahi, Tren B.	68
<b>Tabla 28.</b> Estrategia de comercialización en la elaboración de los diferentes grados de PEAD, planta Asahi, Tren B.	68
<b>Tabla 29.</b> Matriz de rendimientos para la obtención de PEAD puro en la planta Mitsui, Tren A.	71
<b>Tabla 30.</b> Matriz de rendimientos de producción y formulación de PEAD, planta Mitsui, Tren A.	72

<b>Tabla 31.</b> Estrategia de comercialización en la elaboración de los diferentes grados de PEAD, planta Mitsui, Tren A.	72
<b>Tabla 32.</b> Matriz de rendimientos para la obtención de PEAD puro en la planta Mitsui, Tren B.	74
<b>Tabla 33.</b> Matriz de rendimientos de producción y formulación de PEAD, planta Mitsui, Tren B.	75
<b>Tabla 34.</b> Estrategia de comercialización en la elaboración de los diferentes grados de PEAD, planta Mitsui, Tren B.	75
<b>Tabla 35.</b> Factores de insumo para la producción de una tonelada de etileno, complejo La Cangrejera.	77
<b>Tabla 36.</b> Factores de insumo para la producción de una tonelada de óxido de etileno, complejo La Cangrejera.	77
<b>Tabla 37.</b> Factores de insumo para la producción de una tonelada de oxígeno, Tren 1 y 2 complejo La Cangrejera.	77
<b>Tabla 38.</b> Factores de insumo para la producción de una tonelada de PEBD, Tren 1, 2 y 3, complejo La Cangrejera.	78
<b>Tabla 39.</b> Capacidad de almacenamiento de servicios principales en el complejo La Cangrejera.	78
<b>Tabla 40.</b> Factores de insumo para la elaboración de una tonelada de etileno, complejo Morelos.	78
<b>Tabla 41.</b> Factores de insumo para la producción de una tonelada de óxido de etileno, complejo Morelos.	79
<b>Tabla 42.</b> Factores de insumo para la producción de una tonelada de oxígeno, complejo Morelos.	79
<b>Tabla 43.</b> Factores de insumo para la producción de una tonelada de PELBD, complejo Morelos.	79
<b>Tabla 44.</b> Factores de insumo para la producción de una tonelada de PEAD, proceso Asahi y Mitsui, complejo Morelos.	80
<b>Tabla 45.</b> Capacidad de almacenamiento de servicios principales en el complejo Morelos.	80
<b>Tabla 46.</b> Lista con las variables de decisión en el escenario base.	81
<b>Tabla 47.</b> Numero de ecuaciones correspondientes a las restricciones funcionales consideradas en el caso base.	81
<b>Tabla 48.</b> Mantenimientos considerados en la validación del Modelo y en desarrollo de los casos de estudio.	85
<b>Tabla 49.</b> Producción y distribución de etano entre ETI y BI, con un estimando del volumen a penalizar.	93
<b>Tabla 50.</b> Producción y distribución de etano en ETI y BI, estimando el flujo a penalizar	97

## Resumen

Derivado del actual decremento en los niveles de producción de etano en Petróleos Mexicanos, se realizó un análisis de los efectos que podría ocasionar a la empresa el contar con una menor oferta de este hidrocarburo, encontrando que las principales problemáticas son: niveles de proceso por debajo de un mínimo operativo y por ende mayores costos de producción, incumplimiento a los compromisos de ventas nacional de los diferentes petroquímicos y el incumplimiento por falta de suministro de etano a la empresa Braskem Idesa (BI). Siendo de vital importancia evaluar acciones que maximicen los beneficios económicos de los procesos de etileno (ETI) en un programa a mediano plazo.

Para ello, se desarrolló un modelo matemático que dentro de su estructura considera las principales premisas operativas y económicas, que influyen directamente en la operación de los procesos de etileno; con la finalidad de elaborar escenarios que brinden resultados que sirvan como soporte en la toma de decisiones en un periodo mínimo de tiempo. Para resolver esta problemática, se elabora una interfaz en Excel®, denominada Sistema Alternativo (SA), que considera los balances de materia de los Complejos La Cangrejera y Morelos, iniciando el escenario con una oferta de materias primas que pueden ser etano nacional e importado y propano nacional e importado. Posteriormente, se estima un nivel de producción a partir de los flujos de entrada y los rendimientos de insumo; así también, se identifican los servicios principales requeridos para la operación de cada planta; teniendo como límite máximo a la capacidad nominal y como mínimo a la capacidad borde sin riesgo operativo. Identificando que la mejor manera para resolver un problema de toma de decisiones es mediante el uso de un algoritmo de Programación Lineal; algoritmo disponible en el optimizador GRTMPS de Haverly, el cual con apoyo de la recursión adherente tiene la posibilidad de dar soluciones óptimas al modelo propuesto (Modelo de Optimización de los procesos de etileno, MOETI).

Con base en situaciones reales, se establecieron tres casos de estudio de los que se observa que al mantener un proceso mínimo de 30 Mbd (625 MTA), los resultados son positivos y mediante la optimización en MOETI se proponen nuevas opciones de distribución que, para el primer caso, los resultados de operación incrementaron en 113% al considerar un 48% de consumo de etano importado. El segundo caso, indica que el priorizar a ETI sobre BI en la entrega de etano, genera ingresos suficientes como para cubrir el pago de penalizaciones, conservando un ingreso después de este del 73%. El último caso analiza, en conjunto, los resultados obtenidos por los casos anteriores y determinar un punto de equilibrio entre la distribución y la producción, notando que las operaciones con base en un 50% etano nacional y 50% etano importado, son viables, por lo que, MOETI recomienda incrementar las ventas de PEBD en un 80% y así obtener beneficios del 145%.

El uso del modelo matemático reduce de manera significativa el tiempo de elaboración de un escenario (2 días), para el caso de la Gerencia de Programación de Operaciones (GPO) se requieren de 5 días para la elaboración de un programa de operación; otro beneficio de contar con el SA es que en caso de requerirse ajustes, estos pueden realizarse de manera puntual sobre el SA, pues en caso de no tener la posibilidad de usar el MOETI, se evitan retrasos en el cumplimiento de las tareas.

## Abstract

As a result of the current decrease in the production levels of ethane in Petróleos Mexicanos, the company carried out an analysis of the effect of having a lower offer of this hydrocarbon, finding that the main barriers are: process levels below the operational minimum, hence higher production costs, non-fulfillment of the national sales liabilities of the different petrochemicals and the non-fulfillment of the contract to Braskem Idesa (BI) due to the lack of ethane supply. Thereby, becomes relevant to act as to maximize the profits in the ethylene processes (ETI) in the medium term.

In this sense, a mathematical model was developed that considers in its structure the main operation and economic conditionals having a direct influence in the operation of the ethylene processes, with the aim to design scenarios that lead to make decisions within a minimum amount of time. An Excel® interface was developed, called Alternate System (SA), that comprises the material balances of the petrochemical complexes La Cangrejera and Morelos; the base case starts with an offer of raw materials they can be national and imported ethane and national and imported propane. Subsequently, it is estimated a production level of the inlet flow rates and the yields of the inputs; there is also identified the main auxiliary services required to operate each plant, having as upper limit the nominal capacity and as a lower the non-risk operational capacity. The decision-making problem was solved by means of a Linear Programming algorithm, which it was available in the GRTMPS optimizer by Haverly, based on a adherent recursion has the possibility to give optimal solutions to the proposed model (MOETI).

Based on real situations, three case study were analyzed, where it is observed that by keeping a minimum process level of 30 Mbd (625 MTA), the results are positive and the optimization in the MOETI new supply options are proposed. In the first scenario, the operation results increase in 113% by considering a 48% of imported ethane consumption. The second scenario established that by prioritizing ETI over BI with respect to the supply of ethane, enough incomes are generated as to cover the payment of penalties, keeping an income after this of 73%. The last scenario analyzed as an overall the two previous cases to determine an equilibrium between the distribution and the production, realizing that the operations based on a 50% of national ethane and 50% of imported ethane are achievable, thus, MOETI recommended to increase the sales of PEBD in an 80% hence obtaining profits of 145%.

The use of the mathematical model reduces in a considerable manner the amount of time to elaborate a given scenario (2 days), the Management of Programming Operations (GPO) requires up to 5 days to elaborate an operations program; an additional benefit of having the SA is that when certain adjustments could be required, those can be performed directly over the SA in the case of an unavailability in the use of the MOETI, therefore delays are avoided to carry out the tasks of the Management.

The present work satisfies the objectives to provide tools for the decisions making process, making them agile, transparent and technically feasible supported by the maximization of the economic profits of the ethylene processes, fulfilling the demand of the different petrochemical processes, especially the oxide ethylene, a product manufactured exclusively by Pemex



## Introducción

Dentro de la industria petroquímica, el etileno ha demostrado ser uno de los compuestos más importantes debido a su amplio uso como materia prima en la obtención de diferentes productos químicos, tales como etilbenceno, estireno, óxido de etileno, glicoles, polietilenos en varias densidades; a partir de procesos como oxidación, alquilación, polimerización, halogenación, entre otros. (Sri Hari Kumar & Sai Prasad, 2014).

Particularmente en México, (Góngora Pérez, 2019), esta industria tuvo su origen con la expropiación petrolera en 1938 y con el nacimiento de la primer planta de proceso en 1959 (planta de azufre en Azcapotzalco), esto como resultado del modelo de sustitución de importaciones derivado de la segunda guerra mundial, que favoreció la producción de gas y otros productos asociados al petróleo, con el fin de dar certidumbre al desarrollo manufacturero ante la creciente demanda de petroquímicos en el país.

Las estadísticas actuales indican que, a nivel mundial, alrededor del 43% del volumen total de producción de etileno es obtenido a partir de la nafta, debido a su fácil transporte; aunque últimamente, fracciones ligeras del crudo son utilizadas como materia prima en algunas partes del mundo. La producción de etileno a través del etano, representa alrededor del 37%; convirtiéndose en una ruta potencial para la subsecuente síntesis de oxigenantes y aromáticos. Aunado a que el precio del crudo es superior al del gas natural, la obtención del etileno a partir del etano se ha incrementado significativamente, mientras que su obtención partiendo de la nafta ha ido disminuyendo (Lewandowski, 2016). En ese sentido, el comportamiento en los precios de los petroquímicos es menos volátil en comparación con el mercado petrolero.

Actualmente, la compañía estatal de México, Petróleos Mexicanos (Pemex), cuenta con tres plantas para la producción de etileno con base etano, localizadas respectivamente en los Complejos Petroquímicos Cangrejera, Morelos y Pajaritos, totalizando una capacidad de diseño instalada de 1,382,000 toneladas anuales; aclarando que en agosto de 2018 fueron reincorporados los activos del Complejo Petroquímico Pajaritos a Pemex Transformación Industrial (PTRI), que anteriormente operaba de manera independiente en Pemex Etileno (PETI), y que desde septiembre de 2013, formaban parte de un consorcio entre Pemex Petroquímica (PPQ-PETI) y Mexichem; sin embargo derivado de un accidente en el Complejo Pajaritos, en abril de 2016, la petrolera estatal ya sólo contaba con una capacidad disponible de 1,200,000 toneladas anuales.

Aunado a que las últimas cifras reportadas en los Anexos Estadísticos de Pemex indican una declinación en la oferta de líquidos en el gas (metano, etano, propano y butanos), provocado por la baja confiabilidad en las operaciones de las plantas de extracción de líquidos (criogénicas) en el Complejo Procesador de Gas de Cd. Pemex, Nvo. Pemex y Cactus, generen una menor disponibilidad de etano a los procesos de etileno impactando de manera sustancial en la producción de petroquímicos. presentándose como reto actual en los mercados en los que participa México, disminuir la reciente dependencia en la producción de etano para la obtención de etileno, sin soslayando la diversificación de la materia prima como plan estratégico; evitando continuas situaciones de sobreoferta y al mismo tiempo, faltantes en producción (Revista Petroquímica, 2018).

Dado lo anterior, en el presente trabajo tiene por objetivos:

### **Objetivo general**

- Elaborar un modelo matemático que maximice los beneficios económicos de los procesos de etileno, mediante el uso de herramientas de optimización que mejoren el enfoque de la situación a estudiar y proporcionen los elementos necesarios como soporte en una toma de decisiones de los altos directivos al interior de Pemex.

### **Objetivos específicos**

- Desarrollar una herramienta que permita reducir el tiempo de elaboración de casos de estudio, favoreciendo el análisis de los resultados,
- Mayor capacidad de reacción para responder a cuestionamientos que impacten en la empresa,
- Generar sinergias entre las diferentes áreas que conforman los procesos de etileno y el Corporativo.

## Capítulo I. Marco teórico de los procesos de desintegración para la obtención de etileno

La obtención del etileno es posible mediante la desintegración de hidrocarburos como el etano, propano, butano o naftas, según (Sri Hari Kumar & Sai Prasad, 2014), a nivel mundial el 30% de la producción de etileno se realiza a través del etano, mientras que el 50% se obtiene a partir de las naftas, principalmente por lo asequible de su transporte a las diferentes áreas de gran demanda de etileno; sin embargo, en los últimos años se ha notado un decremento en los precios del etano, lo cual ha favorecido los costos de producción del etileno con este insumo, circunstancia que fue motivación para incrementar en 8.56 MTA sobre la capacidad instalada en el Medio Oriente en solo 3 años (2012-2014).

Actualmente, las tecnologías disponibles para la producción de etileno se dividen en dos amplias categorías: procesos de desintegración a altas temperaturas (desintegración térmica, catalítica y de vapor) y procesos de desintegración a bajas temperaturas (deshidrogenación oxidativa), (Sri Hari Kumar & Sai Prasad, 2014).

Dentro de los procesos de desintegración a altas temperaturas, (Sri Hari Kumar & Sai Prasad, 2014), la desintegración térmica es uno de los procesos más aplicados en el sector industrial y éste consiste en generar el rompimiento de largas cadenas de hidrocarburos en unas más pequeñas, al someter la materia prima, principalmente naftas, a presiones superiores a las 70 atm y temperaturas entre los 450 °C y 750°C. La desintegración térmica se puede desarrollar de dos maneras, la primera consiste en calentar la materia prima en los tubos internos del horno hasta iniciar una desintegración parcial, para su posterior terminación en tuberías subsecuentes. En el segundo procedimiento, la materia prima se calienta en el horno hasta una temperatura adecuada de entrada a la sección de reacción, lugar donde se lleva a cabo la desintegración de manera total, al finalizar la reacción se extrae una mezcla líquido y gas, que es enviada a una sección de destilación para su separación; este proceso tiene como desventajas que la reacción es altamente endotérmica, requiere de altas presiones y obtiene coque como subproducto.

La desintegración catalítica, es aplicada para la obtención de aromáticos, para este proceso se requiere de una alimentación de naftas a una temperatura de 200 °C (Villafuerte Macías, Aguilar López, & Maya Yescas, 2003), puesta en contacto con un catalizador de magnesio soportado en alúmina ( $MgAl_2O_4$ ) a una temperatura de 700°C y 800 °C (Sri Hari Kumar & Sai Prasad, 2014), generando al contacto la evaporación, el rompimiento de las cadenas de hidrocarburos y la transferencia de hidrógeno a las cadenas insaturadas (deshidrogenación), la mezcla de hidrocarburos tendrá una temperatura de salida entre los 520 °C y los 590 °C y para entrar a la respectiva sección de separación.

Desventajas de este proceso, la actividad catalítica decrece conforme incrementa la formación de coque por lo que se requiere de una etapa de regeneración del catalizador, ya que la formación de coque disminuye los rendimientos de los productos, demanda mayor consumo de calor y disminuye el tiempo de vida de los serpentines.

En cuanto a la desintegración por vapor (Sri Hari Kumar & Sai Prasad, 2014), este proceso químico es el más utilizado a nivel mundial para la obtención de etileno y consiste en separar los hidrocarburos saturados en cadenas más pequeñas, a menudo hidrocarburos insaturados. La operación es altamente endotérmica, pues implica calentar el hidrocarburo mediante una corriente de vapor a 1,050°C y alimentarlo a los tubos del reactor. Los productos obtenidos salen a 850 °C aproximadamente y son enfriados a 300°C con la finalidad de evitar reacciones secundarias.

Algunas de las desventajas de la desintegración por vapor es que la reacción es altamente endotérmica, los tiempos de residencia son de milisegundos ocasionando una alta caída de presión y la formación de coque es un problema en el horno y en las líneas de intercambio de calor, ya que incrementa la demanda de energía.

Finalmente, en la desintegración a bajas temperaturas tenemos la deshidrogenación oxidativa (ODH), (Sri Hari Kumar & Sai Prasad, 2014), proceso considerado como uno de los más importantes por su bajo impacto al medio ambiente, ya que requiere una menor demanda de energía comparada con las otras alternativas de desintegración, las eficiencias operativas pueden mejorarse sin necesidad de precalentar la alimentación, no requiere de vapor, la reacción se lleva a bajas temperaturas 350°C-600°C y la formación de coque como subproducto es mucho menor, pues emplea como alimentación pequeñas cadenas de alcanos como el etano, propano y butano y la regeneración del catalizador se lleva in situ mediante la alimentación de oxígeno.

### 1.1. Infraestructura de los procesos de etileno en Petróleos Mexicanos

En Petróleos Mexicanos se definen los procesos de etileno como aquellas actividades que hacen referencia a la “producción, distribución y comercialización de derivados del metano, etano y del propileno, ya sea por cuenta propia o de terceros”, (Petróleos Mexicanos, 2019). Para la ejecución de estas tareas se cuenta con los complejos petroquímicos La Cangrejera y Morelos, ambos localizados al sur del país en Coatzacoalcos, Veracruz. La infraestructura disponible en las Tablas 1, 2, y 3 incluyen los equipos para las actividades de operación, guarda y manejo de los productos. Actualmente se satisface la demanda de petroquímicos a nivel nacional; motivo por el que no ha sido necesario incrementar la capacidad instalada de las diferentes plantas de proceso (ver Figs. A1.1-A1.2).

**Tabla 1.** Plantas de proceso de la cadena de etano en los Complejos Petroquímicos. Fuente: Oficio PEMEX-ETI-DG-GPECF-20-2019, Memoria de labores 1992 y 2011, Petróleos Mexicanos.

La Cangrejera			Morelos		
Plantas de proceso	Capacidad Instalada (ton)	Inicio de operación	Plantas de proceso	Capacidad Instalada (ton)	Inicio de operación
Etileno	600,000	1982	Etileno	600,000	1989
Óxido de Etileno	120,000	1981	Óxido de Etileno	280,000	1988
PEBD T-I	105,000	1984	Glicoles Etilénicos	135,000	1988

PEBD T-II	105,000	1985	Swing de PELBD	300,000	2007
PEBD T-III	105,000	1986	Asahi de PEAD T-A	50,000	1989
Oxígeno T-A	160,000	1980	Asahi de PEAD T-B	50,000	1989
Oxígeno T-B			Mitsui de PEAD T-A	50,000	2002
			Mitsui de PEAD T-B	50,000	2002
			Oxígeno	323,000	1988

En las Tablas 2 y 3, se puede observar que las más recientes inversiones en la infraestructura de los procesos de etileno han sido encauzadas para el almacenamiento y transporte de etano importado a los complejos La Cangrejera, Morelos y la Terminal Pajaritos; esto con el fin de contar con una alternativa en caso de una disminución en la oferta de etano nacional.

**Tabla 2.** Almacenamiento disponible para diferentes productos petroquímicos. Fuente: Memoria de labores 2011, Petróleos Mexicanos.

Producto	Capacidad (ton)
<b>Terminal de Almacenamiento y Reparto Pajaritos</b>	
Etileno	12,000 hasta 2018, se cambia de producto.
Etano	12,000 (1 tanque de 8,000 t y 2 de 2,000 t)
Etano Importado	Vaporización de 900 t/d
<b>Complejo Petroquímico La Cangrejera</b>	
Butano-butadieno	970
Óxido de Etileno	1,462
Polietileno de Baja Densidad	14,250
<b>Complejo Petroquímico Morelos</b>	
Butano-butadieno	5,430
Óxido de Etileno	3,400
Monoetilenglicol	3,100
Polietileno de Alta Densidad	18,640
<b>Tuxpan (Cobos, Ver.)</b>	
Etileno	4,000

**Tabla 3.** Poliductos para el transporte de productos petroquímicos. Fuente: Memoria de labores 1992 y 2011, Petróleos Mexicanos.

Producto	Origen	Destino	Diámetro (in)	Longitud (Km)
Etileno vapor/ Etano vapor	C.P. Pajaritos	T.R. Pajaritos (bidireccional)	4	1.5
Etileno líquido/ Etano líquido	C.P. Pajaritos	T.R. Pajaritos (bidireccional)	3	1.5
Etileno gas / Etano	C.P. Pajaritos	C.P. La Cangrejera- C.P. Morelos	12	1



Etileno / Etano	C.P. Morelos	Terminal de Recibo Pajaritos	14	2.4
Etileno / Etano	C.P. La Cangrejera	Puente 11 (Anillo de etileno)	12	5
Butano-Butadieno	C.P. Morelos - C.P. La Cangrejera	Centro Embarcador Pajaritos	6	2.4
Butano-Butadieno	C.P. La Cangrejera	C.P. Morelos	3	5.7
Nitrógeno	Infra	C.P. La Cangrejera	6	14
Nitrógeno	C.P. Morelos	C.P. La Cangrejera	4	14
Nitrógeno	C.P. Morelos	Terminal de Recibo Oriente Pajaritos	4	2
Propileno grado polímero	C.P. La Cangrejera	C.P. Morelos	3	5.6

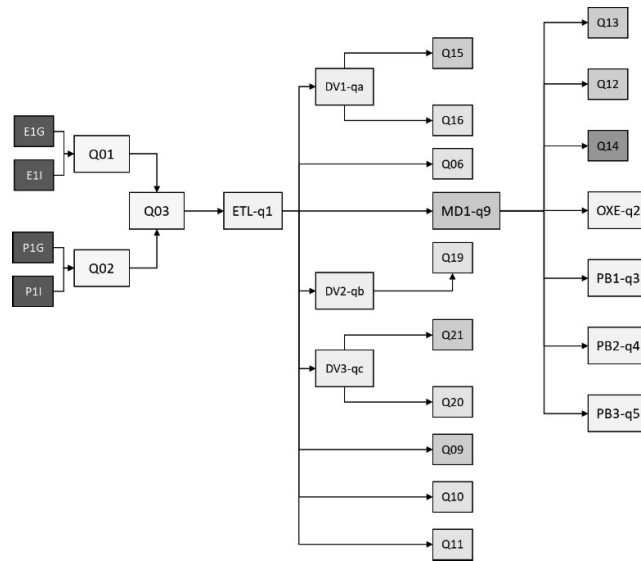
## 1.2. Descripción de los diferentes procesos para la obtención de los productos petroquímicos en los Complejos La Cangrejera y Morelos

### Proceso en la planta de Etileno

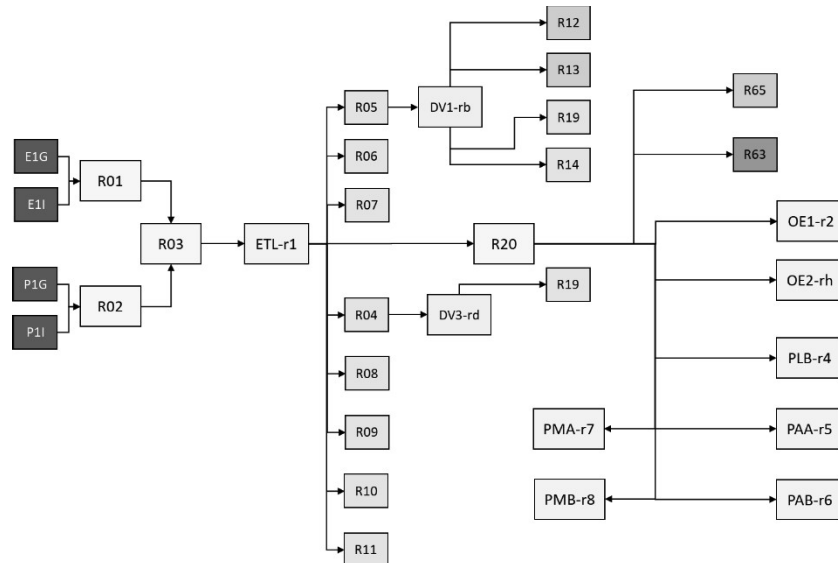
El proceso principal para la obtención de los productos petroquímicos es la planta de etileno, dicha planta guarda la misma ingeniería de proceso en ambos complejos. Cada planta cuenta con 10 hornos de pirólisis y pueden producir 600,000 toneladas anuales, cada una, de etileno de alta pureza mediante el proceso de desintegración térmica del etano, que como se mencionó anteriormente, este proceso es altamente endotérmico y requiere de presiones altas.

Para lograr las condiciones de operación, (Instituto Mexicano del Petróleo, 2003), este proceso cuenta con reactores tubulares (serpentes) colocados dentro del horno donde se hace pasar el etano a la zona de convección del horno para precalentar la carga a 662°C e iniciar la transferencia de calor por radiación al reactor para llegar a una temperatura de 833°C (ver Fig. 1, sección A). Una vez alcanzada la temperatura de desintegración, el etano comienza a transformarse en diferentes productos petroquímicos como: etileno, propileno grado polímero, butadieno, líquidos de pirólisis, hidrógeno, metano, gas residual y coque (ver Figs. 2 y 3); éste último es un producto indeseable, pues perjudica la eficiencia del proceso al incrustarse en los serpentines, minimizando la transferencia de calor hacia el reactor y limitando la selectividad hacia la producción de etileno; razón por la que el etano alimentado al horno es acompañado por vapor de alta presión, el cual tiene dos funciones en este proceso: ser un diluyente térmico, es decir, disminuir la temperatura del sistema para minimizar la producción de coque y mantener limpio los serpentines del horno; así también, disminuir la presión parcial de los hidrocarburos, mejorando la desintegración hacia los productos de mayor interés (etileno y propileno).





**Figura 2.** Diagrama de bloques con las entradas y salidas de la planta de etileno en el complejo petroquímico La Cangrejera.



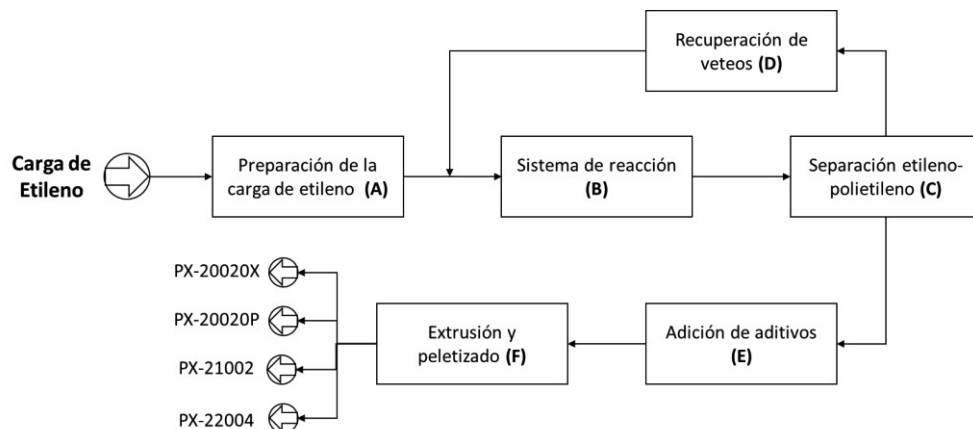
**Figura 3.** Diagrama de bloques con las entradas y salidas de la planta de etileno en el complejo petroquímico Morelos.

### Proceso en la planta de Polietileno de Baja Densidad (PEBD)

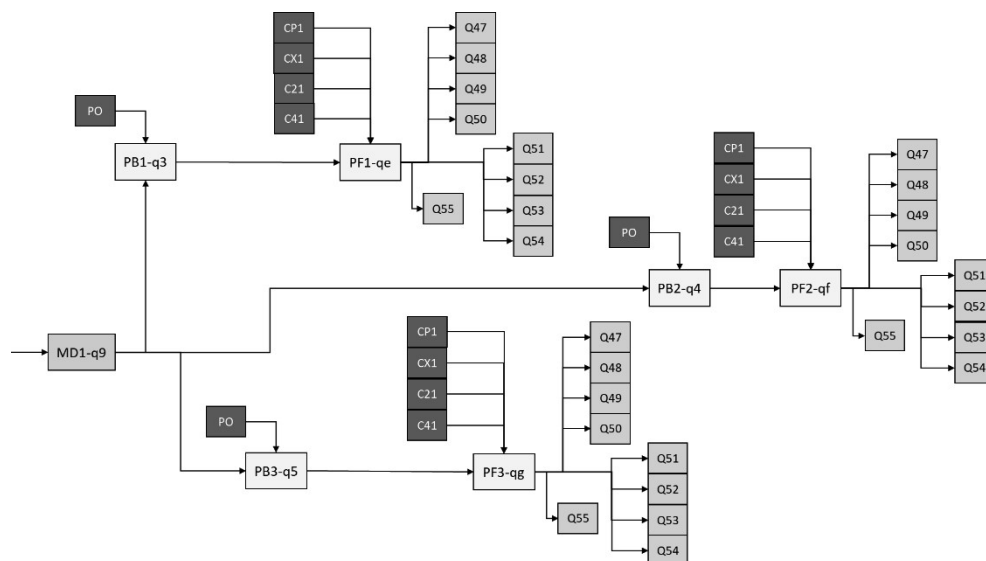
Dependiendo de la demanda que manifieste el mercado, Petróleos Mexicanos tiene la capacidad de producir 315,000 toneladas anuales de polietileno de baja densidad, a partir de tres trenes de 105,000 toneladas anuales cada uno. Destacando que este es un polímero (Roca Girón & Calderón García, 2005), de cadena ramificada que se obtiene por el mecanismo de radicales libres y a altas presiones con una densidad entre los 0.910 - 0.925 g/cm<sup>3</sup>.

Este proceso (Petróleos Mexicanos, 2018), se desarrolla con la alimentación de etileno en fase gas; el cual mediante compresores recíprocos incrementa su presión de 18 a 1,300 kg/cm<sup>2</sup> (ver Fig. 4, sección A), y peróxido orgánico en un reactor de tanque agitado cuya mezcla dará origen a la

reacción de polimerización (ver Fig. 4, sección B), teniendo como productos polietileno y etileno sin reaccionar; dichos productos son separados (ver Fig. 4, sección C), tratando al etileno como recirculación (ver Fig. 4, sección D), mientras que, el polietileno virgen (polietileno sin aditivo), denominado PX-20020X, es transportado hacia una tolva de resina (máx. 1,765 kg/hr) para ser mezclado con una preparación de aditivos (máx. 110 kg/hr) (ver Fig. 4, sección E), para concluir con la extrusión y peletizado (ver Fig. 4, sección F), que cuenta con una capacidad de producción de 15,000 toneladas al año y con la flexibilidad de producir más de un tipo de concentrados (ver Fig. 5); aquí el polietileno virgen es recibido en el extrusor para iniciar el proceso de fusión, plastificación, homogenización y extrusión de mezcla, obteniendo el producto denominado Concentrado “P” (Masterbach No. 0285, PX-20020P).



**Figura 4.** Módulos funcionales de una planta de polietileno de baja densidad. Fuente: Descripción de Procesos, Petróleos Mexicanos (2020). Licenciador Imperial, Ingeniería básica y de detalle: SIM-CHEM (Union Carves LTD).



**Figura 5.** Diagrama de bloques con las entradas y salidas de la planta de polietileno de baja densidad en el complejo petroquímico La Cangrejera.

## Proceso en la planta de Polietileno de Alta Densidad (PEAD)

Otro tipo de polietileno que se produce dentro de las instalaciones de Petróleos Mexicanos es el polietileno de alta densidad con una capacidad de 200,000 toneladas anuales. Este proceso considera dos plantas y cada una con dos trenes de producción de 50,000 toneladas anuales; una con tecnología Asahi y otra tecnología Mitsui (ver Figs. 7 y 8). Este polímero (Roca Girón & Calderón García, 2005), a diferencia del polietileno de baja densidad tiene una estructura lineal con pocas ramificaciones y una densidad entre 0.941 – 0.954 g/cm<sup>3</sup> y su proceso requiere de bajas presiones alrededor de 5 a 15 kg/cm<sup>2</sup> y temperaturas entre los 100 y 170 °C, además de un catalizador óxido metálico, en este caso titanio soportado en sílice de aluminio y un disolvente, hexano.

Este proceso (Petróleos Mexicanos, 2018), se desarrolla en fase de suspensión y requiere como alimentación etileno y un disolvente, para la tecnología Asahi, el disolvente es hexano; mientras que, para el Mitsui, el disolvente es una mezcla de hidrocarburos hidrogenados (hexano, 1-buteno y propileno) (ver Fig. 6, sección A). Estos componentes reaccionan en un reactor de lecho fijo (ver Fig. 6, sección B), para su posterior separación (ver Fig. 6, sección C); el polietileno producido es mezclado con diferentes aditivos con el fin de obtener diferentes grados de polietilenos (ver Fig. 6, sección D).

En el proceso Asahi se obtienen los siguientes grados comerciales (ver Fig. 6, sección E): Padmex 6004S, Padmex 60120, Padmex 65050, Padmex 65080; mientras que en el proceso Mitsui los grados: Padmex 56035, Padmex 60120.

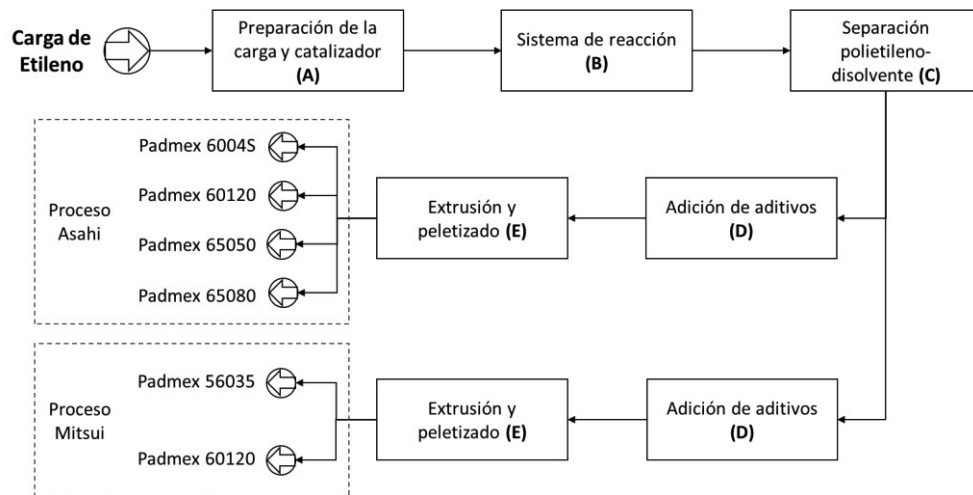


Figura 6. Módulos funcionales de una planta de polietileno de alta densidad. Fuente: Descripción de Procesos, Petróleos Mexicanos (2020). Licenciador Asahi Chemical y Mitsui Petrochemical.

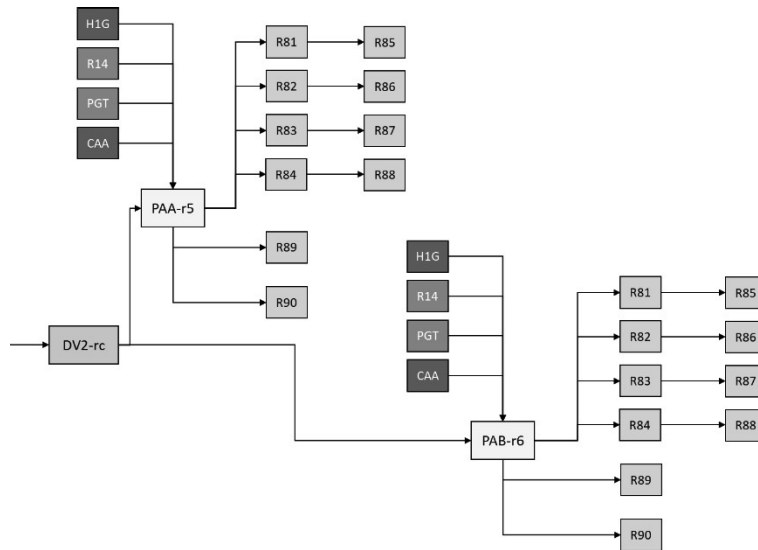


Figura 7. Diagrama de bloques con las entradas y salidas del proceso de polietileno de alta densidad, proceso Asahi, en el complejo petroquímico Morelos.

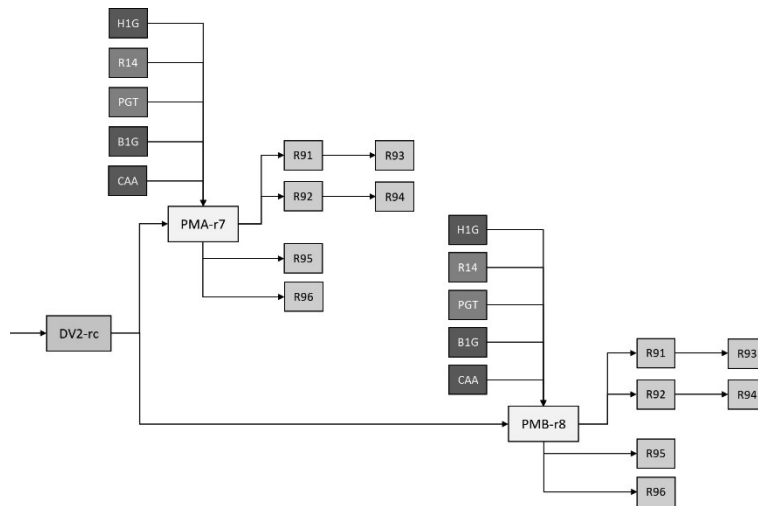
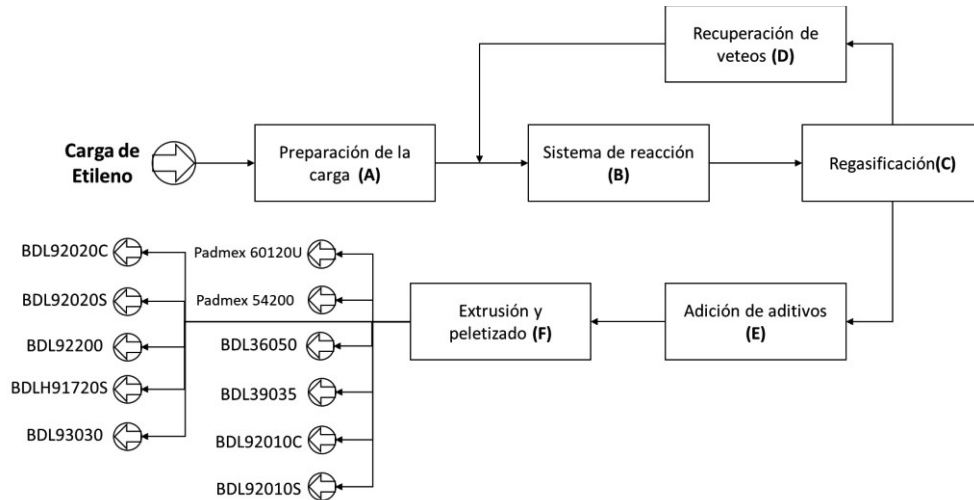


Figura 8. Diagrama de bloques con las entradas y salidas del proceso de polietileno de alta densidad, proceso Mitsui, en el complejo petroquímico Morelos.

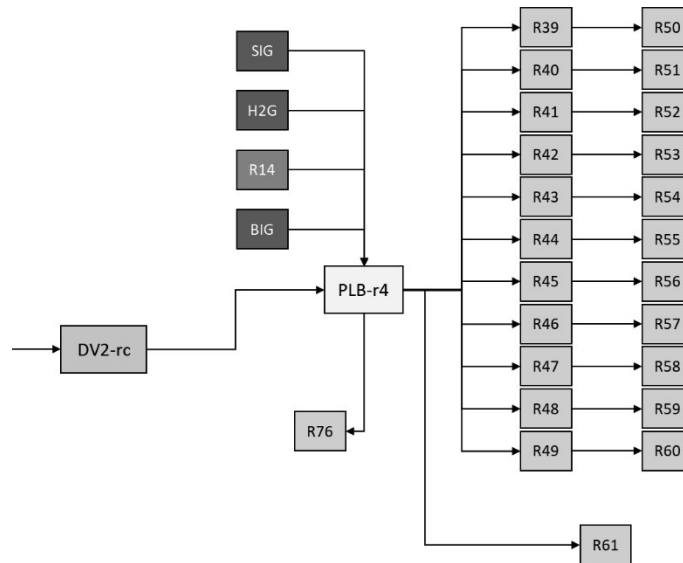
### Proceso en la planta de Polietileno Lineal de Baja Densidad

Por último, (ICIS, 2010), la producción del polietileno lineal de baja densidad (PELBD) se obtiene mediante la reacción de polimerización del etileno con un monómero o comonómero (1-buteno, 1-hexeno e isopentano) e hidrógeno (ver Fig. 9, sección A). La reacción de polimerización se da lugar en un reactor de lecho fluidizado a temperaturas entre 60-100°C y a una presión de 22 kg/cm<sup>2</sup> (ver Fig. 9, sección B), obteniendo un polímero de múltiples ramificaciones cortas que es enviado a una etapa de desgasificación separando las olefinas sin reaccionar (ver Fig. 9, sección C y D), posteriormente son enviados al proceso de adición de los aditivos los cuales mejoraran sus propiedades (ver Fig. 9, sección E) y por último se peletiza para su distribución y almacenamiento (ver Fig. 9, sección F).

Cabe destacar que, dentro de Petróleos Mexicanos (Petróleos Mexicanos, 2011), se cuenta con una capacidad de producción de 300,000 toneladas anuales con su planta Swing, la cual tiene la versatilidad, en caso de ser necesario, producir diferentes grados de polietileno: alta, media y baja densidad sin requerir de cambios mayores en las condiciones de operación (ver Fig. 10).



**Figura 9.** Módulos funcionales de una planta de polietileno lineal de baja densidad. Fuente: Descripción de Procesos, Petróleos Mexicanos (2020). Licenciador Univation.



**Figura 10.** Diagrama de bloques con las entradas y salidas del proceso de polietileno lineal de baja densidad, proceso Swing, en el complejo petroquímico Morelos.

## Proceso en la planta de Óxido de Etileno y Glicoles Etilénicos

En los procesos de etileno se cuenta con dos plantas para la producción de óxido de etileno; la primera planta es localizada en el complejo petroquímico La Cangrejera con una capacidad de producción de 120,000 toneladas anuales y la segunda en el complejo petroquímico Morelos con una capacidad de 280,000 toneladas anuales; donde esta última cuenta con una planta adicional para la elaboración de glicoles etilénicos, con una capacidad de 135,000 toneladas anuales.

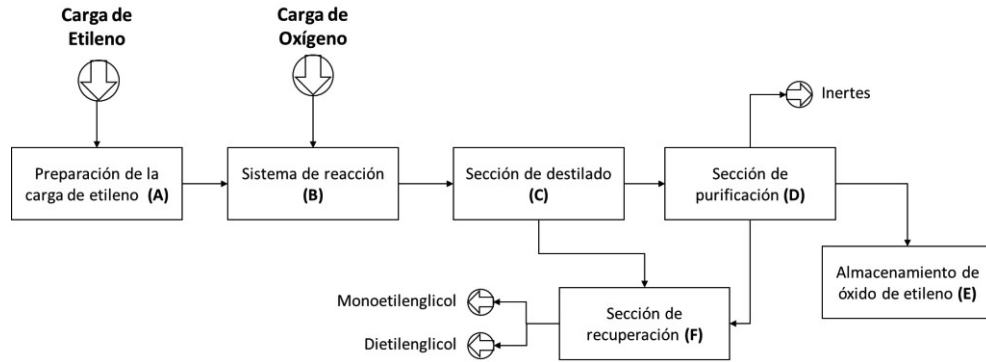
Este proceso (Petróleos Mexicanos, 2018), produce óxido de etileno mediante la oxidación del etileno en fase gaseosa en un reactor de lecho fijo con un catalizador soportado en alúmina (en el complejo La Cangrejera, la planta de óxido utiliza dos reactores de lecho fijo y en el complejo Morelos cuatro reactores), dicha reacción es altamente exotérmica, por lo que parte del calor empleado para la generación de vapor (ver Figs.11 y 12, sección A y B). La mezcla gaseosa fluye en una columna lavadora, en donde por absorción con agua se separa el óxido de etileno y los gases de reacción. El agua rica en óxido de etileno es alimentada a una columna agotadora para separar el óxido de etileno y regresar el agua a la columna lavadora. Esta agua contiene glicoles y una parte es desviada a la sección recuperadora de glicol (ver Fig.11, sección C).

Para el caso del complejo La Cangrejera, el destilado es enviado a una torre reabsorbedora y posteriormente a purificación (ver Fig.11, sección D y E), donde el óxido de etileno puro es enviado a almacenamiento en esferas y los fondos de la torre purificadora son enviados a la sección de recuperación de glicol. En esta sección de recuperación de glicoles se unen las corrientes de los fondos de la torre purificadora y de la columna lavadora, alimentándose a un reactor que por tiempo de residencia genera el glicol. Esta carga pasa a un sistema de evaporación que consta de 3 torres de platos, aquí el contenido de agua en el glicol crudo se elimina en la columna secadora por el domo y los fondos de la columna secadora, se envía a la columna de separación (ver Fig.11, sección F) donde el monoetilenglicol (MEG) sale por el domo y en los fondos dietilenglicol (DEG); ambas corrientes son almacenadas y posteriormente enviadas a su comercialización (ver Fig. 13).

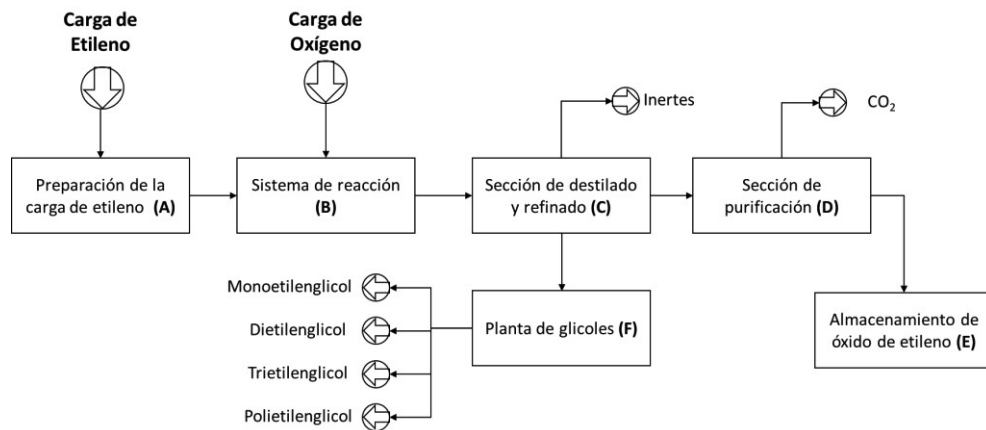
Mientras que el proceso del complejo Morelos, el óxido de etileno obtenido solo pasa a una sección de reabsorción donde se eliminan inertes (ver Fig.12, sección C), seguido de una torre refinadora y una torre agotadora y por último una torre purificadora separando el óxido de etileno y CO<sub>2</sub> obtenido como subproducto de la reacción finalizando con la sección de purificación, donde el óxido de etileno puro se envía a almacenamiento (ver Fig.12, sección D).

El proceso para la obtención de glicoles etilénicos, se encuentra conectado con la sección de reabsorción (ver Fig.12, sección E) pues se envía a reacción parte del óxido de etileno impuro de esta sección, en un reactor tubular tipo pistón. El glicol obtenido pasa a una sección de 6 etapas de evaporación y una última etapa de purificación (ver Fig.12, sección F), para obtener el monoetilenglicol (MEG) y subproductos como el dietilenglicol (DEG), trietilenglicol (TEG) y polietilenglicol (PEG) y ser almacenados en tanques de producto final (ver Fig. 14).

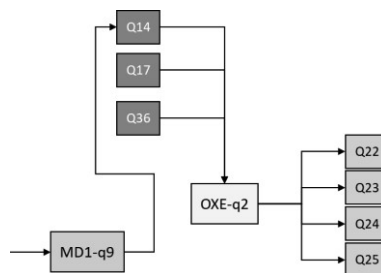




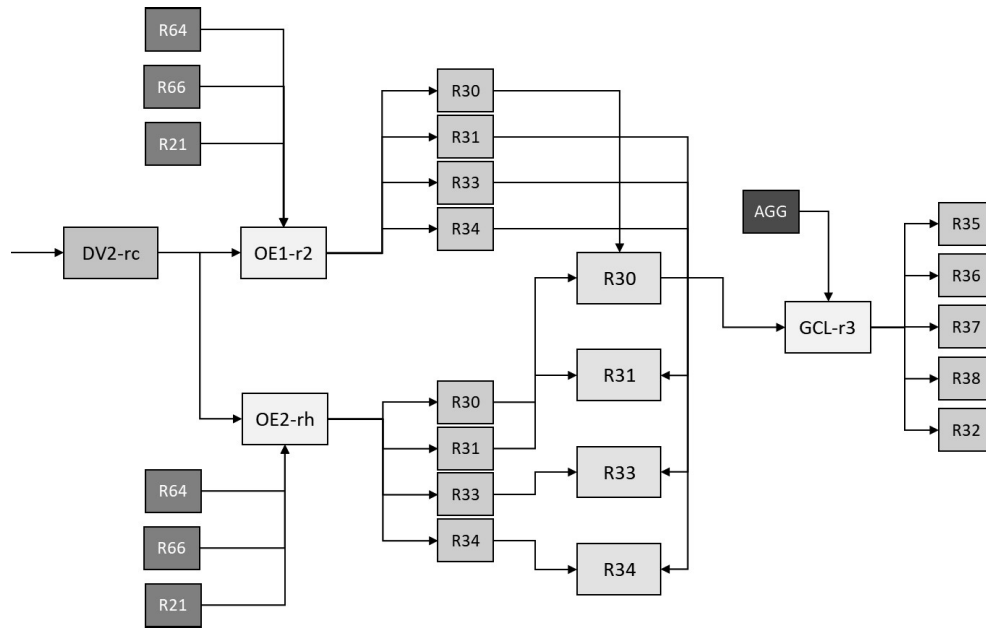
**Figura 11.** Módulos funcionales de una planta de óxido de etileno en el complejo petroquímico Cangrejera. Fuente: Descripción de Procesos, Petróleos Mexicanos (2020). Licenciador Scientific Design Company, Inc.



**Figura 12.** Módulos funcionales de una planta de óxido de etileno en el complejo petroquímico Morelos. Fuente: Descripción de Procesos, Petróleos Mexicanos (2020). Licenciador Scientific Design Company, Inc.



**Figura 13.** Diagrama de bloques con las entradas y salidas del proceso de óxido de etileno en el complejo petroquímico La Cangrejera.



**Figura 14.** Diagrama de bloques con las entradas y salidas del proceso de óxido de etileno y planta de glicoles en el complejo petroquímico Morelos.

## Servicios Principales

### Planta de Generación de Vapor

Dentro de los complejos petroquímicos (Petróleos Mexicanos, 2018), la generación de vapor se realiza mediante calderas, las cuales emplean gas combustible como medio de calentamiento y una mezcla de agua desmineralizada. El agua pasa a un sistema de deareadores donde se elimina por el domo los gases incondensables y el oxígeno disuelto, el agua deareada pasa a un tanque que alimenta a las calderas mediante bombas de alta presión.

Para la producción del vapor, se alimenta gas combustible y aire, para realizar una combustión completa, la temperatura y presión del vapor son reguladas a la salida de las calderas para su distribución a las plantas de proceso y para la generación de energía eléctrica.

### Planta de Generación Eléctrica

La generación eléctrica (Petróleos Mexicanos, 2018), se realiza por el suministro de vapor a los turbogeneradores, los cuales generan una fuerza motriz en la turbina que da movimiento al generador y proporcionar parte de la energía eléctrica requerida en los complejos.

En caso de ser necesario, la empresa cuenta con la posibilidad de comprar energía eléctrica a la Comisión Federal de Electricidad, la cual es alimentada directamente a la estación de suministro eléctrico.

### **Planta para el Tratamiento de Efluentes**

Todas las corrientes de desecho (efluentes líquidos) de los procesos productivos (Petróleos Mexicanos, 2018), son enviadas a la planta de tratamiento de efluentes, que mediante procesos físicos y biológicos (tratamiento primario, secundario y cloración) son tratados para dar cumplimiento a los parámetros de descarga de los complejos petroquímicos.

### **Planta de Tratamiento de Aguas**

El agua cruda proveniente de las presas (Petróleos Mexicanos, 2018), es pretratada mediante clarificación, filtrado y cloración; parte de esta agua pretratada se envía a la planta de tratamiento de agua, la cual es puesta en contacto con unidades de desmineralización para poder proporcionar esta agua a las calderas de vapor y así evitar incrustaciones en tuberías u oxidación en calderas y otros equipos.

## **Capítulo II. Marco metodológico para el desarrollo del Modelo de Optimización de los procesos de Etileno (MOETI)**

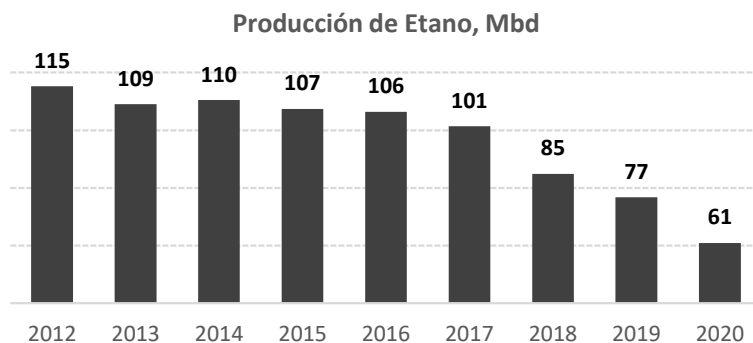
Dentro de las actividades primordiales que debe atender Petróleos Mexicanos se encuentra la elaboración de los Programas Operativos y Financieros de las Empresas Productivas del Estado Subsidiarias en conformidad con el artículo 127, fracción V y al artículo 3, fracción XXIX del Estatuto Orgánico de Petróleos Mexicanos, donde señala que la programación operativa debe contener un desglose mensual de 18 meses, programación que antes de la actualización al Estatuto se realizaba con una proyección a 12 meses. Esta actividad tiene como objetivo mantener una congruencia entre la producción y la venta de productos; así como, desarrollar una estrategia operativa y comercial a corto plazo, que beneficie los resultados económicos de Pemex en su conjunto y que haga frente a las fluctuaciones del mercado.

Estos impactos que van desde la devaluación del crudo, hasta un cambio cultural en materia ambiental, propician la necesidad de contar con elementos que brinden soporte operativo y permitan realizar escenarios bajo diferentes premisas económicas, para así obtener resultados en un mínimo de tiempo posible (2 días), incrementando el tiempo de análisis sobre el impacto operativo y económico que representaría la toma de ciertas decisiones, desde ajustes en el manejo de insumos y productos, la aprobación de proyectos, asociaciones, salidas de operación de plantas, entre otras.

Así también, es importante mencionar que estas herramientas deben ser flexibles en su manejo; razón por la que el SA fue desarrollado en formato Excel®, pues es una aplicación de uso común que asegura su uso, independientemente del sitio en el que se encuentre el usuario, y con una curva de aprendizaje menor en comparación al uso del modelo de optimización, pero con la desventaja de requerir una cantidad de tiempo indefinida para llevar a cabo un estudio de sensibilidad óptimo, aunado a un margen de error mayor; siendo así la forma en la que el SA y el MOETI se complementan en la ejecución eficiente de las tareas.

### **II.1. Desarrollo del Modelo Matemático**

Hablando específicamente de los procesos de etileno, la disponibilidad de materia prima (etano) se ha visto disminuida con el paso de los años (ver Fig. 15), debido a la propia declinación de los pozos de petróleo y gas natural y la baja confiabilidad operativa de los procesos de obtención de líquidos del gas, criogénicos; aunado a que, al ser Petróleos Mexicanos el único productor de esta materia, se encuentra obligado a satisfacer la demanda de etano de sus propios procesos; así como, de la empresa petroquímica Braskem Idesa, con quien adquirió un contrato con vigencia de 20 años, iniciando en marzo de 2016, por el suministro de 66 Mbd (3,757 td) de etano, con un rango mínimo operativo de 46.2 Mbd (2,630 td), en cuyo caso de no cumplir con el total del flujo contratado, se deberá pagar una penalización aproximada equivalente al 200% el precio del etano nacional, por cada barril faltante (López Obrador, 2020).



**Figura 15.** Producción anual de etano 2012 a 2019 y promedio enero-octubre 2020. Fuente: Base de Datos Institucional de Petróleos Mexicanos, 2020.

El desarrollo del modelo matemático parte del establecimiento de un escenario base que tiene por objetivo evaluar los diferentes escenarios que sustenten la viabilidad de las operaciones de los procesos de etileno y a su vez, soporten la ubicación de puntos de equilibrio que satisfagan las obligaciones contractuales. Iniciando este proceso con la definición del escenario base, que considerará un nivel de proceso basado en la capacidad máxima de producción de los principales productos, es decir, óxido de etileno y polietilenos alta, baja y lineal de baja; siendo necesario mapear los balances de materia en cada una de las plantas de proceso; así como, las transferencias de producto entre ellas. Los rendimientos de operación y los factores de consumo en los diferentes procesos de etileno se calibrarán con base en un promedio estadístico del periodo enero 2017 a julio 2020; se contempla una capacidad máxima de consumo de 800 td de etano importado y 270 td de propano y para el caso de la sensibilidad económica, se empleará el conjunto de precios programados para el ejercicio anual de 2020. Todo esto con el fin de determinar las variables de decisión y las restricciones con las que se regirá el modelo base.

Continuando con el desarrollo de los balances de materia en las plantas de proceso, se realiza una esquematización mediante diagramas de bloques, que para su lectura se utiliza la Tabla 4 y la sección de Nomenclatura.

**Tabla 4.** Nomenclatura empleada en la elaboración de los diagramas de bloques.

	La Cangrejera	Morelos
<b>Complejo</b>	QC	QM
<b>Insumos</b>	Identificados por un recuadro color café y con las siglas del nombre del insumo, agua AGG, para el caso de las materias primas, Etano "E1G", propano "P1I": G: Nacional I: Importación	
<b>Corrientes entrada-salida</b>	Q	R
<b>Corrientes a venta</b>	Recuadros de color verde, algunos con las siglas SL	
<b>Corrientes de transferencia</b>	Recuadros de color azul oscuro	

<b>Plantas de proceso</b>	Identificadas con un recuadro color azul y etiquetando con las siglas del producto principal, seguido de la letra del complejo en el que se localice el proceso, "ETL-q1", óxido de etileno "OXE-r2"	ETL-q1
<b>Mezcladores</b>	Recuadro de color amarillo identificado por la letra de la corriente del complejo	Q02
<b>Divisores</b>	Recuadro de color gris, identificado con las siglas DV	DV4-qd

### Balances de materia y Matrices de rendimientos, Complejo Petroquímico La Cangrejera (CQ)

Apoyado de la Tabla 4, el diagrama de bloques en la Fig. 16 muestra las corrientes de entrada y salida, mezcladores y la planta de proceso para la obtención de etileno.

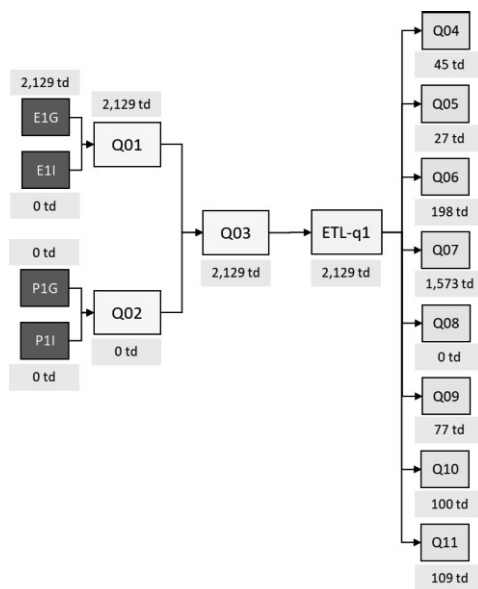


Figura 16. Diagrama de bloques con las entradas y salidas a proceso en la planta de Etileno en el complejo petroquímico La Cangrejera.

#### Mezclador Etano (Q01)

$$E_{1G} + E_{1I} = Q_{01} \quad (2.1)$$

$$Q_{01} \geq 550$$

$$Q_{01} \leq 2,129$$

#### Mezclador Propano (Q02)

En el desarrollo del modelo se contempla la posibilidad de alimentar propano a la carga, que puede ser la mezcla de materia nacional e importada; razón por la cual se indica la existencia de una

corriente  $Q_{02}$ , pero para efectos del caso base, no se considera esta variable debido a que la información reportada en la Base de Datos Institucional BDI, señala que la participación de esta variable durante 2019 ha sido mínima.

$$P_{1G} + P_{1I} = Q_{02}$$

$$Q_{02} = 0$$

*Mezclador de alimentación a la Planta de Etileno (Q03)*

$$Q_{01} + Q_{02} = Q_{03} \quad (2.2)$$

### Planta de Etileno (ETL-q1)

*Balace de materia de la Planta de Etileno (ETL-q1)*

$$Q_{03} = Q_{04} + Q_{05} + Q_{06} + Q_{07} + Q_{08} + Q_{09} + Q_{10} + Q_{11} \quad (2.3)$$

$$Q_{04} + Q_{05} + Q_{06} + Q_{07} + Q_{08} + Q_{09} + Q_{10} + Q_{11} \leq 2,129 \quad (2.4)$$

**Tabla 5.** Matriz de rendimientos de producción de la planta de etileno, complejo La Cangrejera.

Productos	Reactivos									
	$Q_{01}$	$Q_{02}$	$Q_{04}$	$Q_{05}$	$Q_{06}$	$Q_{07}$	$Q_{08}$	$Q_{09}$	$Q_{10}$	$Q_{11}$
$Q_{01}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$Q_{02}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$Q_{04}$	0.0080	0.0620	0	0	0	0	0	0	0	0
$Q_{05}$	0.0124	0.0233	0	0	0	0	0	0	0	0
$Q_{06}$	0.0982	0.0233	0	0	0	0	0	0	0	0
$Q_{07}$	0.7649	0.4514	0	0	0	0	0	0	0	0
$Q_{08}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$Q_{09}$	0.0283	0.1700	0	0	0	0	0	0	0	0
$Q_{10}$	0.0485	0.0300	0	0	0	0	0	0	0	0
$Q_{11}$	0.0397	0.2400	0	0	0	0	0	0	0	0

$$\alpha_{4,1}Q_{01} + \alpha_{4,2}Q_{02} = Q_{04} \quad (2.5)$$

$$Q_{04} \leq 45$$

$\alpha_{4,1}$ = Rendimiento de producción ton de metano/ton de etano

$\alpha_{4,2}$ = Rendimiento de producción ton de metano/ton de propano

$$\alpha_{5,1}Q_{01} + \alpha_{5,2}Q_{02} = Q_{05} \quad (2.6)$$

$$Q_{05} \leq 27$$

$\alpha_{5,1}$ = Rendimiento de producción ton de hidrógeno/ton de etano

$\alpha_{5,2}$ = Rendimiento de producción ton de hidrógeno/ton de propano

$$\alpha_{6,1}Q_{01} + \alpha_{6,2}Q_{02} = Q_{06} \quad (2.7)$$

$$Q_{06} \leq 198$$

$\alpha_{6,1}$ = Rendimiento de producción ton de gas residual/ton de etano

$\alpha_{6,2}$ = Rendimiento de producción ton de gas residual/ton de propano

$$\alpha_{7,1}Q_{01} + \alpha_{7,2}Q_{02} = Q_{07} \quad (2.8)$$

$$Q_{07} \leq 1,573$$

$\alpha_{7,1}$ = Rendimiento de producción ton de etileno/ton de etano

$\alpha_{7,2}$ = Rendimiento de producción ton de etileno/ton de propano

$$\alpha_{8,1}Q_{01} + \alpha_{8,2}Q_{02} = Q_{08}$$

$$Q_{08} = 0$$

$\alpha_{8,1}$ = Rendimiento de producción ton de propileno grado químico/ton de etano

$\alpha_{8,2}$ = Rendimiento de producción ton de propileno grado químico/ton de propano

$$\alpha_{9,1}Q_{01} + \alpha_{9,2}Q_{02} = Q_{09} \quad (2.9)$$

$$Q_{09} \leq 77$$

$\alpha_{9,1}$ = Rendimiento de producción ton de propileno grado polímero/ton de etano

$\alpha_{9,2}$ = Rendimiento de producción ton de propileno grado polímero/ton de propano

$$\alpha_{10,1}Q_{01} + \alpha_{10,2}Q_{02} = Q_{10} \quad (2.10)$$

$$Q_{10} \leq 100$$

$\alpha_{10,1}$ = Rendimiento de producción ton de butano-butadieno/ton de etano

$\alpha_{10,2}$ = Rendimiento de producción ton de butano-butadieno/ton de propano

$$\alpha_{11,1}Q_{01} + \alpha_{11,2}Q_{02} = Q_{11} \quad (2.11)$$

$$Q_{11} \leq 109$$

$\alpha_{11,1}$ = Rendimiento de producción, ton de líquidos de pirólisis/ton de etano

$\alpha_{11,2}$ = Rendimiento de producción, ton de líquidos de pirólisis/ton de propano

Para el balance de materia de los equipos a la salida de la planta de etileno, ver Anexo A2.1

*Divisor para la distribución de Hidrógeno (DV1-qa)*

$$Q_{05} = Q_{15} + Q_{16} \quad (2.12)$$

*Divisor para la distribución de Metano (DV2-qb)*

$$Q_{04} = Q_{17} + Q_{18} \quad (2.13)$$



Mezclador de gases a servicios principales (Q19)

$$X_{01} + Q_{06} + Q_{16} + Q_{18} = Q_{19} \quad (2.14)$$

Divisor para la distribución de Propileno (DV3-qc)

$$Q_{08} = Q_{20} + Q_{21}$$

Mezclador de etileno (MD1-q9)

$$Q_{07} + R_{63} = Q_{12} + Q_{13} + Q_{14} \quad (2.15)$$

Distribución de etileno en el QC

$$Q_{14} = Q_{14OX} + Q_{14PBD} + Q_{14CAN} \quad (2.16)$$

### Plantas de Oxígeno (OX1-q6 y OX2-q7)

El diagrama de bloques en la Fig. 17, señala de manera esquemática las materias primas necesarias para la obtención de los productos de la planta de oxígeno, que son base para los balances de materia que se indicarán a continuación:

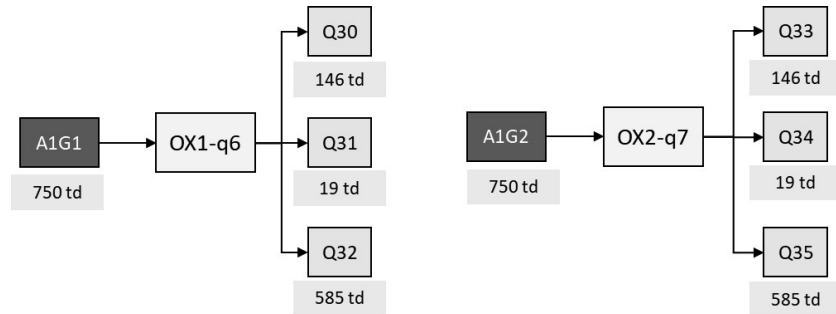


Figura 17. Diagrama de bloques con las entradas y salidas de los trenes 1 y 2, correspondientes a la planta de Oxígeno en el complejo petroquímico La Cangrejera.

#### Planta de Oxígeno - Tren 1 (OX1-q6)

$$A_{1G1} = Q_{30} + Q_{31} + Q_{32} \quad (2.17)$$

$$A_{1G1} \leq 750$$

#### Planta de Oxígeno - Tren 2 (OX2-q7)

$$A_{1G2} = Q_{33} + Q_{34} + Q_{35} \quad (2.18)$$

$$A_{1G2} \leq 750$$

Para el balance de materia de los equipos a la salida de la planta de oxígeno, ver Fig. A2.2

Mezclador de Oxígeno (Q36)

$$Q_{30} + Q_{33} + O_{1G} + R_{16} = Q_{36} \quad (2.19)$$

Distribución de Oxígeno

$$Q_{36} = Q_{36M} + Q_{36OX} + Q_{36X} \quad (2.20)$$

Mezclador de Nitrógeno (Q37)

$$Q_{31} + Q_{34} + R_{62} = Q_{37} \quad (2.21)$$

Divisor para la distribución de Nitrógeno (DV4-qd)

$$Q_{37} = Q_{26} + Q_{27} + Q_{28} + Q_{29} \quad (2.22)$$

$$Q_{29} = Q_{29M} + Q_{29O} \quad (2.23)$$

Mezclador de Gas Residual (Q38)

$$Q_{32} + Q_{35} + Q_{29O} = Q_{38} \quad (2.24)$$

### Planta de Óxido de Etileno (OXE-q2)

Dentro de la planta de óxido de etileno en el Complejo Cangrejera el principal producto a obtener es el óxido; mientras que los glicoles son subproductos derivados de las diferentes reacciones. Los balances de materia de dicha planta se esquematizan en el diagrama de bloques de la Fig. 18.

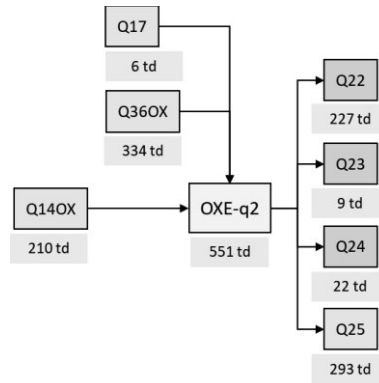


Figura 18. Diagrama de bloques con las entradas y salidas al proceso de la planta de Óxido de etileno en el complejo petroquímico La Cangrejera.

Balace de materia de la Planta de Óxido de Etileno (OXE-q2)

$$Q_{14OX} + Q_{17} + Q_{36OX} = Q_{22} + Q_{23} + Q_{24} + Q_{25} \quad (2.25)$$

$$Q_{22} + Q_{23} + Q_{24} + Q_{25} \leq 551 \quad (2.26)$$

**Tabla 6.** Matriz de rendimientos de producción de la planta de Óxido de etileno, complejo La Cangrejera.

Productos	Reactivos						
	$Q_{17}$	$Q_{140X}$	$Q_{360X}$	$Q_{22}$	$Q_{23}$	$Q_{24}$	$Q_{25}$
$Q_{17}$	0	0	0	0	0	0	0
$Q_{140X}$	0	0	0	0	0	0	0
$Q_{360X}$	0	0	0	0	0	0	0
$Q_{22}$	35.376	1.0798	0.6780	0	0	0	0
$Q_{23}$	1.3294	0.0406	0.0255	0	0	0	0
$Q_{24}$	3.4712	0.1060	0.0665	0	0	0	0
$Q_{25}$	45.759	1.3967	0.8771	0	0	0	0

$$\alpha_{22,17}Q_{17} + \alpha_{22,14}Q_{140X} + \alpha_{22,36}Q_{360X} = Q_{22} \quad (2.27)$$

$$Q_{22} \leq 227$$

$\alpha_{22,17}$ = Rendimiento de producción ton de óxido de etileno/ton de metano

$\alpha_{22,14}$ = Rendimiento de producción ton de óxido de etileno/ton de etileno

$\alpha_{22,36}$ = Rendimiento de producción ton de óxido de etileno/ton de oxígeno

$$\alpha_{23,17}Q_{17} + \alpha_{23,14}Q_{140X} + \alpha_{23,36}Q_{360X} = Q_{23} \quad (2.28)$$

$$Q_{23} \leq 9$$

$\alpha_{23,17}$ = Rendimiento de producción ton de óxido de etileno/ton de metano

$\alpha_{23,14}$ = Rendimiento de producción ton de óxido de etileno/ton de etileno

$\alpha_{23,36}$ = Rendimiento de producción ton de óxido de etileno/ton de oxígeno

$$\alpha_{24,17}Q_{17} + \alpha_{24,14}Q_{140X} + \alpha_{24,36}Q_{360X} = Q_{24} \quad (2.29)$$

$$Q_{24} \leq 22$$

$\alpha_{24,17}$ = Rendimiento de producción ton de óxido de etileno/ton de metano

$\alpha_{24,14}$ = Rendimiento de producción ton de óxido de etileno/ton de etileno

$\alpha_{24,36}$ = Rendimiento de producción ton de óxido de etileno/ton de oxígeno

$$\alpha_{25,17}Q_{17} + \alpha_{25,14}Q_{140X} + \alpha_{25,36}Q_{360X} = Q_{25} \quad (2.30)$$

$$Q_{25} \leq 293$$

$\alpha_{25,17}$ = Rendimiento de producción ton de óxido de etileno/ton de metano

$\alpha_{25,14}$ = Rendimiento de producción ton de óxido de etileno/ton de etileno

$\alpha_{25,36}$ = Rendimiento de producción ton de óxido de etileno/ton de oxígeno

### Plantas de Polietileno de Baja Densidad (PB1-q3, PB2-q4 y PB3-q5)

$$Q_{14PBD} = Q_{14PBDT1} + Q_{14PBDT2} + Q_{14PBDT3} \quad (2.31)$$

### Planta de Polietileno de Baja Densidad (PB1-q3)

Balance de materia de la Planta de Polietileno de Baja Densidad (PB1-q3)

El siguiente diagrama en bloques de la Fig. 19, da seguimiento al balance de materia que da lugar en el tren 1 de PEBD.

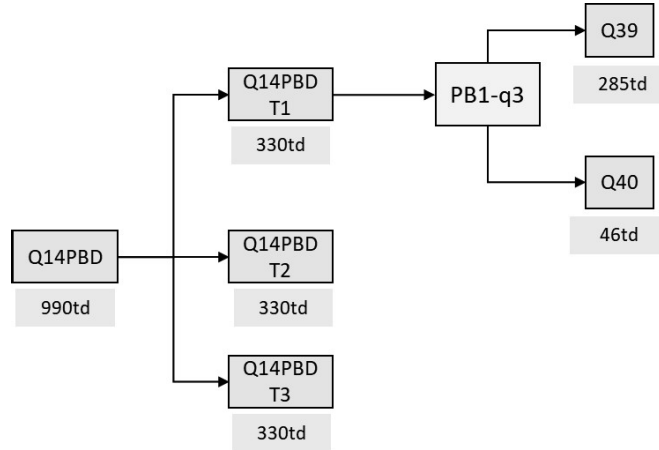


Figura 19. Diagrama de bloques con las entradas y salidas en el proceso de Polietileno de Baja Densidad, tren 1, complejo petroquímico La Cangrejera.

$$Q_{14PBDT1} = Q_{39} + Q_{40} \quad (2.32)$$

$$Q_{39} + Q_{40} \leq 330 \quad (2.33)$$

Tabla 7. Matriz de rendimientos para la obtención de PEBD puro en la planta de PEBD, Tren 1.

Productos	Reactivos		
	$Q_{14PBDT1}$	$Q_{39}$	$Q_{40}$
$Q_{14PBDT1}$	0	0	0
$Q_{39}$	0.8618	0	0
$Q_{40}$	0.1382	0	0

$$\alpha_{39,14}Q_{14PBDT1} + \alpha_{40,14}Q_{14PBDT1} = Q_{39} + Q_{40} \quad (2.34)$$

$$Q_{39} \leq 285$$

$$Q_{40} \leq 46$$

$\alpha_{39,14}$ = Rendimiento de producción tren 1, ton de PEBD puro/ton de etileno

$\alpha_{40,14}$ = Rendimiento de producción tren 1, ton de gas de purga/ton de etileno

Para el balance de materia a la salida del tren 1 de la planta de polietileno de baja densidad, ver Fig. A2.3

### Planta de formulación y aditivación (PF1-qe)

*Balance de materia del tren 1 de formulación y aditivación (PF1-qe)*

$$Q_{39} = Q_{39P1} + Q_{39X1} + Q_{3921} + Q_{3941} \quad (2.35)$$

$$Q_{55TP1} + Q_{55TX1} + Q_{55T21} + Q_{55T41} = Q_{55T1} \quad (2.36)$$

$$Q_{39P1} + C_{P1} = Q_{47T1} + Q_{51T1} + Q_{55P1} \quad (2.37)$$

$$Q_{39X1} + C_{X1} = Q_{48T1} + Q_{52T1} + Q_{55X1}$$

$$Q_{3921} + C_{21} = Q_{49T1} + Q_{53T1} + Q_{5521}$$

$$Q_{3941} + C_{41} = Q_{50T1} + Q_{54T1} + Q_{5541}$$

$$Q_{47T1} + Q_{48T1} + Q_{49T1} + Q_{50T1} + Q_{51T1} + Q_{52T1} + Q_{53T1} + Q_{54T1} + Q_{55T1} \leq 285 \quad (2.38)$$

**Tabla 8.** Matriz de rendimientos de producción y formulación de PEBD, Tren 1.

Productos	Reactivos				
	$Q_{39}$	$C_i$	$Q_i$	$Q_j$	$Q_z$
$Q_{39}$	0	0	0	0	0
$C_i$	0	0	0	0	0
$Q_i$	0.9350	0	0	0	0
$Q_j$	0	0	0.0630	0	0
$Q_{55T1}$	0	0	0.0020	0	0

donde:

$i=47$  al  $50$ ,  $j=51$  al  $54$  y  $z$ =barreduras de los PEBD del  $47$  al  $50$  para el tren 1.

**Tabla 9.** Estrategia de comercialización en la elaboración de los diferentes grados de PEBD, Tren 1.

Productos, $Q_i$	% producción
$Q_{47T1}$	100
$Q_{48T1}$	0
$Q_{49T1}$	0
$Q_{50T1}$	0

Con base en la estrategia comercial, se observará que algunos de los rendimientos de producción en ciertos productos será cero, debido a que su elaboración depende del nivel de demanda en el mercado; para efectos del caso base, se consideran los porcentajes de demanda proporcionados por el área operativa.

$$\alpha_{47,39}Q_{39P1} + \alpha_{47,P1}C_{P1} = Q_{47T1} \quad (2.39)$$

$$Q_{47T1} \leq 267$$

$$\alpha_{51,47}Q_{47T1} + \alpha_{55,47}Q_{47T1} = Q_{51T1} + Q_{55P1} \quad (2.40)$$

$$Q_{51T1} \leq 18$$

$$Q_{55P1} \leq 1$$

$\alpha_{47,39}$ = Rendimiento de producción tren 1 ton de PEBD tipo 20020P/ton de PEBD puro

$\alpha_{47,P1}$ = Rendimiento de producción tren 1 ton de PEBD tipo 20020P/ton de concentrado tipo 20020P

$\alpha_{51,47}$ = Rendimiento de producción tren 1 ton de segundas de PEBD tipo 20020P/ton de PEBD tipo 20020P

$\alpha_{55,47}$ = Rendimiento de producción tren 1 ton de barreduras de PEBD tipo 20020P/ton de PEBD tipo 20020P

$$\alpha_{48,39}Q_{39X1} + \alpha_{48,X1}C_{X1} = Q_{48T1}$$

$$Q_{48T1} = 0$$

$$\alpha_{52,48}Q_{48T1} + \alpha_{55,48}Q_{48T1} = Q_{52T1} + Q_{55X1}$$

$$Q_{52T1} = 0$$

$$Q_{55X1} = 0$$

$\alpha_{48,39}$ = Rendimiento de producción tren 1 ton de PEBD tipo 20020X/ton de PEBD puro

$\alpha_{48,X1}$ = Rendimiento de producción tren 1 ton de PEBD tipo 20020X/ton de concentrado tipo 20020X

$\alpha_{52,48}$ = Rendimiento de producción tren 1 ton de segundas de PEBD tipo 20020X/ton de PEBD tipo 20020X

$\alpha_{55,48}$ = Rendimiento de producción tren 1 ton de barreduras de PEBD tipo 20020X/ton de PEBD tipo 20020X

$$\alpha_{49,39}Q_{3921} + \alpha_{49,21}C_{21} = Q_{49T1}$$

$$Q_{49T1} = 0$$

$$\alpha_{53,49}Q_{49T1} + \alpha_{55,49}Q_{49T1} = Q_{53T1} + Q_{5521}$$

$$Q_{53T1} = 0$$

$$Q_{5521} = 0$$

$\alpha_{49,39}$ = Rendimiento de producción tren 1 ton de PEBD tipo 21002/ton de PEBD puro

$\alpha_{49,21}$ = Rendimiento de producción tren 1 ton de PEBD tipo 21002/ton de concentrado tipo 21002

$\alpha_{53,49}$ = Rendimiento de producción tren 1 ton de segundas de PEBD tipo 21002/ton de PEBD tipo 21002

$\alpha_{55,49}$ = Rendimiento de producción tren 1 ton de barreduras de PEBD tipo 21002/ton de PEBD tipo 21002

$$\alpha_{50,39}Q_{3941} + \alpha_{50,41}C_{41} = Q_{50T1}$$

$$Q_{50T1} = 0$$

$$\alpha_{54,50}Q_{50T1} + \alpha_{55,50}Q_{50T1} = Q_{54T1} + Q_{5541}$$

$$Q_{54T1} = 0$$

$$Q_{5541} = 0$$

$\alpha_{50,39}$ = Rendimiento de producción tren 1 ton de PEBD tipo 22004/ton de PEBD puro

$\alpha_{50,41}$ = Rendimiento de producción tren 1 ton de PEBD tipo 22004/ton de concentrado tipo 22004

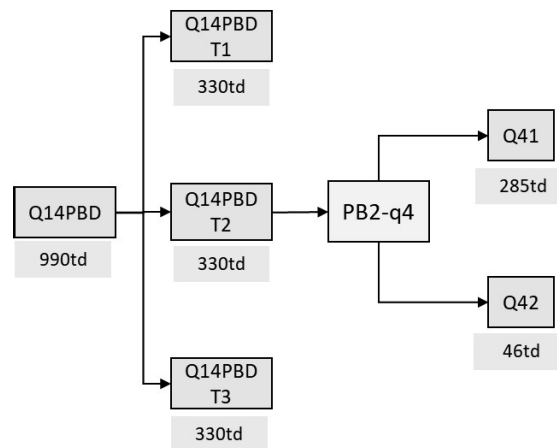
$\alpha_{54,50}$ = Rendimiento de producción tren 1 ton de segundas de PEBD tipo 22004/ton de PEBD tipo 21004

$\alpha_{55,50}$ = Rendimiento de producción tren 1 ton de barreduras de PEBD tipo 22004/ton de PEBD tipo 22004

### Planta de Polietileno de Baja Densidad (PB2-q4)

#### Balace de materia de la Planta de Polietileno de Baja Densidad (PB2-q4)

El siguiente diagrama en bloques de la Fig. 20, da seguimiento al balace de materia que da lugar en el tren 2 de PEBD.



**Figura 20.** Diagrama de bloques con las entradas y salidas en el proceso de Polietileno de Baja Densidad, tren 2, complejo petroquímico La Cangrejera.

$$Q_{14PBDT2} = Q_{41} + Q_{42} \quad (2.41)$$

$$Q_{41} + Q_{42} \leq 330 \quad (2.42)$$

**Tabla 10.** Matriz de rendimientos para la obtención de PEBD puro en la planta de PEBD, Tren 2.

Productos	Reactivos		
	$Q_{14PBDT2}$	$Q_{41}$	$Q_{42}$
$Q_{14PBDT2}$	0	0	0
$Q_{41}$	0.8618	0	0
$Q_{42}$	0.1382	0	0

$$\alpha_{41,14}Q_{14PBDT2} + \alpha_{42,14}Q_{14PBDT2} = Q_{41} + Q_{42} \quad (2.43)$$

$$Q_{41} \leq 285$$

$$Q_{42} \leq 46$$

$\alpha_{41,14}$ = Rendimiento de producción tren 2, ton de PEBD puro/ton de etileno

$\alpha_{42,14}$ = Rendimiento de producción tren 2, ton de gas de purga/ton de etileno

Para el balance de materia a la salida del tren 2 de la planta de polietileno de baja densidad, ver Fig. A2.4

### Planta de formulación y aditivación (PF2-qf)

*Balance de materia del tren 2 de formulación y aditivación (PF2-qf)*

$$Q_{41} = Q_{41P2} + Q_{41X2} + Q_{4122} + Q_{4142} \quad (2.44)$$

$$Q_{55P2} + Q_{55X2} + Q_{5522} + Q_{5542} = Q_{55T2} \quad (2.45)$$

$$Q_{41P2} + C_{P2} = Q_{47T2} + Q_{51T2} + Q_{55P2}$$

$$Q_{41X2} + C_{X2} = Q_{48T2} + Q_{52T2} + Q_{55X2}$$

$$Q_{4122} + C_{22} = Q_{49T2} + Q_{53T2} + Q_{5522} \quad (2.46)$$

$$Q_{4142} + C_{42} = Q_{50T2} + Q_{54T2} + Q_{5542} \quad (2.47)$$

$$Q_{47T2} + Q_{48T2} + Q_{49T2} + Q_{50T2} + Q_{51T2} + Q_{52T2} + Q_{53T2} + Q_{54T2} + Q_{55T2} \leq 285 \quad (2.48)$$

**Tabla 11.** Matriz de rendimientos de producción y formulación de PEBD, Tren 2.

Productos	Reactivos						
	$Q_{41}$	$C_i$	$Q_{47T2}$	$Q_i$	$Q_{51T2}$	$Q_j$	$Q_{55T2}$
$Q_{41}$	0	0	0	0	0	0	0
$C_i$	0	0	0	0	0	0	0
$Q_{47T2}$	0.9350	0.0600	0	0	0	0	0
$Q_i$	0.9350	0	0	0	0	0	0
$Q_{51T2}$	0	0	0.0630	0.0630	0	0	0
$Q_j$	0	0	0.0630	0.0630	0	0	0
$Q_{55T2}$	0	0	0.0020	0.0020	0	0	0

Donde:

$i=48$  al  $50$  y  $j=52$  al  $54$  para el tren 2.

**Tabla 12.** Estrategia de comercialización en la elaboración de los diferentes grados de PEBD, Tren 2.

Productos, $Q_i$	% producción
$Q_{47T2}$	0
$Q_{48T2}$	0
$Q_{49T2}$	30
$Q_{50T2}$	70

Con base en la estrategia comercial:

$$\alpha_{47,41} Q_{41P2} + \alpha_{47,P2} C_{P2} = Q_{47T2}$$



$$Q_{47T2} = 0$$

$$\alpha_{51,47}Q_{47T2} + \alpha_{55,47}Q_{47T2} = Q_{51T2} + Q_{55P2}$$

$$Q_{51T2} = 0$$

$$Q_{55P2} = 0$$

$\alpha_{47,41}$ = Rendimiento de producción tren 2 ton de PEBD tipo 20020P/ton de PEBD puro

$\alpha_{47,P2}$ = Rendimiento de producción tren 2 ton de PEBD tipo 20020P/ton de concentrado tipo 20020P

$\alpha_{51,47}$ = Rendimiento de producción tren 2 ton de segundas de PEBD tipo 20020P/ton de PEBD tipo 20020P

$\alpha_{55,47}$ = Rendimiento de producción tren 2 ton de barreduras de PEBD tipo 20020P/ton de PEBD tipo 20020P

$$\alpha_{48,41}Q_{41X2} + \alpha_{48,X2}C_{X2} = Q_{48T2}$$

$$Q_{48T2} = 0$$

$$\alpha_{52,48}Q_{48T2} + \alpha_{55,48}Q_{48T2} = Q_{52T2} + Q_{55X2}$$

$$Q_{52T2} = 0$$

$$Q_{55X2} = 0$$

$\alpha_{48,41}$ = Rendimiento de producción tren 2 ton de PEBD tipo 20020X/ton de PEBD puro

$\alpha_{48,X2}$ = Rendimiento de producción tren 2 ton de PEBD tipo 20020X/ton de concentrado tipo 20020X

$\alpha_{52,48}$ = Rendimiento de producción tren 2 ton de segundas de PEBD tipo 20020X/ton de PEBD tipo 20020X

$\alpha_{55,48}$ = Rendimiento de producción tren 2 ton de barreduras de PEBD tipo 20020X/ton de PEBD tipo 20020X

$$\alpha_{49,41}Q_{4122} + \alpha_{49,22}C_{22} = Q_{49T2} \quad (2.49)$$

$$Q_{49T2} \leq 80$$

$$\alpha_{53,49}Q_{49T2} + \alpha_{55,49}Q_{49T2} = Q_{53T2} + Q_{5522} \quad (2.50)$$

$$Q_{53T2} \leq 5$$

$$Q_{5522} \leq 0.17$$

$\alpha_{49,41}$ = Rendimiento de producción tren 2 ton de PEBD tipo 21002/ton de PEBD puro

$\alpha_{49,22}$ = Rendimiento de producción tren 2 ton de PEBD tipo 21002/ton de concentrado tipo 21002

$\alpha_{53,49}$ = Rendimiento de producción tren 2 ton de segundas de PEBD tipo 21002/ton de PEBD tipo 21002

$\alpha_{55,49}$ = Rendimiento de producción tren 2 ton de barreduras de PEBD tipo 21002/ton de PEBD tipo 21002

$$\alpha_{50,41}Q_{4142} + \alpha_{50,42}C_{42} = Q_{50T2} \quad (2.51)$$

$$Q_{50T2} \leq 187$$

$$\alpha_{54,50}Q_{50T2} + \alpha_{55,50}Q_{50T2} = Q_{54T2} + Q_{5542} \quad (2.52)$$

$$Q_{54T2} \leq 13$$

$$Q_{5542} \leq 0.4$$

$\alpha_{50,41}$ = Rendimiento de producción tren 2 ton de PEBD tipo 22004/ton de PEBD puro

$\alpha_{50,42}$ = Rendimiento de producción tren 2 ton de PEBD tipo 22004/ton de concentrado tipo 22004

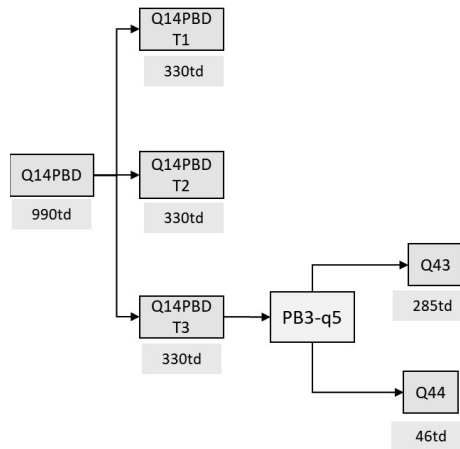
$\alpha_{54,50}$ = Rendimiento de producción tren 2 ton de segundas de PEBD tipo 22004/ton de PEBD tipo 21004

$\alpha_{55,50}$ = Rendimiento de producción tren 2 ton de barreduras de PEBD tipo 22004/ton de PEBD tipo 22004

### Planta de Polietileno de Baja Densidad (PB3-q5)

#### Balance de materia de la Planta de Polietileno de Baja Densidad (PB3-q5)

El siguiente diagrama en bloques de la Fig. 21, da seguimiento al balance de materia que da lugar en el tren 3 de PEBD.



**Figura 21.** Diagrama de bloques con las entradas y salidas en el proceso de Polietileno de Baja Densidad, tren 3, complejo petroquímico La Cangrejera.

$$Q_{14PBDT3} = Q_{43} + Q_{44} \quad (2.53)$$

$$Q_{43} + Q_{44} \leq 330 \quad (2.54)$$

**Tabla 13.** Matriz de rendimientos para la obtención de PEBD puro en la planta de PEBD, Tren 3.

Productos	Reactivos		
	$Q_{14PBDT3}$	$Q_{43}$	$Q_{44}$
$Q_{14PBDT3}$	0	0	0
$Q_{43}$	0.8618	0	0
$Q_{44}$	0.1382	0	0

$$\alpha_{43,14}Q_{14PBDT3} + \alpha_{44,14}Q_{14PBDT3} = Q_{43} + Q_{44} \quad (2.55)$$

$$Q_{43} \leq 285$$

$$Q_{44} \leq 46$$

$\alpha_{43,14}$ = Rendimiento de producción tren 3, ton de PEBD puro/ton de etileno

$\alpha_{44,14}$ = Rendimiento de producción tren 3, ton de gas de purga/ton de etileno

Para el balance de materia a la salida del tren 3 de la planta de polietileno de baja densidad, ver Fig. A2.5

### Planta de formulación y aditivación (PF3-qg)

*Balance de materia del tren 3 de formulación y aditivación (PF3-qg)*

$$Q_{43} = Q_{43P3} + Q_{43X3} + Q_{4323} + Q_{4343} \quad (2.56)$$

$$Q_{55P3} + Q_{55X3} + Q_{5523} + Q_{5543} = Q_{55T3} \quad (2.57)$$

$$Q_{43P3} + C_{P3} = Q_{47T3} + Q_{51T3} + Q_{55P3} \quad (2.58)$$

$$Q_{43X3} + C_{X3} = Q_{48T3} + Q_{52T3} + Q_{55X3} \quad (2.59)$$

$$Q_{4323} + C_{23} = Q_{49T3} + Q_{53T3} + Q_{5523}$$

$$Q_{4343} + C_{43} = Q_{50T3} + Q_{54T3} + Q_{5543}$$

$$Q_{47T3} + Q_{48T3} + Q_{49T3} + Q_{50T3} + Q_{51T3} + Q_{52T3} + Q_{53T3} + Q_{54T3} + Q_{55T3} \leq 294 \quad (2.60)$$

**Tabla 14.** Matriz de rendimientos de producción y formulación de PEBD, Tren 3.

Productos	Reactivos						
	$Q_{43}$	$C_i$	$Q_{47T3}$	$Q_i$	$Q_{51T3}$	$Q_j$	$Q_{55T3}$
$Q_{43}$	0	0	0	0	0	0	0
$C_i$	0	0	0	0	0	0	0
$Q_{47T3}$	0.9350	0.0600	0	0	0	0	0
$Q_i$	0.9350	0	0	0	0	0	0
$Q_{51T3}$	0	0	0.0630	0.0630	0	0	0
$Q_j$	0	0	0.0630	0.0630	0	0	0
$Q_{55T3}$	0	0	0.0020	0.0020	0	0	0

Donde:

$i=48$  al  $50$  y  $j=52$  al  $54$  para el tren 3.

**Tabla 15.** Estrategia de comercialización en la elaboración de los diferentes grados de PEBD, Tren 3.

Productos, $Q_i$	% producción
$Q_{47T3}$	50
$Q_{48T3}$	50
$Q_{49T3}$	0
$Q_{50T3}$	0

Con base en la estrategia comercial:

$$\alpha_{47,43}Q_{43P3} + \alpha_{47,P3}C_{P3} = Q_{47T3} \quad (2.61)$$

$$Q_{47T3} \leq 142$$

$$\alpha_{51,47}Q_{47T3} + \alpha_{55,47}Q_{47T3} = Q_{51T3} + Q_{55P3} \quad (2.62)$$

$$Q_{51T3} \leq 10$$

$$Q_{55P3} \leq 0.3$$

$\alpha_{47,43}$ = Rendimiento de producción tren 3 ton de PEBD tipo 20020P/ton de PEBD puro

$\alpha_{47,P3}$ = Rendimiento de producción tren 3 ton de PEBD tipo 20020P/ton de concentrado tipo 20020P

$\alpha_{51,47}$ = Rendimiento de producción tren 3 ton de segundas de PEBD tipo 20020P/ton de PEBD tipo 20020P

$\alpha_{55,47}$ = Rendimiento de producción tren 3 ton de barreduras de PEBD tipo 20020P/ton de PEBD tipo 20020P

$$\alpha_{48,43}Q_{43X3} + \alpha_{48,X3}C_{X3} = Q_{48T3} \quad (2.63)$$

$$Q_{48T3} \leq 133$$

$$\alpha_{52,48}Q_{48T3} + \alpha_{55,48}Q_{48T3} = Q_{52T3} + Q_{55X3} \quad (2.64)$$

$$Q_{52T3} \leq 9$$

$$Q_{55X3} \leq 0.3$$

$\alpha_{48,43}$ = Rendimiento de producción tren 3 ton de PEBD tipo 20020X/ton de PEBD puro

$\alpha_{48,X3}$ = Rendimiento de producción tren 3 ton de PEBD tipo 20020X/ton de concentrado tipo 20020X

$\alpha_{52,48}$ = Rendimiento de producción tren 3 ton de segundas de PEBD tipo 20020X/ton de PEBD tipo 20020X

$\alpha_{55,48}$ = Rendimiento de producción tren 3 ton de barreduras de PEBD tipo 20020X/ton de PEBD tipo 20020X

$$\alpha_{49,43}Q_{4323} + \alpha_{49,23}C_{23} = Q_{49T3}$$

$$Q_{49T3} = 0$$

$$\alpha_{53,49}Q_{49T3} + \alpha_{55,49}Q_{49T3} = Q_{53T3} + Q_{5523}$$

$$Q_{53T3} = 0$$

$$Q_{5523} = 0$$

$\alpha_{49,43}$ = Rendimiento de producción tren 3 ton de PEBD tipo 21002/ton de PEBD puro

$\alpha_{49,23}$ = Rendimiento de producción tren 3 ton de PEBD tipo 21002/ton de concentrado tipo 21002

$\alpha_{53,49}$ = Rendimiento de producción tren 3 ton de segundas de PEBD tipo 21002/ton de PEBD tipo 21002

$\alpha_{55,49}$ = Rendimiento de producción tren 3 ton de barreduras de PEBD tipo 21002/ton de PEBD tipo 21002

$$\alpha_{50,43}Q_{4343} + \alpha_{50,C43}C_{43} = Q_{50T3}$$

$$Q_{50T3} = 0$$

$$\alpha_{54,50}Q_{50T3} + \alpha_{55,50}Q_{50T3} = Q_{54T3} + Q_{5543}$$

$$Q_{54T3} = 0$$

$$Q_{5543} = 0$$

$\alpha_{50,43}$ = Rendimiento de producción tren 3 ton de PEBD tipo 22004/ton de PEBD puro

$\alpha_{50,C43}$ = Rendimiento de producción tren 3 ton de PEBD tipo 22004/ton de concentrado tipo 22004

$\alpha_{54,50}$ = Rendimiento de producción tren 3 ton de segundas de PEBD tipo 22004/ton de PEBD tipo 21004

$\alpha_{55,50}$ = Rendimiento de producción tren 3 ton de barreduras de PEBD tipo 22004/ton de PEBD tipo 22004

### Balances de materia y Matrices de rendimientos, Complejo Petroquímico Morelos (QM)

El seguimiento de los balances de materia para la planta de etileno se presenta en la Fig. 22, mediante un diagrama de bloques con las interacciones necesarias a la entrada de la planta de etileno.

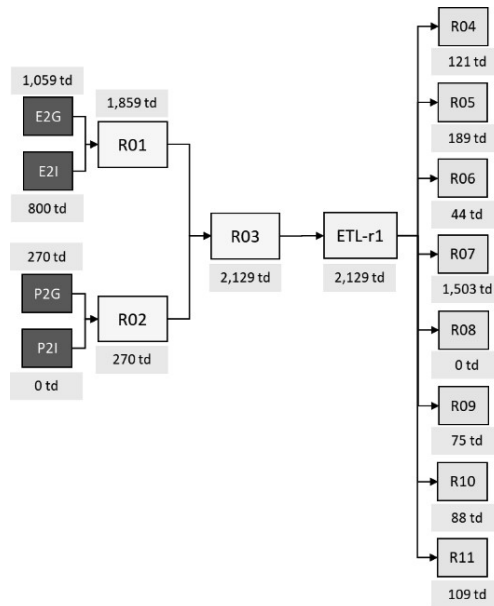


Figura 22. Diagrama de bloques con las entradas y salidas a proceso en la planta de Etileno en el complejo petroquímico Morelos.

#### Mezclador Etano (R01)

$$E_{2G} + E_{2I} = R_{01} \quad (2.65)$$

$$E_{2I} \leq 800$$

$$R_{01} \geq 550$$

$$R_{01} \leq 1,859$$

*Mezclador Propano (R02)*

$$P_{2G} + P_{2I} = R_{02} \quad (2.66)$$

$$R_{02} \geq 0$$

$$R_{02} \leq 270$$

*Mezclador de alimentación a la Planta de Etileno (R03)*

$$R_{01} + R_{02} = R_{03} \quad (2.67)$$

**Planta de Etileno (ETL-r1)**

*Balance de materia de la Planta de Etileno (ETL-r1)*

$$R_{03} = R_{04} + R_{05} + R_{06} + R_{07} + R_{08} + R_{09} + R_{10} + R_{11} \quad (2.68)$$

$$R_{04} + R_{05} + R_{06} + R_{07} + R_{08} + R_{09} + R_{10} + R_{11} \leq 2,129 \quad (2.69)$$

**Tabla 16.** Matriz de rendimientos de producción de la planta de etileno, complejo Morelos.

Productos	Reactivos									
	$R_{01}$	$R_{02}$	$R_{04}$	$R_{05}$	$R_{06}$	$R_{07}$	$R_{08}$	$R_{09}$	$R_{10}$	$R_{11}$
$R_{01}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$R_{02}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$R_{04}$	0.0024	0.2608	0	0	0	0	0	0	0	0
$R_{05}$	0.1040	0.0225	0	0	0	0	0	0	0	0
$R_{06}$	0.0205	0.0233	0	0	0	0	0	0	0	0
$R_{07}$	0.7695	0.4499	0	0	0	0	0	0	0	0
$R_{08}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$R_{09}$	0.0214	0.1000	0	0	0	0	0	0	0	0
$R_{10}$	0.0440	0.0300	0	0	0	0	0	0	0	0
$R_{11}$	0.0381	0.1135	0	0	0	0	0	0	0	0

$$\alpha_{4,1}R_{01} + \alpha_{4,2}R_{02} = R_{04} \quad (2.70)$$

$$R_{04} \leq 121$$

$\alpha_{4,1}$ = Rendimiento de producción, ton de metano/ton de etano

$\alpha_{4,2}$ = Rendimiento de producción, ton de metano/ton de propano

$$\alpha_{5,1}R_{01} + \alpha_{5,2}R_{02} = R_{05} \quad (2.71)$$

$$R_{05} \leq 189$$

$\alpha_{5,1}$ = Rendimiento de producción, ton de hidrógeno/ton de etano

$\alpha_{5,2}$ = Rendimiento de producción, ton de hidrógeno/ton de propano

$$\alpha_{6,1}R_{01} + \alpha_{6,2}R_{02} = R_{06} \quad (2.72)$$

$$R_{06} \leq 44$$

$\alpha_{6,1}$ = Rendimiento de producción, ton de gas residual/ton de etano

$\alpha_{6,2}$ = Rendimiento de producción, ton de gas residual/ton de propano

$$\alpha_{7,1}R_{01} + \alpha_{7,2}R_{02} = R_{07} \quad (2.73)$$

$$R_{07} \leq 1,503$$

$\alpha_{7,1}$ = Rendimiento de producción, ton de etileno/ton de etano

$\alpha_{7,2}$ = Rendimiento de producción, ton de etileno/ton de propano

$$\alpha_{8,1}R_{01} + \alpha_{8,2}R_{02} = R_{08}$$

$$R_{08} = 0$$

$\alpha_{8,1}$ = Rendimiento de producción, ton de propileno grado químico/ton de etano

$\alpha_{8,2}$ = Rendimiento de producción, ton de propileno grado químico/ton de propano

$$\alpha_{9,1}R_{01} + \alpha_{9,2}R_{02} = R_{09} \quad (2.74)$$

$$R_{09} \leq 75$$

$\alpha_{9,1}$ = Rendimiento de producción, ton de propileno grado polímero/ton de etano

$\alpha_{9,2}$ = Rendimiento de producción, ton de propileno grado polímero/ton de propano

$$\alpha_{10,1}R_{01} + \alpha_{10,2}R_{02} = R_{10} \quad (2.75)$$

$$R_{10} \leq 88$$

$\alpha_{10,1}$ = Rendimiento de producción, ton de butano-butadieno/ton de etano

$\alpha_{10,2}$ = Rendimiento de producción, ton de butano-butadieno/ton de propano

$$\alpha_{11,1}R_{01} + \alpha_{11,2}R_{02} = R_{11} \quad (2.76)$$

$$R_{11} \leq 109$$

$\alpha_{11,1}$ = Rendimiento de producción ton de líquidos de pirólisis/ton de etano

$\alpha_{11,2}$ = Rendimiento de producción ton de líquidos de pirólisis/ton de propano

A continuación, en la Fig. 23 se muestra la distribución del hidrógeno que soporta los balances en los divisores de hidrógeno.

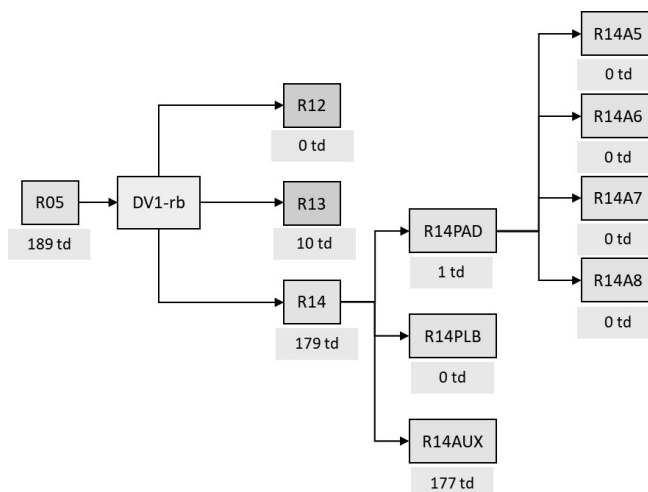


Figura 23. Diagrama de bloques con la distribución del hidrógeno dentro del complejo petroquímico Morelos.

*Divisor de Hidrógeno (DV1-rb)*

$$R_{05} = R_{12} + R_{13} + R_{14} \quad (2.77)$$

*Distribución de R14 – Hidrógeno enviado a autoconsumos*

$$R_{14} = R_{14PAD} + R_{14PLB} + R_{14AUX} \quad (2.78)$$

*Distribución de R14PAD - Hidrógeno destinado al proceso de polietileno de alta densidad*

$$R_{14PAD} = R_{14A5} + R_{14A6} + R_{14A7} + R_{14A8} \quad (2.79)$$

Para observar el balance de materia a la salida de la planta de etileno, ver Fig. A3.1

*Divisor para la distribución de Metano (DV3-rd)*

$$R_{04} = R_{21} + R_{22} \quad (2.80)$$

*Distribución de R21 – Metano proceso de óxido de etileno*

$$R_{21} = R_{21r2} + R_{21rh} \quad (2.81)$$

*Mezclador de Líquidos de pirólisis (R25)*

$$R_{11} + Q_{11} = R_{25} \quad (2.82)$$

*Divisor para la distribución de líquidos de pirólisis (DV4-re)*

$$R_{25} = R_{17} + R_{18} \quad (2.83)$$



*Distribución del propileno grado químico*

$$R_{08} = R_{8SL} + R_{8AUX} + R_{8PGT}$$

*Distribución del propileno grado polímero*

$$R_{09} = R_{9SL} + R_{9AUX} + R_{9PGT} \quad (2.84)$$

*Mezclador de propileno (PGT)*

$$R_{8PGT} + R_{9PGT} + R_{PPC} = R_{PGT} \quad (2.85)$$

*Mezclador de Etileno (R20)*

$$R_{07} + Q_{14CAN} = R_{20} \quad (2.86)$$

*Divisor de etileno en el Complejo Petroquímico Morelos (DV2-rc)*

$$R_{20} = R_{63} + R_{64} + R_{65} \quad (2.87)$$

*Distribución de etileno en los procesos petroquímicos*

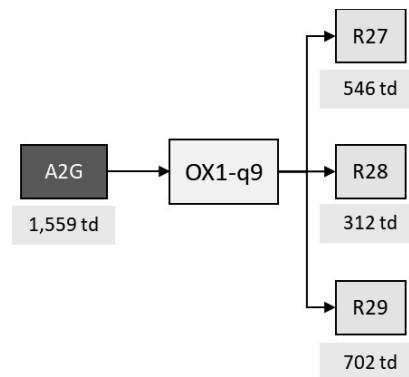
$$R_{64} = R_{64OX} + R_{64PAD} + R_{64PLB} \quad (2.88)$$

$$R_{64OX} = R_{64r2} + R_{64rh} \quad (2.89)$$

$$R_{64PAD} = R_{64A5} + R_{64A6} + R_{64A7} + R_{64A8} \quad (2.90)$$

### Planta de Oxígeno (OX1-r9)

El diagrama de bloques en la Fig. 24, indica de manera esquemática las materias primas necesarias para la obtención de los productos de la planta de oxígeno, los cuales son base para los balances de materia que se indicarán a continuación:



**Figura 24.** Diagrama de bloques con las entradas y salidas de la planta de Oxígeno en el complejo petroquímico Morelos.

$$A_{2G} = R_{27} + R_{28} + R_{29} \quad (2.91)$$

Para observar el balance de materia a la salida de la planta de oxígeno, ver Fig. A3.2

*Mezclador de Oxígeno (R26)*

$$Q_{36M} + O_{2G} + R_{27} = R_{26} \quad (2.92)$$

*Divisor para la distribución de oxígeno (DV5-rf)*

$$R_{26} = R_{15} + R_{16} + R_{66} \quad (2.93)$$

$$R_{66} = R_{66r2} + R_{66rh} + R_{66SL} \quad (2.94)$$

$$R_{66OX} = R_{66r2} + R_{66rh} \quad (2.95)$$

*Divisor para la distribución de nitrógeno puro (DV6-rg)*

$$R_{28} = R_{62} + R_{69} + R_{70} + R_{71} \quad (2.96)$$

*Distribución del nitrógeno*

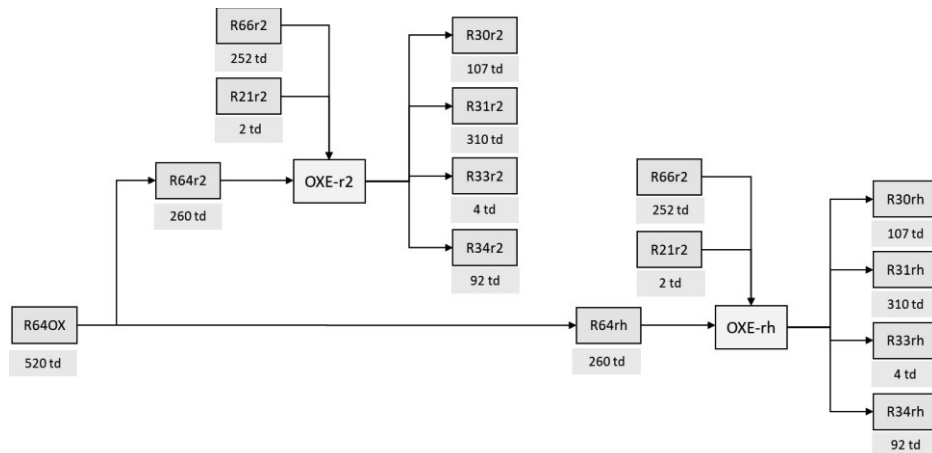
$$R_{71} = R_{71AUX} + R_{71R} \quad (2.97)$$

*Mezclador de gas residual (R67)*

$$R_{29} + R_{71R} = R_{67} \quad (2.98)$$

### Plantas de Óxido de Etileno (OXE-r2 y OXE-rh)

Dentro de la planta de óxido de etileno en el Complejo Morelos se cuenta con dos trenes para la producción de óxido de etileno. Representado mediante diagrama de bloques las entradas y salidas en estas plantas (ver Fig. 25).



**Figura 25.** Diagrama de bloques con las entradas y salidas de los trenes 1 y 2, correspondientes a la planta de Óxido de etileno en el complejo petroquímico Morelos.

*Balance de Materia en la Planta de Óxido de Etileno (OXE-r2 y OXE-rh)*

$$R_{21} + R_{640X} + R_{660X} = R_{30} + R_{31} + R_{33} + R_{34} \quad (2.99)$$

$$R_{30} + R_{31} + R_{33} + R_{34} \leq 1,028 \quad (2.100)$$

Para observar el balance de materia a la salida de las plantas de óxido de etileno, ver Fig. A3.3

**Planta de Óxido de Etileno (OXE-r2)**

*Balance de la planta de óxido de etileno (OXE-r2)*

$$R_{21r2} + R_{64r2} + R_{66r2} = R_{30r2} + R_{31r2} + R_{33r2} + R_{34r2} \quad (2.101)$$

$$R_{30r2} + R_{31r2} + R_{33r2} + R_{34r2} \leq 514 \quad (2.102)$$

**Tabla 17.** Matriz de rendimientos de producción de la planta de Óxido de etileno, Tren 1, complejo Morelos.

Productos	Reactivos						
	$R_{21r2}$	$R_{64r2}$	$R_{66r2}$	$R_{30r2}$	$R_{31r2}$	$R_{33r2}$	$R_{34r2}$
$R_{21r2}$	0	0	0	0	0	0	0
$R_{64r2}$	0	0	0	0	0	0	0
$R_{66r2}$	0	0	0	0	0	0	0
$R_{30r2}$	58.354	0.4127	0.4258	0	0	0	0
$R_{31r2}$	168.74	1.1933	1.2315	0	0	0	0
$R_{33r2}$	2.0490	0.0145	0.0149	0	0	0	0
$R_{34r2}$	50.279	0.3555	0.3669	0	0	0	0

$$\alpha_{31,21}R_{21r2} + \alpha_{31,64}R_{64r2} + \alpha_{31,66}R_{66r2} = R_{31r2} \quad (2.103)$$

$$R_{31r2} \leq 310$$

$\alpha_{31,21}$ = Rendimiento de producción, ton de óxido de etileno/ton de metano

$\alpha_{31,64}$ = Rendimiento de producción, ton de óxido de etileno/ton de etileno

$\alpha_{31,66}$ = Rendimiento de producción, ton de óxido de etileno/ton de oxígeno

$$\alpha_{30,21}R_{21r2} + \alpha_{30,64}R_{64r2} + \alpha_{30,66}R_{66r2} = R_{30r2} \quad (2.104)$$

$$R_{30r2} \leq 107$$

$\alpha_{30,21}$ = Rendimiento de producción, ton de óxido de etileno/ton de metano

$\alpha_{30,64}$ = Rendimiento de producción, ton de óxido de etileno/ton de etileno

$\alpha_{30,66}$ = Rendimiento de producción, ton de óxido de etileno/ton de oxígeno

$$\alpha_{33,21}R_{21r2} + \alpha_{33,64}R_{64r2} + \alpha_{33,66}R_{66r2} = R_{33r2} \quad (2.105)$$

$$R_{33r2} \leq 4$$

$\alpha_{33,21}$ = Rendimiento de producción, ton de óxido de etileno/ton de metano

$\alpha_{33,64}$ = Rendimiento de producción, ton de óxido de etileno/ton de etileno

$\alpha_{33,66}$ = Rendimiento de producción, ton de óxido de etileno/ton de oxígeno

$$\alpha_{34,21}R_{21r2} + \alpha_{34,64}R_{64r2} + \alpha_{34,66}R_{66r2} = R_{34r2} \quad (2.106)$$

$$R_{34r2} \leq 92$$

$\alpha_{34,21}$ = Rendimiento de producción, ton de óxido de etileno/ton de metano

$\alpha_{34,64}$ = Rendimiento de producción, ton de óxido de etileno/ton de etileno

$\alpha_{34,66}$ = Rendimiento de producción, ton de óxido de etileno/ton de oxígeno

### Planta de Óxido de Etileno (OXE-rh)

*Balance de la planta de óxido de etileno (OXE-rh)*

$$R_{21rh} + R_{64rh} + R_{66rh} = R_{30rh} + R_{31rh} + R_{33rh} + R_{34rh} \quad (2.107)$$

$$R_{30rh} + R_{31rh} + R_{33rh} + R_{34rh} \leq 514 \quad (2.108)$$

**Tabla 18.** Matriz de rendimientos de producción de la planta de Óxido de etileno, Tren 2, complejo Morelos.

Productos	Reactivos						
	$R_{21rh}$	$R_{64rh}$	$R_{66rh}$	$R_{30rh}$	$R_{31rh}$	$R_{33rh}$	$R_{34rh}$
$R_{21rh}$	0	0	0	0	0	0	0
$R_{64rh}$	0	0	0	0	0	0	0
$R_{66rh}$	0	0	0	0	0	0	0
$R_{30rh}$	58.354	0.4127	0.4258	0	0	0	0
$R_{31rh}$	168.74	1.1933	1.2315	0	0	0	0
$R_{33rh}$	2.0490	0.0145	0.0149	0	0	0	0
$R_{34rh}$	50.279	0.3555	0.3669	0	0	0	0

$$\alpha_{31,21}R_{21rh} + \alpha_{31,64}R_{64rh} + \alpha_{31,66}R_{66rh} = R_{31rh} \quad (2.109)$$

$$R_{31rh} \leq 310$$

$\alpha_{31,21}$ = Rendimiento de producción, ton de óxido de etileno/ton de metano

$\alpha_{31,64}$ = Rendimiento de producción, ton de óxido de etileno/ton de etileno

$\alpha_{31,66}$ = Rendimiento de producción ton de óxido de etileno/ton de oxígeno

$$\alpha_{30,21}R_{21rh} + \alpha_{30,64}R_{64rh} + \alpha_{30,66}R_{66rh} = R_{30rh} \quad (2.110)$$

$$R_{30rh} \leq 107$$

$\alpha_{30,21}$ = Rendimiento de producción, ton de óxido de etileno/ton de metano

$\alpha_{30,64}$ = Rendimiento de producción, ton de óxido de etileno/ton de etileno

$\alpha_{30,66}$ = Rendimiento de producción ton de óxido de etileno/ton de oxígeno

$$\alpha_{33,21}R_{21rh} + \alpha_{33,64}R_{64rh} + \alpha_{33,66}R_{66rh} = R_{33rh} \quad (2.111)$$

$$R_{33rh} \leq 4$$

$\alpha_{33,21}$ = Rendimiento de producción, ton de óxido de etileno/ton de metano

$\alpha_{33,64}$ = Rendimiento de producción, ton de óxido de etileno/ton de etileno

$\alpha_{33,66}$ = Rendimiento de producción ton de óxido de etileno/ton de oxígeno

$$\alpha_{34,21}R_{21rh} + \alpha_{34,64}R_{64rh} + \alpha_{34,66}R_{66rh} = R_{34rh} \quad (2.112)$$
$$R_{34rh} \leq 92$$

$\alpha_{34,21}$ = Rendimiento de producción, ton de óxido de etileno/ton de metano

$\alpha_{34,64}$ = Rendimiento de producción, ton de óxido de etileno/ton de etileno

$\alpha_{34,66}$ = Rendimiento de producción ton de óxido de etileno/ton de oxígeno

*Mezclador de dióxido de carbono (R30)*

$$R_{30r2} + R_{30rh} = R_{30} \quad (2.113)$$

*Divisor para la distribución de dióxido de carbono (DV7-r)*

$$R_{30} = R_{72} + R_{73} \quad (2.114)$$

*Mezclador de óxido de etileno (R31)*

$$R_{31r2} + R_{31rh} = R_{31} \quad (2.115)$$

*Distribución de óxido de etileno*

$$R_{31} = R_{31G} + R_{31SL} \quad (2.116)$$

*Mezclador de gas argón (R33)*

$$R_{33r2} + R_{33rh} = R_{33} \quad (2.117)$$

*Mezclador de gas residual (R34)*

$$R_{34r2} + R_{34rh} = R_{34} \quad (2.118)$$

## Planta de Glicoles (GCL-r3)

### Balace de la planta de glicoles (GCL-r3)

Siguiendo con el balance entre plantas, el tren 2 de óxido de etileno, destina una parte de su óxido producido a la planta de glicoles, el balance de materia puede observarse en la Fig. 26.

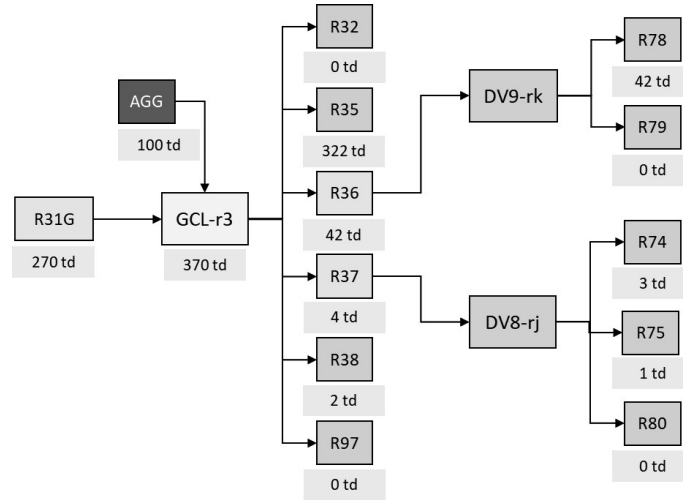


Figura 26. Diagrama de bloques con las entradas y salidas de la planta de glicoles etilénicos en el complejo petroquímico Morelos.

$$R_{31G} + R_{AGG} = R_{32} + R_{35} + R_{36} + R_{37} + R_{38} + R_{97} \quad (2.119)$$

$$R_{32} + R_{35} + R_{36} + R_{37} + R_{38} + R_{97} \leq 370 \quad (2.120)$$

Tabla 19. Matriz de rendimientos de producción en la planta de glicoles etilénicos.

Productos	Reactivos							
	$R_{31G}$	$R_{AGG}$	$R_{32}$	$R_{35}$	$R_{36}$	$R_{37}$	$R_{38}$	$R_{97}$
$R_{31G}$	0	0	0	0	0	0	0	0
$R_{AGG}$	0	0	0	0	0	0	0	0
$R_{32}$	0	0	0	0	0	0	0	0
$R_{35}$	1.1935	3.2197	0	0	0	0	0	0
$R_{36}$	0.1571	0.4238	0	0	0	0	0	0
$R_{37}$	0.0138	0.0372	0	0	0	0	0	0
$R_{38}$	0.0061	0.0166	0	0	0	0	0	0
$R_{97}$	0	0	0	0	0	0	0	0

$$\alpha_{32,31}R_{31G} + \alpha_{32,AGG}R_{AGG} = R_{32}$$

$$R_{32} = 0$$

$\alpha_{32,31}$ = Rendimiento de producción ton de residuo de glicoles etilénicos/ton de óxido de etileno

$\alpha_{32,AGG}$ = Rendimiento de producción ton de residuo de glicoles etilénicos/ton de agua

$$\alpha_{35,31}R_{31G} + \alpha_{35,AGG}R_{AGG} = R_{35} \quad (2.121)$$

$$R_{35} \leq 322$$

$\alpha_{35,31}$ = Rendimiento de producción ton de monoetilenglicol/ton de óxido de etileno

$\alpha_{35,AGG}$ = Rendimiento de producción ton de monoetilenglicol/ton de agua

$$\alpha_{36,31}R_{31G} + \alpha_{36,AGG}R_{AGG} = R_{36} \quad (2.122)$$

$$R_{36} \leq 42$$

$\alpha_{36,31}$ = Rendimiento de producción ton de dietilenglicol/ton de óxido de etileno

$\alpha_{36,AGG}$ = Rendimiento de producción ton de dietilenglicol/ton de agua

$$\alpha_{37,31}R_{31G} + \alpha_{37,AGG}R_{AGG} = R_{37} \quad (2.123)$$

$$R_{37} \leq 4$$

$\alpha_{37,31}$ = Rendimiento de producción ton de trietilenglicol/ton de óxido de etileno

$\alpha_{37,31}$ = Rendimiento de producción ton de trietilenglicol/ton de agua

$$\alpha_{38,31}R_{31G} + \alpha_{38,AGG}R_{AGG} = R_{38} \quad (2.124)$$

$$R_{38} \leq 2$$

$\alpha_{38,31}$ = Rendimiento de producción ton de polietilenglicol/ton de óxido de etileno

$\alpha_{38,31}$ = Rendimiento de producción ton de polietilenglicol/ton de agua

$$\alpha_{97,31}R_{31G} + \alpha_{97,AGG}R_{AGG} = R_{97}$$

$$R_{97} = 0$$

$\alpha_{97,31}$ = Rendimiento de producción ton de mezcla de glicoles etilénicos/ton de óxido de etileno

$\alpha_{97,31}$ = Rendimiento de producción ton de mezcla de glicoles etilénicos/ton de agua

*Divisor para la distribución de dietilenglicol (DV9-rk)*

$$R_{36} = R_{78} + R_{79} \quad (2.125)$$

*Divisor para la distribución de trietilenglicol (DV8-rj)*

$$R_{37} = R_{74} + R_{75} + R_{80} \quad (2.126)$$

### Planta de Polietileno Lineal de Baja Densidad (PLB-r4)

En la Fig. 27 se puede apreciar el balance de materia que se lleva a cabo en la planta de PELBD y que sustenta a las ecuaciones que se citan a continuación:

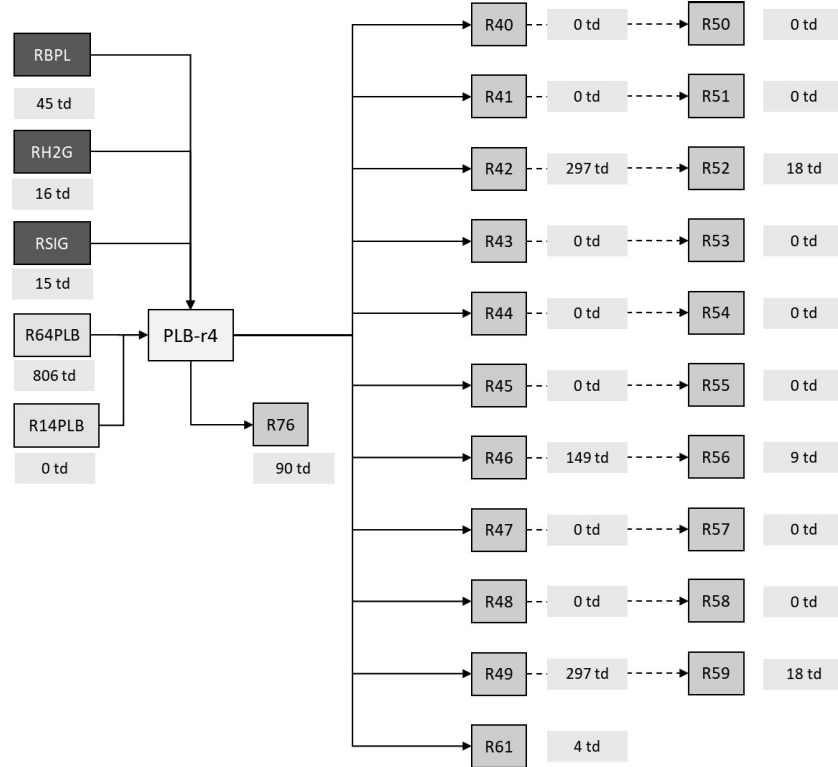


Figura 27. Diagrama de bloques con las entradas y salidas de la planta de Polietileno Lineal de Baja Densidad en el complejo petroquímico Morelos.

#### Balace de la Planta de polietileno lineal de baja densidad (PLB-r4)

$$R_{64PLB} = R_{PBL} + R_{76} \quad (2.127)$$

Tabla 20. Matriz de rendimientos para la obtención de PELBD puro en la planta Swing.

Productos	Reactivos		
	$R_{64PBL}$	$R_{PBL}$	$R_{76}$
$R_{64PBL}$	0	0	0
$R_{PBL}$	0.9838	0	0
$R_{76}$	0.1116	0	0

$$\alpha_{PBL,64} R_{64PBL} = R_{PBL} \quad (2.128)$$

$$R_{PBL} \leq 793$$

$\alpha_{PBL,64}$  = Rendimiento de producción ton de PELBD puro/ton de etileno



$$\alpha_{76,64} R_{64PLB} = R_{76} \quad (2.129)$$

$$R_{76} \leq 90$$

$\alpha_{76,64}$  = Rendimiento de producción ton de gas residual/ton de etileno

Para observar el balance de materia de la planta de polietileno lineal de baja densidad, ver Fig. A3.4

### Área de formulación y aditivación del PELBD

Balance de materia en el área de formulación y aditivos

$$R_{PLB} + R_{14PLB} + R_{SIG} + R_{BPL} + R_{H2G} = R_{39-49} + R_{50-60} + R_{61} \quad (2.130)$$

$$\begin{aligned} R_{39} + R_{40} + R_{41} + R_{42} + R_{43} + R_{44} + R_{45} + R_{46} + R_{47} + R_{48} + R_{49} + R_{50} + R_{51} \\ + R_{52} + R_{53} + R_{54} + R_{55} + R_{56} + R_{57} + R_{58} + R_{59} + R_{60} + R_{61} \\ \leq 793 \end{aligned} \quad (2.131)$$

Balance por producto:

$$\begin{aligned} R_{PL39} + R_{1439} + R_{S39} + R_{H39} &= R_{39} + R_{50} + R_{61U} \\ R_{PL40} + R_{1440} + R_{S40} + R_{H40} &= R_{40} + R_{51} + R_{6154} \\ R_{PL41} + R_{1441} + R_{S41} + R_{H41} &= R_{41} + R_{52} + R_{6150} \end{aligned} \quad (2.132)$$

$$\begin{aligned} R_{PL42} + R_{1442} + R_{S42} + R_{H42} &= R_{42} + R_{53} + R_{6135} \\ R_{PL43} + R_{1443} + R_{S43} + R_{B43} &= R_{43} + R_{54} + R_{611C} \\ R_{PL44} + R_{1444} + R_{S44} + R_{B44} &= R_{44} + R_{55} + R_{611S} \\ R_{PL45} + R_{1445} + R_{S45} + R_{B45} &= R_{45} + R_{56} + R_{612C} \end{aligned} \quad (2.133)$$

$$\begin{aligned} R_{PL46} + R_{1446} + R_{S46} + R_{B46} &= R_{46} + R_{57} + R_{612S} \\ R_{PL47} + R_{1447} + R_{S47} + R_{B47} &= R_{47} + R_{58} + R_{6192} \\ R_{PL48} + R_{1448} + R_{S48} + R_{B48} &= R_{48} + R_{59} + R_{610S} \end{aligned} \quad (2.134)$$

$$R_{PL49} + R_{1449} + R_{S49} + R_{B49} = R_{49} + R_{60} + R_{6130}$$

donde:

$$\begin{aligned} R_{PLB} = R_{PL39} + R_{PL40} + R_{PL41} + R_{PL42} + R_{PL43} + R_{PL44} + R_{PL45} + R_{PL46} + R_{PL47} \\ + R_{PL48} + R_{PL49} \end{aligned} \quad (2.135)$$

$$\begin{aligned} R_{14PLB} = R_{1439} + R_{1440} + R_{1441} + R_{1442} + R_{1443} + R_{1444} + R_{1445} + R_{1446} \\ + R_{1447} + R_{1448} + R_{1449} \end{aligned} \quad (2.136)$$

$$\begin{aligned} R_{SIG} = R_{S39} + R_{S40} + R_{S41} + R_{S42} + R_{S43} + R_{S44} + R_{S45} + R_{S46} + R_{S47} + R_{S48} \\ + R_{S49} \end{aligned} \quad (2.137)$$

$$R_{BPL} = R_{B43} + R_{B44} + R_{B45} + R_{B46} + R_{B47} + R_{B48} + R_{B49} \quad (2.138)$$

$$R_{H2G} = R_{H39} + R_{H40} + R_{H41} + R_{H42} \quad (2.139)$$

$$\begin{aligned} R_{61} = R_{61U} + R_{6154} + R_{6150} + R_{6135} + R_{611C} + R_{611S} + R_{612C} + R_{612S} + R_{6192} \\ + R_{610S} + R_{6130} \end{aligned} \quad (2.140)$$

**Tabla 21.** Matriz de rendimientos de producción y formulación de PELBD.

Productos	Reactivos								
	$R_{PBL}$	$R_{14PBL}$	$R_{SIG}$	$R_{BPL}$	$R_{H2G}$	$R_i$	$R_j$	$R_k$	$R_{61}$
$R_{PBL}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$R_{14PBL}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$R_{SIG}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$R_{BPL}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$R_{H2G}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$R_i$	0.9219	4213	52	0	18.273	0	0	0	0
$R_j$	0.9219	4213	52	9.8564	0	0	0	0	0
$R_k$	0.0573	4213	52	0	0	0	0	0	0
$R_{61}$	0.0046	4213	52	0	0	0	0	0	0

donde:  $i=39-42$ ,  $j=43-49$  y  $k=50-60$

**Tabla 22.** Estrategia de comercialización en la elaboración de los diferentes grados de PELBD.

$Q_{i,j}$	% producción
$R_{39}$	0
$R_{40}$	0
$R_{41}$	40
$R_{42}$	0
$R_{43}$	0
$R_{44}$	0
$R_{45}$	20
$R_{46}$	0
$R_{47}$	0
$R_{48}$	40
$R_{49}$	0

Con base en la estrategia comercial, se observará que algunos de los rendimientos de producción en ciertos productos será cero, debido a que dependen de la solicitud del mercado; para efectos del caso base, se consideran los porcentajes de demanda que tienen los diferentes grados de PELBD, proporcionados por el área operativa.

$$\alpha_{39,PL}R_{PL39} + \alpha_{39,14}R_{1439} + \alpha_{39,S39}R_{S39} + \alpha_{39,H39}R_{H39} = R_{39}$$

$$R_{39} = 0$$

$$\alpha_{50,39}R_{39} + \alpha_{61,39}R_{39} = R_{50} + R_{61U}$$

$$R_{50} = 0$$

$$R_{61U} = 0$$

$\alpha_{39,PL}$ = Rendimiento de producción ton de PELBD tipo Padmex 60120U/ton de PELBD puro

$\alpha_{39,14}$ = Rendimiento de producción ton de PELBD tipo Padmex 60120U/ton de hidrógeno

$\alpha_{39,S39}$ =Rendimiento de producción ton de PELBD tipo Padmex 60120U/ton de isopentano

$\alpha_{39,H39}$ = Rendimiento de producción ton de PELBD tipo Padmex 60120U/ton de 1-hexeno

$\alpha_{50,39}$ = Rendimiento de producción ton de segundas tipo Padmex 60120U/ton de PELBD tipo Padmex 60120U

$\alpha_{61,39}$ = Rendimiento de producción ton de barreduras tipo Padmex 60120U/ton de PELBD tipo Padmex 60120U

$$\alpha_{40,PL}R_{PL40} + \alpha_{40,14}R_{1440} + \alpha_{40,S40}R_{S40} + \alpha_{40,H40}R_{H40} = R_{40}$$

$$R_{40} = 0$$

$$\alpha_{51,40}R_{40} + \alpha_{61,40}R_{40} = R_{51} + R_{6154}$$

$$R_{51} = 0$$

$$R_{6154} = 0$$

$\alpha_{40,PL}$ = Rendimiento de producción ton de PELBD tipo Padmex 54200/ton de PELBD puro

$\alpha_{40,14}$ = Rendimiento de producción ton de PELBD tipo Padmex 54200/ton de hidrógeno

$\alpha_{40,S40}$ =Rendimiento de producción ton de PELBD tipo Padmex 54200/ton de isopentano

$\alpha_{40,H40}$ = Rendimiento de producción ton de PELBD tipo Padmex 54200/ton de 1-hexeno

$\alpha_{51,40}$ = Rendimiento de producción ton de segundas tipo Padmex 54200/ton de PELBD tipo Padmex 54200

$\alpha_{61,40}$ = Rendimiento de producción ton de barreduras tipo Padmex 54200/ton de PELBD tipo Padmex 54200

$$\alpha_{41,PL}R_{PL41} + \alpha_{41,14}R_{1441} + \alpha_{41,S41}R_{S41} + \alpha_{41,H41}R_{H41} = R_{41} \quad (2.141)$$

$$R_{41} \leq 297$$

$$\alpha_{52,41}R_{41} + \alpha_{61,41}R_{41} = R_{52} + R_{6150} \quad (2.142)$$

$$R_{52} \leq 18$$

$$R_{6150} \leq 1$$

$\alpha_{41,PL}$ = Rendimiento de producción ton de PELBD tipo BDL36050/ton de PELBD puro

$\alpha_{41,14}$ = Rendimiento de producción ton de PELBD tipo BDL36050/ton de hidrógeno

$\alpha_{41,S41}$ =Rendimiento de producción ton de PELBD tipo BDL36050/ton de isopentano

$\alpha_{41,H41}$ = Rendimiento de producción ton de PELBD tipo BDL36050/ton de 1-hexeno

$\alpha_{52,41}$ = Rendimiento de producción ton de segundas tipo BDL36050/ton de PELBD tipo BDL36050

$\alpha_{61,41}$ = Rendimiento de producción ton de barreduras tipo BDL36050/ton de PELBD tipo BDL36050

$$\alpha_{42,PL}R_{PL42} + \alpha_{42,14}R_{1442} + \alpha_{42,S42}R_{S42} + \alpha_{42,H42}R_{H42} = R_{42}$$

$$R_{42} = 0$$

$$\alpha_{53,42}R_{42} + \alpha_{61,42}R_{42} = R_{53} + R_{6135}$$

$$R_{53} = 0$$

$$R_{6135} = 0$$

$\alpha_{42,PL}$ = Rendimiento de producción ton de PELBD tipo BDL39035/ton de PELBD puro

$\alpha_{42,14}$ = Rendimiento de producción ton de PELBD tipo BDL39035/ton de hidrógeno

$\alpha_{42,542}$ =Rendimiento de producción ton de PELBD tipo BDL39035/ton de isopentano

$\alpha_{42,H42}$ = Rendimiento de producción ton de PELBD tipo BDL39035/ton de 1-hexeno

$\alpha_{53,42}$ = Rendimiento de producción ton de segundas tipo BDL39035/ton de PELBD tipo BDL39035

$\alpha_{61,42}$ = Rendimiento de producción ton de barreduras tipo BDL39035/ton de PELBD tipo BDL36050

$$\alpha_{43,PL}R_{PL43} + \alpha_{43,14}R_{1443} + \alpha_{43,S43}R_{S43} + \alpha_{43,B43}R_{B43} = R_{43}$$

$$R_{43} = 0$$

$$\alpha_{54,43}R_{43} + \alpha_{61,43}R_{43} = R_{54} + R_{611C}$$

$$R_{54} = 0$$

$$R_{611C} = 0$$

$\alpha_{43,PL}$ = Rendimiento de producción ton de PELBD tipo BDL92010C/ton de PELBD puro

$\alpha_{43,14}$ = Rendimiento de producción ton de PELBD tipo BDL92010C/ton de hidrógeno

$\alpha_{43,S43}$ =Rendimiento de producción ton de PELBD tipo BDL92010C/ton de isopentano

$\alpha_{43,B43}$ = Rendimiento de producción ton de PELBD tipo BDL92010C/ton de 1-buteno

$\alpha_{54,43}$ = Rendimiento de producción ton de segundas tipo BDL92010C/ton de PELBD tipo BDL92010C

$\alpha_{61,43}$ = Rendimiento de producción ton de barreduras tipo BDL92010C/ton de PELBD tipo BDL92010C

$$\alpha_{44,PL}R_{PL44} + \alpha_{44,14}R_{1444} + \alpha_{44,S44}R_{S44} + \alpha_{44,B44}R_{B44} = R_{44}$$

$$R_{44} = 0$$

$$\alpha_{55,44}R_{44} + \alpha_{61,44}R_{44} = R_{55} + R_{611S}$$

$$R_{55} = 0$$

$$R_{611S} = 0$$

$\alpha_{44,PL}$ = Rendimiento de producción ton de PELBD tipo BDL92010S/ton de PELBD puro

$\alpha_{44,14}$ = Rendimiento de producción ton de PELBD tipo BDL92010S/ton de hidrógeno

$\alpha_{44,S44}$ =Rendimiento de producción ton de PELBD tipo BDL92010S/ton de isopentano

$\alpha_{44,B44}$ = Rendimiento de producción ton de PELBD tipo BDL92010S/ton de 1-buteno

$\alpha_{55,44}$ = Rendimiento de producción ton de segundas tipo BDL92010S/ton de PELBD tipo BDL92010S

$\alpha_{61,44}$ = Rendimiento de producción ton de barreduras tipo BDL92010S/ton de PELBD tipo BDL92010S

$$\alpha_{45,PL}R_{PL45} + \alpha_{45,14}R_{1445} + \alpha_{45,S45}R_{S45} + \alpha_{45,B45}R_{B45} = R_{45} \quad (2.143)$$

$$R_{45} \leq 149$$

$$\alpha_{56,45}R_{45} + \alpha_{61,45}R_{45} = R_{56} + R_{612C} \quad (2.144)$$

$$R_{56} \leq 9$$

$$R_{612C} \leq 1$$

$\alpha_{45,PL}$ = Rendimiento de producción ton de PELBD tipo BDL92020C/ton de PELBD puro

$\alpha_{45,14}$ = Rendimiento de producción ton de PELBD tipo BDL92020C/ton de hidrógeno

$\alpha_{45,545}$ =Rendimiento de producción ton de PELBD tipo BDL92020C/ton de isopentano

$\alpha_{45,B45}$ = Rendimiento de producción ton de PELBD tipo BDL92020C/ton de 1-buteno

$\alpha_{56,45}$ = Rendimiento de producción ton de segundas tipo BDL92020C/ton de PELBD tipo BDL92020C

$\alpha_{61,45}$ = Rendimiento de producción ton de barreduras tipo BDL92020C/ton de PELBD tipo BDL92020C

$$\alpha_{46,PL}R_{PL46} + \alpha_{46,14}R_{1446} + \alpha_{46,S46}R_{S46} + \alpha_{46,B46}R_{B46} = R_{46}$$

$$R_{46} = 0$$

$$\alpha_{57,46}R_{46} + \alpha_{61,46}R_{46} = R_{57} + R_{612S}$$

$$R_{57} = 0$$

$$R_{612S} = 0$$

$\alpha_{46,PL}$ = Rendimiento de producción ton de PELBD tipo BDL92020S/ton de PELBD puro

$\alpha_{46,14}$ = Rendimiento de producción ton de PELBD tipo BDL92020S/ton de hidrógeno

$\alpha_{46,546}$ =Rendimiento de producción ton de PELBD tipo BDL92020S/ton de isopentano

$\alpha_{46,B46}$ = Rendimiento de producción ton de PELBD tipo BDL92020S/ton de 1-buteno

$\alpha_{57,46}$ = Rendimiento de producción ton de segundas tipo BDL92020S/ton de PELBD tipo BDL92020S

$\alpha_{61,46}$ = Rendimiento de producción ton de barreduras tipo BDL92020S/ton de PELBD tipo BDL92020S

$$\alpha_{47,PL}R_{PL47} + \alpha_{47,14}R_{1447} + \alpha_{47,S47}R_{S47} + \alpha_{47,B47}R_{B47} = R_{47}$$

$$R_{47} = 0$$

$$\alpha_{58,47}R_{47} + \alpha_{61,47}R_{47} = R_{58} + R_{6192}$$

$$R_{58} = 0$$

$$R_{6192} = 0$$

$\alpha_{47,PL}$ = Rendimiento de producción ton de PELBD tipo BDL92200/ton de PELBD puro

$\alpha_{47,14}$ = Rendimiento de producción ton de PELBD tipo BDL92200/ton de hidrógeno

$\alpha_{47,547}$ =Rendimiento de producción ton de PELBD tipo BDL92200/ton de isopentano

$\alpha_{47,B47}$ = Rendimiento de producción ton de PELBD tipo BDL92200/ton de 1-buteno

$\alpha_{58,47}$ = Rendimiento de producción ton de segundas tipo BDL92200/ton de PELBD tipo BDL92200

$\alpha_{61,47}$ = Rendimiento de producción ton de barreduras tipo BDL92200/ton de PELBD tipo BDL92200

$$\alpha_{48,PL}R_{PL48} + \alpha_{48,14}R_{1448} + \alpha_{48,S48}R_{S48} + \alpha_{48,B48}R_{B48} = R_{48} \quad (2.145)$$

$$R_{48} \leq 297$$

$$\alpha_{59,48}R_{48} + \alpha_{61,48}R_{48} = R_{59} + R_{610S} \quad (2.146)$$

$$R_{59} \leq 18$$

$$R_{610S} \leq 1$$

$\alpha_{48,PL}$ = Rendimiento de producción ton de PELBD tipo BDLH91720S/ton de PELBD puro

$\alpha_{48,14}$ = Rendimiento de producción ton de PELBD tipo BDLH91720S/ton de hidrógeno

$\alpha_{48,548}$ =Rendimiento de producción ton de PELBD tipo BDLH91720S/ton de isopentano

$\alpha_{48,B48}$ = Rendimiento de producción ton de PELBD tipo BDLH91720S/ton de 1-buteno

$\alpha_{59,48}$ = Rendimiento de producción ton de segundas tipo BDLH91720S/ton de PELBD tipo BDLH91720S

$\alpha_{61,48}$ = Rendimiento de producción ton de barreduras tipo BDLH91720S/ton de PELBD tipo BDLH91720S

$$\alpha_{49,PL}R_{PL49} + \alpha_{49,14}R_{1449} + \alpha_{49,S49}R_{S49} + \alpha_{49,B49}R_{B49} = R_{49}$$

$$R_{49} = 0$$

$$\alpha_{60,49}R_{49} + \alpha_{61,49}R_{49} = R_{60} + R_{6130}$$

$$R_{60} = 0$$

$$R_{6130} = 0$$

$\alpha_{49,PL}$ = Rendimiento de producción ton de PELBD tipo BDL93030/ton de PELBD puro

$\alpha_{49,14}$ = Rendimiento de producción ton de PELBD tipo BDL93030/ton de hidrógeno

$\alpha_{49,549}$ =Rendimiento de producción ton de PELBD tipo BDL93030/ton de isopentano

$\alpha_{49,B49}$ = Rendimiento de producción ton de PELBD tipo BDL93030/ton de 1-buteno

$\alpha_{60,49}$ = Rendimiento de producción ton de segundas tipo BDL93030/ton de PELBD tipo BDL93030

$\alpha_{61,49}$ = Rendimiento de producción ton de barreduras tipo BDL93030/ton de PELBD tipo BDL93030

### Plantas de Polietileno de Alta Densidad (PAA-r5, PAB-r6, PMA-r7 y PMB-r8)

$$R_{64PAD} = R_{64A5} + R_{64A6} + R_{64A7} + R_{64A8}$$

$$R_{H1G} = R_{HA5} + R_{HA6} + R_{HA7} + R_{HA8} \quad (2.147)$$

$$R_{PGT} = R_{GA5} + R_{GA6} + R_{GA7} + R_{GA8} \quad (2.148)$$

Plantas de Polietileno de Alta Densidad, Proceso Asahi (PAA-r5 y PAB-r6)

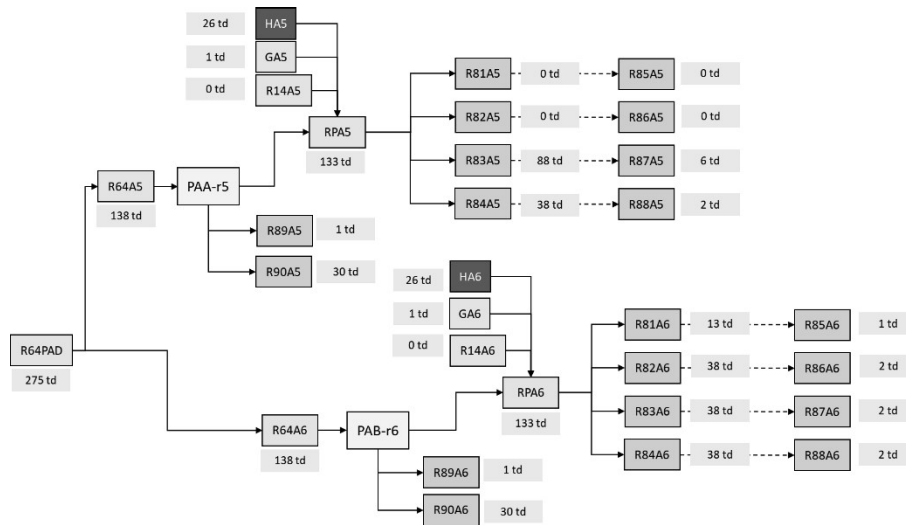
#### *Balance de materia del Proceso de Polietileno de Alta Densidad, Proceso Asahi*

$$(R_{64A5} + R_{64A6}) + (R_{HA5} + R_{HA6}) + (R_{GA5} + R_{GA6}) + (R_{14A5} + R_{14A6}) \\ = R_{81} + R_{82} + R_{83} + R_{84} + R_{85} + R_{86} + R_{87} + R_{88} + R_{89} + R_{90} \quad (2.149)$$

$$R_{81} + R_{82} + R_{83} + R_{84} + R_{85} + R_{86} + R_{87} + R_{88} + R_{89} + R_{90} \leq 329 \quad (2.150)$$

### Planta de Polietileno de Alta Densidad, proceso Asahi (PAA-r5)

En la Fig. 28 se puede observar el balance de materia de la planta PEAD con tecnología Asahi, indicando las transferencias que sustenta las ecuaciones que se citan a continuación:



**Figura 28.** Diagrama de bloques con las entradas y salidas, proceso Asahi, tren A y B, de la planta de Polietileno de Alta Densidad en el complejo petroquímico Morelos.

*Balace de materia tren A de polietileno de alta densidad, proceso Asahi (PAA-r5)*

$$R_{64A5} = R_{PA5} + R_{89A5} + R_{90A5} \quad (2.151)$$

**Tabla 23.** Matriz de rendimientos para la obtención de PEAD puro en la planta Asahi, Tren A.

Productos	Reactivos			
	$R_{64A5}$	$R_{PA5}$	$R_{89A5}$	$R_{90A5}$
$R_{64A5}$	0	0	0	0
$R_{PA5}$	0.9703	0	0	0
$R_{89A5}$	0.0098	0	0	0
$R_{90A5}$	0.2164	0	0	0

$$\alpha_{PA5,64}R_{64A5} + \alpha_{89,64}R_{64A5} + \alpha_{90,64}R_{64A5} = R_{PA5} + R_{89A5} + R_{90A5} \quad (2.152)$$

$$R_{PA5} \leq 133$$

$$R_{89A5} \leq 1$$

$$R_{90A5} \leq 30$$

$\alpha_{PA5,64}$ = Rendimiento de producción ton de polietileno de alta densidad puro/ton de etileno

$\alpha_{89A5,64}$ = Rendimiento de producción ton de ceras polietilénicas/ton de etileno

$\alpha_{90A5,64}$ = Rendimiento de producción ton de gas residual/ton de etileno

## Área de formulación y aditivación del PEAD (PAA-r5)

Balance de materia en el área de formulación y aditivos (PAA-r5)

$$R_{PA5} + R_{HA5} + R_{GA5} + R_{14A5} = R_{81A5} + R_{82A5} + R_{83A5} + R_{84A5} + R_{85A5} + R_{86A5} + R_{87A5} + R_{88A5} \quad (2.153)$$

$$R_{81A5} + R_{82A5} + R_{83A5} + R_{84A5} + R_{85A5} + R_{86A5} + R_{87A5} + R_{88A5} \leq 133 \quad (2.154)$$

Tabla 24. Matriz de rendimientos de producción y formulación de PEAD, planta Asahi, Tren A.

Productos	Reactivos					
	$R_{PA5}$	$R_{HA5}$	$R_{GA5}$	$R_{14A5}$	$R_r$	$R_s$
$R_{PA5}$	0	0	0	0	0	0
$R_{HA5}$	0	0	0	0	0	0
$R_{GA5}$	0	0	0	0	0	0
$R_{14A5}$	0	0	0	0	0	0
$R_r$	0.9101	4.8728	171.17	275.24	0	0
$R_s$	0.0601	0.3218	11.303	18.174	0	0

donde:  $r=81$  al  $84$  y  $s=85$  al  $88$

Tabla 25. Estrategia de comercialización en la elaboración de los diferentes grados de PEAD, planta Asahi, Tren A.

$R_r$	% producción
$R_{81A5}$	0
$R_{82A5}$	0
$R_{83A5}$	70
$R_{84A5}$	30

Al igual que los PEBD y PELB, el comportamiento de los rendimientos de producción para los diferentes grados de PEAD estarán sujetos a una estrategia comercial.

$$\alpha_{81,PA5}R_{PA5} + \alpha_{81,HA5}R_{HA5} + \alpha_{81,14}R_{14A5} + \alpha_{81,GA5}R_{GA5} = R_{81A5}$$

$$R_{81A5} = 0$$

$$\alpha_{85,PA5}R_{PA5} + \alpha_{85,HA5}R_{HA5} + \alpha_{85,14}R_{14A5} + \alpha_{85,GA5}R_{GA5} = R_{85A5}$$

$$R_{85A5} = 0$$

$\alpha_{81,PA5}$ =Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 6004S/ton de PEAD puro, tren A

$\alpha_{81,HA5}$ = Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 6004S/ton de hexano, tren A

$\alpha_{81,14}$ = Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 6004S/ton de hidrógeno, tren A

$\alpha_{81,GA5}$ = Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 6004S/ton de propileno, tren A

$\alpha_{85,PA5}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 6004S/ton de PEAD puro, tren A

$\alpha_{85,HA5}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 6004S/ton de hexano, tren A



$\alpha_{85,14}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 6004S/ton de hidrógeno, tren A

$\alpha_{85,GA5}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 6004S/ton de propileno, tren A

$$\alpha_{82,PA5}R_{PA5} + \alpha_{82,HA5}R_{HA5} + \alpha_{82,14}R_{14A5} + \alpha_{82,GA5}R_{GA5} = R_{82A5}$$

$$R_{82A5} = 0$$

$$\alpha_{86,PA5}R_{PA5} + \alpha_{86,HA5}R_{HA5} + \alpha_{86,14}R_{14A5} + \alpha_{86,GA5}R_{GA5} = R_{86A5}$$

$$R_{86A5} = 0$$

$\alpha_{82,PA5}$ =Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 60120/ton de PEAD puro, tren A

$\alpha_{82,HA5}$ = Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 60120/ton de hexano, tren A

$\alpha_{82,14}$ = Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 60120/ton de hidrógeno, tren A

$\alpha_{82,GA5}$ = Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 60120/ton de propileno, tren A

$\alpha_{86,PA5}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 60120/ton de PEAD puro, tren A

$\alpha_{86,HA5}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 60120/ton de hexano, tren A

$\alpha_{86,14}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 60120/ton de hidrógeno, tren A

$\alpha_{86,GA5}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 60120/ton de propileno, tren A

$$\alpha_{83,PA5}R_{PA5} + \alpha_{83,HA5}R_{HA5} + \alpha_{83,14}R_{14A5} + \alpha_{83,GA5}R_{GA5} = R_{83A5} \quad (2.155)$$

$$R_{83A5} \leq 88$$

$$\alpha_{87,PA5}R_{PA5} + \alpha_{87,HA5}R_{HA5} + \alpha_{87,14}R_{14A5} + \alpha_{87,GA5}R_{GA5} = R_{87A5} \quad (2.156)$$

$$R_{87A5} \leq 6$$

$\alpha_{83,PA5}$ =Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 65050/ton de PEAD puro, tren A

$\alpha_{83,HA5}$ = Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 65050/ton de hexano, tren A

$\alpha_{83,14}$ = Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 65050/ton de hidrógeno, tren A

$\alpha_{83,GA5}$ = Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 65050/ton de propileno, tren A

$\alpha_{87,PA5}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 65050/ton de PEAD puro, tren A

$\alpha_{87,HA5}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 65050/ton de hexano, tren A

$\alpha_{87,14}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 65050/ton de hidrógeno, tren A

$\alpha_{87,GA5}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 65050/ton de propileno, tren A

$$\alpha_{84,PA5}R_{PA5} + \alpha_{84,HA5}R_{HA5} + \alpha_{84,14}R_{14A5} + \alpha_{84,GA5}R_{GA5} = R_{84A5} \quad (2.157)$$

$$R_{84A5} \leq 38$$

$$\alpha_{88,PA5}R_{PA5} + \alpha_{88,HA5}R_{HA5} + \alpha_{88,14}R_{14A5} + \alpha_{88,GA5}R_{GA5} = R_{88A5} \quad (2.158)$$

$$R_{88A5} \leq 2$$

$\alpha_{84,PA5}$ =Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 65080/ton de PEAD puro, tren A

$\alpha_{84,HA5}$ = Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 65080/ton de hexano, tren A

$\alpha_{84,14}$ = Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 65080/ton de hidrógeno, tren A

$\alpha_{84,GA5}$ = Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 65080/ton de propileno, tren A

$\alpha_{88,PA5}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 65080/ton de PEAD puro, tren A

$\alpha_{88,HA5}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 65080/ton de hexano, tren A

$\alpha_{88,14}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 65080/ton de hidrógeno, tren A

$\alpha_{88,GA5}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 65080/ton de propileno, tren A

### Planta de Polietileno de Alta Densidad, proceso Asahi (PAB-r6)

*Balance de materia tren B de polietileno de alta densidad, proceso Asahi (PAB-r6)*

$$R_{64A6} = R_{PA6} + R_{89A6} + R_{90A6} \quad (2.159)$$

**Tabla 26.** Matriz de rendimientos para la obtención de PEAD puro en la planta Asahi, Tren B.

Productos	Reactivos			
	$R_{64A6}$	$R_{PA6}$	$R_{89A6}$	$R_{90A6}$
$R_{64A6}$	0	0	0	0
$R_{PA6}$	0.9703	0	0	0
$R_{89A6}$	0.0098	0	0	0
$R_{90A6}$	0.2164	0	0	0

$$\alpha_{PA6,64}R_{64A6} + \alpha_{89,64}R_{64A6} + \alpha_{90,64}R_{64A6} = R_{PA6} + R_{89A6} + R_{90A6} \quad (2.160)$$

$$R_{PA6} \leq 133$$

$$R_{89A6} \leq 1$$

$$R_{90A6} \leq 30$$

$\alpha_{PA6,64}$ = Rendimiento de producción ton de polietileno de alta densidad puro/ton de etileno

$\alpha_{89A6,64}$ = Rendimiento de producción ton de ceras polietilénicas/ton de etileno

$\alpha_{90A6,64}$ = Rendimiento de producción ton de gas residual/ton de etileno

## Área de formulación y aditivación del PEAD (PAB-r6)

*Balace de materia en el área de formulación y aditivos (PAB-r6)*

$$R_{PA6} + R_{HA6} + R_{GA6} + R_{14A6} = R_{81A6} + R_{82A6} + R_{83A6} + R_{84A6} + R_{85A6} + R_{86A6} + R_{87A6} + R_{88A6} \quad (2.161)$$

$$R_{81A6} + R_{82A6} + R_{83A6} + R_{84A6} + R_{85A6} + R_{86A6} + R_{87A6} + R_{88A6} \leq 133 \quad (2.162)$$

**Tabla 27.** Matriz de rendimientos de producción y formulación de PEAD, planta Asahi, Tren B.

Productos	Reactivos					
	$R_{PA6}$	$R_{HA6}$	$R_{GA6}$	$R_{14A6}$	$R_r$	$R_s$
$R_{PA6}$	0	0	0	0	0	0
$R_{HA6}$	0	0	0	0	0	0
$R_{GA6}$	0	0	0	0	0	0
$R_{14A6}$	0	0	0	0	0	0
$R_r$	0.9101	4.8728	171.17	275.24	0	0
$R_s$	0.0601	0.3218	11.303	18.174	0	0

Donde:  $r=81$  al  $84$  y  $s=85$  al  $88$

**Tabla 28.** Estrategia de comercialización en la elaboración de los diferentes grados de PEAD, planta Asahi, Tren B.

$R_r$	% producción
$R_{81A6}$	10
$R_{82A6}$	30
$R_{83A6}$	30
$R_{84A6}$	30

$$\alpha_{81,PA6}R_{PA6} + \alpha_{81,HA6}R_{HA6} + \alpha_{81,14}R_{14A6} + \alpha_{81,GA6}R_{GA6} = R_{81A6} \quad (2.163)$$

$$R_{81A6} \leq 13$$

$$\alpha_{85,PA6}R_{PA6} + \alpha_{85,HA6}R_{HA6} + \alpha_{85,14}R_{14A6} + \alpha_{85,GA6}R_{GA6} = R_{85A6} \quad (2.164)$$

$$R_{85A6} \leq 1$$

$\alpha_{81,PA6}$ =Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 6004S/ton de PEAD puro, tren B

$\alpha_{81,HA6}$ = Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 6004S/ton de hexano, tren B

$\alpha_{81,14}$ = Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 6004S/ton de hidrógeno, tren B

$\alpha_{81,GA6}$ = Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 6004S/ton de propileno, tren B

$\alpha_{85,PA6}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 6004S/ton de PEAD puro, tren B

$\alpha_{85,HA6}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 6004S/ton de hexano, tren B

$\alpha_{85,14}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 6004S/ton de hidrógeno, tren B

$\alpha_{85,GA6}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 6004S/ton de propileno, tren B

$$\alpha_{82,PA6}R_{PA6} + \alpha_{82,HA6}R_{HA6} + \alpha_{82,14}R_{14A6} + \alpha_{82,GA6}R_{GA6} = R_{82A6} \quad (2.165)$$

$$R_{82A6} \leq 38$$

$$\alpha_{86,PA6}R_{PA6} + \alpha_{86,HA6}R_{HA6} + \alpha_{86,14}R_{14A6} + \alpha_{86,GA6}R_{GA6} = R_{86A6} \quad (2.166)$$

$$R_{86A6} \leq 2$$

$\alpha_{82,PA6}$ = Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 60120/ton de PEAD puro tren B

$\alpha_{82,HA6}$ = Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 60120/ton de hexano, tren B

$\alpha_{82,14}$ = Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 60120/ton de hidrógeno, tren B

$\alpha_{82,GA6}$ = Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 60120/ton de propileno, tren B

$\alpha_{86,PA6}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 60120/ton de PEAD puro, tren B

$\alpha_{86,HA6}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 60120/ton de hexano, tren B

$\alpha_{86,14}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 60120/ton de hidrógeno, tren B

$\alpha_{86,GA6}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 60120/ton de propileno, tren B

$$\alpha_{83,PA6}R_{PA6} + \alpha_{83,HA6}R_{HA6} + \alpha_{83,14}R_{14A6} + \alpha_{83,GA6}R_{GA6} = R_{83A6} \quad (2.167)$$

$$R_{83A6} \leq 38$$

$$\alpha_{87,PA6}R_{PA6} + \alpha_{87,HA6}R_{HA6} + \alpha_{87,14}R_{14A6} + \alpha_{87,GA6}R_{GA6} = R_{87A6} \quad (2.168)$$

$$R_{87A6} \leq 2$$

$\alpha_{83,PA6}$ =Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 65050/ton de PEAD puro, tren B

$\alpha_{83,HA6}$ = Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 65050/ton de hexano, tren B

$\alpha_{83,14}$ = Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 65050/ton de hidrógeno, tren B

$\alpha_{83,GA6}$ = Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 65050/ton de propileno, tren B

$\alpha_{87,PA6}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 65050/ton de PEAD puro, tren B

$\alpha_{87,HA6}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 65050/ton de hexano, tren B

$\alpha_{87,14}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 65050/ton de hidrógeno, tren B

$\alpha_{87,GA6}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 65050/ton de propileno, tren B

$$\alpha_{84,PA6}R_{PA6} + \alpha_{84,HA6}R_{HA6} + \alpha_{84,14}R_{14A6} + \alpha_{84,GA6}R_{GA6} = R_{84A6} \quad (2.169)$$

$$R_{84A6} \leq 38$$

$$\alpha_{88,PA6}R_{PA6} + \alpha_{88,HA6}R_{HA6} + \alpha_{88,14}R_{14A6} + \alpha_{88,GA6}R_{GA6} = R_{88A6} \quad (2.170)$$

$$R_{88A6} \leq 2$$

$\alpha_{84,PA6}$ =Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 65080/ton de PEAD puro, tren B

$\alpha_{84,HA6}$ = Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 65080/ton de hexano, tren B

$\alpha_{84,14}$ = Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 65080/ton de hidrógeno, tren B

$\alpha_{84,GA6}$ = Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 65080/ton de propileno, tren B

$\alpha_{88,PA6}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 65080/ton de PEAD puro, tren B

$\alpha_{88,HA6}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 65080/ton de hexano, tren B

$\alpha_{88,14}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 65080/ton de hidrógeno, tren B

$\alpha_{88,GA6}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 65080/ton de propileno, tren B

### ***Balance de materia del Proceso de Polietileno de Alta Densidad, Proceso Mitsui***

$$(R_{64A7} + R_{64A8}) + (R_{HA7} + R_{HA8}) + (R_{GA7} + R_{GA8}) + (R_{BA7} + R_{BA8}) + (R_{14A7} + R_{14A8}) = R_{91} + R_{92} + R_{93} + R_{94} + R_{95} + R_{96} \quad (2.171)$$

$$R_{91} + R_{92} + R_{93} + R_{94} + R_{95} + R_{96} \leq 336 \quad (2.172)$$

donde:

$R_{64A7}$ = Flujo en ton/día de etileno destinado al proceso Mitsui de PEAD, tren A

$R_{64A8}$ = Flujo en ton/día de etileno destinado al proceso Mitsui de PEAD, tren B

$R_{HA7}$ = Flujo en ton/día de hexano destinado al proceso Mitsui de PEAD tren A

$R_{HA8}$ = Flujo en ton/día de hexano destinado al proceso Mitsui de PEAD tren B

$R_{GA7}$ = Flujo en ton/día de propileno destinado al proceso Mitsui de PEAD tren A

$R_{GA8}$ = Flujo en ton/día de propileno destinado al proceso Mitsui de PEAD tren B

$R_{BA7}$ = Flujo en ton/día de 1-buteno destinado al proceso Mitsui de PEAD tren A

$R_{BA8}$ = Flujo en ton/día de 1-buteno destinado al proceso Mitsui de PEAD tren B

$R_{91}$ = Flujo total producido en ton/día de PEAD tipo Padmex 56035

$R_{92}$ = Flujo total producido en ton/día de PEAD tipo Padmex 60120 en el proceso Mitsui

$R_{93}$ = Flujo total producido en ton/día de segundas de PEAD tipo Padmex 56035

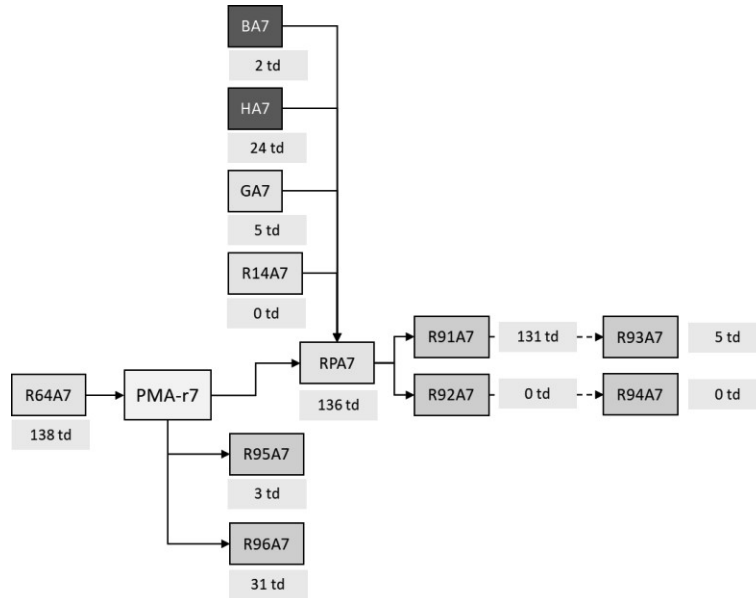
$R_{94}$ =Flujo total producido en ton/día de segundas de PEAD Padmex 60120

$R_{95}$ = Flujo total producido en ton/día de ceras polietilénicas en el proceso Mitsui de PEAD

$R_{96}$ = Flujo total producido en ton/día de gas residual en el proceso Mitsui de PEAD

### Planta de Polietileno de Alta Densidad, proceso Mitsui (PMA-r7)

En la Fig. 29 se puede observar el balance de materia de la planta PEAD, tren A, con tecnología Mitsui, indicando las transferencias que sustenta las ecuaciones que se citan a continuación:



**Figura 29.** Diagrama de bloques con las entradas y salidas, proceso Mitsui, tren A, planta de Polietileno de Alta Densidad en el complejo petroquímico Morelos.

#### Balance de materia tren A de polietileno de alta densidad, proceso Mitsui (PMA-r7)

$$R_{64A7} = R_{PA7} + R_{95A7} + R_{96A7} \quad (2.173)$$

**Tabla 29.** Matriz de rendimientos para la obtención de PEAD puro en la planta Mitsui, Tren A.

Productos	Reactivos			
	$R_{64A7}$	$R_{PA7}$	$R_{95A7}$	$R_{96A7}$
$R_{64A7}$	0	0	0	0
$R_{PA7}$	0.9909	0	0	0
$R_{95A7}$	0.0183	0	0	0
$R_{96A7}$	0.2263	0	0	0

$$\alpha_{PA7,64}R_{64A7} + \alpha_{95,64}R_{64A7} + \alpha_{96,64}R_{64A7} = R_{PA7} + R_{95A7} + R_{96A7} \quad (2.174)$$

$$R_{PA7} \leq 136$$

$$R_{95A7} \leq 3$$

$$R_{96A7} \leq 31$$

$\alpha_{PA7,64}$ = Rendimiento de producción ton de polietileno de alta densidad puro/ton de etileno

$\alpha_{95A7,64}$ = Rendimiento de producción ton de ceras polietilénicas/ton de etileno

$\alpha_{96A7,64}$ = Rendimiento de producción ton de gas residual/ton de etileno

## Área de formulación y aditivación del PEAD (PMA-r7)

Balace de materia en el área de formulación y aditivos (PMA-r7)

$$R_{PA7} + R_{HA7} + R_{GA7} + R_{BA7} + R_{14A7} = R_{91A7} + R_{92A7} + R_{93A7} + R_{94A7} \quad (2.175)$$

$$R_{91A7} + R_{92A7} + R_{93A7} + R_{94A7} \leq 136 \quad (2.176)$$

Tabla 30. Matriz de rendimientos de producción y formulación de PEAD, planta Mitsui, Tren A.

Productos	Reactivos								
	$R_{PA7}$	$R_{HA7}$	$R_{GA7}$	$R_{BA7}$	$R_{14A7}$	$R_{91A7}$	$R_{92A7}$	$R_{93A7}$	$R_{94A7}$
$R_{PA7}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$R_{HA7}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$R_{GA7}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$R_{BA7}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$R_{14A7}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$R_{91A7}$	0.9557	5.3722	56.996	612.01	25.610	0	0	0	0
$R_{92A7}$	0.9557	5.3722	56.996	612.01	25.610	0	0	0	0
$R_{93A7}$	0.0352	0.1977	2.2083	22.526	0.9426	0	0	0	0
$R_{94A7}$	0.0352	0.1977	2.2083	22.526	0.9426	0	0	0	0

Tabla 31. Estrategia de comercialización en la elaboración de los diferentes grados de PEAD, planta Mitsui, Tren A.

Productos	% producción
$R_{91A7}$	100
$R_{92A7}$	0

Con base en la estrategia comercial:

$$\alpha_{91,PA7}R_{PA7} + \alpha_{91,HA7}R_{HA7} + \alpha_{91,GA7}R_{GA7} + \alpha_{91,BA7}R_{BA7} + \alpha_{91,14}R_{14A7} = R_{91A7} \quad (2.177)$$

$$R_{91A7} \leq 131$$

$$\alpha_{93,PA7}R_{PA7} + \alpha_{93,HA7}R_{HA7} + \alpha_{93,GA7}R_{GA7} + \alpha_{93,BA7}R_{BA7} + \alpha_{93,14}R_{14A7} = R_{93A7} \quad (2.178)$$

$$R_{93A7} \leq 5$$

donde:

$\alpha_{91,PA7}$ =Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 56035/ton de PEAD puro, tren A

$\alpha_{91,HA7}$ = Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 56035/ton de hexano, tren A

$\alpha_{91,GA7}$ = Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 56035/ton de propileno, tren A

$\alpha_{91,BA7}$ = Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 56035/ton de 1-buteno, tren A

$\alpha_{91,14}$ = Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 56035/ton de hidrógeno, tren A

$\alpha_{93,PA7}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 56035/ton de PEAD puro, tren A

$\alpha_{93,HA7}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 56035/ton de hexano, tren A

$\alpha_{93,GA7}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 56035/ton de propileno, tren A

$\alpha_{93,BA7}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 56035/ton de 1-buteno, tren A

$\alpha_{93,14}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 56035/ton de hidrógeno, tren A

$$\alpha_{92,PA7}R_{PA7} + \alpha_{92,HA7}R_{HA7} + \alpha_{92,GA7}R_{GA7} + \alpha_{92,BA7}R_{BA7} + \alpha_{92,14}R_{14A7} = R_{92A7}$$
$$R_{92A7} = 0$$

$$\alpha_{94,PA7}R_{PA7} + \alpha_{94,HA7}R_{HA7} + \alpha_{94,GA7}R_{GA7} + \alpha_{94,BA7}R_{BA7} + \alpha_{94,14}R_{14A7} = R_{94A7}$$
$$R_{94A7} = 0$$

$\alpha_{92,PA7}$ =Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 60120/ton de PEAD puro, tren A

$\alpha_{92,HA7}$ = Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 60120/ton de hexano, tren A

$\alpha_{92,GA7}$ = Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 60120/ton de propileno, tren A

$\alpha_{92,BA7}$ = Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 60120/ton de 1-buteno, tren A

$\alpha_{92,14}$ = Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 60120/ton de hidrógeno, tren A

$\alpha_{94,PA7}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 60120/ton de PEAD puro, tren A

$\alpha_{94,HA7}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 60120/ton de hexano, tren A

$\alpha_{94,GA7}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 60120/ton de propileno, tren A

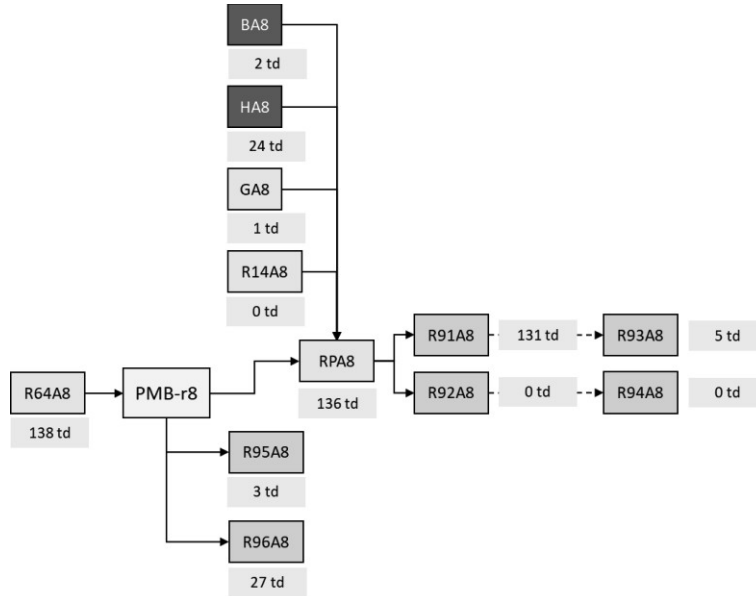
$\alpha_{94,BA7}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 60120/ton de 1-buteno, tren A

$\alpha_{94,14}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 60120/ton de hidrógeno, tren A



### Planta de Polietileno de Alta Densidad, proceso Mitsui (PMB-r8)

En la Fig. 30 se puede observar el balance de materia de la planta PEAD, tren B, con tecnología Mitsui, indicando las transferencias que sustenta las ecuaciones que se citan a continuación:



**Figura 30.** Diagrama de bloques con las entradas y salidas, proceso Mitsui, tren B, planta de Polietileno de Alta Densidad en el complejo petroquímico Morelos.

*Balance de materia tren B de polietileno de alta densidad, proceso Mitsui (PMB-r8)*

$$R_{64A8} = R_{PA8} + R_{95A8} + R_{96A8} \quad (2.179)$$

**Tabla 32.** Matriz de rendimientos para la obtención de PEAD puro en la planta Mitsui, Tren B.

Productos	Reactivos			
	$R_{64A8}$	$R_{PA8}$	$R_{95A8}$	$R_{96A8}$
$R_{64A8}$	0	0	0	0
$R_{PA8}$	0.9909	0	0	0
$R_{95A8}$	0.0183	0	0	0
$R_{96A8}$	0.2263	0	0	0

$$\alpha_{PA8,64}R_{64A8} + \alpha_{95,64}R_{64A8} + \alpha_{96,64}R_{64A8} = R_{PA8} + R_{95A8} + R_{96A8} \quad (2.180)$$

$$R_{PA8} \leq 136$$

$$R_{95A8} \leq 3$$

$$R_{96A8} \leq 31$$

$\alpha_{PA8,64}$ = Rendimiento de producción ton de polietileno de alta densidad puro/ton de etileno

$\alpha_{95A8,64}$ = Rendimiento de producción ton de ceras polietilénicas/ton de etileno

$\alpha_{96A8,64}$ = Rendimiento de producción ton de gas residual/ton de etileno

## Área de formulación y aditivación del PEAD (PMB-r8)

Balance de materia en el área de formulación y aditivos (PMB-r8)

$$R_{PA8} + R_{HA8} + R_{GA8} + R_{BA8} + R_{14A8} = R_{91A8} + R_{92A8} + R_{93A8} + R_{94A8} \quad (2.181)$$

$$R_{91A8} + R_{92A8} + R_{93A8} + R_{94A8} \geq 136 \quad (2.182)$$

Tabla 33. Matriz de rendimientos de producción y formulación de PEAD, planta Mitsui, Tren B.

Productos	Reactivos								
	$R_{PA8}$	$R_{HA8}$	$R_{GA8}$	$R_{BA8}$	$R_{14A8}$	$R_{91A8}$	$R_{92A8}$	$R_{93A8}$	$R_{94A8}$
$R_{PA8}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$R_{HA8}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$R_{GA8}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$R_{BA8}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$R_{14A8}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$R_{91A8}$	0.9557	5.3722	56.996	612.01	25.610	0	0	0	0
$R_{92A8}$	0.9557	5.3722	56.996	612.01	25.610	0	0	0	0
$R_{93A8}$	0.0352	0.1977	2.2083	22.526	0.9426	0	0	0	0
$R_{94A8}$	0.0352	0.1977	2.2083	22.526	0.9426	0	0	0	0

Tabla 34. Estrategia de comercialización en la elaboración de los diferentes grados de PEAD, planta Mitsui, Tren B.

Productos	% producción
$R_{91A8}$	100
$R_{92A8}$	0

Con base en la estrategia comercial:

$$\alpha_{91,PA8}R_{PA8} + \alpha_{91,HA8}R_{HA8} + \alpha_{91,GA8}R_{GA8} + \alpha_{91,BA8}R_{BA8} + \alpha_{91,14}R_{14A8} = R_{91A8} \quad (2.183)$$

$$R_{91A8} \leq 131$$

$$\alpha_{93,PA8}R_{PA8} + \alpha_{93,HA8}R_{HA8} + \alpha_{93,GA8}R_{GA8} + \alpha_{93,BA8}R_{BA8} + \alpha_{93,14}R_{14A8} = R_{93A8} \quad (2.184)$$

$$R_{93A8} \leq 5$$

$\alpha_{91,PA8}$ =Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 56035/ton de PEAD puro, tren B

$\alpha_{91,HA8}$ = Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 56035/ton de hexano, tren B

$\alpha_{91,GA8}$ = Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 56035/ton de propileno, tren B

$\alpha_{91,BA8}$ = Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 56035/ton de 1-buteno, tren B

$\alpha_{91,14}$ = Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 56035/ton de hidrógeno, tren B

$\alpha_{93,PA8}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 56035/ton de PEAD puro, tren B

$\alpha_{93,HA8}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 56035/ton de hexano, tren B

$\alpha_{93,GA8}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 56035/ton de propileno, tren B

$\alpha_{93,BA8}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 56035/ton de 1-buteno, tren B

$\alpha_{93,14}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 56035/ton de hidrógeno, tren B

$$\alpha_{92,PA8}R_{PA8} + \alpha_{92,HA8}R_{HA8} + \alpha_{92,GA8}R_{GA8} + \alpha_{92,BA8}R_{BA8} + \alpha_{92,14}R_{14A8} = R_{92A8}$$

$$R_{92A8} = 0$$

$$\alpha_{94,PA8}R_{PA8} + \alpha_{94,HA8}R_{HA8} + \alpha_{94,GA8}R_{GA8} + \alpha_{94,BA8}R_{BA8} + \alpha_{94,14}R_{14A8} = R_{94A8}$$

$$R_{94A8} = 0$$

$\alpha_{92,PA8}$ =Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 60120/ton de PEAD puro, tren B

$\alpha_{92,HA8}$ = Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 60120/ton de hexano, tren B

$\alpha_{92,GA8}$ = Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 60120/ton de propileno, tren B

$\alpha_{92,BA8}$ = Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 60120/ton de 1-buteno, tren B

$\alpha_{92,14}$ = Rendimiento de producción ton de PEAD tipo Padmex 60120/ton de hidrógeno, tren B

$\alpha_{94,PA8}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 60120/ton de PEAD puro, tren B

$\alpha_{94,HA8}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 60120/ton de hexano, tren B

$\alpha_{94,GA8}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 60120/ton de propileno, tren B

$\alpha_{94,BA8}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 60120/ton de 1-buteno, tren B

$\alpha_{94,14}$ = Rendimiento de producción ton de segundas de PEAD tipo Padmex 60120/ton de hidrógeno, tren B

*Contenedor de Servicios Auxiliares (AUX-ra)*

$$R_{8AUX} + R_{9AUX} + R_{14AUX} + R_{22} + R_{71AUX} + X_{O2} = R_{19} \quad (2.185)$$

### Servicios Principales

Los servicios principales, también conocidos como servicios auxiliares, son aquellas plantas que generan y proporcionan la energía o flujos necesarios para obtener y mantener las condiciones de operación como temperatura y presión, requeridos para la operación de las plantas que dan origen a los diferentes productos petroquímicos (ver Tablas 35-45).

**Tabla 35.** Factores de insumo para la producción de una tonelada de etileno, complejo La Cangrejera.

<b>Planta de Etileno</b>	<b>Unidades</b>	
Propileno grado químico	t/t	0.029
Diesel especial	m <sup>3</sup> /t	0.006
Propano de planta etileno	t/t	0.000
Propano butano	t/t	0.000
Metanol de etileno	t/t	0.000
Nitrógeno de etileno	t/t	0.000
Agua de enfriamiento	m <sup>3</sup> /t	314.220
Gas seco combustible	MMBtu/t	6.019
Vapor de alta	t/t	1.849
Energía eléctrica	kWh/t	29.830
Agua de servicios	m <sup>3</sup> /t	0.000

**Tabla 36.** Factores de insumo para la producción de una tonelada de óxido de etileno, complejo La Cangrejera.

<b>Planta de Óxido de etileno</b>	<b>Unidades</b>	
Dicloroetano	l/t	0.000
Nitrógeno	t/t	0.085
Agua de enfriamiento	m <sup>3</sup> /t	413.200
Agua desmineralizada	m <sup>3</sup> /t	0.696
Vapor de alta	t/t	2.408
Energía eléctrica	kWh/t	165.800
Agua de servicios	m <sup>3</sup> /t	0.000
Vapor de baja presión	t/t	0.000
Vapor de media presión	t/t	2.408

**Tabla 37.** Factores de insumo para la producción de una tonelada de oxígeno, Tren 1 y 2 complejo La Cangrejera.

<b>Planta de Oxígeno</b>	<b>Unidades</b>	<b>Tren 1</b>	<b>Tren 2</b>
Agua de enfriamiento	m <sup>3</sup> /t	202.780	202.780
Vapor de alta	t/t	1.434	1.434
Energía eléctrica	kWh/t	23.970	23.970
Agua de servicios	m <sup>3</sup> /t	0.000	0.000

Vapor de media	t/t	1.434	1.434
Nitrógeno	t/t	0.000	0.000

**Tabla 38.** Factores de insumo para la producción de una tonelada de PEBD, Tren 1, 2 y 3, complejo La Cangrejera.

Planta de PEBD	Unidades	Tren 1	Tren 2	Tren 3
Monoetilenglicol	t/t	0.000	0.000	0.000
Kerosina de absorción	t/t	0.000	0.000	0.000
Gasnafta	t/t	0.000	0.000	0.000
Nitrógeno	t/t	0.000	0.000	0.000
Tecnol 90	t/t	0.000	0.000	0.000
Agua de enfriamiento	m <sup>3</sup> /t	250.000	250.000	250.000
Agua desmineralizada	m <sup>3</sup> /t	0.000	0.000	0.000
Vapor de alta	t/t	0.000	0.000	0.000
Energía eléctrica	kWh/t	850.000	850.000	850.000
Agua de servicios	m <sup>3</sup> /t	0.000	0.000	0.000
Vapor de baja	t/t	0.000	0.000	0.000
Vapor de media	t/t	0.348	0.348	0.348

**Tabla 39.** Capacidad de almacenamiento de servicios principales en el complejo La Cangrejera.

Planta de servicios principales	Unidades	
Carga y salida Nitrógeno	ton	1.000
Carga Gas seco	ton	1.000
Carga y salida de PGQ	ton	1.000
Agua de enfriamiento	m <sup>3</sup>	5,940.454
Agua de servicios	m <sup>3</sup>	4,249.439
Agua desmineralizada	m <sup>3</sup>	1,944.365
Energía eléctrica	KWh	569.809
Vapor de alta	ton	78.236
Vapor de baja presión	ton	9.246
Vapor de media presión	ton	53.660
Salida gas seco	ton	50.000

**Tabla 40.** Factores de insumo para la elaboración de una tonelada de etileno, complejo Morelos.

Planta de Etileno	Unidades	
Diesel especial	m <sup>3</sup> /t	0.006
Propileno Químico Nacional	t/t	0.000
Propileno grado polímero Nacional	t/t	0.000
Nitrogeno	t/t	0.000

Mezcla de gas seco comb.	MMBtu/t	4.412
Vapor de alta	t/t	1.971
Vapor de media	t/t	0.000
Vapor de baja	t/t	0.000
Energía eléctrica	kWh/t	6.073
Agua de servicios	m <sup>3</sup> /t	0.000
Agua de enfriamiento	l/t	314.220

**Tabla 41.** Factores de insumo para la producción de una tonelada de óxido de etileno, complejo Morelos.

<b>Planta de Óxido de etileno</b>	<b>Unidades</b>	<b>Tren 1</b>	<b>Tren 2</b>
Agua desmineralizada	t/t	1.480	1.480
Vapor de alta	t/t	5.672	5.672
Vapor de baja	t/t	0.000	0.000
Energía eléctrica	kWh/t	228.000	228.000
Nitrógeno	t/t	0.048	0.048
Agua de enfriamiento	t/t	593.870	593.870

**Tabla 42.** Factores de insumo para la producción de una tonelada de oxígeno, complejo Morelos.

<b>Planta de Oxígeno</b>	<b>Unidades</b>	
Vapor de alta	t/t	1.314
Vapor de media	t/t	1.314
Energía eléctrica	kWh/t	56.160
Agua de servicios	t/t	0.000
Agua de enfriamiento	t/t	200.280

**Tabla 43.** Factores de insumo para la producción de una tonelada de PELBD, complejo Morelos.

<b>Planta de PELBD</b>	<b>Unidades</b>	
Vapor de Alta	t/t	0.080
Vapor de Media	t/t	0.309
Vapor de Baja	t/t	0.096
Energía Eléctrica	kWh/t	453.600
Agua de Servicio	t/t	0.000
Agua de Enfriamiento	t/t	152.000
Agua desmineralizada	t/t	0.000
Nitrógeno	t/t	0.181

**Tabla 44.** Factores de insumo para la producción de una tonelada de PEAD, proceso Asahi y Mitsui, complejo Morelos.

<b>Planta de PEAD</b>	<b>Unidades</b>	<b>Tren A</b>	<b>Tren B</b>
Nitrógeno	t/t	0.203	0.044
Agua desmineralizada	t/t	0.000	0.000
Mezcla Gas seco combustible	t/t	0.000	0.001
Vapor de alta	t/t	0.760	0.073
Vapor de media	t/t	0.760	0.073
Vapor de baja	t/t	0.750	0.000
Energía eléctrica	kWh/t	1,040.000	415.000
Agua de servicios	t/t	1.200	0.000
Agua de enfriamiento	t/t	360.000	200.000
Propileno	t/t	0.000	0.006

**Tabla 45.** Capacidad de almacenamiento de servicios principales en el complejo Morelos.

<b>Planta de servicios principales</b>	<b>Unidades</b>	
Carga Gas seco	ton	1.000
Agua de enfriamiento	Mgal	5,940.454
Agua de servicios	Mgal	4,249.439
Agua desmineralizada	Mgal	1,944.365
Energía eléctrica	Kwh	569.809
Vapor de alta	ton	78.236
Vapor de baja presión	ton	9.246
Vapor de media presión	ton	53.660
Gas seco combustible	ton	50.000
Propileno grado polímero	ton	1.000
Carga PGQ	ton	1.000
Carga PGP	ton	1.000
Carga Nitrógeno QM	ton	1.000

## II.2. Formulación del Modelo

Con base en el modelo matemático desarrollado se obtuvieron un total de 185 ecuaciones, señaladas como ecuaciones (2.1) a la (2.185). De este estadístico, el Complejo Petroquímico La Cangrejera considera 56 restricciones de igualdad, 8 restricciones de desigualdad y 78 variables, dando un total de 14 grados de libertad; mientras que para el Complejo Petroquímico Morelos se contabilizaron 109 restricciones de igualdad, 12 restricciones de desigualdad y 175 variables dando un total de 54 grados de libertad.

### Variables de decisión

Las variables en este sistema se categorizaron en variables de decisión y parámetros, definiendo a una variable de decisión (Arsham, 1994), como una variable que puede ser directamente controlada (rendimientos, composiciones a la entrada, entre otras), mientras que los parámetros son aquellos valores ya definidos (límites de producción).

Teniendo que de las 254 variables identificadas dentro del caso base, solo 68 serán las que permitan la manipulación del escenario, lo cual se observa en la Tabla 46.

Tabla 46. Lista con las variables de decisión en el escenario base.

<b>Alimentación</b>	$E_{1G}, E_{2G}, E_{2I}, P_{2I}, A_{1G1}, A_{1G2}, A_{2G}, O_{1G}, O_{2G}, X_{01}, X_{02}$
<b>Distribución</b>	$Q_{14PBD}, Q_{14PBBDT1}, Q_{14PBBDT2}, Q_{14PBBDT3}, Q_{14OX}, Q_{14CAN}, R_{16}, R_{62}, R_{64}, R_{74}, R_{75}, R_{78}, R_{64PAD}, R_{64PLB}, R_{64OX}, R_{31G}, R_{64r2}, R_{64rh}, R_{64A5}, R_{64A6}, R_{64A7}, R_{64A8},$
<b>Producción</b>	$Q_{39P1}, Q_{4122}, Q_{4142}, Q_{43P3}, Q_{43X3}, R_{PL41}, R_{PL45}, R_{PL48}, R_{83A5}, R_{84A5}, R_{81A6}, R_{82A6}, R_{83A6}, R_{84A6}, R_{91A7}, R_{91A8}$
<b>Comonómeros</b>	$C_{P1}, C_{22}, C_{42}, C_{P3}, C_{X3}, R_{S41}, R_{H41}, R_{S45}, R_{B45}, R_{HA5}, R_{HA6}, R_{HA7}, R_{HA8}, R_{GA5}, R_{GA6}, R_{GA7}, R_{GA8}, R_{BA7}, R_{BA8}$

### Restricciones del Modelo

Para el caso de las restricciones establecidas en este modelo se definen dos categorías, restricciones funcionales y restricciones de no negatividad, las primeras estarán definidas como aquellas limitaciones de producción por capacidad de diseño en los diferentes procesos; mientras que las restricciones de no negatividad, serán aquellas condiciones que limitarán la capacidad de producción por producto, estas restricciones no están explícitamente en el problema pero son físicamente evidentes, pues no pueden existir producciones y transferencias de flujo negativas.

Resumiendo, dentro del modelo definido se identificaron 20 restricciones funcionales y 98 restricciones de no negatividad, lo anterior se da en la Tabla 47.

Tabla 47. Numero de ecuaciones correspondientes a las restricciones funcionales consideradas en el caso base.

Restricciones funcionales	
<b>Número de ecuación</b>	(2.69), (2.100), (2.102), (2.108), (2.120), (2.131), (2.150), (2.154), (2.162), (2.172), (2.176), (2.182)



## Función Objetivo

Teniendo por objetivo en este proyecto el maximizar el valor económico de los procesos de etileno, expresado por:

$$(Millones\ de\ pesos) \quad \max \text{ resultados de operación} = \text{ingresos} - \text{egresos} \quad (2.186)$$

donde:

Los ingresos (Real Academia Española, 2020), serán todas aquellas transacciones que aumenten los bienes de la empresa y para efectos del escenario base, los ingresos estarán contemplados por las siguientes transacciones:

$$\begin{aligned} \text{Ingresos} = & P_1(Q_{09} + R_{9SL}) + P_2(Q_{10} + R_{10}) + P_3(Q_{22} + R_{31SL}) + P_4 * Q_{23} + P_5 \\ & * Q_{24} + P_6 * R_{73} + P_7(Q_{27} + R_{70}) + P_8(Q_{36X} + R_{66SL}) \\ & + P_9(Q_{47} + Q_{48} + Q_{49} + Q_{50}) + P_{10} * R_{12} + P_{11} * R_{15} + P_{12} * R_{18} \\ & + P_{13} * R_{35} + P_{14} * R_{38} \\ & + P_{15}(R_{39} + R_{40} + R_{41} + R_{42} + R_{43} + R_{44} + R_{45} + R_{46} + R_{47} \\ & + R_{48} + R_{49}) + P_{16} * R_{74} + P_{17} * R_{78} + P_{18} * R_{79} + P_{19} * R_{80} \\ & + P_{20}(R_{81} + R_{82} + R_{83} + R_{84}) + P_{21}(R_{89} + R_{95}) \\ & + P_{22}(R_{91} + R_{92}) + P_{23} * R_{97} \end{aligned} \quad (2.187)$$

Por parte de los egresos (Real Academia Española, 2020), éstos serán aquellas transacciones que impliquen la salida de dinero por parte de la empresa para gastos que se convertirán en ingresos, teniendo que:

$$\begin{aligned} \text{Egresos} = & C_1(E_{1G} + E_{2G}) + C_2 * P_{2G} + C_3(X_{01} + X_{02}) + C_4(O_{1G} + O_{2G}) \\ & + C_5(C_{P1} + C_{P2} + C_{P3}) + C_6(C_{X1} + C_{X2} + C_{X3}) \\ & + C_7(C_{21} + C_{22} + C_{23}) + C_8(C_{41} + C_{42} + C_{43}) + C_9 * R_{H2G} \\ & + C_{10}(R_{BPL} + R_{BA7} + R_{BA8}) + C_{11} * R_{SIG} + C_{12} * R_{H1G} + C_{13} \\ & * R_{AGG} + C_{14}(E_{2I}) + \text{servicios principales} + \text{transporte} \end{aligned} \quad (2.188)$$

### II.3. Método de solución

Para el cumplimiento de la efectividad de la función objetivo, se utilizan los valores iniciales generados en el Sistema Alterno (SA), a través de una serie de operaciones matemáticas que estiman una producción de petroquímicos bajo ciertas condiciones de operación, cuidando la coherencia de los datos a la entrada y salida de los diferentes procesos involucrados, contando con indicadores de advertencia que se activan cuando la información o los resultados se encuentran fuera de los límites establecidos; basado en los datos iniciales la herramienta de optimización (MOETI), tiene como propósito el mejorar los resultados de operación obtenidos en el SA, beneficiando a los procesos de etileno y a Pemex en su conjunto, mediante el uso del algoritmo de recursión adherente que calcula diversos valores óptimos hasta obtener la mejor solución óptima.

La elaboración del modelo comenzó con la identificación y esquematización de las interacciones que se llevan a cabo entre los Complejos La Cangrejera y Morelos, de manera grupal e independiente

(ver Figs. A1.1 a la A3.4). Empleando información de diseño se establecieron los límites mínimos y máximos de producción (ver Figs. A4.1-4.3), bajo los que se registrarían el SA y el MOETI; concluida la optimización, los datos obtenidos de los balances de materia son evaluados con apoyo de personal con experiencia operativa, buscando veracidad operativa y económica de los resultados, complementando con una comparativa con cifras de información real. Validados los números, se estableció un escenario base que contempla las condiciones operativas actuales, los resultados obtenidos se almacenan en un archivo plano en Access®, plataforma compatible para la vinculación de los datos al MOETI.

Dicho modelo es ejecutado en la herramienta que lleva por nombre Sistema de Planificación en el Mercadeo de Transporte de Refinación Generalizada, *Generalized Refining Transportation Marketing Planning System* (por sus siglas en inglés GRTMPS), con el cual se busca la convergencia de valores iniciales y optimizar los beneficios económicos de los procesos de etileno.

Esta herramienta cuenta con un tipo de solución similar al utilizado en modelos de generación de flujo aleatorio, *Random Flow Generation* (por sus siglas en inglés RFG) y a modelos de corrientes agrupadas, donde estos requieren de valores iniciales para obtener una solución óptima inicial (Smirnov, Shi, & Celik, 2001); destacando que la diferencia entre un valor inicial y una solución óptima en el rango de error; ya que, los modelos de programación lineal recursiva son optimizados utilizando cada nuevo valor óptimo calculado, hasta que todas las variables se encuentren en las tolerancias especificadas y así obtener la solución óptima. En caso de que el problema a resolver produzca un comportamiento cíclico que impida que el proceso de recursividad encuentre una solución convergente, GRTMPS permite modificar los valores estimados en recursiones anteriores y también aplicar límites en el número de pasos para restringir la ruta de la solución de programación lineal (Haverly, 2020); agregando que cada uno de los resultados óptimos obtenidos en MOETI son independientes para cada uno de los casos de estudio; ya que, las premisas operativas y económicas que manejan pueden ser diferentes, es decir, diferentes precios, capacidades de operación, rendimientos, entre otras.

Cabe destacar que el modelo tendrá la capacidad y versatilidad para apoyar a diferentes áreas dentro de la empresa, tanto operativas como administrativas; ya que su diseño considerará la posibilidad de elaborar hasta 31 casos de análisis, siendo estos la representación de los 31 días que puede contener un mes, atendiendo a los programas de corto plazo (análisis diario); sin embargo, para el caso de la programación operativa, área donde se realiza el análisis a mediano plazo, el modelo solo requerirá la activación de 12 a 18 casos (análisis mensual) y para el área de programación de largo plazo la activación de 3 a 5 casos (análisis anual), ajustando los rendimientos y factores al promedio del periodo que aplique el análisis.

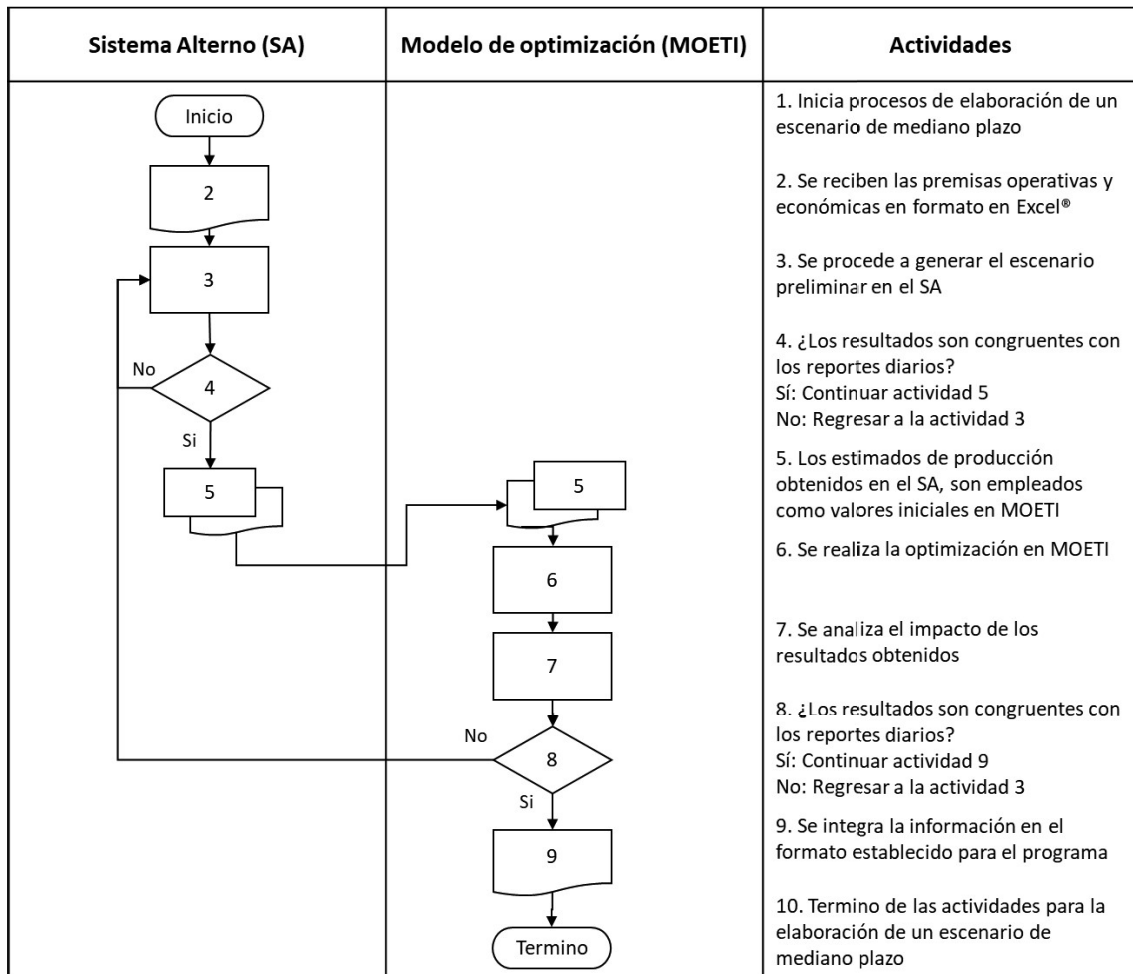


Figura 31. Diagrama de flujo con los pasos a seguir para la optimización de un escenario de mediano plazo.

## Capítulo III. Implementación del MOETI y análisis de resultados

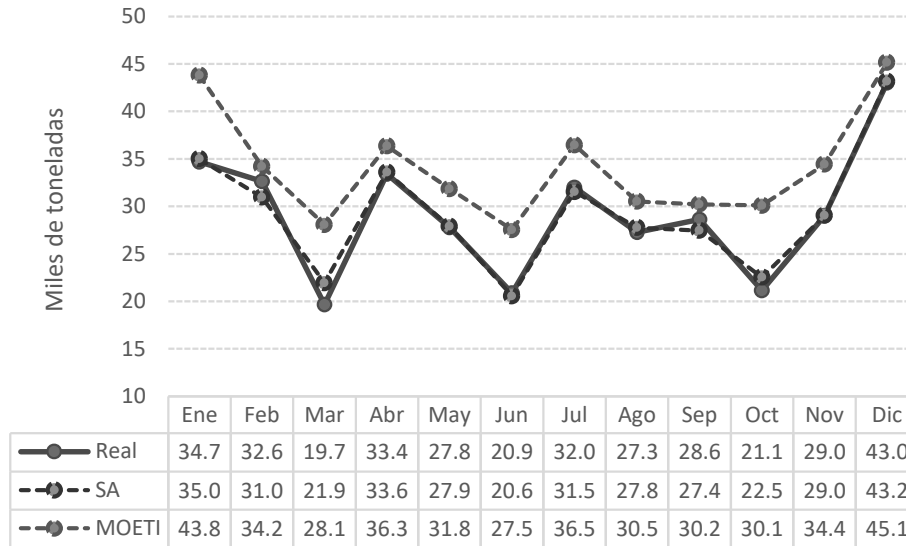
### III.1. Validación del Modelo

Para la validación del modelo se realizó un ejercicio (Programa Operativo y Financiero Anual de Trabajo, POFAT 2020 v.400), con el objetivo de obtener como resultado información muy similar a real reportada en la Base de Datos Institucional (BDI), por las áreas operativas en los Procesos de Etileno; para ello, se calibraron dentro del SA los rendimientos y factores de conversión, se actualizaron los mantenimientos (ver Tabla 48) y se alimentaron los flujos de etano nacional e importado y propano nacional considerados en cada uno de los meses a evaluar (enero-octubre real 2020 y noviembre-diciembre programa operativo). Se observó que, bajo las mismas condiciones de operación, los resultados obtenidos en el Sistema Alterno (SA), fueron muy cercanos a los reportados en la BDI (variación del 2%) con diferencias mínimas en los flujos de producción de los subproductos y un mayor consumo de servicios en algunas plantas. Empleando estos datos como valores iniciales para el modelo MOETI en GRTMPS, se inicia el proceso de optimización, y con base en la información real, los resultados del modelo indican los diferentes puntos de oportunidad comerciales que podrían estarse perdiendo de vista en la operación de las plantas y que deben considerarse en la programación de las operaciones.

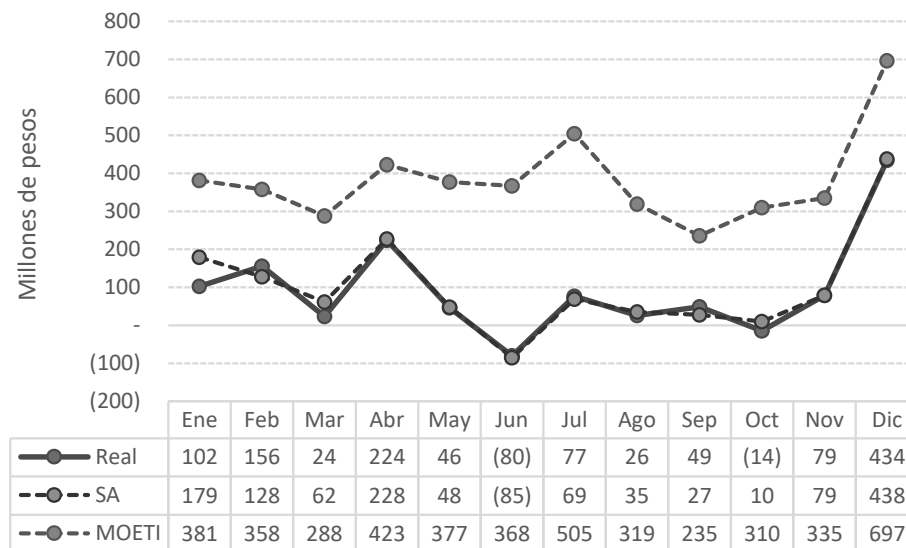
Tabla 48. Mantenimientos considerados en la validación del Modelo y en desarrollo de los casos de estudio.

La Cangrejera		Morelos	
Planta	Mes	Planta	Mes
OXE-CAN	Enero	OXE-MOR	Septiembre
PEBD	Octubre	Glicoles	Enero
PEBD	Noviembre	Glicoles	Octubre
Etileno	Noviembre		

En las Figs. 32 y 33, se observa una comparativa entre las producciones reales y las obtenidas mediante la calibración del SA, mismos que fueron mejorados con uso del MOETI. Hablando específicamente de la información real y los estimados obtenidos en el SA, se puede observar una variación mínima, variación que no genera un rango de error fuera de tendencia, es decir, el impacto en los resultados de operación en 1.3 MMpesos, no es significativa, como lo es, la propuesta de mejora del MOETI con una maximización en los resultados en 58.5 MMpesos.



**Figura 32.** Comparativo mensual de la producción neta de los principales productos petroquímicos (óxido de etileno, PEAD, PEBD y PELBD) con los que se valida el funcionamiento del modelo matemático desarrollado, bajo los criterios para la elaboración de un programa operativo y financiero.



**Figura 33.** Comparativa mensual de los resultados de operación, con los que se valida el cumplimiento de la función objetivo para un análisis a mediano plazo.

Analizando los resultados de producción de la Fig. 32, la comparativa entre la producción real y la producción del SA señala una variación en promedio anual del 8%, porcentaje superior con respecto a lo ya realizado, esta variación se debe principalmente a que uno de los criterios que se emplean en la elaboración de los programas de operación y con el cual se desarrollaron los balances de materia es el no considerar el manejo de inventarios, debido a que para el cálculo de los ingresos programa de la empresa se realizan con base en la producción neta, entendiendo por producción

neta el flujo disponible a ventas, libre de autoconsumos; tal criterio no aplica dentro de la operación diaria, ya que mediante esta práctica es posible el cumplimiento de los volúmenes comprometidos comercialmente y la factibilidad logística para la distribución de los petroquímicos.

Se concluye que los valores obtenidos en el SA, reproducen el funcionamiento de la información operativa real.

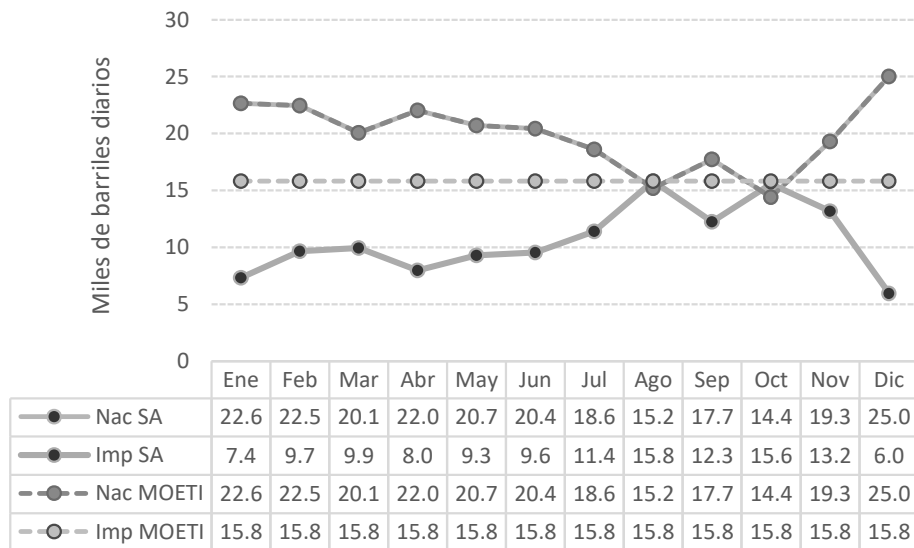
En cuanto a la comparativa de los valores iniciales del SA y los resultados obtenidos del MOETI, es preciso mencionar que uno de los objetivos bajo los que se rigen los procesos petroquímicos en Petróleos Mexicanos, es llevar a cabo las actividades necesarias para abastecer la demanda nacional de dichos productos, permitiendo el continuo desarrollo industrial del país; razón por la que, dentro de los programas de operación, siempre se tendrá como premisa el satisfacer los compromisos comerciales, aun cuando éstos no sean redituables para la empresa. Lo que, al comparar la producción del SA con los niveles de producción propuestos por el MOETI, este último sugiere distribuir el etileno producido en las plantas de óxido de etileno, PEBD y PELBD, descartando la operación de las plantas de PEAD, ya que por condiciones de precio, es mucho más rentable incrementar la producción y por ende, las ventas de estos productos, particularmente el óxido de etileno donde sugiere un incremento en su producción del 75%; sin embargo, actualmente el mercado para colocar este producto se ha reducido debido a la baja confiabilidad en la elaboración de este petroquímico, circunstancia que orilló a algunos clientes a contraer contratos de importación, disminuyendo las posibilidades de venta. Para el caso de los polietilenos, sugiere incrementar las producciones de manera periódica, con base en el precio de venta; el incremento de producción en un 54% es posible, así como su colocación en el mercado, por lo que esta opción se considera factible; así como, la salida de operación de la PEAD; siempre y cuando la empresa BI se encuentre operando, ya que es la única empresa en el territorio mexicano con la posibilidad de elaborar este producto y con ello, satisfacer el objetivo de abastecimiento de la demanda nacional. Se concluye que la propuesta de MOETI es viable por lo que la función objetivo obtenida (ver Fig. 33) se considera válida como soporte para la toma de decisiones, como la priorización en los mantenimientos de las plantas, destinando los recursos bajo este criterio que permita mejorar la confiabilidad operativa y posteriormente, incrementar las ventas al recuperar la confianza de los clientes.

### **Escenarios de sensibilidad en los procesos de etileno**

Ahora bien, partiendo del escenario base se desarrollan tres escenarios de sensibilidad bajo las problemáticas más recientes a las que se ha enfrentado la empresa. Estos escenarios reflejarán las condiciones de operación actuales y buscarán dar un análisis exhaustivo para la toma de decisiones en la realización de proyectos y contratos como “el incremento en la vaporización de etano importado” (Petróleos Mexicanos, 2018), “cumplimiento en la entrega de etano a Braskem Idesa (BI)” (Energía a debate, 2020), buscando un punto de equilibrio entre estas situaciones, mismas que deben ser eficientes y eficaces, pues de ellas depende el impacto en los resultados de operación de la industria petroquímica más representativa del país; la cual demuestra su importancia en la versatilidad de usos y aplicaciones en las diferentes industrias.

### III.2. Evaluación consumo de etano importado en los procesos de etileno (ETI)

El **primer caso de estudio** tiene por objetivo evaluar para un escenario de mediano plazo (POFAT v.401), la rentabilidad del consumo de etano importado para la obtención de etileno, contando para ello con un sistema de vaporización en la Terminal Refrigerada en Pajaritos con un flujo de hasta 900 td (16 Mbd) de etano. Dicho caso de estudio se desarrolla bajo las circunstancias más actuales de las plantas de etileno, mismas que fueron empleadas para la validación del caso base (POFAT v.400), se muestra una producción a baja disponibilidad de etano por parte de los procesos de gas en Pemex Transformación Industrial, mantenimientos (ver Tabla 48) y una alimentación promedio de enero a octubre de 337 Mt (19 Mbd) de etano nacional, sabiendo por referencia operativa, se requiere una disponibilidad mensual de 53 Mt (30 Mbd) de etano, dando un acumulado anual de 625 Mt (30 Mbd), para una operación estable de las plantas de etileno; razón por la que se considera el completar, en los meses que se requiera, los flujos de alimentación de este escenario con etano importado, buscando mantener a los procesos en una operación confiable y con opción a incrementar sus ingresos (ver Fig. 34).



**Figura 34.** Comparativo mensual del consumo de etano nacional e importado entre los valores iniciales del SA y los resultados óptimos de MOETI.

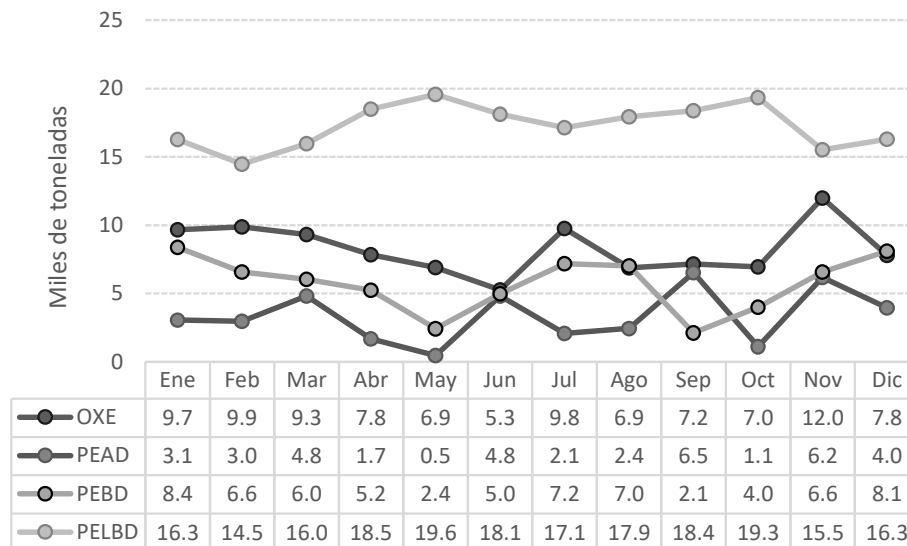
Este escenario maneja el mismo número de ecuaciones, restricciones de igualdad y desigualdad que el escenario base, pero considerando una variable adicional, el consumo de etano importado en el Complejo La Cangrejera, dando como resultado 69 variables de decisión, obteniendo la siguiente función objetivo:

$$(Millones\ de\ pesos) \quad \max \text{ resultados de operación} = \text{ingresos} - \text{egresos} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned}
\text{Ingresos} = & P_1(Q_{09} + R_{9SL}) + P_2(Q_{10} + R_{10}) + P_3(Q_{22} + R_{31SL}) + P_4 * Q_{23} + P_5 \\
& * Q_{24} + P_6 * R_{73} + P_7(Q_{27} + R_{70}) + P_8(Q_{36X} + R_{66SL}) \\
& + P_9(Q_{47} + Q_{48} + Q_{49} + Q_{50}) + P_{10} * R_{12} + P_{11} * R_{15} + P_{12} * R_{18} \\
& + P_{13} * R_{35} + P_{14} * R_{38} \\
& + P_{15}(R_{39} + R_{40} + R_{41} + R_{42} + R_{43} + R_{44} + R_{45} + R_{46} + R_{47} \\
& + R_{48} + R_{49}) + P_{16} * R_{74} + P_{17} * R_{78} + P_{18} * R_{79} + P_{19} * R_{80} \\
& + P_{20}(R_{81} + R_{82} + R_{83} + R_{84}) + P_{21}(R_{89} + R_{95}) \\
& + P_{22}(R_{91} + R_{92}) + P_{23} * R_{97}
\end{aligned} \tag{3.2}$$

$$\begin{aligned}
\text{Egresos} = & C_1(E_{1G} + E_{2G}) + C_2(X_{01} + X_{02}) + C_3(O_{1G} + O_{2G}) \\
& + C_4(C_{P1} + C_{P2} + C_{P3}) + C_5(C_{X1} + C_{X2} + C_{X3}) \\
& + C_6(C_{21} + C_{22} + C_{23}) + C_7(C_{41} + C_{42} + C_{43}) + C_8 * R_{H2G} \\
& + C_9(R_{BPL} + R_{BA7} + R_{BA8}) + C_{10} * R_{SIG} + C_{11} * R_{H1G} + C_{12} \\
& * R_{AGG} + C_{13}(E_{1I} + E_{2I}) + \text{servicios principales} + \text{transporte}
\end{aligned} \tag{3.3}$$

En este primer caso de estudio se puede observar dentro de la Fig. 34, la producción estimada para los principales productos petroquímicos, mismos que se obtienen al considerar una disponibilidad máxima de etano nacional en 414 Mt (20 Mbd) y 222 Mt (11 Mbd) de etano importado, flujo suficiente para mantener una alimentación en 53 Mt mensuales (30 Mbd), que es una de las premisas operativas a cumplir y con el objetivo de lograr resultados de operación positivos para la empresa.



**Figura 35.** Producción estimada de los principales productos petroquímicos en el SA, que servirán como valores iniciales en la optimización de los resultados de operación en el MOETI.

Con base en las producciones estimadas en el SA, se realiza el ingreso de los valores iniciales a MOETI para la optimización de los mismo, con la oportunidad de consumir hasta 28 Mt (16 Mbd) de etano importado, donde se obtiene un incremento en la producción anual de petroquímicos del 31% con respecto a las producciones iniciales en el SA. Los cambios se reflejan en un aumento de 156% anual para la producción de PEBD, 125% en la producción de OE y la disminución en 49% para la



producción de PEAD y 40% en la producción de PELBD (ver Fig. 36); sin embargo, esta priorización cambia en los meses de septiembre y octubre, disminuyendo la producción de PEBD y OXE, favoreciendo en su lugar la producción de PELBD. Esta situación es provocada por una afectación en los rendimientos de operación de las plantas por los mantenimientos programados (ver Tabla 48), que perjudica el incentivo de elaboración por tonelada de PEBD y OXE, en los meses en cuestión; razón por la que se beneficia la elaboración del PELBD y PEAD (ver Figs. 37 y 38).

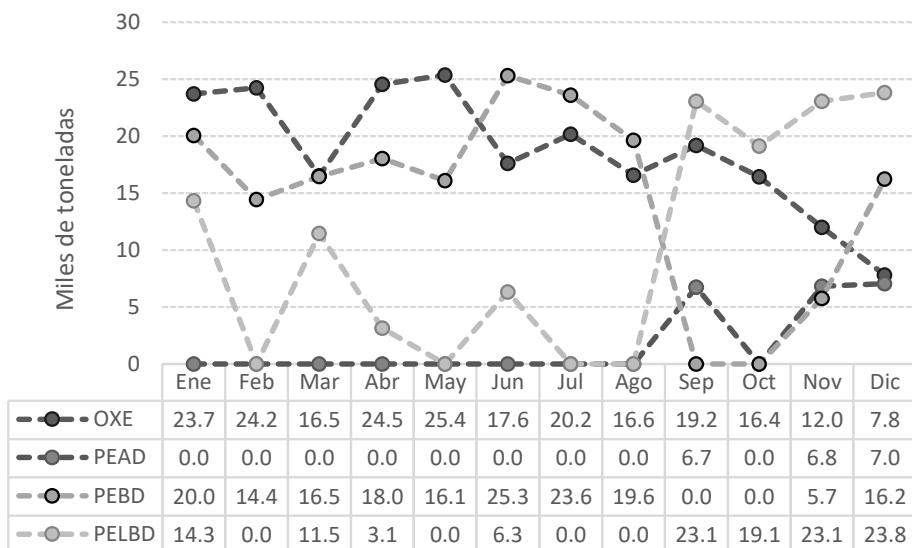


Figura 36. Escenario de producción óptima de los principales productos petroquímicos en MOETI, con base en los valores iniciales del SA.

Code	Description	OpRate UNITS/CD	UnusdCap UNITS/CD	PctOfMax %	Incentive \$/Ton	Minimum UNITS/CD	Maximum UNITS/CD
Cq1	Planta de Etileno QC-Capacidad P Etileno	0	2	3.65		0	2
Cq2	Planta Óxido de Etil-Capacidad P Óxido d	1		100.00	28.60	0	1
Cq6	Oxígeno Tren 1 -Capacidad P Oxígeno		0			0	0
Cq7	Oxígeno Tren 2 -Capacidad P Oxígeno		0			0	0
Cq3	PEBD T1 -Capacidad PEBD T1		0		-35.46	0	0
Cq4	PEBD T2 -Capacidad PEBD T2		0			0	0
Cq5	PEBD T3 -Capacidad PEBD T3		0			0	0

Code	Description	OpRate UNITS/CD	UnusdCap UNITS/CD	PctOfMax %	Incentive \$/Ton	Minimum UNITS/CD	Maximum UNITS/CD
Cr1	Planta de Etileno -Capacidad Planta Et	2	0	85.73		0	2
Cr9	Planta de Oxígeno -Capacidad Planta Ox	3		100.00	63.94	0	3
Cr2	Planta Óxido de Etil-Capacidad Planta Óx	0	1	5.56		0	1
Crh	Planta Óxido de Etil-Capacidad Planta Ox	1		100.00		0	1
Cr3	Planta de Glicoles -Capacidad Planta Gl		0		-183.52	0	0
Cr4	Planta de PELBD Swin-Capacidad Planta Sw	1		100.00	171.36	0	1
Cr5	Planta de PEAD - Asa-Capacidad Planta As		0		-171.30	0	0
Cr6	Planta de PEAD - Asa-Capacidad Planta As		0			0	0
Cr7	Planta de PEAD - Mit-Capacidad Planta Mi		0	100.00	39.19	0	0
Cr8	Planta de PEAD - Mit-Capacidad Planta Mi		0	100.00	60.28	0	0

Figura 37. Resultados de MOETI. Incentivos de operación de los diferentes procesos de etileno en el mes de septiembre (POFAT v.401).

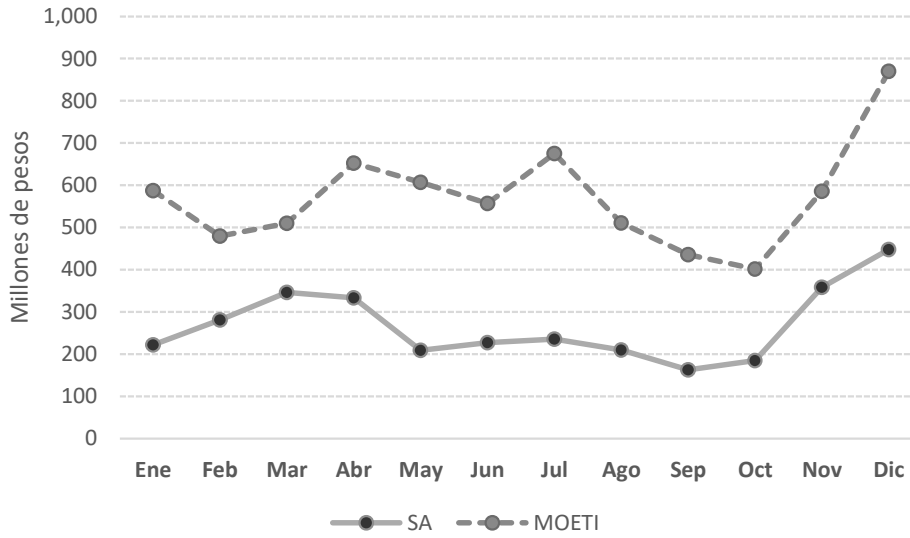
Code	Description	OpRate UNITS/CD	UnusdCap UNITS/CD	PctOfMax %	Incentive \$/Ton	Minimum UNITS/CD	Maximum UNITS/CD
Cq1	Planta de Etileno QC-Capacidad P Etileno	2	0	79.37		0	2
Cq2	Planta Óxido de Etil-Capacidad P Óxido d		1		-46.18	0	1
Cq6	Oxígeno Tren 1 -Capacidad P Oxígeno	0		100.00	21.91	0	0
Cq7	Oxígeno Tren 2 -Capacidad P Oxígeno	0		100.00	21.91	0	0
Cq3	PEBD T1 -Capacidad PEBD T1	0	0		-349.32	0	0
Cq4	PEBD T2 -Capacidad PEBD T2	0	0			0	0
Cq5	PEBD T3 -Capacidad PEBD T3	0	0		-320.31	0	0

Code	Description	OpRate UNITS/CD	UnusdCap UNITS/CD	PctOfMax %	Incentive \$/Ton	Minimum UNITS/CD	Maximum UNITS/CD
Cr1	Planta de Etileno -Capacidad Planta Et	0	2	0.71		0	2
Cr9	Planta de Oxígeno -Capacidad Planta Ox	3		100.00	81.53	0	3
Cr2	Planta Óxido de Etil-Capacidad Planta Ox	1		100.00	5.55	0	1
Crh	Planta Óxido de Etil-Capacidad Planta Ox	1		100.00	5.55	0	1
Cr3	Planta de Glicoles -Capacidad Planta Gl	0	0	76.62		0	0
Cr4	Planta de PELBD Swin-Capacidad Planta Sw	1	0	80.24		0	1
Cr5	Planta de PEAD - Asa-Capacidad Planta As	0	0		-288.75	0	0
Cr6	Planta de PEAD - Asa-Capacidad Planta As	0	0			0	0
Cr7	Planta de PEAD - Mit-Capacidad Planta Mi	0	0			0	0
Cr8	Planta de PEAD - Mit-Capacidad Planta Mi	0	0		-54.03	0	0

Figura 38. Resultados de MOETI. Incentivos de operación de los diferentes procesos de etileno en el mes de octubre (POFAT v.401).

La propuesta de distribución en MOETI se considera viable, ya que con base en la estadística de 2019 (Petróleos Mexicanos, 2019), el reporte por ventas nacionales de polietilenos es de 326 Mt anuales; por lo que se considera posible el colocar las 320 Mt anuales obtenidas en el modelo de estos polímeros en la demanda nacional e incluso para el caso del OXE, se cuenta con la posibilidad de direccionar 3 Mt más de OXE a la planta de glicoles (por capacidad). Estas se sustentan con producciones con los resultados de operación mostrados en la Fig. 39, que muestran el impacto económico de incrementar la producción de petroquímicos en un 31%, incremento derivado de un mayor consumo de etano importado en un 48% (107 Mt o 5 Mbd) con respecto a lo propuesto en el SA (ver Fig. 36), se pueden generar ingresos por 3,653 MMpesos, 113% más que lo estimado en el SA.



**Figura 39.** Comparativo de los resultados de operación obtenidos para el análisis a mediano plazo de la rentabilidad en el consumo de etano importado para la operación de los procesos de etileno.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la importación de etano como materia prima para la elaboración de etileno es rentable bajo los niveles de producción y los precios de venta proyectados, proporciona la información suficiente para sustentar la viabilidad de ampliar la vigencia del contrato por el suministro de etano con la empresa Vitol e incluso, estar a favor del proyecto de inversión, por la misma empresa, para incrementar el flujo de etano vaporizado a 1,200 td instalando vaporizadores ecológicos en la Terminal Refrigerada de Pajaritos.

### III.3. Evaluación en la distribución del etano nacional entre los procesos de etileno (ETI) y Braskem Idesa (BI)

El **segundo caso de estudio** (POFAT v.402) tiene por objetivo evaluar el impacto de dar prioridad al requerimiento mensual de etano nacional a las plantas de etileno sobre el requerimiento contractual con la compañía Braskem Idesa (BI). Para este caso de estudio se considera que el pago de las penalizaciones con dicha empresa equivale al 200% el precio del etano nacional por cada barril no entregado, teniendo la obligación de suministrar 66 Mbd (1,375 Mt) y una producción promedio de 74 Mbd (1,550 Mt) de etano. En este caso de estudio se manejará un envío a BI de 47 Mbd (979 Mt), valor que corresponde al flujo mínimo operativo y el diferencial se enviará a los procesos de etileno, sin considerar la opción de etano importado; ya que, para finales de 2020 se considera concluido el contrato con la empresa Vitol.

Este escenario manejará las 185 ecuaciones desarrolladas para el caso base, con la diferencia de que no serán consideradas las variables de etano importado, resultando 67 variables de decisión.

Función Objetivo:

$$(Millones\ de\ pesos) \quad \max \text{ resultados de operación} = \text{ingresos} - \text{egresos} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} \text{Ingresos} = & P_1(Q_{09} + R_{9SL}) + P_2(Q_{10} + R_{10}) + P_3(Q_{22} + R_{31SL}) + P_4 * Q_{23} + P_5 \\ & * Q_{24} + P_6 * R_{73} + P_7(Q_{27} + R_{70}) + P_8(Q_{36X} + R_{66SL}) \\ & + P_9(Q_{47} + Q_{48} + Q_{49} + Q_{50}) + P_{10} * R_{12} + P_{11} * R_{15} + P_{12} * R_{18} \\ & + P_{13} * R_{35} + P_{14} * R_{38} \\ & + P_{15}(R_{39} + R_{40} + R_{41} + R_{42} + R_{43} + R_{44} + R_{45} + R_{46} + R_{47} + R_{48} \\ & + R_{49}) + P_{16} * R_{74} + P_{17} * R_{78} + P_{18} * R_{79} + P_{19} * R_{80} \\ & + P_{20}(R_{81} + R_{82} + R_{83} + R_{84}) + P_{21}(R_{89} + R_{95}) + P_{22}(R_{91} + R_{92}) \\ & + P_{23} * R_{97} \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} \text{Egresos} = & C_1(E_{1G} + E_{2G}) + C_2(X_{01} + X_{02}) + C_3(O_{1G} + O_{2G}) + C_4(C_{P1} + C_{P2} + C_{P3}) \\ & + C_5(C_{X1} + C_{X2} + C_{X3}) + C_6(C_{21} + C_{22} + C_{23}) + C_7(C_{41} + C_{42} + C_{43}) \\ & + C_8 * R_{H2G} + C_9(R_{BPL} + R_{BA7} + R_{BA8}) + C_{10} * R_{SIG} + C_{11} * R_{H1G} \\ & + C_{12} * R_{AGG} + \text{servicios principales} + \text{transporte} \end{aligned} \quad (3.6)$$

La evaluación de este escenario inicia con la generación de los valores iniciales en el SA introduciendo las premisas mencionadas en el párrafo anterior y programando la distribución del etano con base en los reportes de producción (ver Tabla 48) y los mantenimientos citados en el caso base (ver Tabla 48); se observa que los estimados iniciales proyectan una mayor elaboración anual de PELBD, seguida de la producción de óxido de etileno (ver Fig. 40).

Tabla 49. Producción y distribución de etano entre ETI y BI, con un estimando del volumen a penalizar.

Mbd	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Etano total	81	80	80	73	70	72	70	73	70	61	80	82
Etano a ETI	30	32	30	26	23	25	23	26	23	14	32	31
Etano a BI	51	48	50	47	47	47	47	47	47	47	48	51
Penalizado	15	18	16	19	19	19	19	19	19	19	18	15

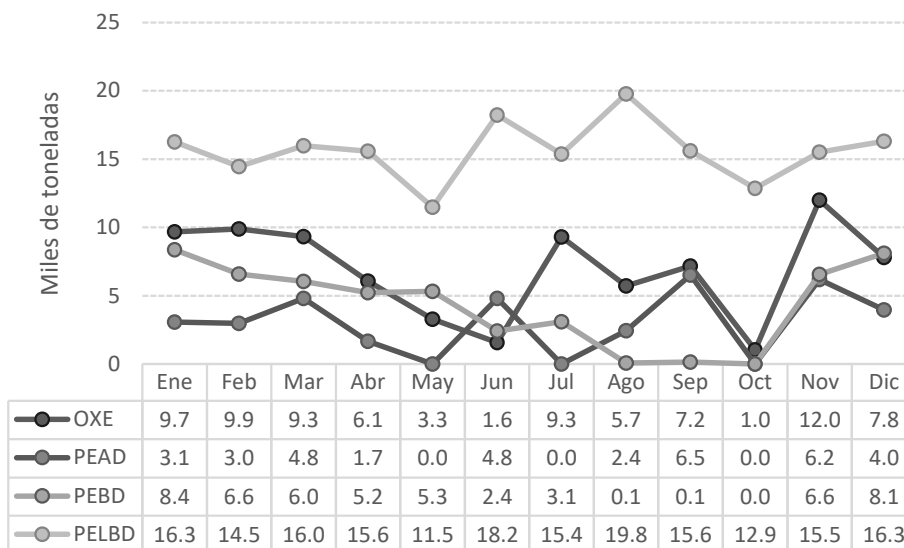


Figura 40. Producciones estimadas de los principales productos petroquímicos en el SA, bajo la premisa de solo consumir etano nacional.

Partiendo de los estimados de la Fig. 40, MOETI propone priorizar la producción de óxido de etileno y PEBD durante los primeros 8 meses del año, a diferencia de lo estimado en el SA que favorece la producción del PELBD durante ese mismo periodo; sin embargo, el criterio que prioriza la elaboración de PEBD, se ve modificado a partir del noveno mes por los mantenimientos a los que se somete dicha planta y que disminuyen el incentivo en la producción de este polímero por los pocos días en los que se encontraría en operación (ver Fig.42), agregando que su rendimiento se ve afectado por el cambio en las condiciones de operación para una correcta salida de operación; distribuyendo el etileno disponible en las plantas de PELBD y PEAD (ver Fig. 41).

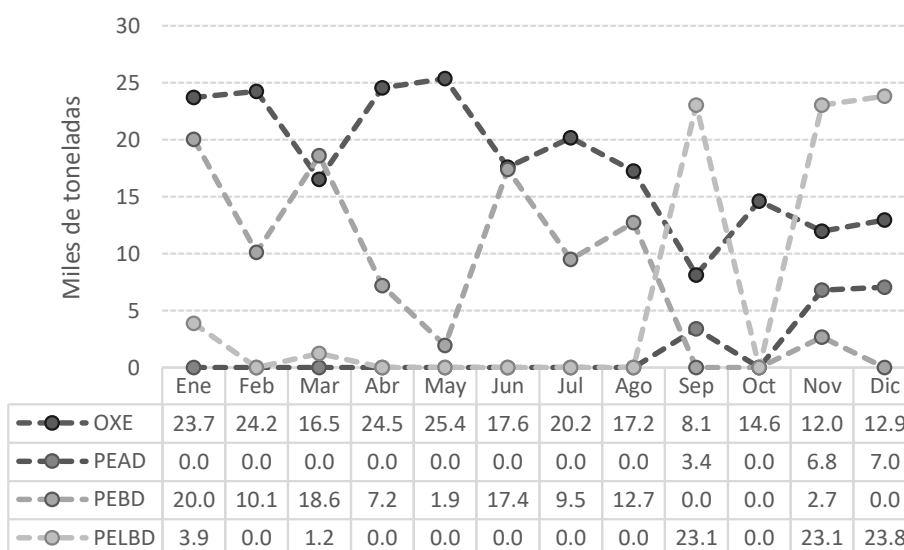


Figura 41. Producción óptima de los principales productos petroquímicos en MOETI, con base en los valores iniciales del SA.

Code	Description	OpRate UNITS/CD	UnusdCap UNITS/CD	PctOfMax %	Incentive \$/Ton	Minimum UNITS/CD	Maximum UNITS/CD
Cq1	Planta de Etileno QC-Capacidad P Etileno	0	2	3.01		0	2
Cq2	Planta Óxido de Etil-Capacidad P Óxido d	1	0	82.47		0	1
Cq6	Oxígeno Tren 1 -Capacidad P Oxígeno	0	0			0	0
Cq7	Oxígeno Tren 2 -Capacidad P Oxígeno	0	0			0	0
Cq3	PEBD T1 -Capacidad PEBD T1	0	0		-391.32	0	0
Cq4	PEBD T2 -Capacidad PEBD T2	0	0		-391.32	0	0
Cq5	PEBD T3 -Capacidad PEBD T3	0	0		-391.32	0	0

Code	Description	OpRate UNITS/CD	UnusdCap UNITS/CD	PctOfMax %	Incentive \$/Ton	Minimum UNITS/CD	Maximum UNITS/CD
Cr1	Planta de Etileno -Capacidad Planta Et	1	1	59.12		0	2
Cr9	Planta de Oxígeno -Capacidad Planta Ox	3	0	100.00	63.94	0	3
Cr2	Planta Óxido de Etil-Capacidad Planta Óx	0	1			0	1
Crh	Planta Óxido de Etil-Capacidad Planta Ox	0	1			0	1
Cr3	Planta de Glicoles -Capacidad Planta Gl	0	0		-183.52	0	0
Cr4	Planta de PELBD Swin-Capacidad Planta Sw	1	0	100.00	103.50	0	1
Cr5	Planta de PEAD - Asa-Capacidad Planta As	0	0		-231.96	0	0
Cr6	Planta de PEAD - Asa-Capacidad Planta As	0	0			0	0
Cr7	Planta de PEAD - Mit-Capacidad Planta Mi	0	0			0	0
Cr8	Planta de PEAD - Mit-Capacidad Planta Mi	0	0	100.00	0.20	0	0

Figura 42. Resultados de MOETI. Incentivos de operación de los diferentes procesos de etileno en el mes de septiembre (POFAT v.402).

Con base en los resultados de las Figs. 41 y 43, podemos observar que una opción de mejora en la programación para la comercialización de los polietilenos; ya que esa actividad podría beneficiar en un 80% (2,514 MMpesos) los ingresos de los procesos de etileno. Para este caso, el modelo sugiere priorizar la producción del PEBD sobre la elaboración del PELBD, considerando como alternativa la estacionalidad en la producción de este último, cuidando que esta situación no ocasione demasiadas entradas y salidas de operación, pues se generarían daños en la integridad de la planta, aunado a un mayor consumo de servicios principales en cada arranque y, por ende, mayores egresos. Destacando que el paro de esta planta para el mes de octubre se debe a la baja disponibilidad de etano en dicho mes.

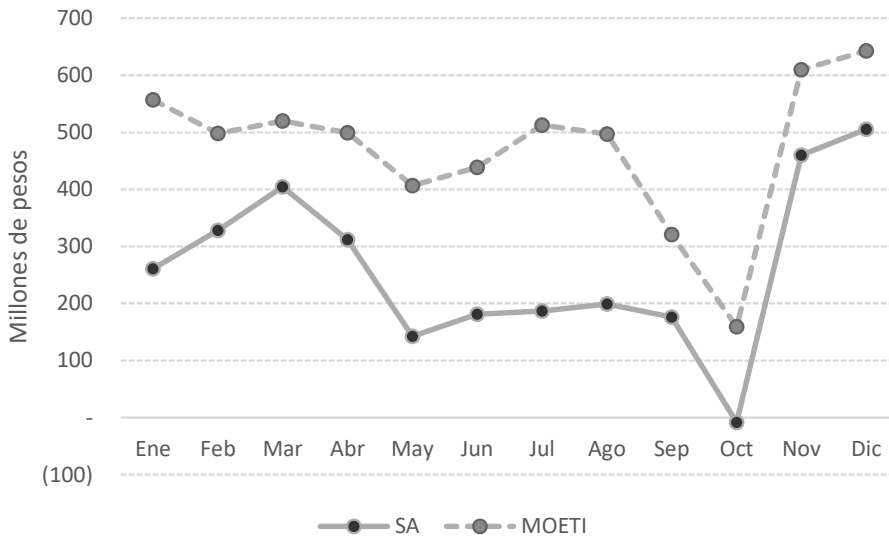
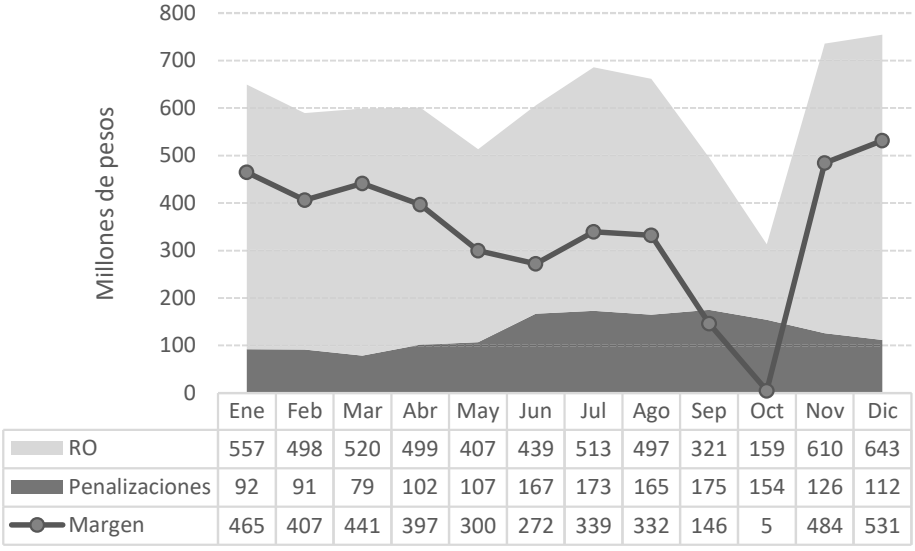


Figura 43. Comparativo de los resultados de operación que tienen por objetivo evaluar la distribución de la materia prima en los procesos de etileno.

A pesar de que la producción promedio de etano es insuficiente para satisfacer la demanda de ETI y BI, quienes requieren de este insumo 30 y 66 Mbd, respectivamente; y donde esta última, penaliza cada barril inferior a este volumen en un 200% el precio del etano nacional, los beneficios económicos obtenidos por el modelo, bajo los criterios de operación y las premisas económicas establecidas en este ejercicio, muestran en la Fig. 44, que es posible solventar el pago de estas penalizaciones brindándole prioridad a la demanda de etano en ETI. El resultado de este estudio, propone prioriza la operación de ETI, sobre BI; se justifica disminuir el flujo de entrega a dicha empresa, pues el beneficio económico como Pemex Transformación Industrial supera el monto por penalizaciones, sólo con el límite de cumplir el porcentaje en promedio móvil de las entregas de etano a BI, las cuales no deben ser menor al 70%, para no activar mayores cláusulas contractuales en perjuicio de Pemex.



**Figura 44.** Margen obtenido por la diferencia entre los resultados de operación (RO) obtenidos en MOETI y el monto correspondiente al pago de las penalizaciones por incumplimiento en la entrega de etano a BI.

### III.4. Punto de equilibrio entre los casos 1 y 2

Para el **tercer caso de estudio** se unen los resultados óptimos de los casos 1 y 2, con el objetivo de encontrar el punto óptimo en la asignación mensual de etano entre ETI y BI (POFAT v.403), tomando como punto de partida la distribución actual reportada en la BDI, se considerará un flujo máximo mensual de 28 Mt (16 Mbd) y se contemplará la posibilidad de suministrar hasta 79 Mt (45 Mbd) de etano a BI (ver Tabla 50).

Este escenario mantiene el mismo número de variables de decisión que el primer caso de estudio, por lo que, ya no se considera necesario citarla nuevamente.

Tabla 50. Producción y distribución de etano en ETI y BI, estimando el flujo a penalizar

Mbd	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Etano total	81	80	80	73	70	72	70	73	70	61	80	82
Etano a ETI	16	16	14	16	24	14	14	16	16	16	17	16
Etano a BI	65	64	65	57	46	58	56	57	54	45	64	66
Penalizado	1	2	1	9	20	8	10	9	12	21	2	0

Empleando los consumos de la Tabla 50 como valores iniciales se obtienen las producciones de la Fig. 45, las cuales cumplen con los criterios operativos definidos en el caso base (ver Tabla 48) y los citados en el párrafo anterior.

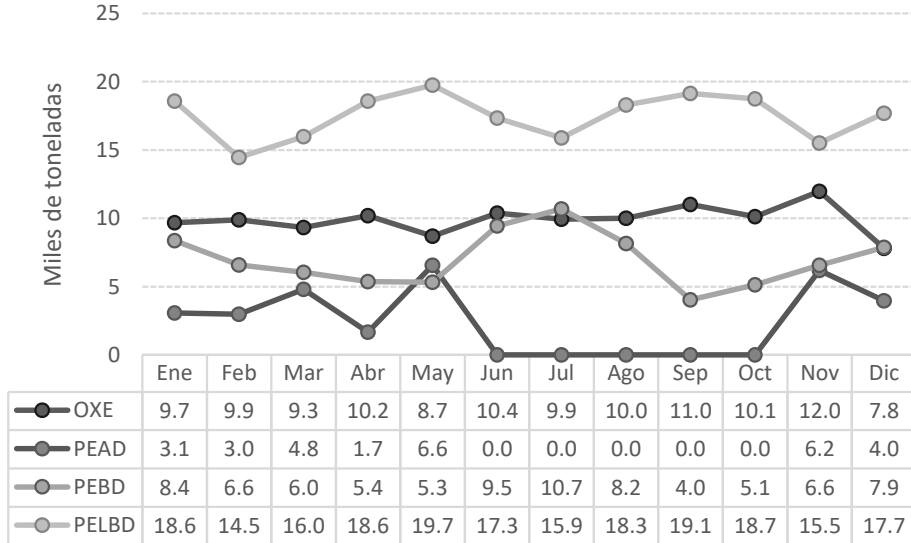


Figura 45. Producciones estimadas de los principales productos petroquímicos en el SA.

Al ser optimizados estos valores, el modelo propone concentrar las producciones en OXE y PEBD, mismo comportamiento para los dos primeros casos de estudio, la distribución de la materia prima se realiza con base en los mantenimientos y los rendimientos de producción reportados para estas plantas; se observa que cuando alguna de estas condiciones se presenta, la producción cambia hacia el producto de mayor incentivo (ver Fig. 46). Percibiendo que, para el mes de septiembre, el



mantenimiento programado en la planta de PEBD baja su incentivo en un 800% comparado con los valores que se reportaba en el mes de agosto que trabaja bajo las condiciones normales de operación (ver Figs. 47 y 48).

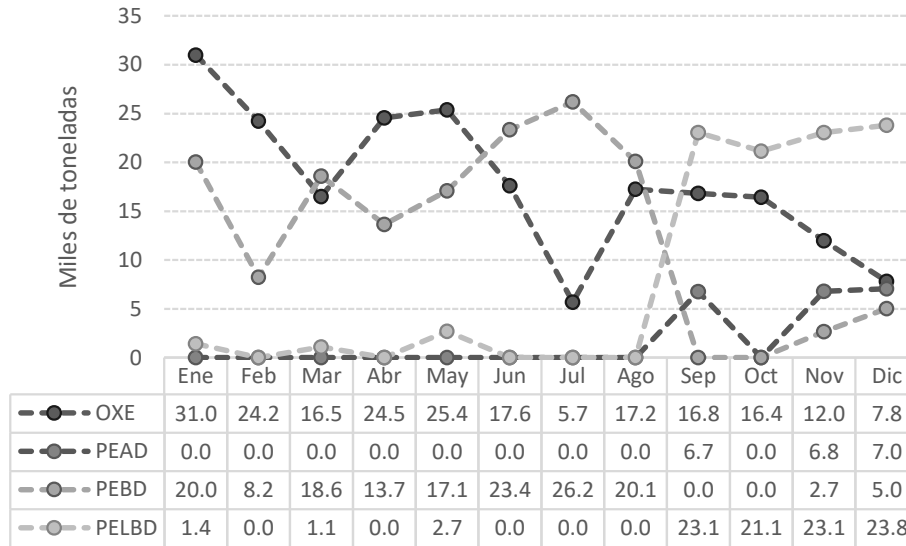


Figura 46. Producción óptima en MOETI de los principales productos petroquímicos.

Report: Process Utilization Table: 08-CUQCAA Case: Run\_00\_C  
 Location: CPQ Cangrejera Period: New Period GRTMPS - V 5.03.000  
 14 JAN 21 11:52

Code	Description	OpRate UNITS/CD	UnusdCap UNITS/CD	PctOfMax %	Incentive \$/Ton	Minimum UNITS/CD	Maximum UNITS/CD
Cq1	Planta de Etileno QC-Capacidad P Etileno	2	0	83.50		0	2
Cq2	Planta Óxido de Etil-Capacidad P Óxido d		1		-47.59	0	1
Cq6	Oxígeno Tren 1 -Capacidad P Oxígeno	0		100.00	11.46	0	0
Cq7	Oxígeno Tren 2 -Capacidad P Oxígeno	0		100.00	11.46	0	0
Cq3	PEBD T1 -Capacidad PEBD T1	0	0	4.88		0	0
Cq4	PEBD T2 -Capacidad PEBD T2	0		100.00	41.24	0	0
Cq5	PEBD T3 -Capacidad PEBD T3	0		100.00	41.24	0	0

CPQ Morelos New Location Group

Report: Process Utilization Table: 08-CUQMAA Case: Run\_00\_C  
 Location: CPQ Morelos Period: New Period GRTMPS - V 5.03.000  
 14 JAN 21 11:52

Code	Description	OpRate UNITS/CD	UnusdCap UNITS/CD	PctOfMax %	Incentive \$/Ton	Minimum UNITS/CD	Maximum UNITS/CD
Cr1	Planta de Etileno -Capacidad Planta Et	0	2	0.76		0	2
Cr9	Planta de Oxígeno -Capacidad Planta Ox	3		100.00	81.67	0	3
Cr2	Planta Óxido de Etil-Capacidad Planta Óx	1		100.00	20.19	0	1
Crh	Planta Óxido de Etil-Capacidad Planta Ox	1		100.00	20.19	0	1
Cr3	Planta de Glicoles -Capacidad Planta Gl	0	0	77.11		0	0
Cr4	Planta de PELBD Swin-Capacidad Planta Sw	1			-84.80	0	1
Cr5	Planta de PEAD - Asa-Capacidad Planta As	0			-348.77	0	0
Cr6	Planta de PEAD - Asa-Capacidad Planta As	0				0	0
Cr7	Planta de PEAD - Mit-Capacidad Planta Mi	0			-171.14	0	0
Cr8	Planta de PEAD - Mit-Capacidad Planta Mi	0				0	0

Figura 47. Resultados de MOETI. Incentivos de operación de los diferentes procesos de etileno en el mes de agosto (POFAT v.403).

Code	Description	OpRate UNITS/CD	UnusdCap UNITS/CD	PctOfMax %	Incentive \$/Ton	Minimum UNITS/CD	Maximum UNITS/CD
Cq1	Planta de Etileno QC-Capacidad P Etileno	0	2	3.65		0	2
Cq2	Planta Óxido de Etil-Capacidad P Óxido d	1		100.00	28.60	0	1
Cq6	Oxígeno Tren 1 -Capacidad P Oxígeno		0			0	0
Cq7	Oxígeno Tren 2 -Capacidad P Oxígeno		0			0	0
Cq3	PEBD T1 -Capacidad PEBD T1		0		-336.40	0	0
Cq4	PEBD T2 -Capacidad PEBD T2		0		-319.00	0	0
Cq5	PEBD T3 -Capacidad PEBD T3		0		-319.00	0	0

Report: Process Utilization Table: 09-CUQCAA  
Location: CPQ Cangrejera Period: New Period  
Case: Run\_00\_C  
GRTPS - V 5.03.000  
14 JAN 21 11:55

---

CPQ Morelos New Location Group

Code	Description	OpRate UNITS/CD	UnusdCap UNITS/CD	PctOfMax %	Incentive \$/Ton	Minimum UNITS/CD	Maximum UNITS/CD
Cr1	Planta de Etileno -Capacidad Planta Et	2	0	81.12		0	2
Cr9	Planta de Oxígeno -Capacidad Planta Ox	3		100.00	67.73	0	3
Cr2	Planta Óxido de Etil-Capacidad Planta Ox		1			0	1
Crh	Planta Óxido de Etil-Capacidad Planta Ox	1	0	78.91		0	1
Cr3	Planta de Glicoles -Capacidad Planta Gl		0		-180.49	0	0
Cr4	Planta de PELBD Swin-Capacidad Planta Sw	1		100.00	171.35	0	1
Cr5	Planta de PEAD - Asa-Capacidad Planta As		0		-171.30	0	0
Cr6	Planta de PEAD - Asa-Capacidad Planta As		0		-171.62	0	0
Cr7	Planta de PEAD - Mit-Capacidad Planta Mi	0		100.00	39.18	0	0
Cr8	Planta de PEAD - Mit-Capacidad Planta Mi	0		100.00	60.27	0	0

Report: Process Utilization Table: 09-CUQMAA  
Location: CPQ Morelos Period: New Period  
Case: Run\_00\_C  
GRTPS - V 5.03.000  
14 JAN 21 11:55

Figura 48. Resultados de MOETI. Incentivos de operación de los diferentes procesos de etileno en el mes de septiembre (POFAT v.403).

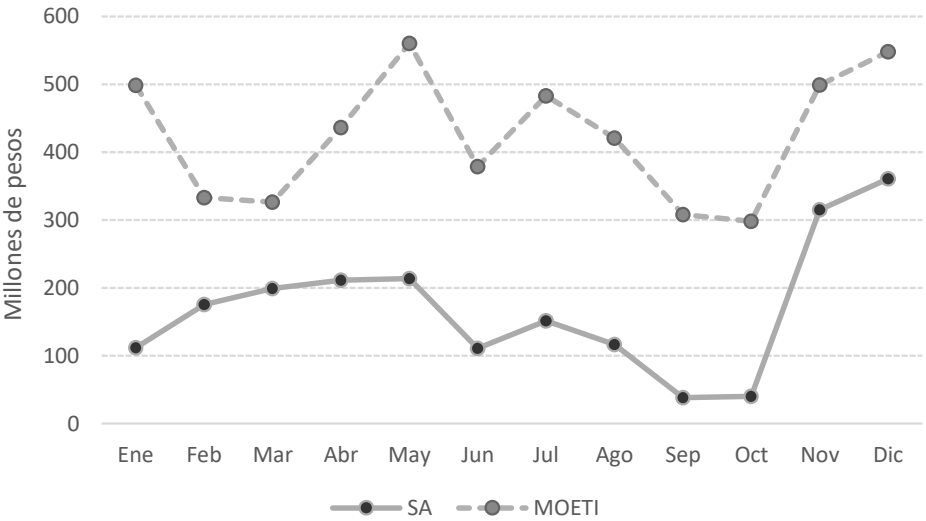
Como se comentaba en el caso III.3, el mes de octubre, es el mes en el que se maneja una menor disponibilidad de etano nacional; sin embargo, realizando un comparativo entre dicho caso y el actual se observa un incremento en la producción del mes de octubre en 157%, esto debido al consumo de etano importado que permite la puesta en operación de la planta de PELBD; el cual con base a los precios de venta cuenta con un incentivo de compra del 52%, porcentaje inferior con respecto al etano nacional, pero incentivo suficiente para obtener resultados positivos en este mes desde la propuesta de los valores iniciales en el SA (ver Figs. 49 y 50).

	Weight UNITS/CD	Price \$/Ton	MrgValue \$/Ton	Incentive \$/Ton	Minimum UNITS/CD	Maximum UNITS/CD
--- Compras						
E1G-BU	Etano de PTRI	911	106.59	467.81	361.22	911
E1I-BU	Etano importado	900	280.33	467.81	187.48	900
X01-BU	Gas de PTRI	1731	182.56	182.56		3340
A1G-BU	Aire	3178				14286
AGG-BU	Agua para glicoles	88	10.00	10.00		160
H2G-BU	1-Hexeno	35	701.28	701.28		10000
SIG-BU	Isopentano	13	561.44	561.44		10000
Total Purchases		6856				

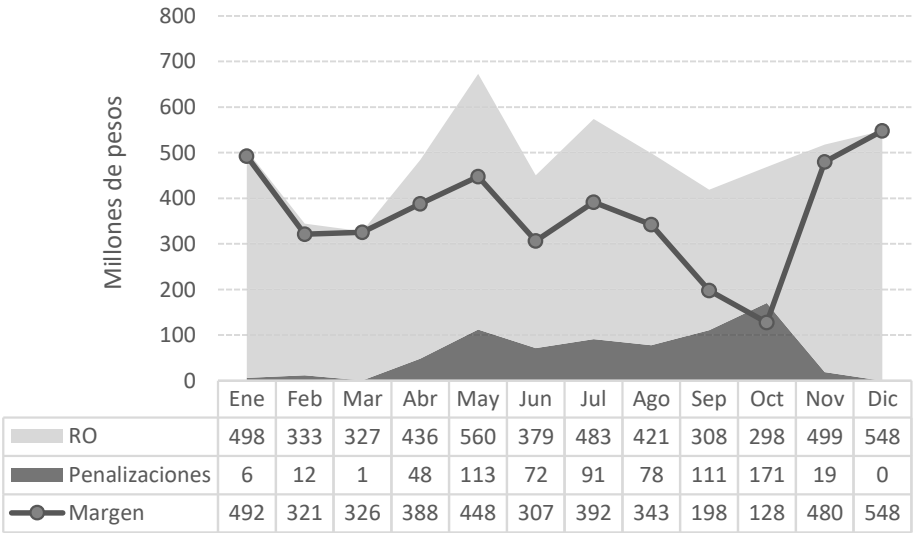
Report: Purchases Table: 10-MPBUAA  
Location: Compras gobale Period: New Period

Figura 49. Resultados MOETI. Incentivos en la compra de materia prima para consumo en los procesos de etileno en el mes de octubre (POFAT v.403).

De este ejercicio se observa que el consumo de una mezcla de etano nacional e importado genera beneficios económicos con un nivel de proceso de 30 Mbd, apoyando en la confiabilidad en la operación de los procesos de etileno, al evitar daños estructurales por operar a capacidades inferiores de las mínimas; así como también, la posibilidad de recuperar mercado proporcionando confianza al cliente en el suministro de los productos petroquímicos adquiridos. La distribución que plantea el modelo genera un incremento en la producción de polietilenos del 21% y de óxido de etileno en 81% obteniendo ingresos superiores en 145% con respecto a lo estimado en el SA (ver Fig.51), ingresos que permiten hacer frente al pago de penalizaciones por el incumplimiento en el volumen de entrega a BI, pues con base en la producción y distribución de etano en la Tabla 50, los niveles de producción no son suficientes para satisfacer la demanda de ambas empresas.



**Figura 50.** Comparativo de los resultados de operación obtenidos en el SA y MOETI, buscando el óptimo operativo entre el uso de etano nacional e importado.



**Figura 51.** Margen obtenido con base en la diferencia entre los resultados de operación (RO) obtenidos en MOETI y el monto correspondiente al pago de las penalizaciones por incumplimiento en la entrega de etano a BI.

## Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos dentro de los tres casos de estudio, se observó que los estimados iniciales propuestos en el SA fueron optimizados generando ingresos superiores en un 80%, el modelo elaborado resolvió los casos de estudio sin contratiempos (2 horas por escenario), permitiendo realizar los análisis pertinentes, como viabilidad operativa en los niveles de proceso, continuidad operativa de las plantas, nivel de ventas propuesto, entre otras; proporcionando elementos para considerar la participación de Pemex en proyectos como aumento en la capacidad de etano vaporizado, considerar un plan variable en las entregas de etano a BI, plan de producción estacional para la producción de los diferentes grados de polietileno. Este conjunto de tareas permite contar con la capacidad de reacción relativamente rápida (1 día) en la elaboración de los POF, generando entregables de mayor calidad e impacto para la empresa.

Partiendo de los resultados obtenidos por los casos de estudio, se encuentra que la función objetivo se satisface con un proceso mínimo de 30 Mbd (625 Mt), inferior a este flujo, los valores iniciales tienen la posibilidad de ser negativos como se observa en el mes de octubre, caso III.3. Los resultados optimizados brindan opciones de mejora alcanzables, movimiento en la planeación de mantenimientos y mayores ventas de óxido de etileno, dentro de los procesos de etileno. De estas opciones de mejora, el caso III.4 estima el punto de equilibrio en dos consideraciones que han sido consideradas con gran polémica en la empresa, debido a la duda que existe sobre su beneficio.

Bajo las consideraciones operativas y económicas, el escenario de equilibrio muestra que la empresa cuenta con la posibilidad de mejorar su confiabilidad operativa y financiera; enfatizando la importancia de contar con programas de mantenimiento afectados por un análisis comercial, con el objetivo de no solo satisfacer un cierto flujo de demanda, sino también el mantener en condiciones óptimas de operación la planta que represente mayor margen de rentabilidad, tal y como se observó en el mes de octubre para el caso III.3, cuya desventaja de contar con una menor disponibilidad de materia prima, se pone fuera de operación la planta con el producto más rentable, esto con base en los precios de venta (PEBD), teniendo incluso la posibilidad de resultados negativos.

Durante el desarrollo de los casos de estudio en la definición de los valores iniciales del SA las premisas empleadas se busca satisfacer los compromisos comerciales, con niveles de producción para el óxido de etileno y diferentes grados de polímeros; criterio que se recomienda el modelo modificar, manteniendo sólo el cumplimiento de las ventas de óxido de etileno, pues este producto es elaborado únicamente por Petróleos Mexicanos; al hacer esto, la comparación de resultados entre el SA y MOETI demuestran que hay una pérdida considerable en los ingresos de la empresa (ver Figs. 39, 43 y 50). Este resultado hace considerar la necesidad de realizar modificaciones a las premisas legales y de producción que le imponen a la empresa el elaborar petroquímicos que no generan margen para la empresa e incluso, esta acción permitiría la apertura de la industria petroquímica en México.

En estos tiempos de crisis económica, legal, política y social que el país enfrenta, el sector energía y más específicamente el sector petrolero se ve inmerso en frecuentes cambios de dirección, tanto en materia presupuestal, legal, normativa, regulatoria, entre otras, que implica ir adaptando a la empresa a estas nuevas direcciones prácticamente en tiempo real, con recursos limitados, sin detener la producción y con la premisa de cumplir las obligaciones comerciales vigentes. Este entorno de trabajo al interior de Pemex, hace invaluable la Interfaz desarrollada para el área de petroquímica, ya que se vuelve imprescindible para la toma de decisiones no sólo del personal operativo o mandos medios, sino para el grupo directivo de Petróleos Mexicanos, que frecuentemente se tiene que enfrentar al estudio, análisis y evaluación de alternativas viables que ofrezcan además de la continuidad de los procesos de producción y comercialización de los productos, la garantía de que se trata de la mejor opción en materia de beneficio económico para la empresa.

## Referencias bibliográficas

- Arsham, H. (2 de Febrero de 1994). Obtenido de Deterministic Modeling: Linear Optimization with Applications: <http://home.ubalt.edu/ntsbarsh/opre640a/partVIII.htm>
- Energía a debate. (18 de Noviembre de 2020). *Contrato de etano con Pemex sigue vigente: Braskem Idesa*. Obtenido de Energía a debate: <https://www.energiaadebate.com/downstream/contrato-de-etano-con-pemex-sigue-vigente-braskem-idesa/>
- Góngora Pérez, J. P. (28 de Agosto de 2019). *La Petroquímica en México y el mundo*. México.
- Haverly. (15 de Diciembre de 2020). *Products*. Obtenido de Haverly: <https://www.haverly.com/main-products/13-products/9-grtmps>
- ICIS. (9 de Junio de 2010). *Polyethylene-linear low density (LLDPE) Production and Manufacturing Process*. Obtenido de Independent Commodity Intelligence Services: <https://www.icis.com/explore/resources/news/2007/11/06/9076162/polyethylene-linear-low-density-lldpe-production-and-manufacturing-process/#:~:text=LLDPE%20is%20produced%20by%20the,but%20the%20linearity%20of%20HDPE.&text=The%20polymer%20leaves%20the%20reac>
- Instituto Mexicano del Petróleo. (2003). *Evaluación de Tecnologías para la Expansión y Modernización de la Planta de Etileno de Morelos*. México.
- Lewandowski, S. (Noviembre de 2016). *Ethylene-Global*. Obtenido de <https://cdn.ihs.com/www/pdf/Steve-Lewandowski-Big-Changes-Ahead-for-Ethylene-Implications-for-Asia.pdf>
- Petróleos Mexicanos. (2011). *Memoria de labores*. Obtenido de Petróleos Mexicanos: [https://www.pemex.com/acerca/informes\\_publicaciones/Documents/memorias/completas/memoria\\_labores\\_2011.pdf](https://www.pemex.com/acerca/informes_publicaciones/Documents/memorias/completas/memoria_labores_2011.pdf)
- Petróleos Mexicanos. (2018). *Descripción de los procesos petroquímicos*. México.
- Petróleos Mexicanos. (31 de Mayo de 2018). *Procedimientos de contratación*. Obtenido de Procura: [https://www.pemex.com/procura/procedimientos-de-contratacion/testigo-social/Documents/tes-pub/PETIL-CAT-B-GCPCYC-G03-55426-001%2001%2079264-18-1%20\(03-2017\).pdf](https://www.pemex.com/procura/procedimientos-de-contratacion/testigo-social/Documents/tes-pub/PETIL-CAT-B-GCPCYC-G03-55426-001%2001%2079264-18-1%20(03-2017).pdf)
- Petróleos Mexicanos. (2019). *Base de Datos Institucional*. Obtenido de Informes, publicaciones y estadísticas: <https://ebdi.pemex.com/bdi/bdiController.do?action=cuadro&subAction=applyOptions>
- Petróleos Mexicanos. (2 de Julio de 2019). *Estatutos de Gobierno*. Obtenido de Petróleos Mexicanos: [https://www.pemex.com/acerca/marco\\_normativo/Documents/estatutos/eopmx\\_20190702.pdf](https://www.pemex.com/acerca/marco_normativo/Documents/estatutos/eopmx_20190702.pdf)
- Petróleos Mexicanos. (23 de Diciembre de 2019). *Estatutos de Gobierno*. Obtenido de Petróleos Mexicanos: [https://www.pemex.com/acerca/marco\\_normativo/Documents/estatutos/eoptri\\_23122019.pdf](https://www.pemex.com/acerca/marco_normativo/Documents/estatutos/eoptri_23122019.pdf)

- Real Academia Española. (15 de Noviembre de 2020). Obtenido de Real Academia Española:  
<https://www.rae.es/>
- Revista Petroquímica. (14 de Abril de 2018). *La industria química debe diversificar sus productos y materias primas*. Obtenido de Revista Petroquímica:  
<https://www.revistapetroquimica.com/la-industria-petroquimica-diversificar-productos-materias-primas/>
- Roca Girón, I. E., & Calderón García, J. E. (2005). *Estudio de las propiedades y aplicaciones industriales del Polietileno de Alta Densidad (PEAD)*. Guatemala.
- Smirnov, A., Shi, S., & Celik, I. (2001). Random Flow Generation Technique for Large Eddy Simulations and Particle-Dynamics Modeling. *Journal of Fluids Engineering*, 359-371.
- Sri Hari Kumar, A., & Sai Prasad, P. S. (2014). Cracking and oxidative dehydrogenation of ethane to ethylene: Process and intensification options. En K. V. Raghavan, & B. M. Reddy, *Industrial Catalysis and Separations: Innovations for Process Intensification* (págs. 289-300). Apple Academic Press.
- Villafuerte Macías, E. F., Aguilar López, R., & Maya Yescas, R. (2003). Modelo matemático de reactores de desintegración catalítica de gasóleo. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 89-94.

## Nomenclatura

### Corrientes de entrada

$E_{1G}$ = Flujo en ton/día de etano nacional alimentado al QC  
 $E_{1I}$ = Flujo en ton/día de etano importado alimentado al QC  
 $P_{1G}$ = Flujo en ton/día de propano nacional alimentado al QC  
 $P_{1I}$ = Flujo en ton/día de propano importado alimentado al QC  
 $E_{2G}$ = Flujo en ton/día de etano nacional alimentado al QM  
 $E_{2I}$ = Flujo en ton/día de etano importado alimentado al QM  
 $P_{2G}$ = Flujo en ton/día de propano nacional alimentado al QM  
 $P_{2I}$ = Flujo en ton/día de propano importado alimentado al QM  
 $X_{01}$ = Compra en ton/día de gas seco para QC  
 $X_{02}$ = Compra en ton/día de gas seco para QM  
 $A_{1G1}$ = Flujo de aire en ton/día alimentado al tren 1 de la planta de oxígeno en QC  
 $A_{1G2}$ = Flujo de aire en ton/día alimentado al tren 2 de la planta de oxígeno en QC  
 $A_{2G}$ = Flujo de aire alimentado en ton/día a la planta de oxígeno en QM  
 $O_{1G}$ = Compra en ton/día de oxígeno en QC  
 $O_{2G}$ = Compra en ton/día de oxígeno en QM  
 $P_{ij}$ = Precios de venta de productos petroquímicos  
 $C_{ij}$ = Costos de adquisición de productos petroquímicos

### CPQ Cangrejera (QC)

$Q_{01}$ = Flujo total en ton/día de etano  
 $Q_{02}$ = Flujo total en ton/día de propano  
 $Q_{03}$ = Flujo total alimentado en ton/día a la planta de etileno  
 $Q_{04}$ = Flujo total en ton/día de metano  
 $Q_{05}$ = Flujo total en ton/día de hidrógeno  
 $Q_{06}$ = Flujo total producido en ton/día de gas residual destinado a servicios principales  
 $Q_{07}$ = Flujo total en ton/día de etileno  
 $Q_{08}$ = Flujo total producido en ton/día de propileno grado químico  
 $Q_{09}$ = Flujo total producido en ton/día de propileno grado polímero destinado a ventas internas  
 $Q_{10}$ = Flujo total producido en ton/día de butano-butadieno destinado a exportación  
 $Q_{11}$ = Flujo total producido en ton/día de líquidos de pirólisis transferidos a QM por el QC  
 $Q_{12}$ = Flujo en ton/día de etileno al proceso de estireno  
 $Q_{13}$ = Flujo en ton/día de etileno destinado a ventas internas  
 $Q_{14}$ = Flujo en ton/día de etileno disponible a los procesos de etileno  
 $Q_{14OX}$ = Flujo en ton/día de etileno destinado al proceso de óxido de etileno  
 $Q_{14PBD}$ = Flujo en ton/día de etileno destinado al proceso de polietileno de baja densidad  
 $Q_{14PBDT1}$ = Flujo en ton/día de etileno destinado al proceso de PEBD, tren 1  
 $Q_{14PBDT2}$ = Flujo en ton/día de etileno destinado al proceso de PEBD, tren 2  
 $Q_{14PBDT3}$ = Flujo en ton/día de etileno destinado al proceso de PEBD, tren 3  
 $Q_{14CAN}$ = Flujo en ton/día de etileno transferidos al QM por el QC  
 $Q_{15}$ = Flujo en ton/día de hidrógeno destinado a autoconsumos en el SNR  
 $Q_{16}$ = Flujo en ton/día de hidrógeno destinado a servicios principales  
 $Q_{17}$ = Flujo en ton/día de metano alimentado a la planta de óxido de etileno  
 $Q_{18}$ = Flujo en ton/día de metano destinado a servicios principales  
 $Q_{19}$ = Flujo en ton/día de gases destinados a servicios principales



Q<sub>20</sub>= Flujo en ton/día de propileno grado químico destinado a servicios principales  
 Q<sub>21</sub>= Flujo en ton/día de propileno grado químico destinado a ventas internas  
 Q<sub>22</sub>= Flujo total producido en ton/día de óxido de etileno destinado a ventas internas  
 Q<sub>23</sub>= Flujo total producido en ton/día de glicol impuro destinado a ventas internas  
 Q<sub>24</sub>= Flujo total producido en ton/día de glicol puro destinado a ventas internas  
 Q<sub>25</sub>= Flujo total producido en ton/día de gas residual  
 Q<sub>26</sub>= Flujo en ton/día de nitrógeno puro destinado a servicios principales  
 Q<sub>27</sub>= Flujo en ton/día de nitrógeno puro destinado a ventas internas  
 Q<sub>28</sub>= Flujo en ton/día de nitrógeno puro enviado a autoconsumo  
 Q<sub>29</sub>= Flujo en ton/día de nitrógeno puro transferido al QM por el QC y otros  
 Q<sub>29M</sub>= Flujo en ton/día de nitrógeno puro transferido al QM por el QC  
 Q<sub>29O</sub>= Flujo en ton/día de nitrógeno puro enviado al mezclador de gas residual  
 Q<sub>30</sub>= Flujo total producido en ton/día de oxígeno en el tren 1  
 Q<sub>31</sub>= Flujo total producido en ton/día de nitrógeno puro en el tren 1  
 Q<sub>32</sub>= Flujo total producido en ton/día de nitrógeno impuro en el tren 1  
 Q<sub>33</sub>= Flujo total producido en ton/día de oxígeno en el tren 2  
 Q<sub>34</sub>= Flujo total producido en ton/día de nitrógeno puro en el tren 2  
 Q<sub>35</sub>= Flujo total producido en ton/día de nitrógeno impuro en el tren 2  
 Q<sub>36</sub>= Flujo total disponible en ton/día de oxígeno  
 Q<sub>36M</sub>= Flujo en ton/día de oxígeno transferido al QM por el QC  
 Q<sub>36OX</sub>= Flujo en ton/día de oxígeno destinado al proceso en óxido de etileno  
 Q<sub>36X</sub>= Flujo en ton/día de oxígeno destinado a ventas internas  
 Q<sub>37</sub>= Flujo total disponible en ton/día de nitrógeno puro  
 Q<sub>38</sub>= Flujo total en ton/día de nitrógeno impuro enviado a venteo  
 Q<sub>39</sub>= Flujo total producido en ton/día de polietileno puro de baja densidad, tren 1  
 Q<sub>39P1</sub>= Flujo en ton/día de PEBD puro destinado a la formulación del tipo 20020P, tren 1  
 Q<sub>39X1</sub>= Flujo en ton/día de PEBD puro destinado a la formulación del tipo 20020X, tren 1  
 Q<sub>3921</sub>= Flujo en ton/día de PEBD puro destinado a la formulación del tipo 21002, tren 1  
 Q<sub>3941</sub>= Flujo en ton/día de PEBD puro destinado a la formulación del tipo 22004, tren 1  
 Q<sub>40</sub>= Flujo total producido en ton/día de gas de purga, tren 1  
 Q<sub>41</sub>= Flujo total producido en ton/día de polietileno puro de baja densidad, tren 2  
 Q<sub>41P2</sub>= Flujo en ton/día de PEBD puro destinado a la formulación del tipo 20020P, tren 2  
 Q<sub>41X2</sub>= Flujo en ton/día de PEBD puro destinado a la formulación del tipo 20020X, tren 2  
 Q<sub>4122</sub>= Flujo en ton/día de PEBD puro destinado a la formulación del tipo 21002, tren 2  
 Q<sub>4142</sub>= Flujo en ton/día de PEBD puro destinado a la formulación del tipo 22004, tren 2  
 Q<sub>42</sub>= Flujo total producido en ton/día de gas de purga, tren 2  
 Q<sub>43</sub>= Flujo total producido en ton/día de polietileno puro de baja densidad, tren 3  
 Q<sub>43P3</sub>= Flujo en ton/día de PEBD puro destinado a la formulación del tipo 20020P, tren 3  
 Q<sub>43X3</sub>= Flujo en ton/día de PEBD puro destinado a la formulación del tipo 20020X, tren 3  
 Q<sub>4323</sub>= Flujo en ton/día de PEBD puro destinado a la formulación del tipo 21002, tren 3  
 Q<sub>4343</sub>= Flujo en ton/día de PEBD puro destinado a la formulación del tipo 22004, tren 3  
 Q<sub>44</sub>= Flujo total producido en ton/día de gas de purga, tren 3  
 Q<sub>47</sub>= Flujo total en ton/día de polietileno de baja densidad tipo 20020P destinado a ventas internas  
 Q<sub>47T1</sub>= Flujo en ton/día de polietileno de baja densidad tipo 20020P, tren 1  
 Q<sub>47T2</sub>= Flujo en ton/día de polietileno de baja densidad tipo 20020P, tren 2  
 Q<sub>47T3</sub>= Flujo en ton/día de polietileno de baja densidad tipo 20020P, tren 3  
 Q<sub>48</sub>= Flujo total en ton/día de polietileno de baja densidad tipo 20020X destinado a ventas internas  
 Q<sub>48T1</sub>= Flujo en ton/día de polietileno de baja densidad tipo 20020X, tren 1

$Q_{48T2}$ = Flujo en ton/día de polietileno de baja densidad tipo 20020X, tren 2  
 $Q_{48T3}$ = Flujo en ton/día de polietileno de baja densidad tipo 20020X, tren 3  
 $Q_{49}$ = Flujo total en ton/día de polietileno de baja densidad tipo 21002 destinado a ventas internas  
 $Q_{49T1}$ = Flujo en ton/día de polietileno de baja densidad tipo 21002, tren 1  
 $Q_{49T2}$ = Flujo en ton/día de polietileno de baja densidad tipo 21002, tren 2  
 $Q_{49T3}$ = Flujo en ton/día de polietileno de baja densidad tipo 21002, tren 3  
 $Q_{50}$ = Flujo total en ton/día de polietileno de baja densidad tipo 22004 destinado a ventas internas  
 $Q_{50T1}$ = Flujo total en ton/día de polietileno de baja densidad tipo 22004, tren 1  
 $Q_{50T2}$ = Flujo total en ton/día de polietileno de baja densidad tipo 22004, tren 2  
 $Q_{50T3}$ = Flujo total en ton/día de polietileno de baja densidad tipo 22004, tren 3  
 $Q_{51}$ = Flujo total en ton/día de segundas de polietileno de baja densidad tipo 20020P destinado a ventas internas  
 $Q_{51T1}$ = Flujo en ton/día de segundas de polietileno de baja densidad tipo 20020P, tren 1  
 $Q_{51T2}$ = Flujo en ton/día de segundas de polietileno de baja densidad tipo 20020P, tren 2  
 $Q_{51T3}$ = Flujo en ton/día de segundas de polietileno de baja densidad tipo 20020P, tren 3  
 $Q_{52}$ = Flujo total en ton/día de segundas de polietileno de baja densidad tipo 20020X destinado a ventas internas  
 $Q_{52T1}$ = Flujo en ton/día de segundas de polietileno de baja densidad tipo 20020X, tren 1  
 $Q_{52T2}$ = Flujo en ton/día de segundas de polietileno de baja densidad tipo 20020X, tren 2  
 $Q_{52T3}$ = Flujo en ton/día de segundas de polietileno de baja densidad tipo 20020X, tren 3  
 $Q_{53}$ = Flujo total en ton/día de segundas de polietileno de baja densidad tipo 21002 destinado a ventas internas  
 $Q_{53T1}$ = Flujo en ton/día de segundas de polietileno de baja densidad tipo 21002, tren 1  
 $Q_{53T2}$ = Flujo en ton/día de segundas de polietileno de baja densidad tipo 21002, tren 2  
 $Q_{53T3}$ = Flujo en ton/día de segundas de polietileno de baja densidad tipo 21002, tren 3  
 $Q_{54}$ = Flujo total en ton/día de segundas de polietileno de baja densidad tipo 22004 destinado a ventas internas  
 $Q_{54T1}$ = Flujo en ton/día de segundas de polietileno de baja densidad tipo 22004, tren 1  
 $Q_{54T2}$ = Flujo en ton/día de segundas de polietileno de baja densidad tipo 22004, tren 2  
 $Q_{54T3}$ = Flujo en ton/día de segundas de polietileno de baja densidad tipo 22004, tren 3  
 $Q_{55}$ = Flujo total en ton/día de barreduras de polietileno de baja densidad destinado a ventas internas  
 $Q_{55T1}$ = Flujo total en ton/día de barreduras de polietileno de baja densidad, tren 1  
 $Q_{55P1}$ = Flujo en ton/día de barreduras de PEBD tipo 20020P, tren 1  
 $Q_{55X1}$ = Flujo en ton/día de barreduras de PEBD tipo 20020X, tren 1  
 $Q_{5521}$ = Flujo en ton/día de barreduras de PEBD tipo 21002, tren 1  
 $Q_{5541}$ = Flujo en ton/día de barreduras de PEBD tipo 22004, tren 1  
 $Q_{55T2}$ = Flujo total en ton/día de barreduras de polietileno de baja densidad, tren 2  
 $Q_{55P2}$ = Flujo en ton/día de barreduras de PEBD tipo 20020P, tren 2  
 $Q_{55X2}$ = Flujo en ton/día de barreduras de PEBD tipo 20020X, tren 2  
 $Q_{5522}$ = Flujo en ton/día de barreduras de PEBD tipo 21002, tren 2  
 $Q_{5542}$ = Flujo en ton/día de barreduras de PEBD tipo 22004, tren 2  
 $Q_{55T3}$ = Flujo total en ton/día de barreduras de polietileno de baja densidad, tren 3  
 $Q_{55P3}$ = Flujo en ton/día de barreduras de PEBD tipo 20020P, tren 3  
 $Q_{55X3}$ = Flujo en ton/día de barreduras de PEBD tipo 20020X, tren 3  
 $Q_{5523}$ = Flujo en ton/día de barreduras de PEBD tipo 21002, tren 3  
 $Q_{5543}$ = Flujo en ton/día de barreduras de PEBD tipo 22004, tren 3  
 $C_{P1}$ = Flujo en ton/día de concentrado destinado a la formulación del tipo 20020P, tren 1

C<sub>X1</sub>= Flujo en ton/día de concentrado destinado a la formulación del tipo 20020X, tren 1  
C<sub>21</sub>= Flujo en ton/día de concentrado destinado a la formulación del tipo 21002, tren 1  
C<sub>41</sub>= Flujo en ton/día de concentrado destinado a la formulación del tipo 22004, tren 1  
C<sub>P2</sub>= Flujo en ton/día de concentrado destinado a la formulación del tipo 20020P, tren 2  
C<sub>X2</sub>= Flujo en ton/día de concentrado destinado a la formulación del tipo 20020X, tren 2  
C<sub>22</sub>= Flujo en ton/día de concentrado destinado a la formulación del tipo 21002, tren 2  
C<sub>42</sub>= Flujo en ton/día de concentrado destinado a la formulación del tipo 22004, tren 2  
C<sub>P3</sub>= Flujo en ton/día de concentrado destinado a la formulación del tipo 20020P, tren 3  
C<sub>X3</sub>= Flujo en ton/día de concentrado destinado a la formulación del tipo 20020X, tren 3  
C<sub>23</sub>= Flujo en ton/día de concentrado destinado a la formulación del tipo 21002, tren 3  
C<sub>43</sub>= Flujo en ton/día de concentrado destinado a la formulación del tipo 22004, tren 3

### CPQ Morelos (QM)

R<sub>01</sub>= Flujo total en ton/día de etano  
R<sub>02</sub>= Flujo total en ton/día de propano  
R<sub>03</sub>= Flujo total alimentado en ton/día a la planta de etileno  
R<sub>04</sub>= Flujo total producido en ton/día de metano  
R<sub>05</sub>= Flujo total producido en ton/día de hidrógeno  
R<sub>06</sub>= Flujo total producido en ton/día de gas residual  
R<sub>07</sub>= Flujo total producido en ton/día de etileno  
R<sub>08</sub>= Flujo total producido en ton/día de propileno grado químico  
R<sub>8SL</sub>= Flujo en ton/día de propileno grado químico destinado a ventas internas  
R<sub>8AUX</sub>= Flujo en ton/día de propileno grado químico destinado a servicios principales  
R<sub>8PGT</sub>= Flujo en ton/día de propileno grado químico enviado al mezclador de propileno  
R<sub>09</sub>= Flujo total producido en ton/día de propileno grado polímero  
R<sub>9SL</sub>= Flujo en ton/día de propileno grado polímero destinado a ventas internas  
R<sub>9AUX</sub>= Flujo en ton/día de propileno grado polímero destinado a servicios principales  
R<sub>9PGT</sub>= Flujo en ton/día de propileno grado polímero enviado al mezclador de propileno  
R<sub>10</sub>= Flujo en ton/día de butano-butadieno destinado a exportación  
R<sub>11</sub>= Flujo total producido en ton/día de líquidos de pirólisis  
R<sub>12</sub>= Flujo en ton/día de hidrógeno destinado a ventas internas  
R<sub>13</sub>= Flujo en ton/día de hidrógeno destinado a autoconsumos en el SNR  
R<sub>14</sub>= Flujo en ton/día de hidrógeno enviado a autoconsumos en las plantas de etileno  
R<sub>14PAD</sub>= Flujo en ton/día de hidrógeno destinado al proceso de polietileno de alta densidad  
R<sub>14A5</sub>= Flujo en ton/día de hidrógeno destinado al proceso Asahi de PEAD, tren A  
R<sub>14A6</sub>= Flujo en ton/día de hidrógeno destinado al proceso Asahi de PEAD, tren B  
R<sub>14A7</sub>= Flujo en ton/día de hidrógeno destinado al proceso Mitsui de PEAD, tren A  
R<sub>14A8</sub>= Flujo en ton/día de hidrógeno destinado al proceso Mitsui de PEAD, tren B  
R<sub>14PLB</sub>= Flujo en ton/día de hidrógeno destinado al proceso de polietileno lineal de baja densidad  
R<sub>1439</sub>= Flujo en ton/día de hidrógeno para la formulación del PELBD tipo Padmex 60120U  
R<sub>1440</sub>= Flujo en ton/día de hidrógeno para la formulación del PELBD tipo Padmex 54200  
R<sub>1441</sub>= Flujo en ton/día de hidrógeno para la formulación del PELBD tipo BDL36050  
R<sub>1442</sub>= Flujo en ton/día de hidrógeno para la formulación del PELBD tipo BDL39035  
R<sub>1443</sub>= Flujo en ton/día de hidrógeno para la formulación del PELBD tipo BDL92010C  
R<sub>1444</sub>= Flujo en ton/día de hidrógeno para la formulación del PELBD tipo BDL92010S  
R<sub>1445</sub>= Flujo en ton/día de hidrógeno para la formulación del PELBD tipo BDL92020C  
R<sub>1446</sub>= Flujo en ton/día de hidrógeno para la formulación del PELBD tipo BDL92020S

R<sub>1447</sub>= Flujo en ton/día de hidrógeno para la formulación del PELBD tipo BDL92200  
R<sub>1448</sub>= Flujo en ton/día de hidrógeno para la formulación del PELBD tipo BDLH91720S  
R<sub>1449</sub>= Flujo en ton/día de hidrógeno para la formulación del PELBD tipo BDL93030  
R<sub>14AUX</sub>= Flujo en ton/día de hidrógeno destinado a servicios principales  
R<sub>15</sub>= Flujo en ton/día de oxígeno destinado a ventas internas  
R<sub>16</sub>= Flujo en ton/día de oxígeno transferido al QC por el QM  
R<sub>17</sub>= Flujo en ton/día de líquidos de pirólisis destinados a autoconsumos en el SNR  
R<sub>18</sub>= Flujo en ton/día de líquidos de pirólisis destinados a exportación  
R<sub>20</sub>= Flujo total producido en ton/día de etileno  
R<sub>21</sub>= Flujo en ton/día de metano destinado al proceso de óxido de etileno  
R<sub>21r2</sub>= Flujo en ton/día de metano destinado al proceso de óxido de etileno, tren 1  
R<sub>21rh</sub>= Flujo en ton/día de metano destinado al proceso de óxido de etileno, tren 2  
R<sub>22</sub>= Flujo en ton/día de metano destinado a servicios principales  
R<sub>24</sub>= Flujo total en ton/día de butano-butadieno destinado a exportación  
R<sub>25</sub>= Flujo total en ton/día de líquidos de pirólisis  
R<sub>26</sub>= Flujo total disponible en ton/día de oxígeno  
R<sub>27</sub>= Flujo total producido en ton/día de oxígeno  
R<sub>28</sub>= Flujo total producido en ton/día de nitrógeno puro  
R<sub>29</sub>= Flujo total producido en ton/día de nitrógeno impuro  
R<sub>30</sub>= Flujo total producido en ton/día de dióxido de carbono  
R<sub>30r2</sub>= Flujo producido en ton/día de dióxido de carbono, tren 1  
R<sub>30rh</sub>= Flujo producido en ton/día de dióxido de carbono, tren 2  
R<sub>31</sub>= Flujo total producido en ton/día de óxido de etileno  
R<sub>31r2</sub>= Flujo producido en ton/día de óxido de etileno, tren 1  
R<sub>31rh</sub>= Flujo producido en ton/día de óxido de etileno, tren 2  
R<sub>31G</sub>= Flujo en ton/día de óxido de etileno destinado al proceso de glicoles etilénicos  
R<sub>31SL</sub>= Flujo en ton/día de óxido de etileno destinado ventas internas  
R<sub>32</sub>= Flujo producido en ton/día de residuo de glicoles etilénicos  
R<sub>33</sub>= Flujo total producido en ton/día de gas argón enviado a autoconsumo  
R<sub>33r2</sub>= Flujo producido en ton/día de gas argón, tren 1  
R<sub>33rh</sub>= Flujo producido en ton/día de gas argón, tren 2  
R<sub>34</sub>= Flujo total producido en ton/día de gas residual enviado a venteo  
R<sub>34r2</sub>= Flujo producido en ton/día de gas residual, tren 1  
R<sub>34rh</sub>= Flujo producido en ton/día de gas residual, tren 2  
R<sub>35</sub>= Flujo en ton/día de monoetilenglicol destinado a ventas internas  
R<sub>36</sub>= Flujo total producido en ton/día de dietilenglicol  
R<sub>37</sub>= Flujo total producido en ton/día de trietilenglicol  
R<sub>38</sub>= Flujo producido en ton/día de polietilenglicol destinado a ventas internas  
R<sub>39</sub>= Flujo producido en ton/día de polietileno lineal de baja densidad tipo Padmex 60120U  
R<sub>40</sub>= Flujo producido en ton/día de polietileno lineal de baja densidad tipo Padmex-54200  
R<sub>41</sub>= Flujo producido en ton/día de polietileno lineal de baja densidad tipo BDL36050  
R<sub>42</sub>= Flujo producido en ton/día de polietileno lineal de baja densidad tipo BDL39035  
R<sub>43</sub>= Flujo producido en ton/día de polietileno lineal de baja densidad tipo BDL92010C  
R<sub>44</sub>= Flujo producido en ton/día de polietileno lineal de baja densidad tipo BDL92010S  
R<sub>45</sub>= Flujo producido en ton/día de polietileno lineal de baja densidad tipo BDL92020C  
R<sub>46</sub>= Flujo producido en ton/día de polietileno lineal de baja densidad tipo BDL92020S  
R<sub>47</sub>= Flujo producido en ton/día de polietileno lineal de baja densidad tipo BDL92200  
R<sub>48</sub>= Flujo producido en ton/día de polietileno lineal de baja densidad tipo BDLH91720S

R<sub>49</sub>= Flujo producido en ton/día de polietileno lineal de baja densidad tipo BDL93030  
 R<sub>50</sub>= Flujo producido en ton/día de segundas de PELBD tipo Padmex 60120U  
 R<sub>51</sub>= Flujo producido en ton/día de segundas de PELBD tipo Padmex-54200  
 R<sub>52</sub>= Flujo producido en ton/día de segundas de PELBD tipo BDL36050  
 R<sub>53</sub>= Flujo producido en ton/día de segundas de PELBD tipo BDL39035  
 R<sub>54</sub>= Flujo producido en ton/día de segundas de PELBD tipo BDL92010C  
 R<sub>55</sub>= Flujo producido en ton/día de segundas de PELBD tipo BDL92010S  
 R<sub>56</sub>= Flujo producido en ton/día de segundas de PELBD tipo BDL92020C  
 R<sub>57</sub>= Flujo producido en ton/día de segundas de PELBD tipo BDL92020S  
 R<sub>58</sub>= Flujo producido en ton/día de segundas de PELBD tipo BDL92200  
 R<sub>59</sub>= Flujo producido en ton/día de segundas de PELBD tipo BDLH91720S  
 R<sub>60</sub>= Flujo producido en ton/día de segundas de PELBD tipo BDL93030  
 R<sub>61</sub>= Flujo total producido en ton/día de barreduras de polietileno lineal de baja densidad  
 R<sub>61U</sub>= Flujo producido en ton/día de barreduras de PELBD tipo Padmex 60120U  
 R<sub>6154</sub>= Flujo producido en ton/día de barreduras de PELBD tipo Padmex 54200  
 R<sub>6150</sub>= Flujo producido en ton/día de barreduras de PELBD tipo BDL36050  
 R<sub>6135</sub>= Flujo producido en ton/día de barreduras de PELBD tipo BDL39035  
 R<sub>611c</sub>= Flujo producido en ton/día de barreduras de PELBD tipo BDL92010C  
 R<sub>611s</sub>= Flujo producido en ton/día de barreduras de PELBD tipo BDL92010S  
 R<sub>612c</sub>= Flujo producido en ton/día de barreduras de PELBD tipo BDL92020C  
 R<sub>612s</sub>= Flujo producido en ton/día de barreduras de PELBD tipo BDL92020S  
 R<sub>6192</sub>= Flujo producido en ton/día de barreduras de PELBD tipo BDL92200  
 R<sub>610s</sub>= Flujo producido en ton/día de barreduras de PELBD tipo BDLH91720S  
 R<sub>6130</sub>= Flujo producido en ton/día de barreduras de PELBD tipo BDL93030  
 R<sub>62</sub>= Flujo en ton/día de nitrógeno transferido al QC por el QM  
 R<sub>63</sub>= Flujo en ton/día de etileno transferido al QC por el QM  
 R<sub>64</sub>= Flujo en ton/día de etileno disponible a los procesos de etileno  
 R<sub>64OX</sub>= Flujo en ton/día de etileno destinado al proceso de óxido de etileno  
 R<sub>64r2</sub>= Flujo en ton/día de etileno destinado al proceso de óxido de etileno, tren 1  
 R<sub>64rh</sub>= Flujo en ton/día de etileno destinado al proceso de óxido de etileno, tren 2  
 R<sub>64PAD</sub>= Flujo en ton/día de etileno destinado al proceso de polietileno de alta densidad  
 R<sub>64A5</sub>= Flujo en ton/día de etileno destinado al proceso Asahi de PEAD, tren A  
 R<sub>64A6</sub>= Flujo en ton/día de etileno destinado al proceso Asahi de PEAD, tren B  
 R<sub>64A7</sub>= Flujo en ton/día de etileno destinado al proceso Mitsui de PEAD, tren A  
 R<sub>64A8</sub>= Flujo en ton/día de etileno destinado al proceso Mitsui de PEAD, tren B  
 R<sub>64PLB</sub>= Flujo en ton/día de etileno destinado al proceso de polietileno lineal de baja densidad  
 R<sub>65</sub>= Flujo en ton/día de etileno destinado a ventas internas  
 R<sub>66</sub>= Flujo total en ton/día de oxígeno destinado a autoconsumos y ventas internas  
 R<sub>66OX</sub>= Flujo en ton/día de oxígeno destinado al proceso de óxido de etileno  
 R<sub>66r2</sub>= Flujo en ton/día de oxígeno destinado al proceso de óxido de etileno, tren 1  
 R<sub>66rh</sub>= Flujo en ton/día de oxígeno destinado al proceso de óxido de etileno, tren 2  
 R<sub>66SL</sub>= Flujo en ton/día de oxígeno destinado a ventas internas  
 R<sub>67</sub>= Flujo total en ton/día de nitrógeno a ventas internas  
 R<sub>69</sub>= Flujo en ton/día de nitrógeno puro destinado a autoconsumo  
 R<sub>70</sub>= Flujo en ton/día de nitrógeno puro destinado a ventas internas  
 R<sub>71AUX</sub>= Flujo en ton/día de nitrógeno puro destinado a servicios principales  
 R<sub>71R</sub>= Flujo en ton/día de nitrógeno puro enviado al mezclador de nitrógeno residual  
 R<sub>72</sub>= Flujo en ton/día de dióxido de carbono enviado a venteo

R<sub>73</sub>= Flujo en ton/día de dióxido de carbono destinado a ventas internas  
R<sub>74</sub>= Flujo en ton/día de trietilenglicol destinado a ventas internas  
R<sub>75</sub>= Flujo en ton/día de trietilenglicol transferido a Pemex Exploración y Producción  
R<sub>76</sub>= Flujo total producido en ton/día de gas residual enviado a venteo  
R<sub>78</sub>= Flujo en ton/día de dietilenglicol destinado a ventas internas  
R<sub>79</sub>= Flujo en ton/día de dietilenglicol destinado a exportación  
R<sub>80</sub>= Flujo en ton/día de trietilenglicol destinado a exportación  
R<sub>81</sub>= Flujo total producido en ton/día de PEAD tipo Padmex 6004S  
R<sub>81A5</sub>= Flujo producido en ton/día de PEAD tipo Padmex 6004S, tren A  
R<sub>81A6</sub>= Flujo producido en ton/día de PEAD tipo Padmex 6004S, tren B  
R<sub>82</sub>= Flujo total producido en ton/día de PEAD tipo Padmex 60120  
R<sub>82A5</sub>= Flujo producido en ton/día de PEAD tipo Padmex 60120, tren A  
R<sub>82A6</sub>= Flujo producido en ton/día de PEAD tipo Padmex 60120, tren B  
R<sub>83</sub>= Flujo total producido en ton/día de PEAD tipo Padmex 65050  
R<sub>83A5</sub>= Flujo producido en ton/día de PEAD tipo Padmex 65050, tren A  
R<sub>83A6</sub>= Flujo producido en ton/día de PEAD tipo Padmex 65050, tren B  
R<sub>84</sub>= Flujo total producido en ton/día de PEAD tipo Padmex 65080  
R<sub>84A5</sub>= Flujo producido en ton/día de PEAD tipo Padmex 65080, tren A  
R<sub>84A6</sub>= Flujo producido en ton/día de PEAD tipo Padmex 65080, tren B  
R<sub>85</sub>= Flujo total producido en ton/día de segundas de PEAD tipo Padmex 6004S  
R<sub>85A5</sub>= Flujo producido en ton/día de segundas de PEAD tipo Padmex 6004S, tren A  
R<sub>85A6</sub>= Flujo producido en ton/día de segundas de PEAD tipo Padmex 6004S, tren B  
R<sub>86</sub>= Flujo total producido en ton/día de segundas de PEAD tipo Padmex 60120 en el proceso Asahi  
R<sub>86A5</sub>= Flujo producido en ton/día de segundas de PEAD tipo Padmex 60120, tren A  
R<sub>86A6</sub>= Flujo producido en ton/día de segundas de PEAD tipo Padmex 60120, tren B  
R<sub>87</sub>= Flujo total producido en ton/día de segundas de PEAD tipo Padmex 65050  
R<sub>87A5</sub>= Flujo producido en ton/día de segundas de PEAD tipo Padmex 65050, tren A  
R<sub>87A6</sub>= Flujo producido en ton/día de segundas de PEAD tipo Padmex 65050, tren B  
R<sub>88</sub>= Flujo total producido en ton/día de segundas de PEAD tipo Padmex 65080  
R<sub>88A5</sub>= Flujo producido en ton/día de segundas de PEAD tipo Padmex 65080, tren A  
R<sub>88A6</sub>= Flujo producido en ton/día de segundas de PEAD tipo Padmex 65080, tren B  
R<sub>89</sub>= Flujo total producido en ton/día de ceras polietilénicas en el proceso Asahi de PEAD  
R<sub>89A5</sub>= Flujo producido en ton/día de ceras polietilénicas en el proceso Asahi de PEAD, tren A  
R<sub>89A6</sub>= Flujo producido en ton/día de ceras polietilénicas en el proceso Asahi de PEAD, tren B  
R<sub>90</sub>= Flujo total producido en ton/día de gas residual en el proceso Asahi de PEAD  
R<sub>90A5</sub>= Flujo producido en ton/día de gas residual en el proceso Asahi de PEAD, tren A  
R<sub>90A6</sub>= Flujo producido en ton/día de gas residual en el proceso Asahi de PEAD, tren B  
R<sub>91</sub>= Flujo total producido en ton/día de PEAD tipo Padmex 56035  
R<sub>91A7</sub>= Flujo producido en ton/día de PEAD tipo Padmex 56035, tren A  
R<sub>91A8</sub>= Flujo producido en ton/día de PEAD tipo Padmex 56035, tren B  
R<sub>92</sub>= Flujo total producido en ton/día de PEAD tipo Padmex 60120 en el proceso Mitsui  
R<sub>92A7</sub>= Flujo producido en ton/día de PEAD tipo Padmex 60120, tren A  
R<sub>92A8</sub>= Flujo producido en ton/día de PEAD tipo Padmex 60120, tren B  
R<sub>93</sub>= Flujo total producido en ton/día de segundas de PEAD tipo Padmex 56035  
R<sub>93A7</sub>= Flujo producido en ton/día de segundas de PEAD tipo Padmex 56035, tren A  
R<sub>93A8</sub>= Flujo producido en ton/día de segundas de PEAD tipo Padmex 56035, tren B  
R<sub>94</sub>= Flujo total producido en ton/día de segundas de PEAD tipo Padmex 60120 en el proceso Mitsui  
R<sub>94A7</sub>= Flujo producido en ton/día de segundas de PEAD tipo Padmex 60120, tren A

R<sub>94A8</sub>= Flujo producido en ton/día de segundas de PEAD tipo Padmex 60120, tren B  
R<sub>95</sub>= Flujo total producido en ton/día de ceras polietilénicas en el proceso Mitsui de PEAD  
R<sub>95A7</sub>= Flujo producido en ton/día de ceras polietilénicas en el proceso Mitsui de PEAD, tren A  
R<sub>95A8</sub>= Flujo producido en ton/día de ceras polietilénicas en el proceso Mitsui de PEAD, tren B  
R<sub>96</sub>= Flujo total producido en ton/día de gas residual en el proceso Mitsui de PEAD  
R<sub>96A7</sub>= Flujo producido en ton/día de gas residual en el proceso Mitsui de PEAD, tren A  
R<sub>96A8</sub>= Flujo producido en ton/día de gas residual en el proceso Mitsui de PEAD, tren B  
R<sub>97</sub>= Flujo producido en ton/día de mezcla de glicoles destinado a ventas internas  
R<sub>PLB</sub>= Flujo producido en ton/día de polietileno lineal de baja densidad  
R<sub>PL39</sub>= Flujo en ton/día de PELBD puro para la formulación del PELBD tipo Padmex 60120U  
R<sub>PL40</sub>= Flujo en ton/día de PELBD puro para la formulación del PELBD tipo Padmex 54200  
R<sub>PL41</sub>= Flujo en ton/día de PELBD puro para la formulación del PELBD tipo BDL36050  
R<sub>PL42</sub>= Flujo en ton/día de PELBD puro para la formulación del PELBD tipo BDL39035  
R<sub>PL43</sub>= Flujo en ton/día de PELBD puro para la formulación del PELBD tipo BDL92010C  
R<sub>PL44</sub>= Flujo en ton/día de PELBD puro para la formulación del PELBD tipo BDL92010S  
R<sub>PL45</sub>= Flujo en ton/día de PELBD puro para la formulación del PELBD tipo BDL92020C  
R<sub>PL46</sub>= Flujo en ton/día de PELBD puro para la formulación del PELBD tipo BDL92020S  
R<sub>PL47</sub>= Flujo en ton/día de PELBD puro para la formulación del PELBD tipo BDL92200  
R<sub>PL48</sub>= Flujo en ton/día de PELBD puro para la formulación del PELBD tipo BDLH91720S  
R<sub>PL49</sub>= Flujo en ton/día de PELBD puro para la formulación del PELBD tipo BDL93030  
R<sub>H2G</sub>= Flujo en ton/día de 1-hexeno al proceso de polietileno lineal de baja densidad  
R<sub>H39</sub>= Flujo en ton/día de 1-hexeno para la formulación del PELBD tipo Padmex 60120U  
R<sub>H40</sub>= Flujo en ton/día de 1-hexeno para la formulación del PELBD tipo Padmex 54200  
R<sub>H41</sub>= Flujo en ton/día de 1-hexeno para la formulación del PELBD tipo BDL36050  
R<sub>H42</sub>= Flujo en ton/día de 1-hexeno para la formulación del PELBD tipo BDL39035  
R<sub>BPL</sub>= Flujo en ton/día de 1-buteno al proceso de polietileno lineal de baja densidad  
R<sub>B43</sub>= Flujo en ton/día de 1-buteno para la formulación del PELBD tipo BDL92010C  
R<sub>B44</sub>= Flujo en ton/día de 1-buteno para la formulación del PELBD tipo BDL92010S  
R<sub>B45</sub>= Flujo en ton/día de 1-buteno para la formulación del PELBD tipo BDL92020C  
R<sub>B46</sub>= Flujo en ton/día de 1-buteno para la formulación del PELBD tipo BDL92020S  
R<sub>B47</sub>= Flujo en ton/día de 1-buteno para la formulación del PELBD tipo BDL92200  
R<sub>B48</sub>= Flujo en ton/día de 1-buteno para la formulación del PELBD tipo BDLH91720S  
R<sub>B49</sub>= Flujo en ton/día de 1-buteno para la formulación del PELBD tipo BDL93030  
R<sub>S1G</sub>= Flujo en ton/día de isopentanos al proceso de polietileno lineal de baja densidad  
R<sub>S39</sub>= Flujo en ton/día de isopentano para la formulación del PELBD tipo Padmex 60120U  
R<sub>S40</sub>= Flujo en ton/día de isopentano para la formulación del PELBD tipo Padmex 54200  
R<sub>S41</sub>= Flujo en ton/día de isopentano para la formulación del PELBD tipo BDL36050  
R<sub>S42</sub>= Flujo en ton/día de isopentano para la formulación del PELBD tipo BDL39035  
R<sub>S43</sub>= Flujo en ton/día de isopentano para la formulación del PELBD tipo BDL92010C  
R<sub>S44</sub>= Flujo en ton/día de isopentano para la formulación del PELBD tipo BDL92010S  
R<sub>S45</sub>= Flujo en ton/día de isopentano para la formulación del PELBD tipo BDL92020C  
R<sub>S46</sub>= Flujo en ton/día de isopentano para la formulación del PELBD tipo BDL92020S  
R<sub>S47</sub>= Flujo en ton/día de isopentano para la formulación del PELBD tipo BDL92200  
R<sub>S48</sub>= Flujo en ton/día de isopentano para la formulación del PELBD tipo BDLH91720S  
R<sub>S49</sub>= Flujo en ton/día de isopentano para la formulación del PELBD tipo BDL93030  
R<sub>H1G</sub>= Flujo en ton/día de hexano destinado al proceso de polietileno de alta densidad  
R<sub>HA5</sub>= Flujo en ton/día de hexano destinado al proceso Asahi de PEAD tren A  
R<sub>HA6</sub>= Flujo en ton/día de hexano destinado al proceso Asahi de PEAD tren B

$R_{HA7}$ = Flujo en ton/día de hexano destinado al proceso Mitsui de PEAD tren A  
 $R_{HA8}$ = Flujo en ton/día de hexano destinado al proceso Mitsui de PEAD tren B  
 $R_{PGT}$ = Flujo en ton/día de propileno destinado al proceso de polietileno de alta densidad  
 $R_{GA5}$ = Flujo en ton/día de propileno destinado al proceso Asahi de PEAD tren A  
 $R_{GA6}$ = Flujo en ton/día de propileno destinado al proceso Asahi de PEAD tren B  
 $R_{GA7}$ = Flujo en ton/día de propileno destinado al proceso Mitsui de PEAD tren A  
 $R_{GA8}$ = Flujo en ton/día de propileno destinado al proceso Mitsui de PEAD tren B  
 $R_{AGG}$ = Flujo en ton/día de agua al proceso de glicoles etilénicos  
 $R_{BA7}$ = Flujo en ton/día de 1-buteno destinado al proceso Mitsui de PEAD tren A  
 $R_{BA8}$ = Flujo en ton/día de 1-buteno destinado al proceso Mitsui de PEAD tren B  
 $R_{PPC}$ = Traspaso en ton/día de propileno por el SNR  
 $R_{PA5}$ = Flujo producido en ton/día de PEAD puro en el proceso Asahi, tren A  
 $R_{PA6}$ = Flujo producido en ton/día de PEAD puro en el proceso Asahi, tren B  
 $R_{PA7}$ = Flujo producido en ton/día de PEAD puro en el proceso Mitsui, tren A  
 $R_{PA8}$ = Flujo producido en ton/día de PEAD puro en el proceso Mitsui, tren B

### Plantas de operación

ETL-q1	Planta de etileno en el complejo petroquímico La Cangrejera
OXE-q2	Planta de óxido de etileno en el complejo petroquímico La Cangrejera
PB1-q3	Planta de polietileno de baja densidad, tren 1
PF1-qe	Planta de formulación y aditivación del polietileno de baja densidad, tren 1
PB1-q4	Planta de polietileno de baja densidad, tren 2
PF1-qf	Planta de formulación y aditivación del polietileno de baja densidad, tren 2
PB1-q5	Planta de polietileno de baja densidad, tren 3
PF1-qg	Planta de formulación y aditivación del polietileno de baja densidad, tren 3
OX1-q6	Planta de oxígeno, tren 1, complejo petroquímico La Cangrejera
OX2-q7	Planta de oxígeno, tren 2, complejo petroquímico La Cangrejera
ETL-r1	Planta de etileno en el complejo petroquímico Morelos
OXE-r2	Planta de óxido de etileno, tren 1, complejo petroquímico Morelos
Oxe-rh	Planta de óxido de etileno, tren 2, complejo petroquímico Morelos
GCL-r3	Planta de glicoles etilénicos
PBL-r4	Planta de polietileno lineal de baja densidad
PAA-r5	Planta de polietileno de alta densidad, proceso Asahi, tren 1
PAB-r6	Planta de polietileno de alta densidad, proceso Asahi, tren 2
PMA-r7	Planta de polietileno de alta densidad, proceso Mitsui, tren 1
PMB-r8	Planta de polietileno de alta densidad, proceso Mitsui, tren 2
OX1-r9	Planta de oxígeno

### Equipos

a	Conector alimentación de etileno al tren 1 de la PEBD
---	---



b	Conector alimentación de etileno al tren 2 de la PEBD
c	Conector alimentación de etileno al tren 3 de la PEBD
A	Conector alimentación de etileno al tren 1 de OXE en QM
B	Conector alimentación de etileno al tren 2 de OXE en QM
C	Conector alimentación de etileno a PELBD en QM
D	Conector alimentación de etileno al tren 1 de PEAD, proceso Asahi
E	Conector alimentación de etileno al tren 2 de PEAD, proceso Asahi
F	Conector alimentación de etileno al tren 1 de PEAD, proceso Mitsui
G	Conector alimentación de etileno al tren 2 de PEAD, proceso Mitsui
Q01	Mezclador de etano en QC
Q02	Mezclador de propano en QC
Q03	Mezclador con la carga de alimentación a la planta de etileno en QC
Q19	Mezclador de gases a servicios principales en QC
Q36	Mezclador de oxígeno en QC
Q37	Mezclador de nitrógeno en QC
Q38	Mezclador de gas residual en QC
R01	Mezclador de etano en QM
R02	Mezclador de propano en QM
R03	Mezclador con la carga de alimentación a la planta de etileno en QM
R20	Mezclador con el flujo total de etileno para las plantas del QM
R24	Mezclador con el flujo total de butanos disponibles a exportación
R25	Mezclador con el flujo total de líquidos de pirólisis en QM
R26	Mezclador con el flujo total de oxígeno en QM
R67	Mezclador con el flujo total de gas residual en QM
MD1-q9	Mezclador con el flujo total de etileno para las plantas del QC
DV1-qa	Divisor para la distribución de hidrógeno en QC
DV2-qb	Divisor para la distribución de metano en QC
DV3-qc	Divisor para la distribución de propano en QC
DV4-qd	Divisor para la distribución de nitrógeno en QC
DV1-rb	Divisor para la distribución de hidrógeno en QM
DV2-rc	Divisor para la distribución de etileno en QM
DV3-rd	Divisor para la distribución de metano en QM
DV5-rf	Divisor para la distribución de oxígeno en QM
DV6-rg	Divisor para la distribución de nitrógeno puro en QM
DV8-rj	Divisor para la distribución del trietilenglicol en QM
DV9-rk	Divisor para la distribución de dietilenglicol en QM

## Abreviaturas

BDI	Base de Datos Institucional
BI	Braskem Idesa
CPQ	Complejo Petroquímico
DEG	Dietilenglicol
ETI	Procesos de etileno
GPO	Gerencia de Programación de Operaciones
Mbd	Miles de barriles diarios
MEG	Monoetilenglicol
MMpesos	Millones de pesos
MOETI	Modelo de Optimización de Etileno
Mt	Miles de toneladas
MTA	Miles de toneladas anuales
OXE	Óxido de Etileno
PEAB	Polietileno de Alta Densidad
PEBD	Polietileno de Baja Densidad
PEG	Polietilenglicol
PELBD	Polietileno de Lineal de Baja Densidad
POF	Programa Operativo y Financiero
POFAT	Programa Operativo y Financiero Anual de Trabajo
QC	Complejo Petroquímico La Cangrejera
QM	Complejo Petroquímico Morelos
SA	Sistema Alternativo
Ton	Toneladas
Td	Toneladas diarias
TEG	Trietilenglicol

## Factores de conversión utilizados

1 metro cúbico            6.28981041 barriles

## Peso específico de productos seleccionados

Etano	0.3580 gr/cc
Propano	0.5110 gr/cc
Butanos	0.5766 gr/cc

# Anexo 1. Diagrama de bloques de los procesos considerados en MOETI

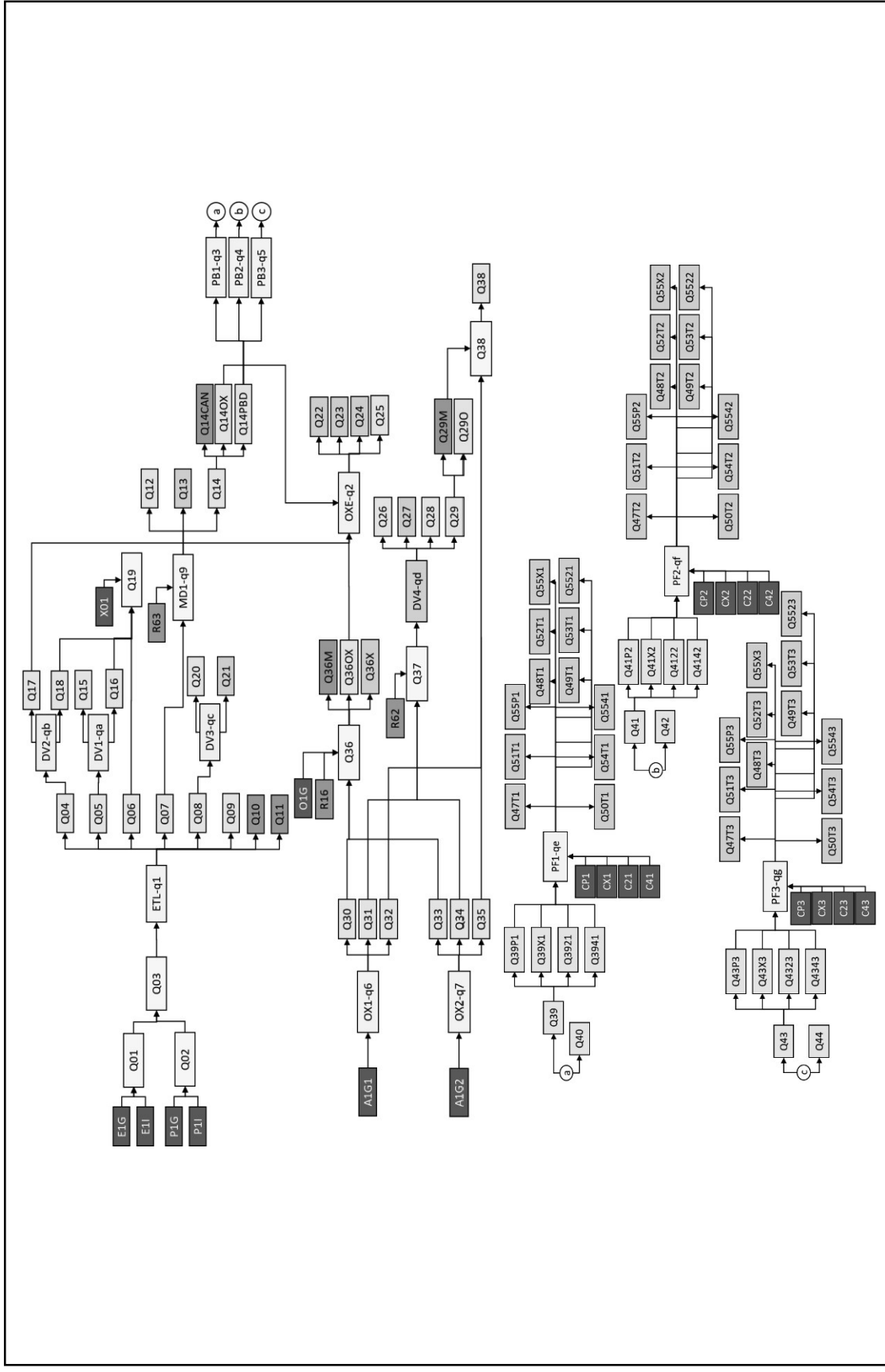


Fig. A1. 1 Diagrama de bloques de los procesos en el Complejo Petroquímico La Cangrejera.

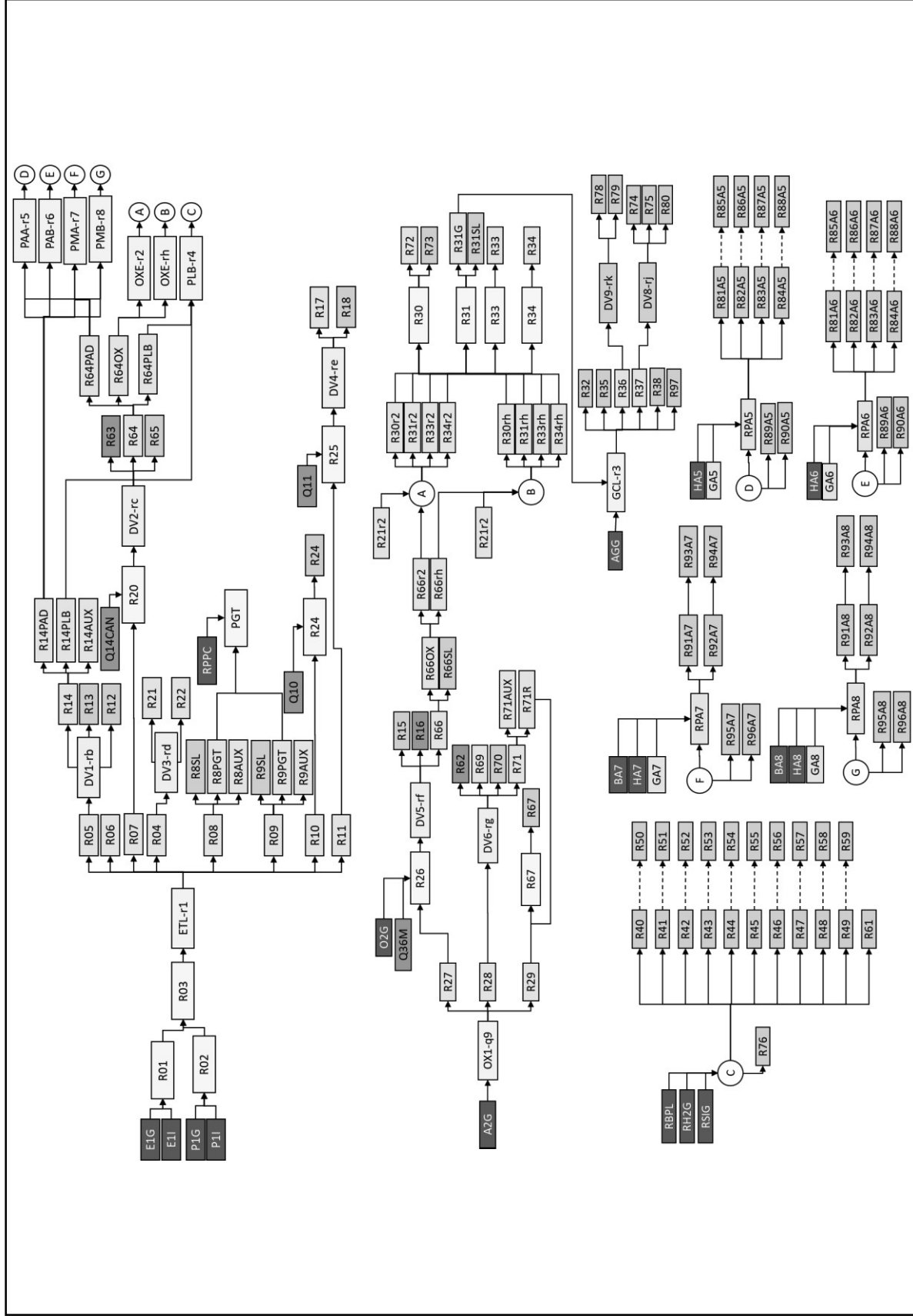


Fig. A1. 2. Diagrama de bloques de los procesos en el Complejo Petroquímico Morelos.

## Anexo 2. Balances de materia de los procesos de etileno en el complejo La Cangrejera

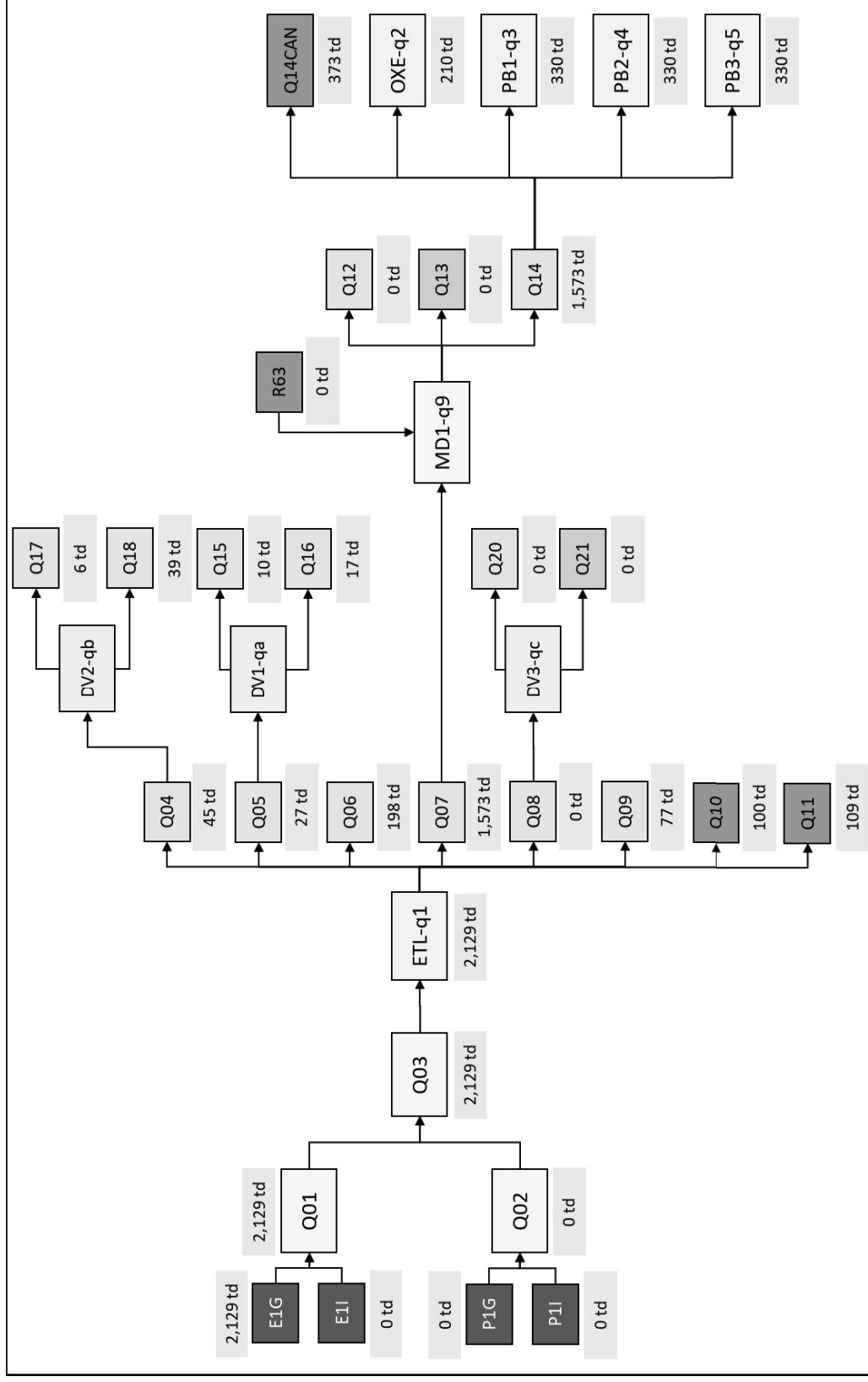


Fig. A2. 1. Diagrama de bloques de la planta de etileno con el balance de materia y distribución de sus productos, Complejo Petroquímico La Cangrejera.

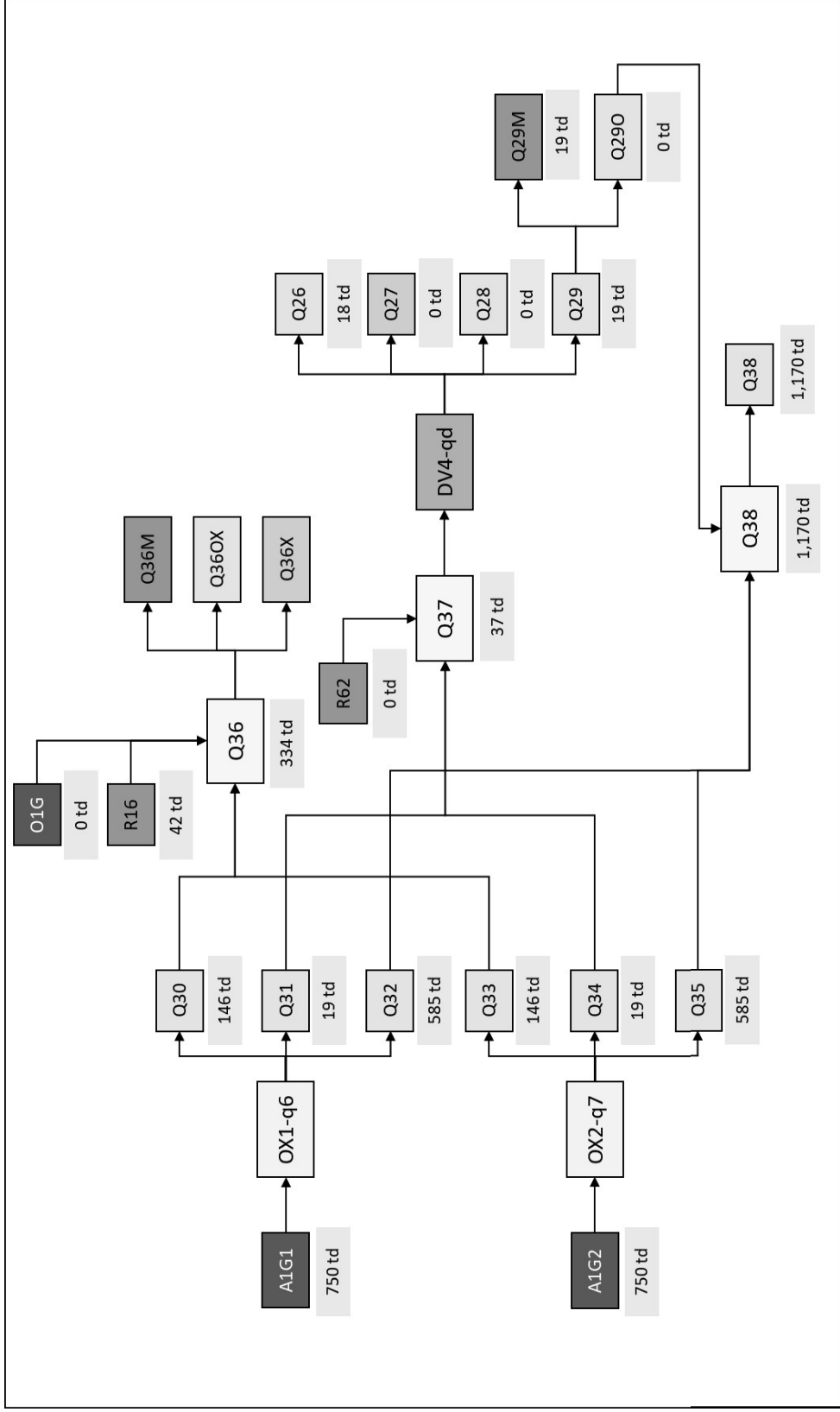


Fig. A2. 2. Diagrama de bloques de la planta de oxígeno con el balance de materia y distribución de sus productos, Complejo Petroquímico La Cangrejera.

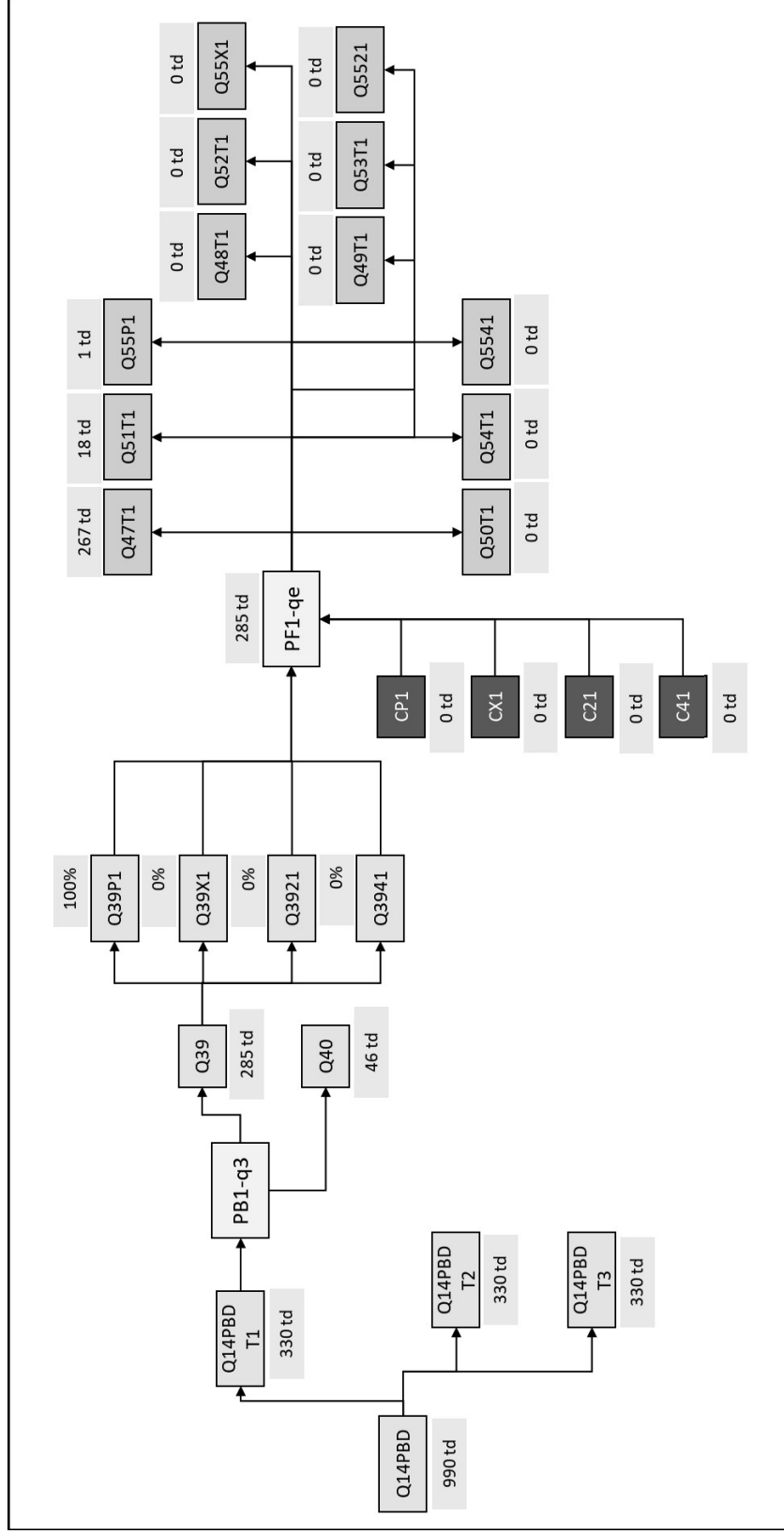


Fig. A2. 3. Diagrama de bloques del tren 1 de la planta de polietileno de baja densidad (PEBD) con el balance de materia y distribución de sus productos.

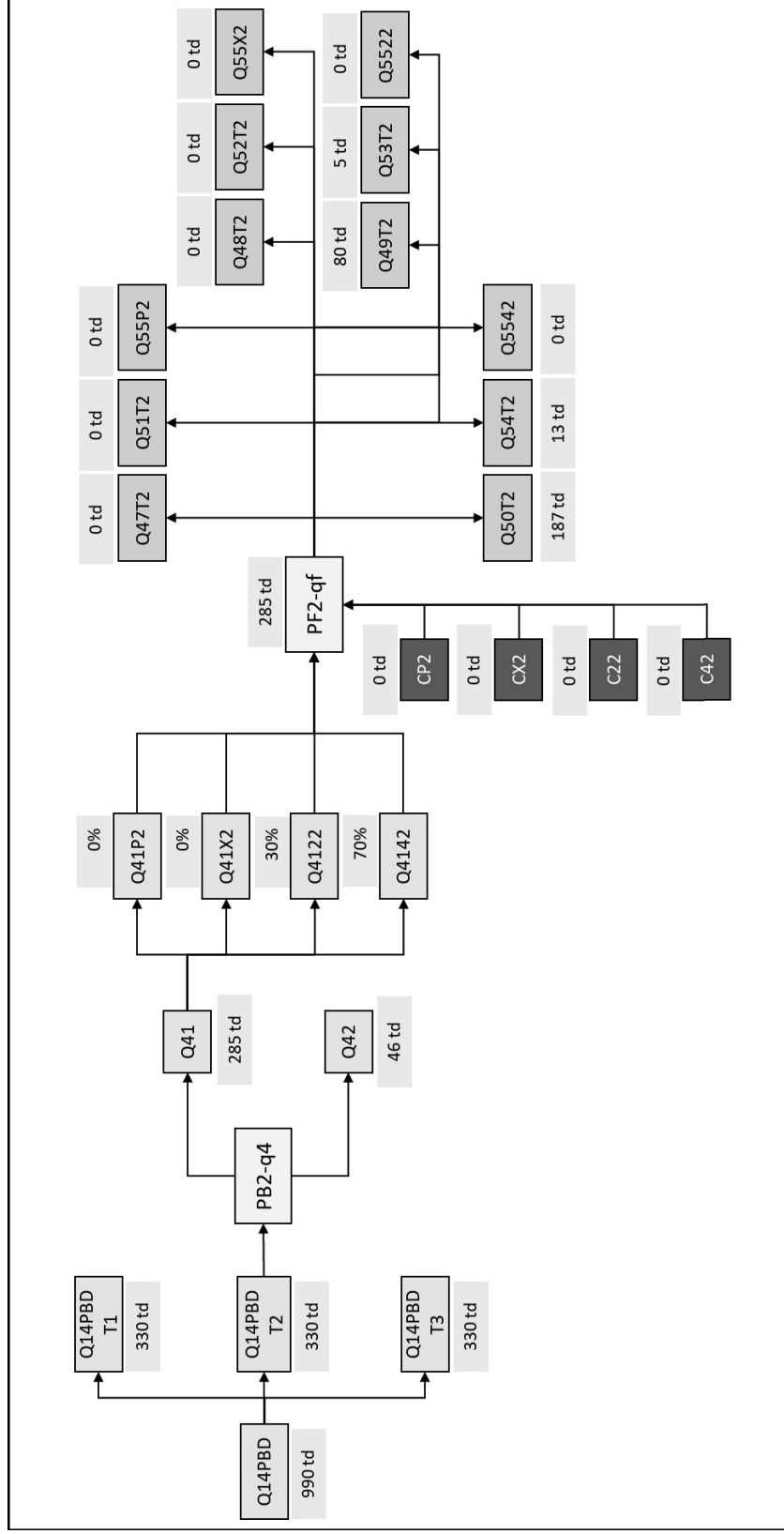


Fig. A2. 4. Diagrama de bloques del tren 2 de la planta de polietileno de baja densidad (PEBD) con el balance de materia y distribución de sus productos.



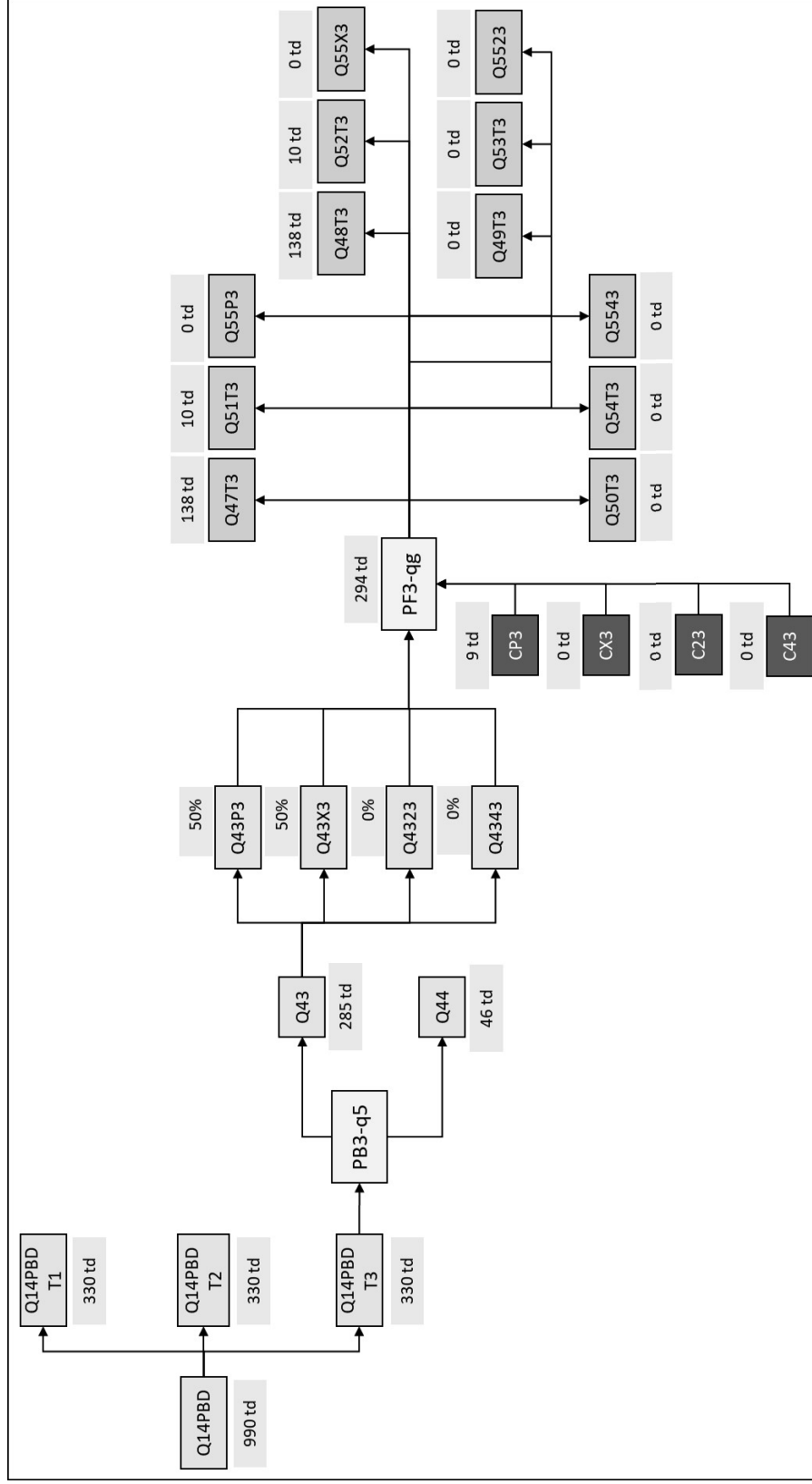


Fig. A2. 5. Diagrama de bloques del tren 3 de la planta de polietileno de baja densidad (PEBD) con el balance de materia y distribución de sus productos.

### Anexo 3. Balances de materia de los procesos de etileno en el complejo Morelos

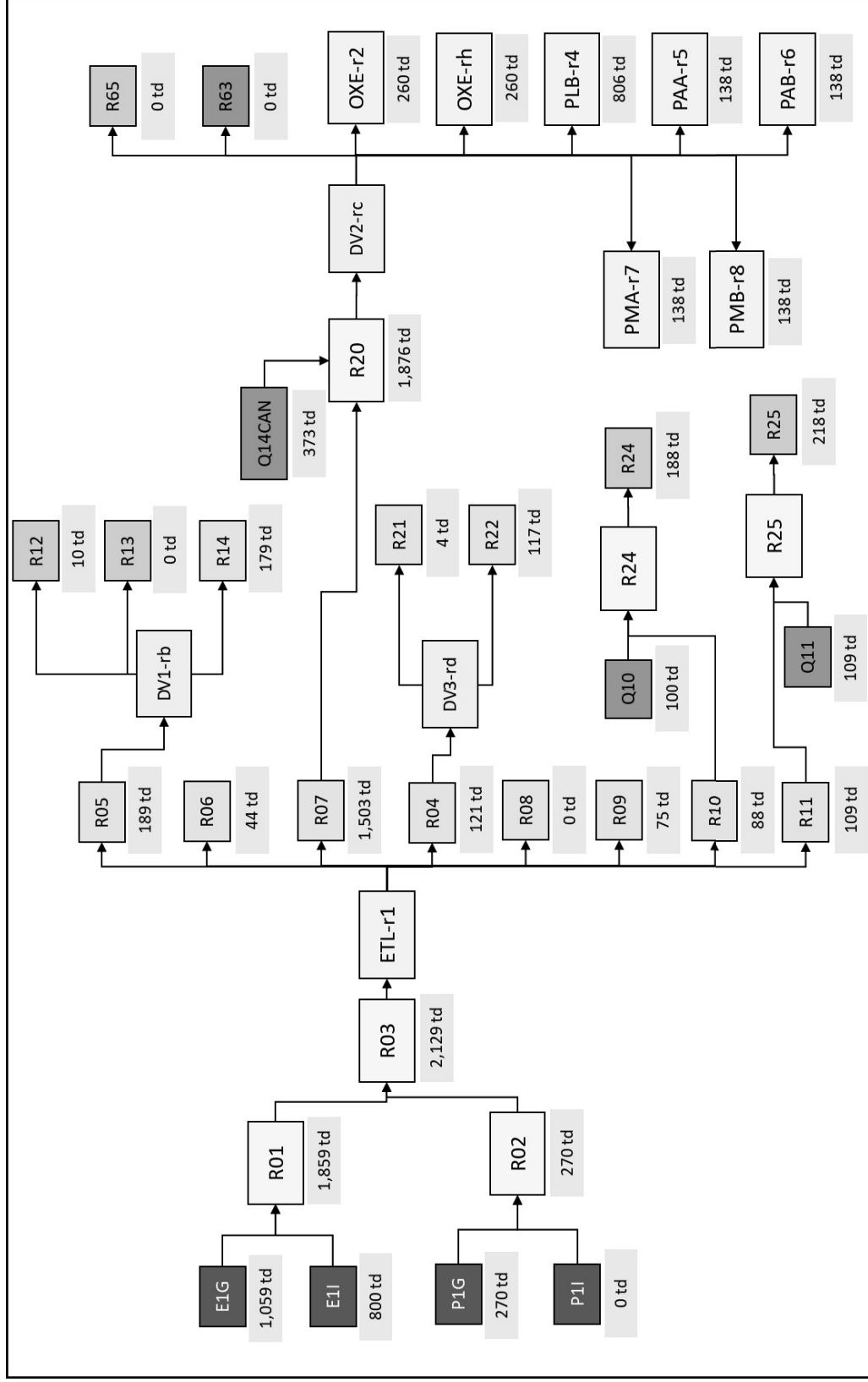
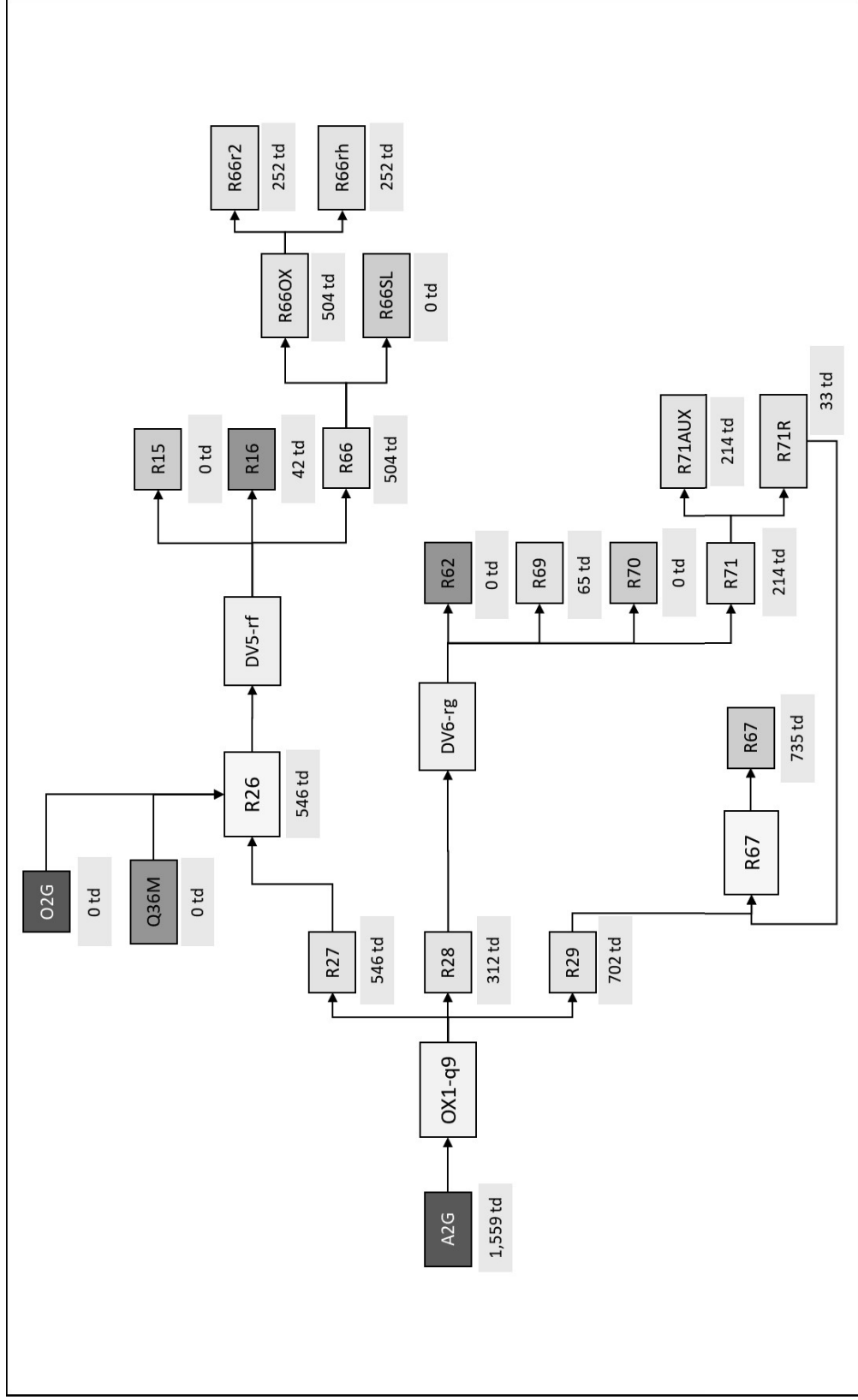


Fig. A3. 1. Diagrama de bloques de la planta de etileno con el balance de materia y distribución de sus productos, Complejo Petroquímico Morelos.



**Fig. A3. 2.** Diagrama de bloques de la planta de oxígeno con el balance de materia y distribución de sus productos, Complejo Petroquímico Morelos.

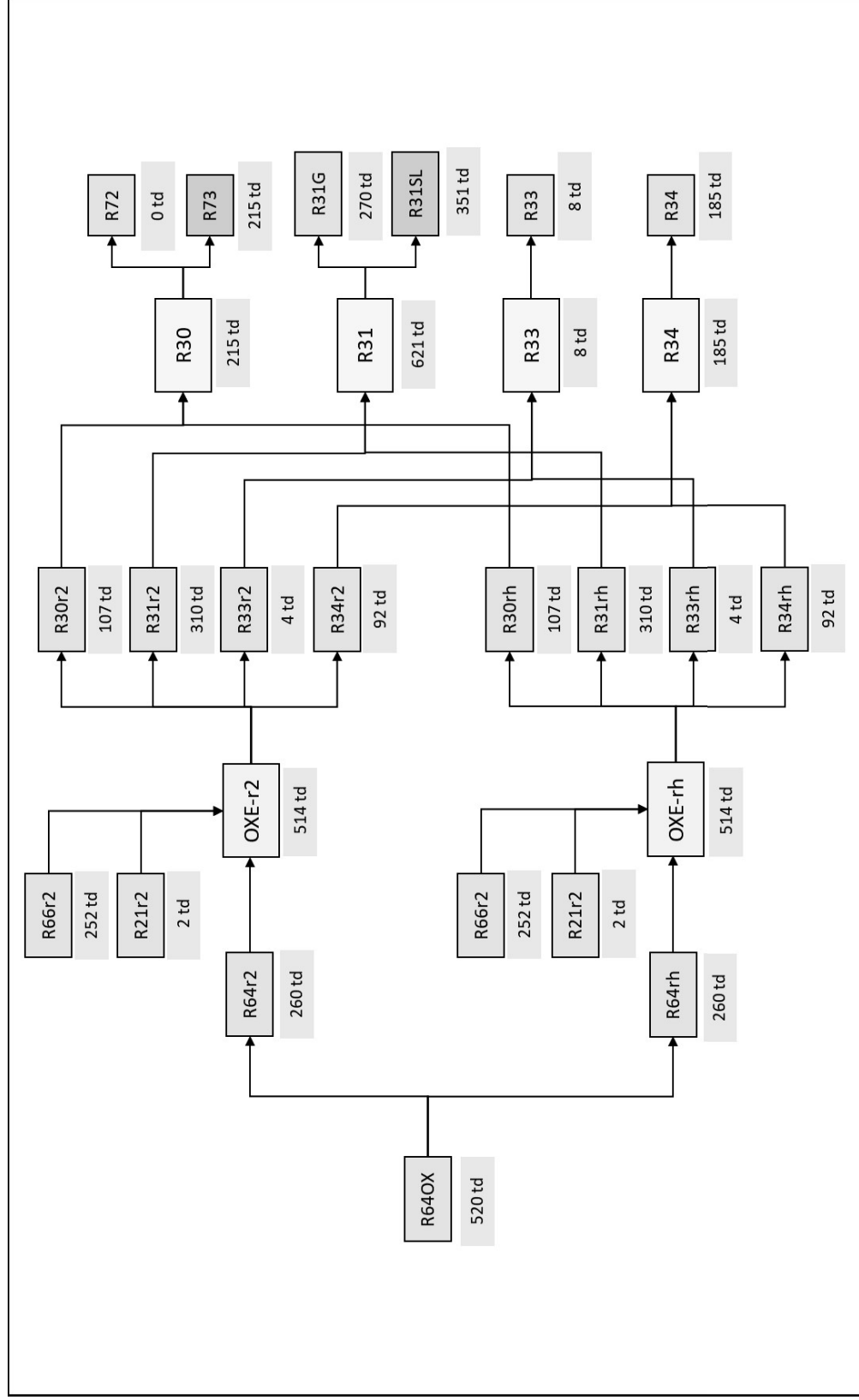


Fig. A3. 3. Diagrama de bloques de la planta de óxido de etileno con el balance de materia y distribución de sus productos, Complejo Petroquímico Morelos.



## Anexo 4. Flujos máximos y mínimos empleados en el desarrollo del caso base

Compras						Compras					
Descripción	Clave	unidad	tipo	Caso		Descripción	Clave	unidad	tipo	Caso	
Etano de PTRI	E1G	td	MIN	3,187		Catalizador Mitsui TA	CMA	td	MIN	-	
Etano de PTRI	E1G	td	MAX	3,187		Catalizador Mitsui TA	CMA	td	MAX	10,000	
Etano importado	E1I	td	MIN	800		Catalizador Mitsui TB	CMB	td	MIN	-	
Etano importado	E1I	td	MAX	800		Catalizador Mitsui TB	CMB	td	MAX	10,000	
Propano de PTRI	P1G	td	MIN	270		Concentrado P PEBD 20020P T1	CP1	td	MIN	-	
Propano de PTRI	P1G	td	MAX	270		Concentrado P PEBD 20020P T1	CP1	td	MAX	10,000	
Propano importado	P1I	td	MIN	-		Concentrado P PEBD 20020P T2	CP2	td	MIN	-	
Propano importado	P1I	td	MAX	-		Concentrado P PEBD 20020P T2	CP2	td	MAX	10,000	
Gas de PTRI	X01	MIMpcd	MIN	-		Concentrado P PEBD 20020P T3	CP3	td	MIN	-	
Gas de PTRI	X01	MIMpcd	MAX	3,340		Concentrado P PEBD 20020P T3	CP3	td	MAX	10,000	
Aire	A1G	td	MIN	-		Catalizador T1	CT1	td	MIN	-	
Aire	A1G	td	MAX	14,286		Catalizador T1	CT1	td	MAX	10,000	
Agua para glicoles	AGG	td	MIN	-		Catalizador T2	CT2	td	MIN	-	
Agua para glicoles	AGG	td	MAX	160		Catalizador T2	CT2	td	MAX	10,000	
1-Buteno	B1G	td	MIN	-		Catalizador T3	CT3	td	MIN	-	
1-Buteno	B1G	td	MAX	10,000		Catalizador T3	CT3	td	MAX	10,000	
Concentrado P PEBD 21002 T1	C21	td	MIN	-		Concentrado P PEBD 20020X T1	CX1	td	MIN	-	
Concentrado P PEBD 21002 T1	C21	td	MAX	10,000		Concentrado P PEBD 20020X T1	CX1	td	MAX	10,000	
Concentrado P PEBD 21002 T2	C22	td	MIN	-		Concentrado P PEBD 20020X T2	CX2	td	MIN	-	
Concentrado P PEBD 21002 T2	C22	td	MAX	10,000		Concentrado P PEBD 20020X T2	CX2	td	MAX	10,000	
Concentrado P PEBD 21002 T3	C23	td	MIN	-		Concentrado P PEBD 20020X T3	CX3	td	MIN	-	
Concentrado P PEBD 21002 T3	C23	td	MAX	10,000		Concentrado P PEBD 20020X T3	CX3	td	MAX	10,000	
Concentrado P PEBD 22004 T1	C41	td	MIN	-		Hexano	H1G	td	MIN	-	
Concentrado P PEBD 22004 T1	C41	td	MAX	10,000		Hexano	H1G	td	MAX	10,000	
Concentrado P PEBD 22004 T2	C42	td	MIN	-		1-Hexeno	H2G	td	MIN	-	
Concentrado P PEBD 22004 T2	C42	td	MAX	10,000		1-Hexeno	H2G	td	MAX	10,000	
Concentrado P PEBD 22004 T3	C43	td	MIN	-		Compras de oxígeno de terceros	O1G	td	MIN	-	
Concentrado P PEBD 22004 T3	C43	td	MAX	10,000		Compras de oxígeno de terceros	O1G	td	MAX	10,000	
Catalizador Asahi TB	CAB	td	MIN	-		Propileno Compras	PPC	td	MIN	-	
Catalizador Asahi TB	CAB	td	MAX	10,000		Propileno Compras	PPC	td	MAX	10,000	
						Isopentano	SIG	td	MIN	-	
						Isopentano	SIG	td	MAX	10,000	

Fig. A4. 1 Flujos máximos y mínimos de insumos establecidos en el caso base.

Ventas					Ventas				
Descripción	Clave	unidad	tipo	Caso	Descripción	Clave	unidad	tipo	Caso
Propileno Grado Polímero	Q09	td	MIN	0	BDL92020C	R45	td	MAX	1000
Propileno Grado Polímero	Q09	td	MAX	1000	BDL92020S	R46	td	MIN	0
Etileno a PTRI QC	Q12	td	MIN	0	BDL92020S	R46	td	MAX	1000
Etileno a PTRI QC	Q12	td	MAX	0	BDL92200	R47	td	MIN	0
Etileno a ventas internas QC	Q13	td	MIN	0	BDL92200	R47	td	MAX	1000
Etileno a ventas internas QC	Q13	td	MAX	0	BDLH91720S	R48	td	MIN	0
H2 residual a ventas	Q15	td	MIN	9.677419	BDLH91720S	R48	td	MAX	1000
H2 residual a ventas	Q15	td	MAX	9.677419	BDL93030	R49	td	MIN	0
Propileno GQ a ventas	Q21	td	MIN	0	BDL93030	R49	td	MAX	1000
Propileno GQ a ventas	Q21	td	MAX	1000	Padmex 60120U segundas	R50	td	MIN	0
Óxido de etileno	Q22	td	MIN	0	Padmex 60120U segundas	R50	td	MAX	1000
Óxido de etileno	Q22	td	MAX	1000	Padmex-54200 segundas	R51	td	MIN	0
Glicol impuro	Q23	td	MIN	0	Padmex-54200 segundas	R51	td	MAX	1000
Glicol impuro	Q23	td	MAX	1000	BDL36050 segundas	R52	td	MIN	0
Glicol puro	Q24	td	MIN	0	BDL36050 segundas	R52	td	MAX	1000
Glicol puro	Q24	td	MAX	1000	BDL39035 segundas	R53	td	MIN	0
Gas residual de Óxido de Etileno	Q25	td	MIN	0	BDL39035 segundas	R53	td	MAX	1000
Gas residual de Óxido de Etileno	Q25	td	MAX	1000	BDL92010C segundas	R54	td	MIN	0
N2 ventas internas	Q27	td	MIN	0	BDL92010C segundas	R54	td	MAX	1000
N2 ventas internas	Q27	td	MAX	0	BDL92010S segundas	R55	td	MIN	0
N2 a PTRI	Q28	td	MIN	0	BDL92010S segundas	R55	td	MAX	1000
N2 a PTRI	Q28	td	MAX	1000	BDL92020C segundas	R56	td	MIN	0
Gas residual de la planta de oxígeno	Q38	td	MIN	0	BDL92020C segundas	R56	td	MAX	1000
Gas residual de la planta de oxígeno	Q38	td	MAX	1000	BDL92020S segundas	R57	td	MIN	0
Gas de purga - Tren 1	Q40	td	MIN	0	BDL92020S segundas	R57	td	MAX	1000
Gas de purga - Tren 1	Q40	td	MAX	1000	BDL92200 segundas	R58	td	MIN	0
Gas de purga - Tren 2	Q42	td	MIN	0	BDL92200 segundas	R58	td	MAX	1000
Gas de purga - Tren 2	Q42	td	MAX	1000	BDLH91720S segundas	R59	td	MIN	0
Gas de purga - Tren 3	Q44	td	MIN	0	BDLH91720S segundas	R59	td	MAX	1000
Gas de purga - Tren 3	Q44	td	MAX	1000	BDL93030 segundas	R60	td	MIN	0
PEBD 20020P	Q47	td	MIN	0	BDL93030 segundas	R60	td	MAX	1000
PEBD 20020P	Q47	td	MAX	1000	Barreduras PLB-r4	R61	td	MIN	0
PEBD 20020X	Q48	td	MIN	0	Barreduras PLB-r4	R61	td	MAX	1000
PEBD 20020X	Q48	td	MAX	1000	Etileno a terceros	R65	td	MIN	0
PEBD 21002	Q49	td	MIN	0	Etileno a terceros	R65	td	MAX	0
PEBD 21002	Q49	td	MAX	1000	Oxígeno a OE QM	R66	td	MIN	0
PEBD 22004	Q50	td	MIN	0	Oxígeno a OE QM	R66	td	MAX	1000
PEBD 22004	Q50	td	MAX	1000	Gas Residual de OXI a atmósfera	R67	td	MIN	0
Segundas 20020P	Q51	td	MIN	0	Gas Residual de OXI a atmósfera	R67	td	MAX	100000
Segundas 20020P	Q51	td	MAX	1000	Nitrógeno venta PTRI	R69	td	MIN	0
Segundas 20020X	Q52	td	MIN	0	Nitrógeno venta PTRI	R69	td	MAX	1000
Segundas 20020X	Q52	td	MAX	1000	Nitrógeno a ventas internas	R70	td	MIN	0
Segundas 21002	Q53	td	MIN	0	Nitrógeno a ventas internas	R70	td	MAX	0
Segundas 21002	Q53	td	MAX	1000	Anhidrido Carbónico a venteo QM	R72	td	MIN	0
Segundas 22004	Q54	td	MIN	0	Anhidrido Carbónico a venteo QM	R72	td	MAX	1000
Segundas 22004	Q54	td	MAX	1000	Anhidrido Carbónico a ventas	R73	td	MIN	214.5945
Barreduras	Q55	td	MIN	0	Anhidrido Carbónico a ventas	R73	td	MAX	214.5945
Barreduras	Q55	td	MAX	1000	Trietilenglicol a ventas internas	R74	td	MIN	0
Propileno Grado Químico	R08	td	MIN	0	Trietilenglicol a ventas internas	R74	td	MAX	1000
Propileno Grado Químico	R08	td	MAX	1000	Trietilenglicol a PEP	R75	td	MIN	0
Propileno Grado Polímero	R09	td	MIN	0	Trietilenglicol a PEP	R75	td	MAX	0.483871
Propileno Grado Polímero	R09	td	MAX	1000	Gas residual de PLB-r4	R76	td	MIN	0
Hidrógeno ventas terceros	R12	td	MIN	0	Gas residual de PLB-r4	R76	td	MAX	1000
Hidrógeno ventas terceros	R12	td	MAX	0	Dietilenglicol a ventas internas	R78	td	MIN	0
Hidrógeno a PTRI	R13	td	MIN	9.677419	Dietilenglicol a ventas internas	R78	td	MAX	0
Hidrógeno a PTRI	R13	td	MAX	9.677419	Dietilenglicol a exportación	R79	td	MIN	0
Oxígeno de QM a ventas terceros	R15	td	MIN	0	Dietilenglicol a exportación	R79	td	MAX	1000
Oxígeno de QM a ventas terceros	R15	td	MAX	0	Trietilenglicol a exportación	R80	td	MIN	0
Líquidos de pirólisis a PTRI	R17	td	MIN	0	Trietilenglicol a exportación	R80	td	MAX	1000
Líquidos de pirólisis a PTRI	R17	td	MAX	48.3871	Padmex 6004S	R81	td	MIN	0
Líquidos de pirólisis a otros	R18	td	MIN	0	Padmex 6004S	R81	td	MAX	1000
Líquidos de pirólisis a otros	R18	td	MAX	1000	Padmex 60120	R82	td	MIN	0
Butano-Butadieno total	R24	td	MIN	0	Padmex 60120	R82	td	MAX	1000
Butano-Butadieno total	R24	td	MAX	1000	Padmex 65050	R83	td	MIN	0
Óxido de Etileno QM	R68	td	MIN	577.2728	Padmex 65050	R83	td	MAX	1000
Óxido de Etileno QM	R68	td	MAX	1000	Padmex 65080	R84	td	MIN	0
Residuo Glicoles QM	R32	td	MIN	0	Padmex 65080	R84	td	MAX	1000
Residuo Glicoles QM	R32	td	MAX	1000	Padmex 6004S segundas	R85	td	MIN	0
Gas Argón QM	R33	td	MIN	0	Padmex 6004S segundas	R85	td	MAX	1000
Gas Argón QM	R33	td	MAX	1000	Padmex 60120 segundas	R86	td	MIN	0
Gas residual de OXE QM	R34	td	MIN	0	Padmex 60120 segundas	R86	td	MAX	1000
Gas residual de OXE QM	R34	td	MAX	1000	Padmex 65050 segundas	R87	td	MIN	0
Monoetilenglicol QM	R35	td	MIN	0	Padmex 65050 segundas	R87	td	MAX	1000
Monoetilenglicol QM	R35	td	MAX	1000	Padmex 65080 segundas	R88	td	MIN	0
Polietilenglicol QM	R38	td	MIN	0	Padmex 65080 segundas	R88	td	MAX	1000
Polietilenglicol QM	R38	td	MAX	1000	Ceras Polietilénicas - Planta Asahi	R89	td	MIN	0
Padmex 60120U	R39	td	MIN	0	Ceras Polietilénicas - Planta Asahi	R89	td	MAX	1000
Padmex 60120U	R39	td	MAX	1000	Gas de purga - Planta Asahi	R90	td	MIN	0
Padmex-54200	R40	td	MIN	0	Gas de purga - Planta Asahi	R90	td	MAX	1000
Padmex-54200	R40	td	MAX	1000	Padmex 56035	R91	td	MIN	0
BDL36050	R41	td	MIN	0	Padmex 56035	R91	td	MAX	1000
BDL36050	R41	td	MAX	1000	Padmex 60120M	R92	td	MIN	0
BDL39035	R42	td	MIN	0	Padmex 60120M	R92	td	MAX	1000
BDL39035	R42	td	MAX	1000	Padmex 56035 segundas	R93	td	MIN	0
BDL92010C	R43	td	MIN	0	Padmex 56035 segundas	R93	td	MAX	1000
BDL92010C	R43	td	MAX	1000	Padmex 60120M segundas	R94	td	MIN	0
BDL92010S	R44	td	MIN	0	Padmex 60120M segundas	R94	td	MAX	1000
BDL92010S	R44	td	MAX	1000	Ceras Polietilénicas - Planta Mitsui	R95	td	MIN	0
BDL92020C	R45	td	MIN	0	Ceras Polietilénicas - Planta Mitsui	R95	td	MAX	1000
					Gas de purga - Planta Mitsui	R96	td	MIN	0
					Gas de purga - Planta Mitsui	R96	td	MAX	1000

Fig. A4. 2. Flujos máximos y mínimos establecidos para la venta de productos petroquímicos para el caso base.

Transferencias				
Descripción	Clave	unidad	tipo	Caso
Etano de PTRI BUQC	DBUQCE1	td	MIN	1593.689
Etano de PTRI BUQC	DBUQCE1	td	MAX	10000
Etano importado BUQC	DBUQCE1	td	MIN	0
Etano importado BUQC	DBUQCE1	td	MAX	10000
Propano de PTRI BUQC	DBUQCP1	td	MIN	0
Propano de PTRI BUQC	DBUQCP1	td	MAX	10000
Propano importado BUQC	DBUQCP1	td	MIN	0
Propano importado BUQC	DBUQCP1	td	MAX	10000
Gas de PTRI BUQC	DBUQCX0	td	MIN	0
Gas de PTRI BUQC	DBUQCX0	td	MAX	10000
Etano de PTRI BUQM	DBUQME1	td	MIN	0
Etano de PTRI BUQM	DBUQME1	td	MAX	10000
Etano importado BUQM	DBUQME1	td	MIN	0
Etano importado BUQM	DBUQME1	td	MAX	10000
Propano de PTRI BUQM	DBUQMP1	td	MIN	0
Propano de PTRI BUQM	DBUQMP1	td	MAX	10000
Propano importado BUQM	DBUQMP1	td	MIN	0
Propano importado BUQM	DBUQMP1	td	MAX	10000

Transferencias				
Descripción	Clave	unidad	tipo	Caso
Gas de PTRI BUQM	DBUQMX0	td	MIN	0
Gas de PTRI BUQM	DBUQMX0	td	MAX	10000
Etileno de QC a proceso QM	DQCQMQ	td	MIN	0
Etileno de QC a proceso QM	DQCQMQ	td	MAX	10000
Butano-Butadieno de QC a QM	DQCQMQ	td	MIN	0
Butano-Butadieno de QC a QM	DQCQMQ	td	MAX	10000
Líquidos de pirólisis QC	DQCQMQ	td	MIN	0
Líquidos de pirólisis QC	DQCQMQ	td	MAX	10000
Oxígeno de QC	DQCQMQ	td	MIN	0
Oxígeno de QC	DQCQMQ	td	MAX	0
N2 de QC a QM	DQCQMQ	td	MIN	0
N2 de QC a QM	DQCQMQ	td	MAX	10000
Etileno de QM a proceso QC	DQMQRÉ	td	MIN	0
Etileno de QM a proceso QC	DQMQRÉ	td	MAX	10000
Oxígeno de QM a QC	DQMQR1	td	MIN	0
Oxígeno de QM a QC	DQMQR1	td	MAX	10000
Oxido de etileno de QC a QM	TQCQMQ2	td	MIN	0
Oxido de etileno de QC a QM	TQCQMQ2	td	MAX	10000
Nitrógeno de QM a QC	DQMQRÉ	td	MIN	0
Nitrógeno de QM a QC	DQMQRÉ	td	MAX	10000

Capacidades de plantas				
Descripción	Clave	unidad	tipo	Caso
Etileno QC	QCAACq1	Mtd	MIN	0
Etileno QC	QCAACq1	Mtd	MAX	2.149184
Óxido de etileno QC	QCAACq2	Mtd	MIN	0
Óxido de etileno QC	QCAACq2	Mtd	MAX	0.798646
PEBD Tren 1 QC	QCAACq3	Mtd	MIN	0
PEBD Tren 1 QC	QCAACq3	Mtd	MAX	0.333814
PEBD Tren 2 QC	QCAACq4	Mtd	MIN	0
PEBD Tren 2 QC	QCAACq4	Mtd	MAX	0.333814
PEBD Tren 3 QC	QCAACq5	Mtd	MIN	0
PEBD Tren 3 QC	QCAACq5	Mtd	MAX	0.333814
Oxígeno Tren 1 QC	QCAACq6	Mtd	MIN	0
Oxígeno Tren 1 QC	QCAACq6	Mtd	MAX	0.219178
Oxígeno Tren 2 QC	QCAACq7	Mtd	MIN	0
Oxígeno Tren 2 QC	QCAACq7	Mtd	MAX	0.219178
Servicios Auxiliares QC	QCAACq8	Mtd	MIN	0
Servicios Auxiliares QC	QCAACq8	Mtd	MAX	5

Capacidades de plantas				
Descripción	Clave	unidad	tipo	Caso
Etileno QM	QMAACr1	Mtd	MIN	0
Etileno QM	QMAACr1	Mtd	MAX	2.136198
Óxido de etileno QM	QMAACr2	Mtd	MIN	0
Óxido de etileno QM	QMAACr2	Mtd	MAX	0.635161
Glicoles QM	QMAACr3	Mtd	MIN	0
Glicoles QM	QMAACr3	Mtd	MAX	0.424755
PELBD QM	QMAACr4	Mtd	MIN	0
PELBD QM	QMAACr4	Mtd	MAX	0.835422
PEAD Asahi Tren 1 QM	QMAACr5	Mtd	MIN	0
PEAD Asahi Tren 1 QM	QMAACr5	Mtd	MAX	0.141183
PEAD Asahi Tren 2 QM	QMAACr6	Mtd	MIN	0
PEAD Asahi Tren 2 QM	QMAACr6	Mtd	MAX	0.141183
PEAD Mitsui Tren 1 QM	QMAACr7	Mtd	MIN	0
PEAD Mitsui Tren 1 QM	QMAACr7	Mtd	MAX	0.138248
PEAD Mitsui Tren 2 QM	QMAACr8	Mtd	MIN	0
PEAD Mitsui Tren 2 QM	QMAACr8	Mtd	MAX	0.138248
Oxígeno QM	QMAACr9	Mtd	MIN	0
Oxígeno QM	QMAACr9	Mtd	MAX	2.739726
Servicios Auxiliares QM	QMAACra	Mtd	MIN	0
Servicios Auxiliares QM	QMAACra	Mtd	MAX	5
Óxido de etileno QM	QMAACrh	Mtd	MIN	0
Óxido de etileno QM	QMAACrh	Mtd	MAX	0.635161

Fig. A4. 3. Flujos máximos y mínimos de transferencia y capacidades en los procesos petroquímicos para el caso base.