



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN
INGENIERIA**

FACULTAD DE QUIMICA

**SELECCION MULTICRITERIO DE TECNOLOGIAS PARA
EL PROCESAMIENTO DE CRUDO EN LA PRODUCCION
ALTERNATIVA DE PETROQUIMICOS EN MEXICO**

T E S I S

QUE PARA OPTAR EL GRADO DE:

DOCTOR EN INGENIERIA

INGENIERÍA QUÍMICA (PROCESOS) - INGENIERÍA DE PROCESOS

P R E S E N T A:

CLAUDIA GARCIA ARANDA

TUTOR:

Dr. CARLOS E. ESCOBAR TOLEDO

2008





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. BERTRAND MARESCHAL

Secretario: Dr. EDUARDO VIVALDO LIMA

Vocal: Dr. JORGE F. RAMIREZ SOLIS

1^{er}. Suplente: Dr. RICARDO ACEVES GARCIA

2^{do}. Suplente: Dr. CARLOS E. ESCOBAR TOLEDO

Lugar en donde se realizó la tesis:

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO.
FACULTAD DE QUIMICA.**

TUTOR DE TESIS:

Dr. CARLOS E. ESCOBAR TOLEDO

Agradecimientos

A la **Universidad Nacional Autónoma de México.**

A la **Facultad de Química**, no sólo porque en ella pude adquirir mis conocimientos, sino porque me dio la oportunidad formarme como docente.

Al **Departamento de Fisicoquímica**, por haberme otorgado el permiso necesario para concluir este trabajo.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología**, por su programa de becas que apoyan a contribuir el desarrollo científico de nuestro país, además de su apoyo a través del Proyecto CIAM-CONACYT U40259-Y.

Agradecimientos

Al proyecto **DGAPA PAPIIT IN 106203-2**, por haber apoyado el inicio de este trabajo.

Al **Dr. Carlos E. Escobar Toledo**... por la progresión infinita de tiempo, espacio y amor dedicados a la formación de profesionales.
Gracias mil, xxx

A mi comité tutorial, especialmente al **Dr. Bertrand Mareschal** y al **Dr. Eduardo Vivaldo Lima**, por sus valiosos comentarios y apoyo a este trabajo.

Dedicatorias

A **Dios**.

A **mi familia**, especialmente a mi madre.

Raro es, en ocasiones el amar.
Lúgubre es, en ocasiones el pensar;
Gélida es, en ocasiones la razón del pensar
en la pasión del amar.
No obstante, a pesar de la confusión
dedico este trabajo, a todas las personas
con quien he convivido fraternalmente.

Dedicatorias

La manière la plus profonde de sentir quelque chose est d'en souffrir.
Gustave Flaubert (1821-1880)

Avec une passion profonde de ma pensée. . .
Pour Carlos.

Resumen:

Se propone una metodología para resolver sistemas grandes y complejos. Para estructurar convenientemente la metodología, se utilizan métodos y modelos pertenecientes a la intersección entre la Ingeniería Química y la Investigación de Operaciones, tales como análisis de procesos, técnicas de redes, métodos con múltiples criterios para la ayuda a la toma de decisiones y programación entera mixta entre otras, en el marco de la coordinación de sistemas descentralizados a múltiples niveles. Uno de los principales objetivos de esta investigación es reducir la complejidad de un gran sistema y resolverlo para encontrar la mejor solución posible.

La metodología es utilizada en la planeación de la Industria Petroquímica de México como caso de estudio, la cual se estructura a través de una red que contiene rutas tecnológicas alternativas de producción.

La aplicación de la metodología comienza con el procesamiento de petróleo crudo utilizado como materia prima para producir los llamados petroquímicos básicos, hasta la producción de los petroquímicos finales. Se considera que los petroquímicos básicos pueden producirse a través de un conjunto de configuraciones de refinerías con alto rendimiento en la producción de petroquímicos básicos. Se eligen las mejores rutas tecnológicas para producir petroquímicos finales a partir de petroquímicos básicos y posteriormente se seleccionan los mejores petroquímicos finales.

Ambas selecciones deben cumplir con cuatro criterios que son: maximizar el valor agregado que se genere en toda la ruta de producción; la mínima cantidad de energía que se consuma en los procesos de producción; la mínima inversión en las cadenas productivas y el mínimo riesgo al ambiente y la salud humana durante la operación de los productos elegidos de acuerdo a sus respectivas rutas de producción.

El problema de descentralización, se resuelve utilizando flujos de información que maneja una Unidad Central en conjunto con los demás actores involucrados en la toma de decisiones. Uno de los hallazgos distintivos de la presente tesis es la utilización de los métodos con criterios múltiples como criterio de descentralización en subsistemas, en lugar de una sola función objetivo, a maximizar o minimizar.

La variable de control utilizada para saber si se ha llegado a la mejor solución posible, consiste en comparar el Valor del Producto (que es una variable próxima a los precios de venta) de los productos petroquímicos finales considerando dicho valor a lo largo de la cadena respecto del precio de venta del petróleo para exportación. Se espera que el valor de los productos petroquímicos finales seleccionados sea superior al precio de venta a la exportación del crudo.

Summary:

A methodology to solve great and complex systems is proposed. In order to structure the methodology properly, methods and models pertaining to the intersection between Chemical Engineering and Operations Research are used, such as process analysis, network techniques, methods with multiple criteria for the decision making aid, mixed integer programming among others, within the framework of the decentralized coordination multilevel systems. One of the main objectives of this research was to reduce the complexity of a great system and to solve it in order to find the best possible solution.

The methodology is applied in the planning of the Petrochemical Industry of Mexico as a case study, which is structured through a network containing alternative technological routes of production. This network begins with crude oil processing used as raw material to produce basic petrochemicals until the production of the final petrochemicals. It is considered that basic petrochemicals can be produced through a set of technological configurations of Refineries with high yield in the production of basic petrochemicals. Later, the best technological routes are chosen to take the system from basic products to finals. At the way, the best final petrochemicals are selected. Both of this selections four criteria that are: to maximize the added value generated along the routes of production; the minimum amount of energy consumed in all the production processes; the minimum investment in the productive chains and the minimum risk to the environment and the human health during the operation of process chosen according to its respective routes of production.

The decentralization problem is solved using a new approach of coordination model with multiple levels. This approach explains how it is possible to obtain through the decisions taken concerning the units hierarchically decentralized, the results for the set of input-output processes that characterize a process industry. In this model of decentralization, a subset of the system produces an intermediate product, inputs produced by other subsystems. In this approach, the best global results are obtained using multicriterio decision aid methods instead of mathematical programming. We consider it a fundamental contribution of this thesis to the issue.

The control variable will be the price of crude oil could be exported comparing it to the product value of a final petrochemical along its chain of production. We hope that the product value be at least equal to crude oil price in the international market.

Contenido

Índice de Capítulos

i. Prólogo	1
ii. Introducción	3
iii. Objetivos	6
iv. Hipótesis	6
v. Alcances	7
vi. Contribuciones a la Investigación Científica	8
<i>Capítulo I. Enfoque Sistémico de la Industria Petroquímica.</i>	9
1 Breve Perspectiva de la Teoría de Sistemas	10
2 La Industria Petroquímica: Un enfoque sistémico.	13
3 Bibliografía.	16
<i>Capítulo II. Modelación de la Industria Petroquímica.</i>	17
1 Modelos realizados para la Industria Petroquímica. Estado del Arte.	18
1.1 El Modelo de Insumo-Producto (input-output) de Leontief	18
2 Planificación Estratégica de la Industria Petroquímica. Estado del Arte.	20
2.1 Representación de la Industria Petroquímica Mediante Programación Lineal	22
2.1.1 Representaciones Lineales	23
2.1.2 Stadtherr	27
2.1.3 Saxena	27
2.1.4 Treviño	29
2.1.5 Fathi-Afshar	30
2.1.6 Sophos y Mikkelsen	32
2.1.7 Otros Modelos	33
2.2 Desventajas de la Programación Lineal	33
2.3 Representación de la Industria Petroquímica Mediante Algoritmos de Recorrido	35
2.3.1 Modelo de Chávez, Rodríguez y Escobar	35
2.3.2 Flujo y Manejo de la Información	36
2.3.3 Herramientas Auxiliares	38
2.3.4 Requisitos Para Poder Realizar la Estructuración de una Cadena Petroquímica	39
2.3.5 Limitaciones en la Aplicación del Algoritmo de Recorrido	40
3 Bibliografía	42

Capítulo III. Métodos de Descomposición, Programación Matemática y Métodos de Ayuda para la Toma de Decisiones. Estado del Arte.	43
1 Métodos de descomposición. Estado del Arte.	44
2 Programación Matemática	53
2.1 Programación Lineal	53
2.2 Descripción a grandes rasgos del Método Simplex	54
2.3 Las grandes familias de los programas lineales	56
2.3.1 La estructura de ingreso	56
2.3.2 La estructura de mezcla	57
2.3.3 La estructura multiperiodo	57
2.3.4 La estructura de cobertura	57
2.3.5 La estructura multietapas	57
2.3.6 La estructura en forma de redes	57
2.4 Programación Entera Mixta	58
2.5 Métodos de Solución	61
2.6 Optimización en Redes	62
2.6.1 Significado de los modelos de redes	62
2.6.2 Formulación General	64
2.6.3 Problema de la Red Generalizada	65
3 Métodos de Ayuda a la Toma de Decisiones	66
3.1 Enfoques con decisiones multicriterio	66
3.2 Operabilidad de la metodología PROMETHEE	68
3.2.1 Modelo de la información con PROMETHEE	70
3.2.2 Información entre los criterios	70
3.2.3 Información dentro de cada criterio	70
3.2.4 Clasificación I y II de PROMETHEE	73
3.2.5 Flujos de categoría superior	74
3.2.6 La clasificación parcial. PROMETHEE I	75
3.2.7 La clasificación completa de PROMETHEE II	76
4 Bibliografía	77
Capítulo IV. Desarrollo de la Metodología.	43
1 Marco de referencia de la metodología	81
1.1 El objeto de estudio	82
1.2 Premisas	83
1.3 Hipótesis de trabajo para el diseño de la metodología.	83
1.4 Metodología propuesta para el análisis de sistemas grandes y complejos	84
1.4.1 Características del modelo teórico descriptivo	87
1.4.2 Niveles del sistema económico	88
1.4.3 Dirección de los flujos de información	89
1.4.4 Tipos de información	90

1.5 Estructura de la metodología propuesta	93
1.6 Oportunidades analizadas del modelo teórico descriptivo para su aplicación en la metodología propuesta	96
1.7 Estructura de la metodología aplicada al caso de estudio: La Industria Petroquímica	97
1.7.1 Tipo de información a utilizar en el caso de estudio	101
1.8 Comentarios Generales	102
2 Bibliografía	103

***Capítulo V. Caso de Estudio: Aplicación de la metodología.
RECUPERACIÓN DEL VALOR AGREGADO Y LA PRODUCTIVIDAD DE
LA INDUSTRIA PETROQUÍMICA MEXICANA.*** **105**

1 Introducción.- Objetivos, hipótesis, justificación del caso de estudio y metas a alcanzar.	106
2 Presentación de la metodología aplicada al caso de estudio	108
2.1 Iteración número 1.- Primer Nivel.	113
2.1.1 FI ₁ : Información exógena a la metodología.- a) Breve descripción sobre la selección los de petroquímicos finales.	114
2.1.2 FI ₁ : Información exógena a la metodología.- b) Estudio de mercado y pronóstico de los petroquímicos finales.	115
2.1.3 FI ₂ : Demanda de PQ Finales a evaluar y definición de las variables de coordinación.	117
2.1.4 VC ₁ , Acción 1 y FI ₃ .- Construcción de cadenas de procesos y productos y utilización del algoritmo de redes generalizadas.	119
2.2 Iteración número 2. Segundo nivel.	125
2.2.1 VC ₂ , Acción 2 y FI ₄ . - Selección de la mejor ruta de producción para cada PQ Final. Resultados.	125
2.2.2 Acción 3, FI ₅ y FI ₆ .- Jerarquización y selección de PQ Finales. Resultados.	133
2.3 Iteración número 3.- Tercer nivel	141
2.3.1 FI ₇ , VC ₄ , Acción 4 y FI ₈ .- Selección de configuraciones de refinería con alto rendimiento en la producción de PQ Básicos.	141
2.3.2 Breve descripción de las configuraciones a ser evaluadas en esta investigación.	143
2.3.3 FI ₉ y Acción 5.- Construcción del modelo de programación lineal.	146
2.3.4 FI ₁₀ y PD ₅ .- Solución del modelo de programación lineal.	150
2.3.5 FI ₁₁ y Acción 6.- Construcción del modelo de programación lineal entera mixta.	153
2.3.6 FI ₁₂ y VC ₅ .- Solución del modelo de programación entera mixta.	156
2.3.7 PD ₆ : Análisis del valor agregado, valor del producto e inversiones tomando en cuenta las cadenas de los PQ Finales seleccionados y las refinerías resultantes del modelo MILP.	163
2.4 Sobre los resultados obtenidos	168
3 Bibliografía	169

<i>Capítulo VI. Conclusiones.</i>	<i>170</i>
1 Introducción	172
2 Acerca de la metodología	172
3 Acerca del caso de estudio	174
4 Acerca de los objetivos de la tesis	176
5 Acerca de las hipótesis de esta tesis	182

Índice de Apéndices

<i>Apéndice I. Perspectiva de la Industria Petroquímica Mexicana.</i>	<i>184</i>
1 Introducción	185
2 Problemática de la Industria Petroquímica	185
3 Estructura de la Industria Petroquímica Mexicana	187
3.1 Estadísticas del Anuario Estadístico de la Industria Petroquímica	190
3.2 Estadísticas del Anuario Estadístico de PEMEX	194
3.3 Gas Natural como materia prima para producir petroquímicos	197
3.4 Indicadores macroeconómicos	202
4 Pronósticos y Prospectiva de la Demanda de los Productos Petroquímicos Seleccionados	203
4.1 Principales destinos finales de los aromáticos	204
4.1.1 Benceno	204
4.1.2 Tolueno	205
4.1.3 Xilenos	206
4.2 Producción, importación y exportación de los productos seleccionados	207
4.2.1 Resinas de Poliuretano	207
4.2.2 Fibras poliéster	208
4.2.3 Resinas de poli(tereftalato de etileno) (PET)	208
4.2.4 Resinas de polietileno de alta densidad	209
4.2.5 Resinas de polietileno de baja densidad	210
4.3 Algunas propiedades y aplicaciones de los productos seleccionados	210
4.3.1 Polietilenos	210
4.3.2 Polietileno de alta densidad	211
4.3.3 Polietileno de baja densidad	211
4.3.4 Polietileno lineal de baja densidad	212
4.3.5 Polipropileno	212
4.3.6 Poliestireno	212
4.3.7 Poliuretano	213
4.3.8 Poli(tereftalato de butileno) (PBT)	214
4.3.9 Poli(tereftalato de etileno) (PET)	214
4.3.10 Fibras poliéster	215
4.3.11 Resina de Acrilo-Nitrilo-Butadieno-Estireno (ABS)	215
4.3.12 Resina de Estireno-Acrilonitrilo (SAN)	215
4.3.13 Hule Estireno Butadieno (SBR)	216
4.3.14 Anhídrido Ftálico	216
5 Bibliografía	217

<i>Apéndice II. Estudio de Inteligencia Tecnológica para procesos petroquímicos y análisis de esquemas de refinación con alto rendimiento en la producción de petroquímicos primarios.</i>	218
1 Introducción	219
2 Estudio de Inteligencia Tecnológica (IT) para los procesos de Reformación y Descomposición Catalítica	221
2.1 Análisis de Patentes en la Producción de Olefinas	226
2.2 Análisis de Patentes en la Producción de Aromáticos	228
3 Desarrollos tecnológicos comercializados para la producción de olefinas y aromáticos	230
4 Complejos aromáticos	234
5 Procesos y corrientes de la refinación del petróleo integrables a los procesos de producción de olefinas y aromáticos	240
5.1 Descomposición (cracking) catalítica de lecho fluidizado (FCC) y producción de olefinas y aromáticos	242
5.2 Algunas consideraciones acerca de los procesos de producción de poliolefinas	244
5.3 Importancia de los catalizadores en la producción de poliolefinas	246
6 Situación Tecnológica existente en el Sistema Nacional de Refinación	247
7 Situación tecnológica de la Industria Petroquímica Nacional	249
8 El petróleo como materia prima de petroquímicos	251
9 Estructuración de una Refinería Petroquímica	251
9.1 Configuración No. 1: Destilación atmosférica y pirólisis de naftas para combustibles y petroquímicos	254
9.2 Configuración No. 2: Destilación atmosférica y pirólisis de todos los destilados atmosféricos para combustibles y petroquímicos	255
9.3 Configuración 3: Destilación atmosférica, de vacío y pirólisis para combustibles y petroquímicos	256
9.4 Configuración 4: Destilación atmosférica, de vacío, craqueo catalítico y pirólisis para combustibles y petroquímicos	257
9.5 Configuración 5: Destilación atmosférica, de vacío, hidrodeseintegración y pirólisis para combustibles y petroquímicos.	258
9.6 Configuración 6: Destilación atmosférica y vacío, conversión de residuo, hidrodeseintegración y pirólisis para combustibles y petroquímicos	259
9.7 Consideraciones generales relacionadas a los procesos de desintegración	260
9.8 Rendimientos de productos petroquímicos a partir del tipo de crudo	261
9.9 Productos deseables	261
9.10 Inversiones	262
10 Bibliografía	264

<i>Apéndice III. Información complementaria del Capítulo V.</i>	265
1 Representación Gráfica de los petroquímicos seleccionados: De los petroquímicos finales a los básicos.	266
1.1 Anhídrido Ftálico	266
1.2 Fibras Poliéster	266
1.3 Hule Estireno Butadieno	268
1.4 Poli(tereftalato de butileno)	270
1.5 Poliestireno normal y expandido	273
1.6 Polietileno de alta densidad	275
1.7 Polietileno de baja densidad	276
1.8 Polietileno lineal de baja densidad	276
1.9 Polipropileno	277
1.10 Poliuretano	277
1.11 Resinas ABS-SAN	280
1.12 Resinas Poli(tereftalato de etileno) (PET)	284
2 Resultados de la evaluación de la mejor ruta de proceso para cada petroquímico final para cada periodo del Horizonte de Planeación, mediante la aplicación de PROMETHEE II	285
2.1 Evaluación de las rutas de producción para Anhídrido Ftálico	288
2.2 Fibras Poliéster	288
2.3 Hule Estireno Butadieno	289
2.4 Poli(tereftalato de butileno) (PBT)	289
2.5 Poliestireno normal y expandido	289
2.6 Polietileno de alta densidad	290
2.7 Polietileno de baja densidad	290
2.8 Polietileno lineal de baja densidad	290
2.9 Polipropileno	291
2.10 Poliuretano	291
2.11 Resinas ABS-SAN	291
2.12 Resinas Poli(tereftalato de etileno) (PET)	292
3 Evaluación de Petroquímicos Finales	292
3.1 Evaluación de petroquímicos finales utilizando PROMETHEE II para los periodos 2, 3 y 4 del HP.	292
3.2 Valores del Valor Agregado, Energía consumida, Inversión e Índices de Peligros a la salud y medio ambiente de petroquímicos finales evaluados cuyos valores de $\Phi_i > 0$ son mayores que cero	293
3.3 Demanda para satisfacer la producción de petroquímicos finales seleccionados	294
3.4 Balances de materia de petroquímicos básicos para satisfacer la demanda de petroquímicos finales en cada periodo del HP	294

Índice de Figuras

Figura II.1.	Modelo generalizado para la toma de decisiones para la selección de rutas tecnológicas de la Industria Petroquímica	21
Figura II.2.	Flujo de Información en la Planificación de la IPQ	25
Figura II.3.	Curva de Aprendizaje	26
Figura II.4.	Procedimiento Recursivo de Planificación para la IPQ	27
Figura II.5.	Representación de las Cadenas Petroquímicas	37
Figura II.6.	Representación del Vector de Compuestos	38
Figura II.7.	Cadenas Petroquímicas Corriente Arriba	39
Figura II.8.	Cadenas Petroquímicas Corriente Abajo	39
Figura III.1.	Jerarquía e información descentralizada	45
Figura III.2.	Esquema de un sistema de control	50
Figura III.3.	Esquema de un sistema complejo	50
Figura III.4.	Sistema Jerárquico Descentralizado	51
Figura III.5.	¿Cómo se comporta la solución óptima entera con respecto a la función objetivo y las restricciones?	59
Figura III.6.	¿Qué pasa si se incluye la solución entera óptima como una restricción?	60
Figura III.7.	Representación gráfica de la solución de un programa con números enteros	61
Figura III.8.	Representación del Método de Enumeración Implícita para un PL con números enteros	62
Figura III.9.	Representación esquemática de una red	63
Figura III.10.	Relaciones de Dominancia	68
Figura III.11.	Función de preferencia	71
Figura III.12.	Gráfico de índices de preferencias agregadas.	74
Figura III.13.	Flujos de categorías de PROMETHEE	75
Figura III.14.	Relaciones de PROMETHEE I	75
Figura IV.1.	Representación del algoritmo de Kornai suponiendo que el sistema se descompone en la Unidad Central y un solo subsistema	86
Figura IV.2.	Descripción matemática del método de Kornai	86
Figura IV.3.	Ecuaciones generalizadas del método de Kornai	87
Figura IV.4.	Jerarquía perfecta	89
Figura IV.5.	Esquema de descomposición y coordinación propuesto por Escobar Toledo.	92
Figura IV.6.	Representación de un proceso químico	93
Figura IV.7.	Propuesta de descomposición de un sistema de procesos	94
Figura IV.8.	Metodología propuesta para aplicar al caso de estudio	95
Figura IV.9.	Esquema de producción de petroquímicos	100
Figura V.1.	Diagrama de flujo de la metodología propuesta aplicada al caso de estudio	108

Figura V.2.	Diagrama detallado basado en la metodología para resolver un sistema de planificación a varios niveles.	109
Figura V.3.	Descripción de las acciones realizadas en cada nivel y los flujos de información requeridos y/o enviados por la UC	111
Figura V.4.	Descripción de las variables de coordinación (VC) y los controles de decisión (preguntas de decisión) definidos por la UC	112
Figura V.5.	Representación de la primera iteración dentro del diagrama de coordinación.	113
Figura V.6.	Diagrama representativo de la coordinación y toma de decisiones de los productores de PQ Intermedios y Finales	121
Figura V.7.	Representación gráfica de las diferentes rutas de producción existentes para cada petroquímico seleccionado.	122
Figura V.8.	Representación de la segunda iteración dentro del diagrama de descentralización con la ejecución de la Acción 2.	125
Figura V.9.	Evaluación de la mejor ruta tecnológica para el Poliuretano en el periodo 1	128
Figura V.10.	Criterios utilizados para la primera y segunda evaluación con PROMETHEE II (Acciones 2 y 3)	129
Figura V.11.	Representación de la segunda iteración dentro del diagrama de descentralización con la ejecución de la Acción 3.	134
Figura V.12.	Evaluación de los mejores PQ Finales en el periodo 1 del HP	135
Figura V.13.	Representación de la tercera iteración, Acción 4, dentro del diagrama de descentralización	141
Figura V.14.	Representación de la tercera iteración, Acción 5, dentro del diagrama de descentralización	147
Figura V.15.	Representación de la tercera iteración, Acción 6, dentro del diagrama de descentralización	153
Figura 1. ap. II.	Esquema de clasificación de los diferentes tecnólogos con base al número de citas propias y externas.	225
Figura 2. ap. II.	Esquema de Mapa Tecnológico para determinar la estrategia seguida por los involucrados en un campo específico en base a las citas en patentes y su participación del portafolio global de patentes.	225
Figura 3. ap. II.	Complejo de aromáticos simple	235
Figura 4. ap. II.	Configuración propuesta de reformación de nafta para producir benceno, tolueno y xileno.	236
Figura 5. ap. II.	Complejo de aromáticos UOP	238
Figura 6. ap. II.	Esquema de procesamiento de aromáticos propuesto por el grupo Exxon-Mobil.	239
Figura 7. ap. II.	Esquema general de refinación	241
Figura 8. ap. II.	Reformado catalítico de naftas para producción de aromáticos	244
Figura 9. ap. II.	Esquema de Configuración 1.	254
Figura 10. ap. II.	Esquema de Configuración 2.	255
Figura 11. ap. II.	Esquema de configuración 3	256

Figura 12. ap. II. Esquema de configuración 4	257
Figura 13. ap. II. Esquema de configuración 5	258
Figura 14. ap. II. Esquema de configuración 6	259
Figura 15. ap. II. Efecto de los cambios de severidad en la hidrodeseintegración	260
Figura 16. ap. II. Destilación atmosférica, reformado catalítico y pirólisis de nafta para combustibles y petroquímicos	262
Figura 1. ap. III. Anhídrido Ftálico. Primer periodo (2009)	288
Figura 2. ap. III. Fibras Poliéster. Primer periodo (2009)	288
Figura 3. ap. III. Hule Estireno Butadieno. Primer periodo (2009)	289
Figura 4. ap. III. Poli(tereftalato de butileno). Primer periodo (2009)	289
Figura 5. ap. III. Poliestireno. Primer periodo (2009)	289
Figura 6. ap. III. Polietileno de Alta Densidad. Primer periodo (2009)	290
Figura 7. ap. III. Polietileno de Baja Densidad. Primer periodo (2009)	290
Figura 8. ap. III. Polietileno Lineal de Baja Densidad. Primer periodo (2009)	290
Figura 9. ap. III. Polipropileno. Primer periodo (2009)	291
Figura 10. ap. III. Poliuretano. Primer periodo (2009)	291
Figura 11. ap. III. Resinas ABS-SAN. Primer periodo (2009)	291
Figura 12. ap. III. Resinas PET. Primer periodo (2009)	292
Figura 13. ap. III. Selección de petroquímicos finales periodo 2 del HP	292
Figura 14. ap. III. Selección de petroquímicos finales periodo 3 del HP	292
Figura 15. ap. III. Selección de petroquímicos finales periodo 4 del HP	293

Índice de Gráficas

Gráfica V.1.	Pronóstico de la Demanda de Petroquímicos Finales para el HP	119
Gráfica V.2.	Porcentaje de los incremento de la demanda en cada periodo del HP	127
Gráfica V.3.	Valor Agregado de las rutas seleccionadas para cada PQ Final en cada año del periodo del HP	131
Gráfica V.4.	Valor de la Inversión de las rutas seleccionadas para cada PQ Final en cada periodo del HP	131
Gráfica V.5.	Valor de la Energía de las rutas seleccionadas para cada PQ Final en cada año del periodo del HP	132
Gráfica V.6.	Valor de los Peligros a la Salud y al Medio Ambiente de las rutas seleccionadas para cada PQ Final en cada periodo del HP	132
Gráfica V.7.	Valores acumulados del VA para cada periodo en cada ruta de proceso de cada año del periodo de cada PQ Final con $\Phi_i^* > 0$	138
Gráfica V.8.	Valores acumulados de la Energía consumida en cada ruta de proceso para cada año del periodo de cada PQ Final con $\Phi_i^* > 0$	139
Gráfica V.9.	Valores acumulados de la Inversión en cada ruta de proceso para cada periodo de cada PQ Final con $\Phi_i^* > 0$	139
Gráfica V.10.	Valores de los Peligros a la salud y el medio ambiente en cada ruta de proceso para cada periodo de cada PQ Final con $\Phi_i^* > 0$	140
Gráfica V.11.	Demanda de cada PQ Básico requerido para satisfacer la demanda de PQ Finales seleccionados ($\Phi_i^* > 0$)	140
Gráfica V.12.	Comparación de la producción de PQ Básicos de cada refinería seleccionada (procesando 2.5 Millones de Ton/año) contra la demanda de PQ Básicos requerida para producir PQ Finales con $\Phi_i^* > 0$ en cada periodo del HP	146
Gráfica V.13.	Comparación de la cantidad de PQ Finales producidos contra la demanda requerida en el periodo 1	159
Gráfica V.14.	Comparación de la cantidad de PQ Finales producidos contra la demanda requerida en el periodo 2	160
Gráfica V.15.	Comparación de la cantidad de PQ Finales producidos contra la demanda requerida en el periodo 3	161
Gráfica V.16.	Comparación de la cantidad de PQ Finales producidos contra la demanda requerida en el periodo 4	162
Gráfica V.17.	Comparación de la cantidad de PQ Finales producidos contra la demanda requerida de todo el HP	162
Gráfica V.18.	Demanda de crudo equivalente a PQ Finales por cada periodo del HP	163

Gráfica 1. ap. I. Porcentaje del grado de utilización de la capacidad instalada en petroquímica	191
Gráfica 2. ap. I. Evolución de la Producción de la Industria Petroquímica	192
Gráfica 3. ap. I. Balanza comercial de la Industria Petroquímica	193
Gráfica 4. ap. I. Elaboración de Productos Petroquímicos	195
Gráfica 5. ap. I. Producción agregada de productos petroquímicos	196
Gráfica 6. ap. I. Balanza comercial de petroquímicos	197
Gráfica 7. ap. I. Comparación de la producción de Gas Natural de PGPB contra la demanda de PEMEX Petroquímica	200
Gráfica 8. ap. I. Consumo de gas natural por sector	200
Gráfica 9. ap. I. Balance de Gas Natural Seco	201
Gráfica 10. ap. I. Valor Agregado de la rama V de la Industria Manufacturera (Millones de pesos constantes de 1993)	202
Gráfica 1. ap. II. Análisis de patentes encontradas en la producción de olefinas y aromáticos. Análisis por año.	223
Gráfica 2. ap. II. Porcentaje de patentes otorgadas en la producción de olefinas. Fuente: Elaboración propia con datos de la USPTO	226
Gráfica 3. ap. II. Posición Tecnológica en la Producción de Olefinas. Fuente: Elaboración propia con datos de la USPTO	227
Gráfica 4. ap. II. Análisis de la participación de las diferentes compañías en el desarrollo de tecnologías para producir olefinas. Fuente: Elaboración propia con datos de la USPTO	227
Gráfica 5. ap. II. Porcentaje de patentes otorgadas en la producción de aromáticos. Fuente: Elaboración propia con datos de la USPTO	228
Gráfica 6. ap. II. Posición tecnológica en la Producción de Aromáticos. Fuente: Elaboración propia con datos de la USPTO	229
Gráfica 7. ap. II. Análisis de la participación de las diferentes compañías en el desarrollo de tecnologías para producir aromáticos. Fuente: Elaboración propia con datos de la USPTO	230
Gráfica 8. ap. II. Porcentaje de participación de los diferentes licenciadores del proceso de FCC en el SNR.	248
Gráfica 9. ap. II. Porcentaje de participación de los diferentes licenciadores del proceso de reformación en el SNR.	249

Índice de Tablas

Tabla III.1.	Tabla de evaluación	68
Tabla III.2.	Pesos de relativa importancia	70
Tabla III.3.	Funciones de preferencia	72
Tabla V.1.	Lista de PQ Finales seleccionados exógenamente para su análisis y sus respectivas abreviaciones	114
Tabla V.2.	Demanda de los petroquímicos seleccionados para el HP (Ton/año)	117
Tabla V.3.	Tasa media anual (TMAC) de crecimiento de los petroquímicos finales considerados en el estudio de caso	118
Tabla V.4.	Número de rutas de producción existentes para cada petroquímico final seleccionado	124
Tabla V.5.	Incrementos de la demanda con respecto al periodo "t"	126
Tabla V.6.	Ruta de producción seleccionada utilizando PROMETHEE II	130
Tabla V.7.	PQ Finales jerarquizados de acuerdo a sus flujos netos de información ($\Phi_i^* > 0$) para cada PQ Final en los periodos 1 y 2 del HP	136
Tabla V.8.	PQ Finales jerarquizados de acuerdo a sus flujos netos de información ($\Phi_i^* > 0$) para cada PQ Final en los periodos 3 y 4 del HP	136
Tabla V.9.	Flujos netos de información para cada PQ Final en los periodos del HP	137
Tabla V.10.	Rendimientos de los diferentes productos de refinación característicos en cada configuración seleccionada para evaluación	142
Tabla V.11.	Información económica de cada configuración seleccionada para evaluación	143
Tabla V.12.	Oferta de PQ Básicos que puede satisfacer la refinería	150
Tabla V.13.	Producción de otros productos petroquímicos de las refinerías seleccionadas por el modelo LP	151
Tabla V.14.	Porcentaje de la demanda de PQ Finales satisfecha por las refinerías seleccionadas por el modelo LP para el año 2009 (primer periodo del HP)	151
Tabla V.15.	Número de veces en que el precio dual de la configuración 4 es mayor que el precio dual de las otras configuraciones evaluadas.	152
Tabla V.16.	Valores de la Función Objetivo para el modelo LP y MILP en cada periodo del HP	156
Tabla V.17.	Número de refinerías de la configuración 4, ganancia, inversión y rentabilidad de cada periodo del sistema para todo el HP	157
Tabla V.18.	Total de crudo procesado y Precio del Crudo en cada periodo del sistema para todo el HP	157

Tabla V.19.	Balance de producción de PQ Básicos para el periodo 1, considerando 6 refinerías de la configuración 4.	158
Tabla V.20.	Balance de producción de PQ Básicos para el periodo 2 considerando 5 refinerías de la configuración 4.	159
Tabla V.21.	Balance de producción de PQ Básicos para el periodo 3 considerando 6 refinerías de la configuración 4.	160
Tabla V.22.	Balance de producción de PQ Básicos para el periodo 4 considerando 6 refinerías de la configuración 4.	161
Tabla V.23.	Valor Agregado de las rutas, refinerías y totales para cada periodo del HP expresado en Millones USD/periodo	164
Tabla V.24.	Valor del Producto de las rutas, refinerías y totales para cada periodo del HP expresado en Millones USD/periodo	164
Tabla V.25.	Valor de la Energía de las rutas, refinerías y totales para cada periodo del HP expresado en Millones de GJ/periodo	164
Tabla V.26.	Valor de la Inversión de las rutas, refinerías y totales para cada periodo del HP expresado en Millones USD/periodo	164
Tabla V.27.	Valores totales del crudo considerando la producción de PQ Básicos, Intermedios y Finales considerando las Refinerías.	166
Tabla V.28.	Valores totales del crudo considerando la producción de PQ Básicos, Intermedios y Finales sin considerar las Refinerías	166
Tabla 1. ap. I.	Materias Primas Consideradas Petroquímicos Básicos	189
Tabla 2. ap. I.	Producción Total de Productos Petroquímicos en México [Miles de Toneladas por año]	191
Tabla 3. ap. I.	Estadística de elaboración de productos petroquímicos [Miles de Toneladas]	194
Tabla 4. ap. I.	Balance de Gas Natural 1995-2005 [Millones de pies cúbicos diarios]	198
Tabla 5. ap. I.	Comercio Exterior de productos petrolíferos y gas seco [Miles de barriles por día]	201
Tabla 6. ap. I.	Principales destinos inmediatos y finales del benceno	204
Tabla 7. ap. I.	Principales destinos finales del estireno	204
Tabla 8. ap. I.	Principales destinos inmediatos y finales del tolueno	205
Tabla 9. ap. I.	Principales destinos inmediatos y finales del para-xileno	206
Tabla 10. ap. I.	Producción, importación y exportación del poliestireno (Toneladas/año)	207
Tabla 11. ap. I.	Producción, importación y exportación del poliuretano (Toneladas/año)	208
Tabla 12. ap. I.	Producción, importación y exportación de fibras poliéster (Toneladas/año)	208
Tabla 13. ap. I.	Producción, importación y exportación de resinas PET (Toneladas/año)	209
Tabla 14. ap. I.	Producción, importación y exportación de polietileno de alta densidad (Toneladas/año)	209
Tabla 15. ap. I.	Producción, importación y exportación de polietileno de baja densidad (Toneladas/año)	210

Tabla 1. ap. II. Cantidad de patentes otorgadas por Compañía (Asignatario comercial)	223
Tabla 2. ap. II. Procesos de descomposición catalítica licenciados por UOP.	231
Tabla 3. ap. II. Tecnologías desarrolladas por UOP para la fabricación de olefinas.	231
Tabla 4. ap. II. Tecnologías desarrolladas por UOP para producir aromáticos.	232
Tabla 5. ap. II. Tecnologías para producir aromáticos licenciadas por Exxon-Mobil.	234
Tabla 6. ap. II. Línea de productos de Basell	245
Tabla 7. ap. II. Líneas de polietilenos producidas por Basell	245
Tabla 8. ap. II. Tecnologías para producir olefinas.	250
Tabla 9. ap. II. Bases para los costos de proceso (precios de 1995)	253
Tabla 10. ap. II. Petroquímicos obtenidos a partir del crudo (Pirólisis de nafta y gasóleo atmosférico)	261
Tabla 11. ap. II. Producción de petroquímicos a través de pirólisis y reformado catalítico	263
Tabla 12. ap. II. Productos petroquímicos obtenidos del crudo	263
Tabla 1. ap. III. Valor Agregado (USD/kg)	285
Tabla 2. ap. III. Energía real por servicio (kcal/kg)	286
Tabla 3. ap. III. Inversión (USD/kg)	286
Tabla 4. ap. III. Valor del Producto (USD/kg)	287
Tabla 5. ap. III. Índice de Peligro a la salud y ambiente	287
Tabla 6. ap. III. Valor Agregado (Millones USD/año en el periodo)	293
Tabla 7. ap. III. Energía consumida (GJ/año en el periodo)	293
Tabla 8. ap. III. Inversión (Millones USD/año en el periodo)	293
Tabla 9. ap. III. Índices de Peligros a la salud y el medio ambiente	294
Tabla 10. ap. III. Demanda de petroquímicos (Ton/año)	294
Tabla 11. ap. III. Capacidad de producción de petroquímicos básicos de cada configuración de refinería seleccionada vs los requerimientos de demanda por intervalo de periodo (Ton/año)	294

Tabla de Abreviaturas

ABS-SAN	Resinas Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno - Estireno-Acrilonitrilo
bbl	Barriles
Conf	Configuración
Dem	Demanda
FI	Flujo de Información
GJ	GigaJoule
HDP	Polietileno de alta densidad
HP	Horizonte de Planeación
Inv	Inversión
IPQ	Industria
Kcal	Kilocalorías
LDP	Polietileno de Baja Densidad
LLDP	Polietileno Lineal de Baja Densidad
MCDA	Método para la ayuda de decisiones con criterios múltiples (por sus siglas en inglés)
PBT	Poli(tereftalato de butileno)
PD	Parámetros de Decisión
PEF	Fibras Poliéster
PET	Poli(tereftalato de etileno)
PhA	Anhídrido Ftálico
PIB	Producto Interno Bruto
PP	Polipropileno
PPQB	Productores de Petroquímicos Básicos
PPQF	Productores de Petroquímicos Finales
PQ	Petroquímico (s)
PS	Peligros al ambiente y salud
PS	Poliestireno
PU	Poliuretano
SBR	Hule Estireno-Butadieno
TMAC	Tasa media anual
Ton	Toneladas
UC	Unidad Central
UOP	United Oil Products
USD	Dólares
VA	Valor Agregado
VC	Variables de Coordinación
VP	Valor del Producto

Letras Griegas

Φ_i	Flujos netos obtenidos del Método Multicriterio "PROMETHEE"
----------	---

i. Prólogo

Es el grado de interés por la investigación lo que define el nivel de desarrollo de un país o de una civilización: quien tiene una estructura de investigación, tiene el tesoro de la creación, tiene la independencia científica, tecnológica y de pensamiento que ésta aporta.

No hay avances en la Ciencia sin Investigación. La historia de la humanidad es la suma de conocimientos adquiridos a través de los tiempos, y el conocimiento, la interpretación racional de la realidad. Pero la realidad, no obstante, no es perceptible como tal, sino que es representada bajo concepciones antropomórficas, en las que el modelo y la medida es el propio ser humano, el interpretador. Es, mediante la evolución del concepto, es decir, del propio lenguaje, como se va desarrollando la capacidad de interpretación, asimilando la verdad a la que somos capaces de acceder¹.

Por ello, el conocimiento vinculado a la sociedad permite abordar cada uno de los problemas del país; por lo cual la actividad intelectual, debe ser considerada un tema de seguridad nacional, pues es el único medio para que crezcan los recursos tanto humanos como materiales.

Precisamente es el crecimiento de la economía el que determina una mayor demanda del conocimiento. Y esto es lo que nos justifica como profesionales. Sin ese crecimiento, con la economía estancada y las cadenas productivas desechas, los ingenieros no tenemos nada que hacer en este país.

Con un profundo interés de seguir contribuyendo en la Investigación dentro del campo del conocimiento de la Ingeniería Química hemos avocado nuestros esfuerzos para presentar una metodología² para planificar, organizar y resolver secuencialmente la planeación descentralizada de industrias de proceso consideradas como grandes sistemas complejos con características interdisciplinarias que permiten considerar varios objetivos o metas en común, es decir criterios múltiples y no uno sólo.

Más allá de eso, el trabajo que presentamos va de lo general a lo particular, transformándolo en un trabajo específico y particular titulado "Selección Multicriterio de Tecnologías para el Procesamiento de Crudo en la Producción Alternativa de Petroquímicos en México".

Obedeciendo al requerimiento inminente de realizar una aportación que fortalezca el campo de la investigación, ávido de innovaciones tanto científicas como tecnológicas, el trabajo que desarrollamos tiene la bondad de presentar un nuevo manejo y sentido de los métodos desarrollados para resolver grandes sistemas complejos, los cuales se citarán como el fundamento que sustenta el estudio, integrándolos en una metodología de

¹ http://www.clinicaarquero.com/03_metodo.htm. Octubre 2007.

² Método y metodología son dos conceptos diferentes. El método es el procedimiento para lograr los objetivos. Metodología es el estudio del método.

carácter robusto. Dicho manejo es innovador debido a que no se ha considerado hasta este momento en la literatura como una metodología posible, aplicable y de implementación a los sistemas citados.

Cierto es que se han desarrollado una gran cantidad de métodos basados en la aplicación de la programación matemática para resolver dichos sistemas, pero también es cierto que en la misma literatura les ha sido negado un resultado exitoso cuando se utilizan para resolver grandes sistemas interrelacionados.

Por ello, la puerta de entrada que lleva por nombre el título citado nos llevará a través de diferentes campos de la ciencia y la investigación; el sendero a recorrer para seleccionar las mejores tecnologías para procesar petroquímicos a partir de petróleo crudo presenta carácter interdisciplinario, ya que es inherente el vínculo que existe entre la ingeniería y la tecnología de los procesos, su planificación y su repercusión económica.

Como lo hemos dicho anteriormente, este estudio se particulariza cuando hablamos de la alternativa que puede tener procesar una cierta cantidad de crudo para transformarlo en petroquímicos, en términos del costo de oportunidad que con ello conlleva.

No obstante, hemos acordado que el marco de referencia principal es la Teoría de Sistemas.

ii. Introducción

Desde el punto de vista teórico, la solución de un problema complejo de modelación, como el que se presenta en esta tesis, ha utilizado diferentes metodologías de análisis empleadas en la Ingeniería Química, en la Investigación Operacional, en la Teoría de la Descentralización de Sistemas Jerarquizados, tales como el Análisis de Redes, los Métodos de ayuda para la toma de decisiones con criterios múltiples y la Programación Matemática, principalmente Programación Lineal y en números enteros. Con la combinación de estos métodos, se pretende crear una metodología de análisis para mejorar la toma de decisiones en industrias que presentan la particularidad de estar interrelacionadas por cadenas de producción, que se alimentan de una materia prima básica hasta la producción de productos que puedan ser utilizados para satisfacer necesidades humanas.

El marco de referencia para el estudio propuesto en esta tesis es la Teoría de Sistemas. Por tal motivo, en el Capítulo I se explican brevemente los conceptos principales que integran esta teoría. Aunque su aplicación no es tangible en el cuerpo de esta tesis, sí se encuentra intrínsecamente ligado a las características del sistema de estudio a evaluar.

En el Capítulo II se realiza una recopilación de los principales modelos matemáticos propuestos por varios investigadores para modelar la industria petroquímica, y se presentan las herramientas que utilizaron. Como podrá observarse, la programación matemática es utilizada para plantear y resolver el problema de la planificación y/o en otros casos de producción tanto en la industria petroquímica como en la química solamente. Es por ello que se considera pertinente mencionar a partir de este momento, que independientemente de cual sea el problema, la modelación del sistema se plantea utilizando una sola función objetivo a resolver seguida de su respectivo conjunto de restricciones.

En la Ingeniería de procesos, pueden observarse diversos tipos de sistemas complejos en donde la toma de decisiones futuras es importante para obtener ciertas medidas de mérito como por ejemplo, un mayor valor agregado ó el ahorro de energía, entre otras.

La metodología propuesta en esta tesis tiene el objetivo de ser utilizada en sistemas complejos, caracterizados por interrelaciones de producción conocidas como "insumo-producto", es por ello que existe la necesidad de seleccionar las tecnologías asociadas a la producción de productos en cada una de las etapas de producción.

Considerando que existen múltiples alternativas, el sistema presenta también la singularidad de observar la multiplicidad de combinaciones posibles entre productos y tecnologías. De esta manera, y tratándose de acciones de futuro, el sistema debe descomponerse en partes para poder encontrar una o un conjunto de soluciones factibles.

Para realizar esta solución se pueden utilizar diversos métodos descritos en la bibliografía; no obstante, esta tesis propone la utilización de métodos de descomposición

para sistemas grandes y complejos, métodos de decisión multicriterio, teoría de redes y métodos de programación matemática tanto lineal como con números enteros.

Específicamente se utilizará la descomposición jerárquica a niveles múltiples, éste método realiza las particiones que más convengan para resolver el sistema tomando en cuenta la información que cada uno de los niveles de decisión requiere para obtener soluciones parciales y que intercambia para obtener finalmente una solución global congruente con cada una de las soluciones parciales.

El estado del Arte de la descomposición de sistemas grandes así como algunos conceptos básicos de los métodos para la ayudada a la toma de decisiones, de los cuales hemos decidido utilizar el programa PROMETHEE, y de programación matemática lineal y con números enteros se encuentra en el Capítulo III.

En el Capítulo IV se presenta el desarrollo de la metodología propuesta en esta tesis utilizando los conceptos revisados en los capítulos anteriores.

La validación de la metodología se realiza utilizando como caso de estudio a la Industria Petroquímica Mexicana.

Este sistema tiene características definidas ya que su estructura se basa en una red de procesos; es decir, para la producción de un solo petroquímico existen varias rutas de proceso que entrecruzan entre sí a través de los productos intermedios. Cada ruta de proceso representa una tecnología de producción diferente. La red de procesos y productos, se inicia con los llamados petroquímicos básicos.

La complejidad de este sistema se debe al gran número de combinaciones que maneja para producir un solo producto.

Por lo anterior, se utilizarán simultáneamente las técnicas de análisis de redes y métodos multicriterio para escoger las mejores cadenas de producción para cada producto petroquímico de la cadena.

Para utilizar la teoría de redes se deben establecer las condiciones iniciales del sistema así como la demanda de los petroquímicos finales (principalmente, plásticos, hules sintéticos, fertilizantes, fibras sintéticas); la cual servirá como la condición *sine qua non* que debe respetarse para incursionar en las mejores rutas de producción a las que les quedarán asociadas los productos intermedios y sus tecnologías, indisociablemente ligadas a la producción.

Para la utilización de los métodos de ayuda para la toma de decisiones (métodos multicriterio, específicamente PROMETHEE II) y tomando en cuenta el esquema de descentralización, la unidad central verificará que cada cadena de producción arroje el mejor valor agregado, el mínimo consumo de energía, el más alto valor de la cadena de producción y la inversión más baja, así como el menor impacto al ambiente y a la salud. Estos representan los criterios para utilizar PROMETHEE II.

Por su parte, la demanda de los productos finales deberá inducir las demandas de los productos intermedios y básicos, entonces, la demanda de los petroquímicos básicos, debe satisfacerse con producción considerando diferentes configuraciones tecnológicas a través de la utilización del petróleo crudo.

Así, dentro de la metodología de análisis, hemos debido incluir una búsqueda exhaustiva pero ordenada de las configuraciones tecnológicas de procesos para obtener del petróleo crudo, un subconjunto finito del que se obtengan rendimientos de petroquímicos básicos – diferenciándolos de las refinerías clásicas donde se obtienen principalmente energéticos secundarios, principalmente combustibles- al que se le asociarán inversiones y costos de producción, congruentes con la meta que se pretende.

Esta última parte, se resolvió modelando tales configuraciones por medio de la Programación Lineal y con números enteros que restringirá la demanda del petróleo crudo de acuerdo a una capacidad preestablecida y tendrá la posibilidad de elegir el mejor conjunto de tales configuraciones.

Finalmente, se pretende comprobar que el valor de un petroquímico final considerando toda su cadena de producción, es al menos comparable y atractivo, que el valor obtenido de la sola exportación de petróleo crudo.

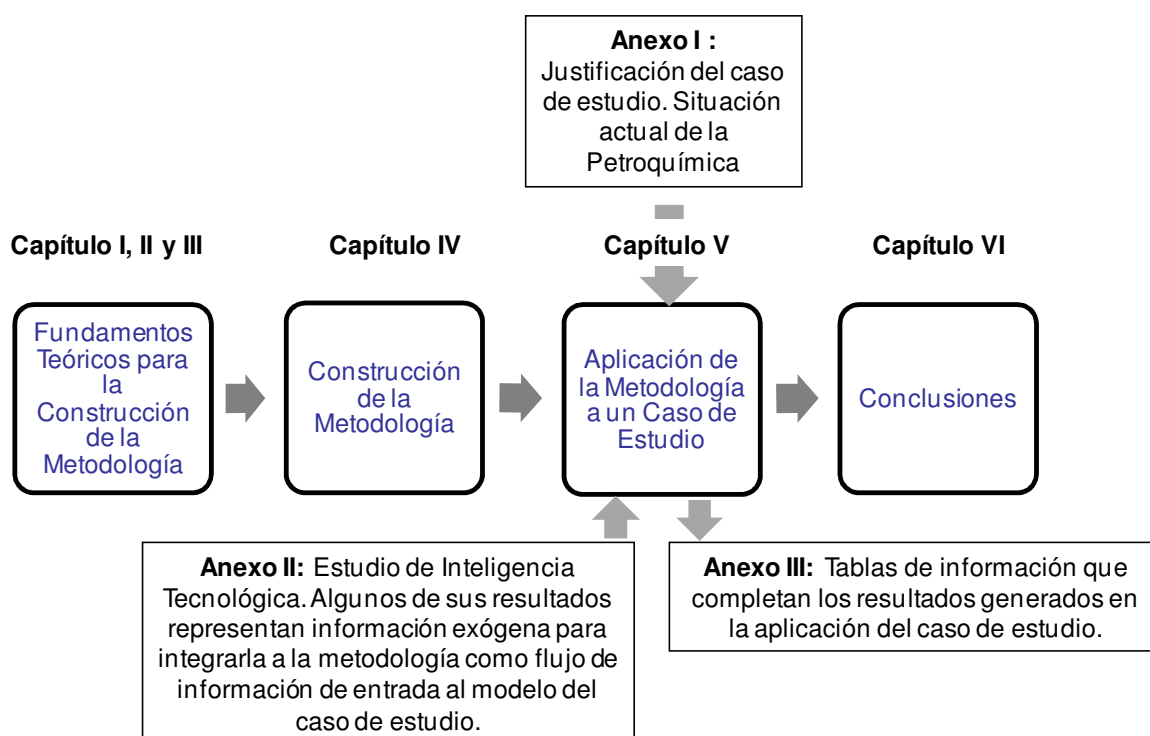
En el Capítulo V se aplica la metodología desarrollada y en el Capítulo VI se presentan las conclusiones de todo el trabajo.

La justificación para haber seleccionado tal caso de estudio la presentamos como el Apéndice I de este trabajo, en el cual se encuentra una perspectiva de la situación actual de la Industria Petroquímica en México basada principalmente en la utilización de estadísticas.

En el Apéndice II se presenta un estudio de Inteligencia Tecnológica sobre la producción de petroquímicos básicos y aromáticos. Además se presentan las diferentes configuraciones de refinación cuya tecnología mejora el rendimiento de producción de petroquímicos básicos.

En el Apéndice III se presentan las rutas de producción de cada petroquímico evaluado que se utilizaron para resolver el caso de estudio.

En el siguiente diagrama de flujo se muestra la secuencia de pasos seguida en esta tesis para alcanzar los objetivos propuestos.



iii. Objetivos

- i. Proponer y desarrollar una metodología que permita analizar, jerarquizar y seleccionar las posibles tecnologías alternativas para el desarrollo de industrias de proceso como la Industria Petroquímica, partiendo de petróleo crudo y considerando un horizonte de planificación de largo plazo. Para ello es necesario establecer los requerimientos de petroquímicos básicos y de crudo a través de la concepción de las diversas rutas tecnológicas para la elaboración de productos de la demanda final.
- ii. Utilizar la metodología propuesta, también para hacer una planificación jerárquica a varios niveles, de tal manera de incrementar la posibilidad de llevar a cabo la restitución del valor agregado de la Industria Petroquímica Mexicana.
- iii. Demostrar que la utilización de petróleo crudo puede competir, desde el punto de vista económico, con la exportación de éste para añadir valor a la cadena de producción de petroquímicos.

iv. Hipótesis

- ☞ Que existen tecnologías de proceso que permiten utilizar crudo como materia prima para procesar insumos petroquímicos y que podrían ser utilizadas para reactivar la Industria Petroquímica y hacerla más competitiva.
- ☞ Que debido a que el precio de oportunidad del crudo es muy alto, y al parecer su exportación es muy rentable, el valor agregado (VA) y el valor del producto (VP) de la cadena de productos-procesos, partiendo desde los petroquímicos básicos hasta los finales, deben ser igualmente rentables que la sola exportación de crudo.

-
- ↳ Que se tratará de demostrar que la metodología que se propone para los objetivos antes mencionados, es robusta tanto en términos de la metodología que se aplicará y que la modelación utilizada es la más conveniente para llevar a cabo la planificación mencionada.
 - ↳ Que al evaluar la posibilidad de implementar estas nuevas tecnologías, existe la oportunidad de aprovechar nuestros recursos naturales más eficientemente, generar mayor valor agregado y fortalecer la integración industrial del país.

v. Alcances

La planificación o modificación de productos y procesos que conlleven a objetivos como la recuperación del valor agregado de una de las industrias de proceso más cercanas a un ingeniero químico, como es el caso de la Industria Petroquímica (IPQ), es parte de la investigación que se abordó, en donde se distingue como característica principal la interdisciplinariedad.

Teniendo como meta la integración de algunos procesos de refinación con los propios de producción de petroquímicos básicos, se analizará la forma en que sería posible obtener a través de decisiones tomadas jerárquicamente a nivel de unidades coordinadas, mejores resultados para el funcionamiento de las configuraciones tecnológicas que se investigarán. Se sabe que a través de la combinación de ciertos procesos de la refinación del petróleo crudo, es posible aumentar el rendimiento de los petroquímicos básicos.

En este trabajo se elabora una metodología para establecer un “diálogo” entre subsistemas coordinados, a través de una “unidad central”, la cuál será la entidad que distribuya el crudo para su utilización para la producción de petroquímicos básicos. Los subsistemas coordinados con este tipo de planificación a varios niveles, serán aquellas cadenas de productos-procesos que recorren la ruta de producción de los petroquímicos finales a los básicos.

Se propone utilizar conjuntamente la Teoría de Redes generalizada, a través de una técnica denominada “cruzando los arcos”, la cual consiste en calcular un flujo de información (materia y/o energía) que se transporta a cada uno de los nodos que estructura una red de procesos, en conjunto con los métodos multicriterio, desarrollados recientemente.

De la utilización conjunta de éstas dos herramientas, ha resultado un sistema de modelos para modelar un sistema complejo.

Por otro lado, se aplicará la metodología propuesta por la denominada “Inteligencia Tecnológica” (IT) con la finalidad de crear mapas tecnológicos que indiquen la importancia real de los procesos que fueron registrados como patentes para la producción de petroquímicos a partir de crudo.

vi. Contribuciones a la Investigación Científica

Así, las contribuciones del presente proyecto de investigación al campo del conocimiento de la Ingeniería Química, son:

- ↪ Utilizar combinadamente algunas de las herramientas que forman parte de la Investigación de Operaciones como lo son el análisis de redes, los métodos multicriterio y la programación matemática dentro del marco de la planificación descentralizada, para alcanzar la meta que se ha fijado en esta investigación: crear una metodología robusta con la que se pueda analizar un sistema complejo de procesos interrelacionados, que arroje los resultados planteados en los objetivos.
Sin embargo, cabe mencionar que el mayor aporte científico de este proyecto consiste en la utilización combinada de las herramientas antes mencionadas para reducir la complejidad del sistema que es provocada por los elementos combinatorios que existen para elegir las rutas de proceso. Para ello, no se tratará el problema utilizando una sola función objetivo, sino utilizando múltiples criterios.
- ↪ Para el caso de estudio, se analizará la manera de restituir el valor agregado de la Industria Petroquímica Mexicana, desarrollando así un nuevo modelo de toma de decisiones coordinadas junto con la metodología que le dará respuesta.
- ↪ Comparar la exportación de crudo contra su utilización como materia prima para obtener petroquímicos básicos a través de procesos de refinación que consideren la tecnología necesaria para incrementar el rendimiento de olefinas y aromáticos entre otros.

Por lo tanto, otra de las contribuciones de la investigación llevada a cabo es:

- ↪ Evaluar la integración procesos ya conocidos en la industria de la refinación para obtener mayores rendimientos de productos petroquímicos básicos, utilizando información de proceso y económica.

Al respecto, el desafío que se presentó en la investigación es tratar de responder al cuestionamiento de utilizar este petróleo crudo destinado previamente a su exportación, para la producción de petroquímicos básicos, siempre y cuando éstos pudieran tener una equivalencia superior o cuando menos igual al precio al que se cotiza el petróleo crudo para fines de exportación.

- ↪ De esta forma se propone reducir la complejidad de un problema combinatorio como lo es seleccionar aquellas rutas de productos y procesos que lleven de los petroquímicos básicos a los petroquímicos finales.

Capítulo I.

Enfoque Sistémico de la Industria Petroquímica.

*"El buen sentido o sentido común es la cosa mejor repartida del mundo, pues cada cual piensa estar tan bien provisto de él, que, hasta los más difíciles de contentar en cualquier otra cosa, no acostumbran desear más buen sentido del que ya tienen..." Descartes (1637).
Discurso del Método.*

1 Breve Perspectiva de la Teoría de Sistemas

“Es imposible conocer las partes sin conocer el todo, como tampoco conocer el todo sin conocer particularmente las partes”.
Pascal.

“El todo, es más que la suma de sus partes”.
Aristóteles.

Debido a nuestro interés en la Teoría de Sistemas como marco de un método científico para desarrollar una metodología de análisis para la toma de decisiones, hemos decidido incluir algunos conceptos ligados con esta teoría.

Un sistema es un conjunto de objetos organizados que se interrelacionan en función de un objetivo, de una meta y que se encuentra inmerso dentro de un medio entorno. Es entonces un sistema abierto¹.

Para que este conjunto sea un sistema debe, particularmente:

↪ Ser coherente: elementos en interrelación (noción de totalidad).

La coherencia es una propiedad del conjunto cuyas partes están unidas y tienen entre ellas interrelacionadas en forma lógica; sin embargo, no traduce el hecho de que ellas participan todas positivamente a la misma finalidad.

↪ Ser autónomo: abierto sobre el entorno.

La autonomía es una propiedad del conjunto que puede encontrar en sí mismo su determinación de comportamiento dentro de un entorno que lo puede restringir, pero que no debe ser confundido con la libertad de no tomar en cuenta las restricciones del entorno.

↪ Tener finalidades (nociones de teleología, acronía).

La finalidad es inseparable de la idea de valor, de apreciación totalmente intencional: es la adaptación de las partes con respecto del todo, es el efecto de una inteligencia que prevé y selecciona.

↪ Ser activo (noción de sincronía).

↪ Evolucionar (noción de diacronía).

Un sistema está siempre incluido en un suprasistema (que puede ser su propio entorno), aún si éste último no tiene relaciones con el sistema.

Un sistema no limitado por objetivos, es indefinible.

Un sistema tiene siempre una actividad y una evolución.

¹ Para el contexto que nos ocupa, los sistemas se pueden clasificar como abiertos o cerrados, siendo éste último no considerado debido a que no presenta interacciones con el entorno.

La Teoría de Sistemas es la teoría de la modelación que intenta progresar en la comprensión de sistemas complejos. Se centra sobre flujos de información y procesos de decisión. Se basa en cuatro preceptos:

- ↪ Pertinencia
- ↪ Globalismo
- ↪ Teleología
- ↪ Agregatividad

La pertinencia es convenir que todo objeto se define con relación a las intenciones implícitas del observador. Nunca prohibirse poner en duda esta definición: si las intenciones se modifican, la intención que se tenía del objeto se modifica.

El globalismo es considerar siempre al objeto como una parte inmersa y activa en el seno de un gran todo. Percibirlo primero globalmente en su relación funcional con su entorno sin preocuparse de otra medida que de establecer una imagen fiel de su estructura interna, cuya existencia y unidad no serán jamás tenidas por adquiridas.

La teleología es interpretar el objeto no por él mismo sino por su comportamiento, sin buscar explicarlo a priori por alguna ley implicada en su estructura. Más bien, comprender este comportamiento y los recursos que éste moviliza con relación a los proyectos que el observador atribuye al objeto.

La agregatividad es convenir que toda representación es simplificadora. Buscar agregados que sean tenidos como pertinentes y excluir la búsqueda exhaustiva de los elementos a considerar.

Estos cuatro preceptos dan por inseparables el funcionamiento y la transformación de un fenómeno, a partir de entornos activos dentro de los cuales el sistema está inmerso y de proyectos para los cuales es identificable.

La Teoría de Sistemas representa un conocimiento ideal, especulativo y tiene por objeto presentar conceptos generales comunes a toda identidad que responde a la definición de organizar dichos conceptos con objeto de servir de marco de referencia para una modelación de la realidad. Sin embargo, una de las características más importantes, esencial de los fenómenos en estudio es la relativa a la complejidad.

Un fenómeno es complicado cuando se puede solucionar analíticamente por más difícil que sea encontrar la solución y cuando la solución sigue patrones de causa a efecto, es decir, en un problema complicado la solución depende de las condiciones iniciales. Por el contrario un fenómeno es complejo cuando existen interrelaciones entre los elementos constitutivos, donde éstos resultan ser esenciales. En este tipo de fenómeno las condiciones iniciales pueden llevar a las condiciones finales a través de diferentes trayectorias o rutas.

El tipo de razonamiento de la Teoría de Sistemas, es circular; es decir, el análisis del fenómeno en estudio se lleva a cabo por la afinación progresiva de los conceptos, esto es: por interacción o recursividad.

En la Teoría de Sistemas se razona casi siempre en términos de modelos². Los modelos son el soporte y los medios de comunicación para hacer progresar el conocimiento.

La Teoría de Sistemas no escapa al proceso de acumulación de experiencias, su puesta en práctica estará ampliándose cada vez más en la medida en que la producción de información es en la actualidad bastante importante.

La importancia de la información en los sistemas queda demostrada al considerar que la naturaleza científica de las entidades que lo conforman puede ser muy variada. En efecto, la Teoría de Sistemas nos ofrece una visión interdisciplinaria y muchas veces transdisciplinaria.

Por otro lado, hablando acerca del significado de la palabra modelo, podemos mencionar en principio que la dualidad entre empirismo y formalismo reviste la oposición entre la neutralidad de los hechos y la producción activa de un modelo. Dicho de otra manera, la ciencia y la tecnología son aplicadas como el *vis à vis* de un objeto real sobre el que se debe investigar y de un objeto artificial destinado a reproducir, a imitar dentro de la ley de sus efectos, al objeto real. Con ello podemos considerar que es posible acercarnos a una formación ideológica particular que distribuye el discurso de la ciencia y la tecnología de acuerdo a una diferencia que debe darse por presupuesta: la diferencia de la realidad empírica y de la forma teórica.

En tanto que se trata de un objeto artificial, el modelo es controlable. Puede preverse la forma en que el modelo reaccionará en caso de modificación de uno de sus elementos. En esta previsión reside la transparencia teórica del modelo y está ligada evidentemente al hecho de que el modelo se ha construido integralmente, de suerte tal que la opacidad atribuible a la realidad está ausente. Por lo anterior, un modelo no es transformación práctica de la realidad, de su realidad: pertenece más bien al registro de la invención pura dotada de una irrealidad formal si todos los axiomas de esta teoría son válidos para esta estructura.

Formulemos entonces las tesis siguientes:

Existen dos instancias epistemológicas de la palabra "modelo". La primera es una noción descriptiva y/o experimental de la actividad científica y tecnológica; mientras que la segunda se refiere exclusivamente al concepto de la lógica matemática.

Cuando la segunda instancia sirve de soporte a la primera, se tiene una concepción ideológica de la ciencia, es decir una categoría filosófica, la categoría de modelo.

² *Un modelo es una aproximación de la realidad y para construirlos, es necesario utilizar imágenes físicas a partir de signos (numéricos, literales, gráficas,...)*

Por lo tanto, un modelo o un sistema de modelos, designa la red cruzada de retroalimentaciones y de anticipaciones que entretejen la historia de la formalización: sea que se le haya designado por lo que se refiere a la anticipación como corte o por lo que se refiere a la retroacción, como modificación.

2 La Industria Petroquímica: Un enfoque sistémico.

Permítasenos utilizar los conceptos básicos de la Teoría de Sistemas para realizar una analogía entre éstos y el tema que nos ocupa respecto a la planificación estratégica de la Industria Petroquímica (IPQ). Tomemos como objeto a esta última y expresemos que la Teoría de Sistemas es la ciencia de la modelación. Sin pérdida de generalidad, consideremos que el objeto (la IPQ) se define en relación con las intenciones explícitas del modelador. Si tales intenciones sobre el objeto a modelar cambian, la percepción que de éste se tenía se modifica y entonces podemos hacer uso del precepto de la pertinencia.

Considerando por otra parte que “el todo es más que la suma de sus partes”, apliquemos el precepto globalista para expresar que nuestro objeto bajo análisis es una parte inmersa y activa en el seno de un “gran todo”, cuando consideramos el entorno que lo circunda y lo abrimos para que aquél se interrelacione con éste. Percibirlo globalmente en el contexto de su relación funcional con su entorno, es nunca aceptar sus posibles estructuras como fijas. Reconozcamos por ello que no sólo existe una relación de causa – efecto sino más bien solidaridad concreta de contrastes en armonía con el objeto bajo análisis. Por ello, las decisiones que se han tomado respecto de la IPQ con el encubrimiento del causalismo, son más susceptibles de fallar que aquellas que se toman con todo conocimiento de sus consecuencias; con ello podemos hacer uso del precepto teleológico para referirnos a las finalidades del objeto que ha de analizarse. A través de esta expresión interpretamos al objeto no por sí mismo, sino que lo observamos a través de su comportamiento, tomando en cuenta las finalidades que el modelador confiere al objeto; es decir, no hemos buscado explicar a priori tal comportamiento por alguna ley implicada dentro de una de sus eventuales estructuras. Hemos intentado por el contrario, en todo momento, comprender el comportamiento de la IPQ y los recursos que ésta moviliza con relación a las finalidades que le hemos atribuido. Se trata también de reconocer la complejidad del objeto en estudio. Por ello, hemos excluido la posibilidad de enumerar todos los elementos que constituyen el objeto para aplicar entonces, el precepto de agregatividad, donde la modelación del objeto agregado es relevante a las finalidades conferidas y pertinentes para su análisis.

Partiendo del paradigma teleológico y la apertura hacia su entorno y considerando además, el esquema que traduce el paradigma estructuralista podemos definir el paradigma sistémico para el caso de la IPQ. En los términos dialécticos bajo los cuales la Teoría de Sistemas define el estudio de un objeto: el ser, el hacer y el devenir, se forman los tres polos entre los cuales habremos de modelar la IPQ de México, ponderando su definición funcional (“lo que el objeto hace”), su definición ontológica o analítica (“lo que el objeto es”) y su definición genética (“en lo que el objeto se transforma”).

Existe por lo tanto una relación circular entre los tres aspectos básicos de los sistemas: las estructuras cambian un instante cuando éstas se encuentran en funcionamiento, pero cuando el cambio es tan grande que es necesariamente irreversible, entonces un nuevo proceso se desarrolla, dando lugar a una nueva estructura, alcanzando con ello uno de los principios básicos de la planificación estratégica.

Pero la Teoría de Sistemas se interesa también en los objetos cuyos elementos permanecen en conjunto gracias a procesos dinámicos y no por ataduras predeterminadas y rígidas. Tales objetos mantienen relaciones dinámicas con su entorno a través de las cuales conservan sus características con relación a éste, siendo capaces de adaptarse, dentro de ciertos límites, a sus modificaciones.

El sistema que hemos querido analizar y generalizar, puede definirse dentro de la clasificación realizada por Flood y Jackson [1], en donde este sistema está tipificado por las metáforas orgánica y neurocibernética; de acuerdo a la metáfora orgánica, nuestro sistema tiene una relación abierta con un entorno cambiante, en donde se necesita satisfacer necesidades para sobrevivir, promover la responsabilidad para alcanzar el cambio requerido. Es también neurocibernético, en la medida en que se inquiera a sí mismo, para tener la posibilidad de alcanzar metas dinámicas basadas en el aprendizaje, enfatizando la creatividad y soportando los riesgos inherentes a su posible operación.

Ahora bien, desde el punto de vista de la metodología sistémica, nuestro sistema es *Complejo-Pluralista*, ya que es necesaria una planificación participativa, debido a que no todos los actores pueden tender hacia un mismo objetivo individualmente, por lo que requiere una coordinación y control para alcanzar compromisos factibles (por lo que es pluralista) y se encuentra interrelacionado por un contexto complejo.

El enfoque sistémico sirve así a la planificación estratégica y participativa de acuerdo a Ackoff [2], [3], que se tipifica por un futuro deseado, siguiendo 5 fases que son: formulación del problema, planificación de los fines, planificación de los medios, planificación de los recursos e implementación y control.

En el caso de la formulación del problema, el análisis del sistema implica conocer cada uno de sus elementos, es decir, los productores de petroquímicos intermedios y finales y de los petroquímicos básicos, sus relaciones con el entorno, los obstáculos para que esta planificación se lleve a cabo para restituir el valor agregado de la Industria petroquímica de México.

La planificación de los fines, se refiere a los objetivos, metas e ideales, principiando por el diseño de un futuro deseado, seleccionando la misión, especificando el diseño de la planificación a través de informaciones llevadas a cabo a niveles múltiples que se encuentran dentro del sistema y modelando (diseñando) el comportamiento del sistema y de cada una de sus partes.

La planificación de los medios, requiere de la aplicación científica de los fines de la planificación con modelos que interrelacionen, fines con medios de forma creativa.

La planificación de los recursos, exige, que los insumos principales, la energía, los procesos de producción y su inversión requerida, así como las relaciones con el entorno, estén perfectamente especificados. En nuestro se trata principalmente de la utilización del petróleo crudo como materia prima para alcanzar los fines de la planificación, compitiendo con un cierto riesgo con la utilización de este mismo recurso que puede destinarse a la exportación.

En el caso de la implementación y el control, para que los fines, los medios y los recursos puedan realmente utilizarse, es necesario que exista un ente que coordine los esfuerzos de los actores para saber las acciones que deberán realizar cada uno de los actores y que sean retroalimentados de acuerdo a las decisiones del ente coordinador, que en nuestro caso llamaremos la *Unidad Central*.

Reconocemos que no hemos hecho mención explícita a la bibliografía sobre la Teoría de Sistemas, por lo que debe entenderse que los conceptos mencionados anteriormente, deben tomarse como nuestra interpretación, de la cuál asumimos toda la responsabilidad.

Ciertamente realizamos varias lecturas, principalmente de libros. La bibliografía, se encuentra al final de este capítulo.

3 Bibliografía.

- [1] R. L. Flood and M. C. Jackson, (Ed), *Critical Systems Thinking. Directed Readings*. Chichester: John Wiley & Sons Inc., 1991.
- [2] R. L. Ackoff, *Redesigning the future. A systems approach to societal problems*. New York, U.S.A.: John Wiley & Sons, Inc., 1974.
- [3] R. L. Ackoff, *Creating the Corporate Future*. New York, U.S.A.: John Wiley & Sons, Inc., 1981.
- [4] L. Bertalanffy, *General System Theory: Foundations, development, applications*. New York, U.S.A.: George Braziller, 1968.
- [5] P. B. Checkland and J. Scholes, *Soft Systems Methodology in Action*. Chichester: John Wiley & Sons Inc., 1990.
- [6] C. W. Churchman, *The Design of Inquiring Systems, Basic Concepts of Systems and Organization*. New York, U.S.A.: Basic Books, 1971.
- [7] C. W. Churchman, *The system approach*. New York / México: Dell Publishing Co. / Diana, 1973.
- [8] H. G. Daellenbach, *Systems and decision making: A management science approach*. New York, U.S.A.: John Wiley, 1994.
- [9] R. L. Flood and E. R. Carson, *Dealing with Complexity: An Introduction to the Theory and Application of Systems Science*. New York: Plenum, 1992.
- [10] R. L. Flood and M. C. Jackson, *Creative Problem Solving. Total System Intervention*. New York, U.S.A.: John Wiley & Sons Inc., 1991.
- [11] D. M. Himmelblau and T. F. Edgar, *Optimization of Chemical Processes*. Singapore: MacGraw-Hill International Editions, 1989.
- [12] E. Howard, *Essentials of Project and Systems Engineering Management*. New York: John Wiley, 1997.
- [13] J. L. Le Moigne, *La théorie du Système Général: théorie de la modélisation*. Paris: Presses Universitaires de France, 1977.
- [14] J. L. Le Moigne, *La modélisation des systèmes complexes*. Paris: Dunod, 1995.
- [15] J. Oliga and C. Power, *Ideology and Control: A Critical Systems Perspective*. New York, U.S.A.: Plenum, 1992.
- [16] D. Rudd and C. Watson, *Strategy of Process Engineering*. United States of America: John Wiley & Sons Inc., 1968.
- [17] B. Wilson, *Systems: Concepts, Methodologies and Applications*. Chichester: John Wiley, 1984.

Capítulo II.

Modelación de la Industria Petroquímica.

1 Modelos realizados para la Industria Petroquímica. Estado del Arte.

La Industria Petroquímica (IPQ) es una extensa red formada por un gran número de cadenas entrelazadas que elabora compuestos demandados por la economía. Estas cadenas inician con los productos obtenidos de la refinación del petróleo y del procesamiento del gas natural asociado y no asociado. En esta red, un mismo compuesto puede ser producido a través de diferentes cadenas, mediante procesos diferentes e incluso partiendo de distintos conjuntos de materias primas. El número de combinaciones de procesos capaz de producir un determinado producto final, es enorme. Para la mayoría de los productos, la ruta de producción parte del metano, etano y etileno; propano y propileno, butano, pentanos y los aromáticos; todos ellos se le ha dado en llamar productos petroquímicos “básicos” y son considerados las piedras angulares de la petroquímica.

Debido a las características que presenta el sistema a evaluar (la IPQ) hemos considerado conveniente mencionar que el modelo de insumo-producto de Leontief¹ es la base precedente para los posteriores desarrollos que se han hecho sobre nuestro sistema de análisis.

1.1 El Modelo de Insumo-Producto (input-output) de Leontief [1]

El análisis input-output se fundamenta en una matriz cuadrada no negativa de coeficientes técnicos, A , en cuyas columnas se muestran las necesidades por unidad de producción de un sector determinado. Uno de sus principales usos es servir de instrumento de análisis de impacto a través de la llamada matriz inversa de Leontief, $(I - A)^{-1}$, cuyos elementos recogen los efectos sobre los niveles de producción (X) de cambios en la demanda final (D).

De acuerdo a Leontief hay dos aplicaciones de su modelo: un modelo cerrado y un modelo abierto.

El modelo cerrado trata sólo con los ingresos de cada industria mientras que el modelo abierto encuentra la cantidad de producción necesaria para satisfacer un incremento en la demanda.

El modelo de insumo-producto de Leontief propone que cada industria de un sector determinado, puede tener dos tipos de demanda: la demanda externa (que se encuentra fuera del sistema) y la demanda interna que se encuentra dentro del sistema por una o varias industrias del sector en estudio.

Cuando el modelo de Leontief se aplica a un sistema que considera un sector productivo formado por “n” industrias interdependientes, S_1, \dots, S_n , se considera un sistema cerrado.

¹ Leontief Wassily, ganador del premio Nobel de Economía en 1973. Sus publicaciones se encuentran en: *Wassily Leontief (life and achievements of W. Leontief)*.
<http://online.redwoods.cc.ca.us/instruct/darnold/laproj/Fall2001/Iris/lapaper.pdf>

Esto significa que cada industria o cada componente del sistema consumen ciertos productos que han sido producidos por otras industrias, incluyendo su autoconsumo.

A continuación, se explica brevemente la deducción de la ecuación de Leontief.

Se define X como el vector de producción que satisface la demanda interna y externa de una industria.

Como la demanda es igual a la producción total menos la producción necesaria por otras industrias como insumos, matemáticamente se expresa como:

$$D = X - AX \quad \text{Ec. II.1}$$

Dónde la matriz de tecnologías A , es conocida, así como el vector de la demanda de cada industria D .

Cualquier matriz multiplicada por una matriz identidad es igual a sí misma.

$$IX = X \quad \text{Ec. II.2}$$

Por lo tanto:

$$D = IX - AX \quad \text{Ec. II.3}$$

Factorizando:

$$D = (I - A)X \quad \text{Ec. II.4}$$

Resolviendo para X , se multiplica por $(I - A)^{-1}$ ambos lados de la ecuación II.4.

$$(I - A)^{-1}D = (I - A)^{-1}(I - A)X \quad \text{Ec. II.5}$$

Cualquier matriz multiplicada por su inversa es igual a la matriz identidad $(I - A)^{-1}(I - A) = I$.

Substituyendo:

$$(I - A)^{-1}D = IX \quad \text{Ec. II.6}$$

Aplicando la ecuación II.2 a II.6,

$$X = (I - A)^{-1}D \quad \text{Ec. II.7}$$

Donde $(I - A)^{-1}$ se puede desarrollar como una serie infinita:

$$(I - A)^{-1} \approx I + A^1 + A^2 + \dots + A^n \quad \text{Ec. II.8}$$

Por otro lado, existen ciertas relaciones entre los insumos y productos que podrían referirse a las cantidades estequiométricas necesarias para producir una unidad del sector " i ". Los coeficientes resultantes se pueden normalizar para obtener los llamados "coeficientes técnicos".

$$a_{ij} = \frac{X_{ij}}{X_j} \quad \text{Ec. II.9}$$

Es decir, la matriz de tecnología está formada por un conjunto de relaciones que indican la proporcionalidad de producción de una unidad de producto del sector " i ", el cual se

convierte en el insumo del sector “j”. Por lo que A se puede considerar también como la matriz de consumos íter industriales.

$$A = \{a_{ij}\}$$

Ec. II.10

La metodología de insumo producto es un instrumento cuantitativo que permite dar una descripción de la estructura de producción de un sistema productivo en un momento determinado, o tener proyecciones de dicha estructura y sus agregados principales en función de cambios esperados en la demanda final de bienes y servicios.

En el segundo caso, el modelo de insumo-producto constituye, como teoría de la producción, una interesante aproximación a la realidad. Una vez conocidos los requerimientos fijos de insumos que los distintos sectores productivos requieren para su actividad (funciones de producción sectoriales) y la demanda prevista de bienes finales, es posible establecer los niveles de producción que deben alcanzar los distintos sectores para satisfacer dicha demanda final tomando en cuenta las relaciones intersectoriales propias del sistema.

Este modelo fue el marco de referencia en el que se basaron Rudd [2] y colaboradores, como lo ha sido para otros autores que han construido modelos de sectores industriales o de procesos (principalmente usados en la Industria de Proceso) [3], [4], teniendo en mente la idea y las consecuencias del modelo de Insumo-Producto de Leontief.

2 Planificación² Estratégica de la Industria Petroquímica. Estado del Arte.

Para poder proyectar el comportamiento de la IPQ se requieren considerar aspectos químicos, tecnológicos, económicos, de ingeniería y de planificación. Dada la interacción que existe entre estos factores, el análisis que tome en cuenta el mayor número de estos en forma adecuada será más fidedigno.

La IPQ es en esencia cambiante y sumamente sensible a las variaciones del entorno económico y a la interacción de las diversas tecnologías (procesos) que la constituyen, lo cual dificulta la evaluación de las modificaciones que en ella se dan, o que pueden llegarse a dar. Encontrar procedimientos que permitan anticipar oportunidades y posibles problemas en la IPQ, proporcionando información cualitativa respecto a conjuntos de procesos a evaluar, siguiendo siempre las mismas bases, es importante.

Información de este tipo puede ser valiosa y útil en la toma de decisiones que se realiza al planificar el desarrollo de la IPQ.

² *Planificación. Acción y efecto de planificar. Técnica que trata de coordinar ex ante los comportamientos de las diversas unidades económicas que participan en el sistema económico, con objeto de alcanzar objetivos predeterminados. [Diccionario Larousse, 2003].*

2.1 Modelo general de la estructura de la industria petroquímica.

En la Figura II.1 se presenta una generalización del modelo utilizado para la toma de decisiones respecto a la selección de rutas tecnológicas de producción y la dupla producto/proceso para la Industria Petroquímica.

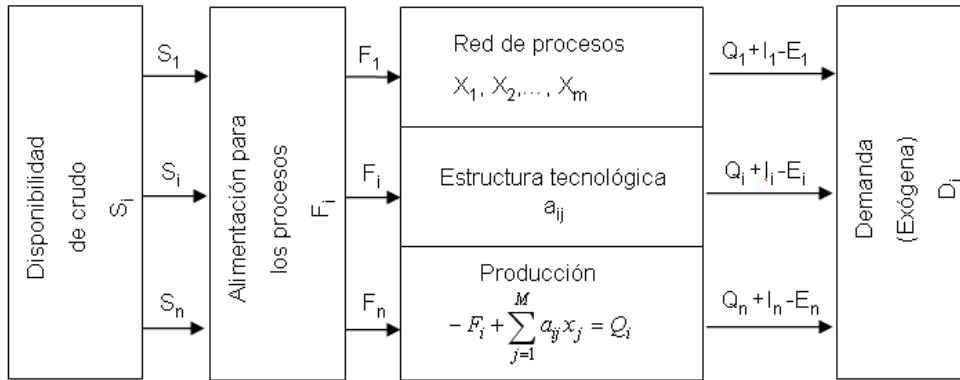


Figura II.1. Modelo generalizado para la toma de decisiones para la selección de rutas tecnológicas de la Industria Petroquímica

La generalización del modelo se encuentra sujeta a las siguientes restricciones:

Tipo de restricción	Expresión matemática
De abastecimiento:	$F_i \leq S_i$ <p>$S_i =$ Disponibilidad de crudos o de otra materia prima.</p> <p>$F_i =$ Producción de petroquímicos mediante una refinería petroquímica</p>
De capacidad:	$K_j \leq K_j Y_j$ $Y_j = 0,1$ <p>$K_j =$ Capacidad de producción de todos los petroquímicos básicos e intermedios</p> $K_i \leq K_i Y_i$ <p>$K_i =$ Capacidad de producción de todos los petroquímicos finales</p> <p>$\Delta X_j = K_j Y_j$; incremento de la producción de j</p> <p>$\Delta Q_i = K_i Y_i$; incremento de la producción de i</p> $X_j \leq K_j$

De demanda:

$$Q_i + I_i - E_i \geq D_i$$

Q_i = Producción de petroquímicos intermedios y finales

I_i = Importaciones de petroquímicos intermedios y finales

E_i = Exportaciones de petroquímicos finales

D_i = Demanda de petroquímicos finales

X_j = producción del petroquímico intermedio "j"

El modelo, realizado para la IPQ de los Estados Unidos, cuenta con 182 procesos para 131 petroquímicos intermedios y sus materias primas. Dentro del modelo, se especifican los límites de las capacidades de producción (información exógena) y las restricciones de la materia prima principal, el petróleo crudo, S_i

La función objetivo (F.O.) busca que los procesos operen a los niveles X_j tal que las demandas de los productos, D_j se satisfagan a un mínimo costo total de producción para la industria. Matemáticamente, se expresa como:

$$\text{Costo total de producción} = \sum_{i=1}^N p_i F_i + \sum_{j=1}^M C_j X_j + \sum_{i=1}^N p_{imp_i} I_i - \sum_{j=1}^M p_{exp_j} E_j \quad \text{Ec. II.11}$$

Donde C_j es el costo total de producción para el proceso "j". Este término incluye los costos de materias primas, de servicios, de mano de obra y de inversión anualizada, considerando un retorno de la inversión adecuado. Por su parte p_{imp_i} y p_{exp_i} representan, respectivamente los precios de las importaciones I_i y de las exportaciones E_i . El término $p_i F_i$, representa el costo de las materias primas.

Como puede observarse, el modelo de insumo-producto se encuentra descrito en la parte intermedia del modelo generalizado representado en la Figura II.1, correspondiente a la red de productos y procesos de la IPQ. Es obvio que en lugar de la matriz de "coeficientes técnicos" de Leontief, se encuentran las relaciones estequiométricas reales (rendimientos de cada reacción química) y del proceso de producción considerado.

2.2 Representación de la Industria Petroquímica Mediante Programación Lineal

La red que conforma la IPQ se adapta en forma dinámica al medio ambiente económico, además de desplazarse hacia las rutas más directas que le permitan la elaboración de los productos demandados por la economía.

En el corto plazo, la IPQ puede ajustarse a los cambios en las condiciones de oferta-demanda de los productos finales y de los petroquímicos básicos variando el factor de utilización de la capacidad instalada para las plantas existentes, así como algunas otras variables de operación. De esta forma la industria puede emplear la capacidad de los

procesos existentes en forma óptima. Un criterio posible es asignar las capacidades empleadas a los procesos tal que se cumplan los límites impuestos por las restricciones en los suministros y se satisfagan las demandas a un mínimo costo de producción. Si el problema es formulado de esta manera es posible representarlo y resolverlo mediante programación lineal.

En el largo plazo la IPQ se ajusta al crecimiento de los mercados expandiendo la capacidad instalada para los diferentes procesos e incluso con la adopción de nuevas tecnologías que eliminan las obsoletas.

En general se considera que los problemas que enfrenta el desarrollo industrial son demasiado complicados para encontrar su solución en un horizonte de planificación largo, y por tanto los individuos encargados de tomar decisiones restringen estas al corto plazo, en el cual evitan errores de estimación y predicción. Para el largo plazo se toman una serie de decisiones estratégicas basándose en el juicio de las posibles consecuencias. Cuando la planificación a corto plazo es realizada con base a modelos, ésta puede señalar la necesidad de tomar decisiones estratégicas que involucren modificaciones en la capacidad instalada de diferentes procesos, el desarrollo de procesos nuevos y la sustitución de un compuesto por otro para cumplir con una misma función requerida por el exterior del sistema. Estos ajustes ocurren en períodos de 5 a 15 años.

En los últimos años se han introducido en la IPQ tecnologías nuevas y modificaciones a las existentes buscando mejorar su posición competitiva y crear nuevos mercados. Por ello es útil desarrollar modelos que ayuden a evaluar tecnologías en forma adecuada bajo diferentes escenarios de crecimiento, con lo cual es posible analizar el comportamiento futuro de la IPQ. En especial debido a que en el largo plazo se necesita evaluar la adición o eliminación de tecnologías y comparar diferentes procesos entre sí.

A continuación se presentan los resultados del trabajo de algunos grupos de investigación que han estudiado la representación de la IPQ y simulado su comportamiento

2.2.1 Representaciones Lineales

Lineamientos para el estudio de la IPQ en su conjunto fueron desarrollados por Rudd, [5], [2]. Empleó programación lineal para resolver el problema de planificación a corto plazo. En un principio determinó las variables exógenas al problema: El pronóstico de la demanda de los productos petroquímicos finales y las restricciones en el suministro de las materias primas básicas así como la estructura de la industria (capacidades instaladas). Estableció un modelo de asignación de la producción que incluye el balance de materia para la IPQ en su conjunto. Este balance debe de ser satisfecho por cualquiera de los métodos de simulación que se desarrollen para la IPQ. Sophos [6], con las mismas bases, planteó el problema de la siguiente manera:

La IPQ puede estar formada por I compuestos y J procesos o tecnologías. Para cada tecnología se tienen coeficientes insumo-producto para cada compuesto (i) y tecnología (j).

El coeficiente representa la cantidad en masa del compuesto "i" producida por unidad de masa de producto principal obtenida por la tecnología "j". Si el coeficiente es mayor a cero el compuesto "i" es producto del proceso "j". Si es menor a cero, entonces es materia prima. Y si es igual a cero no participa en el proceso.

El conjunto de coeficientes conforma la matriz insumo-producto.

Al definir las materias primas básicas empleadas: r_i , masa de producto final "i" producida; p_i , cantidad de producto principal de la tecnología "j", elaborado por esta x_j , se puede establecer el balance de materia para cada compuesto "i":

$$r_i + \sum_{j=1}^J a_{ij} x_j - p_i = 0; \quad \forall i = 1, \dots, I \quad \text{Ec. II.12}$$

La IPQ debe cumplir con ciertas restricciones:

No exceder la disponibilidad de materia prima:

$$r_i \leq s_i$$

donde s_i es la disponibilidad de suministro de la materia prima básica "i".

Satisfacer la demanda de productos finales:

$$p_i \geq d_i$$

donde d_i es la demanda del producto final "i".

La producción no puede exceder la capacidad de producción instalada:

$$x_j \leq c_j$$

donde c_j es la capacidad instalada para el proceso "j".

Es importante notar que la matriz insumo-producto "A" es dispersa debido a que pocos compuestos en relación al total intervienen en cada reacción, de la misma forma, muchos elementos de los vectores "S" y "D" tienen un valor de cero.

Una función objetivo (F.O.) propuesta por Rudd para determinar la asignación de producciones al minimizar los costos de producción es:

$$\text{F.O.: } \text{Min} \sum_{j=1}^J \gamma_j x_j \quad \text{Ec. II.13}$$

donde γ_j es el costo de producir una unidad del producto principal de la tecnología "j". Se pueden establecer otras funciones objetivo de este tipo para determinar el uso óptimo de la capacidad instalada.

La asignación de producciones realizada mediante programación lineal, y en general los resultados obtenidos, todos ellos de corto plazo, pueden señalar la necesidad de realizar movimientos estratégicos a largo plazo. Los precios sombra, correspondientes a las variaciones de los “lados derecho” del modelo primal, se encuentran formulados en el problema dual en un modelo lineal, proporcionan un criterio local para identificar los procesos que deben modificarse. Sin embargo, al considerar la posibilidad de realizar cambios estratégicos a largo plazo, se debe tomar en cuenta que las restricciones en el suministro de materias primas básicas, en la demanda de productos finales así como las capacidades instaladas varían. Por todo ello y teniendo en mente que se incorporarán nuevos procesos a la industria, es necesario entender en una forma mucho más profunda el efecto del entorno económico. Para estimar el efecto de modificaciones en suministros, demandas y capacidades pueden ser hechos estudios paramétricos.

El diagrama de flujo de la información mostrado en la Figura II.2 presenta la forma de emplear la planificación en corto plazo para realizar la planificación a largo plazo.

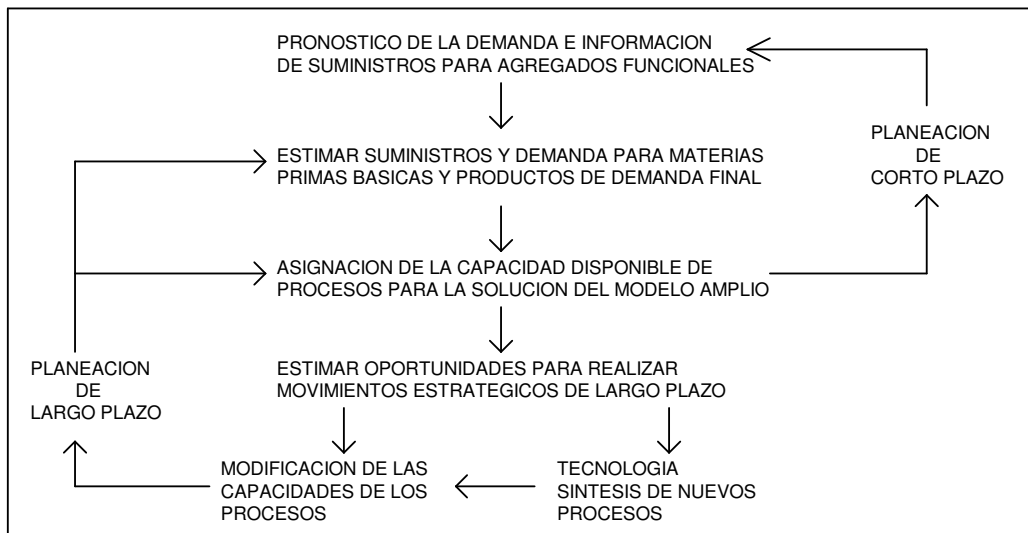


Figura II.2. Flujo de Información en la Planificación de la IPQ

En este se señala además de la modificación en las capacidades instaladas para cada proceso, la posibilidad de incorporar nuevos procesos.

Existe una diferencia fundamental entre la modificación de la capacidad instalada para un proceso ya implantado con respecto a la instalación de un nuevo proceso. Un proceso conocido no tiene, en general, resistencia a ser adoptado, si es rentable económicamente, en cambio, un proceso con una nueva tecnología no se adopta con la misma rapidez que el ya conocido a pesar de ser económicamente factible y superior.

Una nueva tecnología puede cambiar la estructura entera de la industria, debido a la apertura de nuevas rutas. La consecuencia de una nueva tecnología no puede ser vista

local y aisladamente, por lo que se requiere de un modelo amplio para visualizar su impacto de manera integral.

Para que las innovaciones de los procesos se difundan realmente en la red de procesos, se requiere, en teoría, que sea menos costoso que los existentes y que exista capital disponible para implantarla.

Existen otros aspectos, que deben tomarse en cuenta. Uno es la resistencia a adoptar nuevas tecnologías, debido al tiempo requerido para aprenderlas a usar y en perfeccionar su aplicación en las compañías existentes. Una curva de aprendizaje (Figura II.3), muestra que cuando un proceso se encuentra en la etapa inicial, su potencialidad para disminuir costos unitarios de producción puede no ser suficientemente atractiva.

En esa región de la curva, aunque hay una gran reducción en los costos unitarios conforme la producción se acumula, en el caso de que la producción sea realmente pequeña el efecto sobre el costo también lo será. En estas circunstancias es posible que un proceso recién implantado no pueda, en un inicio, elaborar el producto deseado a un menor costo que el proceso al cual sustituye.

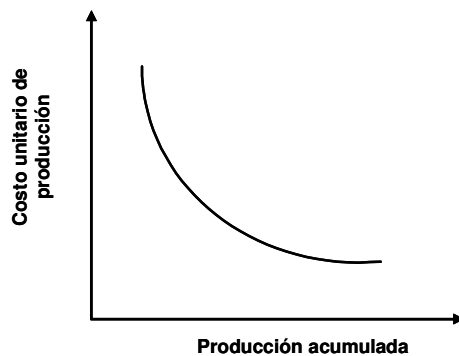


Figura II.3. Curva de Aprendizaje

Respecto a la curva de aprendizaje debe de observarse que cuando una tecnología es madura, su costo unitario de producción tiende a ser asintótico a un valor determinado, esto significa que el incremento en la producción acumulada tendrá un escaso efecto en el costo unitario de producción. En esta situación sólo podrá obtenerse modificación apreciable en el costo de producción cuando se cambie de proceso.

En este sentido, el valor de los modelos de planificación estratégica, es de primordial importancia en el desarrollo de tales pronósticos que permitan percibir en largo plazo la factibilidad de introducir en el mercado nuevos procesos y productos más competitivos.

Las oportunidades y problemas percibidos durante la planificación a corto plazo pueden orientar la investigación en la búsqueda de nuevas tecnologías. Esto afecta directamente la síntesis de procesos, ya que la factibilidad técnica es necesaria, aunque no suficiente para que una innovación forme parte de la red de procesos.

Se han desarrollado muchos otros modelos basados en programación lineal después de Rudd. Todos se han diseñado para cumplir con los balances de materia. La diferencia fundamental consiste en la función objetivo que se plantea para cada uno.

2.2.2 Stadtherr

Stadtherr [7] observó que entre el 40 y 80% de los costos de producción para la IPQ corresponden a las materias primas, por lo que la función objetivo que estableció para asignar las capacidades de producción se basa en la minimización del consumo de materias primas, cuantificado por el contenido de carbón de cada materia prima.

$$\text{F.O.: } \text{Min} \sum_{i=1}^I w_i r_i \quad \text{Ec. II.14}$$

donde w_i es la fracción en peso de carbón contenida en el compuesto "i". "I" es el número total de compuestos. r_i es el consumo de materia prima básica, tal y como en el modelo de Rudd, de quien también toma las restricciones.

2.2.3 Saxena

Saxena [8] se enfoca primordialmente a la resolución del problema de planificación a largo plazo. Presenta un procedimiento recursivo para determinar la capacidad instalada de diferentes procesos considerados, fundamentado en los sistemas recursivos desarrollados por Day [9]. Considera dos etapas para simular el crecimiento de la IPQ.

En el primer paso se establecen las capacidades a emplear en base a la resolución del problema de programación lineal.

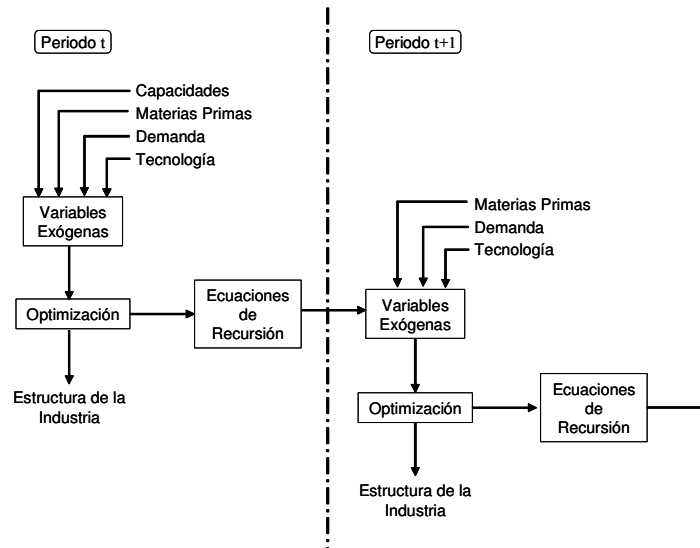


Figura II.4. Procedimiento Recursivo de Planificación para la IPQ

En el segundo paso, recursivo, las capacidades a modificarse en un período " $t+1$ " son determinadas por las decisiones tomadas en el período " t " y anteriores mediante las ecuaciones de recursión. Entonces se aplica nuevamente el primer paso para el período " $t+1$ ", y así sucesivamente hasta llegar al período final del horizonte de planificación. Figura II.4.

En el paso recursivo, Day presenta dos factores que deben considerarse al determinar la capacidad de una planta, ya que afectan las decisiones realizadas por los directivos:

- ↪ Existe una falta de inclinación por emplear tecnología desconocida, siendo proporcional la inversión que se realiza en una tecnología determinada a la experiencia previa que se tenga en la misma.
- ↪ No son deseables los cambios drásticos de capacidad en base a pronósticos de demanda que son en esencia inciertos y cuya distribución de probabilidades tiene un comportamiento disperso.

Para tomar en cuenta estos factores crea dos parámetros: PK_1 y PK_2 .

PK_1 es el parámetro de ajuste por adopción y lo relaciona con la tasa de adopción de una nueva tecnología. Lo considera igual al inverso del tiempo de construcción de las plantas (de uno a dos años).

PK_2 es el parámetro de ajuste por subutilización de la capacidad y lo considera igual a la inversa del tiempo requerido en que sea utilizada toda la capacidad instalada.

$$PK_1 = \left[\ln \frac{c(t_2)}{c(t_1)} \right] \frac{1}{\Delta T}$$

$$PK_2 = \frac{(PK_1)(c_t)}{c_t - x_t}$$

Donde:

$c(t_i)$ es la capacidad instalada en el momento t_i .

$$\Delta T = t_b - t_a$$

x_t es la producción en el tiempo " t ".

La ecuación recursiva que propone es:

$$c_{j(t+1)} = (1 + PK_1)c_{j(t)} - PK_2(c_{j(t)} - x_{j(t)}^*)$$

donde

$c_{j(t)}$ es la capacidad del proceso " j " en el año " t ", y

$x_{j(t)}^*$ es el nivel óptimo de producción para el proceso " j " en el año " t ".

El objeto de su estudio fue entender las fuerzas dinámicas involucradas en el desarrollo de la IPQ en Estados Unidos y proyectarla en una simulación de la dinámica industrial.

Realizó doce diferentes simulaciones para la IPQ, considerando diferentes juegos de valores PK_1 y PK_2 , fijados por él, y que van 0.25 a 0.55. Consideró que los factores de utilización (β) a los cuales se tienen incentivos para construir nuevas plantas son $\beta=0.8$ y $\beta=0.9$.

De las doce simulaciones, sólo dos tuvieron solución; en ellas, $PK_1=0.55$, $PK_2=0.25$ con $\beta=0.8$ en un caso, y 0.9 en el otro. Se obtuvieron las siguientes conclusiones:

Al comparar el comportamiento de los modelos con la industria real, se encuentra que 6 de las 8 tecnologías aceptadas por la IPQ real también lo son por el modelo.

La adopción de las tecnologías señaladas se realiza empleando al límite las capacidades instaladas de los nuevos procesos incorporados en forma reciente, lo que es similar a lo que ocurre en la realidad.

Respecto a la obsolescencia de procesos por la entrada de nuevas tecnologías, el modelo es capaz de mostrar las tendencias que se presentan en el comportamiento industrial.

Encuentra que la estructura generada para la industria es semejante a la que se tiene en la industria real, dando preferencia a las cadenas directas, es decir en donde se utilizan menos etapas de transformación desde los petroquímicos básicos hasta los finales.

2.2.4 Treviño

Treviño [10] realiza adiciones significativas al proyecto de Rudd. En esa etapa del proyecto, el modelo constaba con una sección de optimización lineal para determinar la producción óptima en base a la minimización del consumo de materias primas, con la restricción de cumplir los balances de materia, satisfacer la demanda y no exceder la disponibilidad de materias primas.

Sus contribuciones son:

- ↪ Agregar un término en la función objetivo para considerar la energía empleada en cada proceso, ésto en término de equivalentes de carbón.
- ↪ Incluir un término a la función objetivo para tomar en cuenta los costos de la inversión de capital.
- ↪ Incrementar el número de procesos considerados, además de considerar un término para tomar en cuenta la importación de compuestos, con lo cual su modelo se abre al comercio exterior.

La función objetivo que maneja sigue buscando la minimización de los equivalentes de carbono contenidos en la alimentación, considerándolos en términos de energía.

Para incluir el término de energía empleada, convierte el total de la energía requerida a la cantidad de combustóleo que sería necesaria y ésta a la cantidad de equivalentes de carbono correspondientes. El valor de un equivalente de carbono de la materia prima es

mucho mayor al valor de un equivalente de carbono empleado como combustible, por esto es necesario emplear un factor " α " y poder expresar la función objetivo en términos del equivalente de carbón de materias primas.

$$\alpha = \frac{\text{valor de un equivalente de carbón como combustible}}{\text{valor de un equivalente de carbón como materia prima}}$$

Para incluir los costos de inversión se basa en plantas de tamaño óptimo (incluyendo inversiones fuera de límites de batería, pero no terrenos ni edificios). Para mantener la consistencia de la función objetivo emplea β , la cual se define a continuación.

$$\beta = \frac{1}{\text{valor de un equivalente de carbón en la alimentación}}$$

Este factor debe de emplearse también en las importaciones. La función objetivo que maneja es:

$$\text{F.O.: } \text{Min } [(cf + (\alpha u + \beta m)p) + \gamma x] \quad \text{Ec. II.15}$$

Donde:

f es el consumo de materias primas.

p es el nivel de producción.

x es el nivel de importación.

c es el contenido de carbón en las materias primas.

u son los requerimientos de energía en equivalentes de carbono.

m es la inversión unitaria para plantas óptimas.

i son los costos de importación.

β es la matriz de requerimientos tecnológicos.

γ es el inverso del valor de un equivalente de carbono en la alimentación.

Treviño simuló la IPQ Mexicana para tres diferentes estrategias:

- ↪ Reducción al límite de la importación de petroquímicos básicos,
- ↪ reducción al límite de la importación de petroquímicos secundarios, y
- ↪ reducción al límite de toda importación de petroquímicos (básicos y secundarios).

Determinó las ganancias netas para cada estrategia, así como la tasa de retorno. Encontró que la mayor tasa de retorno se tiene para la estrategia que busca la reducción de todas las importaciones.

2.2.5 Fathi-Afshar

Fathi-Afshar [11] estableció la función objetivo expresada en términos monetarios, por lo que incluye costos y precios como coeficientes en la función objetivo, buscando representar el costo de producción para la industria completa. Enfoca el problema de considerar el exceso de producción. Para ello maneja dos F.O. en la minimización de costos. Con la primera optimiza la IPQ tratando de obtener el mejor resultado para cada proceso, mientras en la segunda pretende más bien la optimización de la IPQ integrada.

La función objetivo consta de tres términos. El primero se refiere a los costos de las materias primas que entran a la industria, el segundo a los costos de producción para cada proceso e incluye las materias primas requeridas para cada proceso individual, por lo que se busca el mejor desempeño de cada proceso. El tercero corresponde a la penalización del exceso de producción de cada compuesto.

$$\text{F.O.: } \min \sum_{i=1}^N P_i F_i + \sum_{j=1}^M C_j X_j + \sum_{i=1}^N (Q_i - D_i)(P_i - H_i) \quad \text{Ec. II.16}$$

Donde:

N es el número de compuestos involucrados.

M es el número de procesos involucrados.

P_i es el precio de la materia prima básica " i ".

F_i es el consumo de la materia prima básica " i ".

C_j es el costo unitario de producción. Incluye los costos de la materia prima empleada para cada proceso " j ", servicios, mano de obra y costos relacionados con la inversión.

X_j es la cantidad de producto principal elaborado por el proceso " j ".

Q_i es la cantidad del compuesto " i " elaborado por todas las tecnologías.

D_i es la demanda del compuesto " i ".

H_i es el valor del poder calorífico del compuesto " i ".

Esta función objetivo debe cumplir con las restricciones debidas a la disponibilidad de materia prima, no exceder la capacidad de producción de los procesos existentes y satisfacer la demanda de productos finales.

La penalización se da cuando se produce un exceso del compuesto " i ". Cada unidad en exceso de " i " incrementa el valor de la función objetivo en la diferencia del precio del producto " i " y su valor como combustible.

En la IPQ de los Estados Unidos, los precios de mercado de los productos petroquímicos intermedios son de hecho uno de los mayores factores de decisión en la selección de procesos industriales y las fluctuaciones de precios de dichos compuestos pueden inducir cambios en la estructura óptima de la industria. Buscando reflejar esta interacción entre la industria y la economía, los precios de los productos petroquímicos intermedios son incorporados a los costos de producción. En el caso de que la IPQ sea constituida como un todo, la transformación deberá comenzar con las materias primas básicas que son llevadas hasta productos finales de consumo. En otras palabras, los petroquímicos intermedios deben ser usados cautivamente y no deben tener valor por lo que respecta al consumidor. La función objetivo para la industria integrada es:

$$\text{F.O.: } \min \sum_{i=1}^N P_i F_i + \sum_{j=1}^M C_j^* X_j + \sum_{i=1}^N (Q_i - D_i)(H_i) \quad \text{Ec. II.17}$$

A diferencia de la función objetivo original, el término correspondiente a los costos de producción, en este caso C_j^* , no incluye a los compuestos que permanecen dentro de la IPQ, por lo que en este caso la IPQ se semeja más a un conjunto de procesos. La

penalización consiste ahora en asignar a la producción en exceso únicamente su valor como combustible.

2.2.6 Sophos y Mikkelsen

Sophos [6] y Mikkelsen [12] realizan la ampliación del modelo de programación lineal al trabajar con tres funciones objetivo. Las funciones consideradas evalúan de forma distinta la eficiencia de la IPQ: La maximización de la disponibilidad energética (maximización de la exergía), minimización del trabajo perdido y la minimización del consumo de materias primas (como consumo de carbono).

FUNCIONES OBJETIVO:

$$\text{Max Exergía } (\Phi_1): \quad \Phi_1 = \sum_j X_j \left(\sum_k \sum_i W_{ik} \beta_{ik} \right) \quad \text{Ec. II.18}$$

$$\text{Min Trabajo Perdido } (\Phi_2): \quad \Phi_2 = \sum_j X_j (T_0 R_s)_j \quad \text{Ec. II.19}$$

$$\text{Min Consumo de carbono } (\Phi_3): \quad \Phi_3 = \sum_i W_{ci} r_i \quad \text{Ec. II.20}$$

Donde:

X_j es la masa de producto principal obtenido mediante la tecnología "j".

W_{ik} es el flujo en masa del compuesto "i".

β_{ik} es la disponibilidad termodinámica específica del compuesto "i".

T_0 es la temperatura de los alrededores.

R_s es la cantidad de creación de entropía.

W_{ci} es la fracción masa de carbón del compuesto "i".

Estas tres funciones objetivo están sujetas a las mismas restricciones:

$$r + Ax - p = 0$$

$$r \leq s$$

$$p \geq d$$

Donde:

x es el vector de producción.

r es el vector de materias primas básicas que ingresan a la IPQ.

s es la disponibilidad de materias primas básicas.

p es el vector de productos finales elaborados.

d es la demanda.

A es la matriz de coeficientes de insumo-producto.

La resolución del problema lineal simple para cada una de las funciones objetivo demostró que los conjuntos de procesos seleccionados son diferentes dependiendo de la función objetivo elegida. Los tres óptimos determinados, cada uno con una función objetivo,

corresponden a la situación límite de la programación lineal multiobjetivo, donde el factor de peso es uno para una función y cero para las dos restantes.

Dado que los conjuntos óptimos son distintos, se procedió a buscar soluciones donde una determinada función objetivo no puede ser mejorada, sin afectar en un grado mayor en un sentido no deseado otra función objetivo involucrada, es decir, el óptimo de Pareto. Los conjuntos de mejores condiciones así obtenidas son conocidos como conjuntos no inferiores.

Es posible, de esta forma, encontrar una serie de soluciones de compromiso que sean las mejores estructuras para la IPQ considerando los tres puntos de vista en forma simultánea (en este sentido es importante determinar el factor de peso para cada función objetivo) y determinar qué procesos presentes en un conjunto solución no pertenecen a otro. Los procesos que no pertenecen al conjunto óptimo generado por alguna función objetivo, muestran debilidad en ese aspecto, aunque estén incluidos en los otros dos conjuntos solución. Esto permite detectar en qué aspectos podría ser conveniente mejorar un proceso.

2.2.7 Otros Modelos

Se han desarrollado otros modelos lineales para simular el comportamiento de la IPQ [13], [11], [14], [15], que parten de los fundamentos desarrollados en párrafos anteriores. Presentan algunas modificaciones menores en las aplicaciones o en los algoritmos. Otros modelos han buscado simular la IPQ mundial y aunque siguen los fundamentos anteriores se requiere considerar la existencia de diferentes regiones. Sigurdsson [16] emplea un modelo de programación lineal con un sólo objetivo (minimización de costos) para estudiar la IPQ mundial dividiendo al mundo en 12 regiones. Bell [17] también divide al mundo en regiones minimizando el costo de producción en cada una, para posteriormente optimizar el comportamiento mundial minimizando los costos de transporte.

2.3 Desventajas de la Programación Lineal

Al resolver el primal de un problema de programación lineal se tiene información para resolver el problema dual asociado. El dual puede ser analizado en términos económicos. Las variables duales conocidas como precios sombra representan el incremento en la función objetivo por producir una unidad más del producto correspondiente.

Los modelos de programación lineal pueden usarse para determinar el costo de producción de los compuestos químicos a través de los precios sombra. Chávez [18], analiza el modelo de Rudd, el primer autor cita que "quien realice la evaluación debe de estar seguro de como son afectados los precios sombra por la naturaleza de los modelos".

En el modelo, la demanda de productos es la fuerza motriz para la producción de compuestos. Para cada uno existe información acerca de su balance de materia, de su consumo de energía y de los requerimientos de inversión. Cuando un proceso es seleccionado por el algoritmo de programación lineal, el costo de la energía y de la inversión son contabilizados por la función objetivo, pero no así el costo de las materias

primas, a menos que éstas sean materias primas básicas que ingresen a la red. Esto se debe a que los productos intermedios no tienen valor explícito, al no salir de la red. Los precios sombra se pueden usar como un estimado del costo de los productos intermedios, Sin embargo, la presencia en este tipo de modelos de co-productos y de múltiples rutas para producir la misma molécula deben tomarse en cuenta.

La presencia de co-productos afecta la forma en que los precios sombra son calculados. Si existe un exceso de producción de un co-producto no se recibirá ningún crédito por él, ya que no es consumido dentro de la red. Si el co-producto no está en exceso, recibirá créditos de acuerdo a su precio sombra. Para el caso de procesos con co-productos que están en exceso y tienen un valor de mercado diferente de cero (por ejemplo, en el caso de que puedan ser exportados), el hecho de que el modelo considere dichos co-productos con un valor de cero es erróneo.

Los precios sombra representan el costo de producir una unidad extra de producto empleando el proceso aceptado (que no esté en su límite máximo de producción) de menor costo. Si todos los procesos se encuentran al límite el precio sombra es el menor de los costos de producción.

Debido a la complejidad y tamaño de los modelos, frecuentemente se presenta el problema de degeneración del dual; esto es que la solución al primal tiene una o más variables básicas con valor de cero que provocan múltiples soluciones del dual. Como resultado de la degeneración del dual, existen varios conjuntos de precios sombra para una solución óptima. Este problema puede ser evitado asignando un límite inferior para las variables básicas que tengan valor de cero.

La variable dual para los procesos (llamada también costo reducido) representa la desventaja en precio para los procesos que no forman parte de la solución óptima. El costo reducido es usado como herramienta para evaluar una nueva tecnología. La posibilidad de que el dual sea degenerado, debe ser verificada cuidadosamente cuando la evaluación de tecnologías es realizada.

Es importante hacer notar una de las características intrínsecas al empleo de modelos de optimización basados en programación lineal. Cuando se plantea un problema de programación lineal es necesario proponer una función objetivo y las restricciones a que ésta se debe sujetar. Al resolver el problema se tendrá el conjunto de valores que deben de tomar las variables para alcanzar el funcionamiento óptimo de la industria. Este planteamiento implica que quien resolvió el problema tendrá la libertad, y sobre todo el poder, de hacer que las variables tomen los valores indicados y se pueda alcanzar así el óptimo calculado.

En el contexto de la IPQ, el realizar una optimización lineal hará que invariablemente los intereses de la industria en su conjunto se impongan a los intereses de los procesos individuales, o de las empresas que están conformadas por conjuntos de procesos, lo cual sólo podría suceder, si acaso, cuando todas las empresas y procesos son propiedad de un dueño único, con el poder suficiente para imponer su criterio, por lo que cualquier

mejora en el conjunto beneficia al menos en forma indirecta a todas las empresas que conforman la red.

La programación lineal es un instrumento valioso en la modelación y simulación del comportamiento de la IPQ, pero sus características hacen necesario buscar otras formas de representarla adecuadamente.

2.4 Representación de la Industria Petroquímica Mediante Algoritmos de Recorrido

Una alternativa al empleo de la programación lineal es la utilización de algoritmos de recorrido. Con ellos se busca evitar los problemas que se presentan al optimizar la estructura de la IPQ mediante programación lineal. Los modelos basados en algoritmos de recorrido se orientan a la obtención del mayor beneficio para cada proceso individual, ya que en un medio ambiente competitivo, cada individuo busca su desempeño óptimo. Al evaluar a los procesos en forma individual no se puede garantizar el obtener una estructura óptima, como lo hace un modelo de programación, lo que se obtiene es una estructura mejorada. El empleo conjunto de modelos de programación y de recorrido puede permitir encontrar mejores soluciones.

2.4.1 Modelo de Chávez, Rodríguez y Escobar

Chávez [18] y, posteriormente Rodríguez y Escobar [19] establecieron una estructura gráfica como fundamento para simular la IPQ. En esta gráfica (grafo) formada por nodos y arcos, los nodos representan compuestos y procesos, mientras que los arcos entre ellos representan sus relaciones. Los arcos tienen dirección, lo que establece un orden entre nodos adyacentes, tal y como se presenta en la IPQ. Si se representa a la IPQ como una red de procesos, se tiene que en un extremo las materias primas básicas ingresan a la red mientras por el otro la abandonan los productos finales. Es de resaltar que un grafo en el que los nodos representen compuestos y los arcos procesos no es adecuado cuando algún proceso requiere más de un compuesto como materia prima. Cuando tanto los procesos como los compuestos son nodos es preciso distinguir entre ambos. De acuerdo a un grafo unión/intersección ("AND/OR") los nodos unión corresponden a aquellos en que deben ser conocidos un conjunto de nodos "hermanos" antes de que su antecesor lo sea, por lo que representan a los compuestos. El antecesor sería un proceso. Los nodos de intersección son aquellos para los que se necesitan definir sólo un nodo antes de que su antecesor lo sea. Estos nodos corresponden a los procesos químicos.

Al recorrer la red de los productos finales hasta las materias primas básicas se tiene un problema combinatorio ya que existen muchas alternativas diferentes para elaborar un mismo producto final. Se han desarrollado técnicas que evitan este problema al recorrer los grafos. En estas se emplean funciones para seleccionar el proceso que sea el mejor candidato.

El algoritmo de recorrido que emplea Chávez funciona de la siguiente manera:

- ↪ Se inicia en un nodo de compuesto.
- ↪ Selecciona un proceso que elabore el compuesto.

- ↪ Para cada compuesto empleado como materia prima del proceso inmediato anterior se repite el algoritmo hasta alcanzar los compuestos de entrada a la red.

2.4.2 Flujo y Manejo de la Información

El empleo de un algoritmo de recorrido requiere de información para poder seleccionar la mejor ruta a seguir, y es necesario considerar que al representar la IPQ se tendrá que:

- ↪ Algunos nodos de compuestos son empleados por más de un proceso.
- ↪ Para poder alcanzar compuestos petroquímicos intermedios se requiere atravesar parte de la red.
- ↪ El número de descendientes de un nodo es variable.

Estos aspectos son importantes, ya que el modelo es más sencillo si el acceso a cada compuesto es independiente y el número de descendientes es el mismo para cada nodo.

Para tener un acceso independiente a cada nodo de compuesto, se requiere romper la estructura en subgrafos, donde las interacciones químicas entre procesos se distinguen claramente y se puede acceder a los compuestos independientemente.

Se forma un tipo especial de grafo, en el que cada nodo tiene al menos un antecesor. Estos grafos son llamados árboles tecnológicos.

Una representación estándar de los árboles es la de los árboles binarios. Estos tienen la característica de que un nodo sólo puede tener dos descendientes, por lo que se requiere transformar las estructuras.

La transformación a árboles binarios se realiza de la siguiente forma: Cuando todos los descendientes de un nodo dado son del mismo tipo y el orden no es relevante, se crea una lista eslabonada de dichos nodos. Esto significa que todos los nodos que representan a los compuestos que intervienen en un proceso son colocados en una lista eslabonada (un compuesto es antecesor de otro). Este es el caso de las materias primas requeridas para la elaboración de un determinado compuesto petroquímico.

De la misma forma, los procesos empleados para eslabonar un compuesto se colocan en una lista eslabonada. Si se relaciona cada lista de compuestos con su nodo de proceso correspondiente y cada lista de procesos con su nodo químico (de compuesto), se tendrá una representación de un árbol binario. Figura II.5.

Esta representación no restringe el número de compuestos o procesos en una lista.

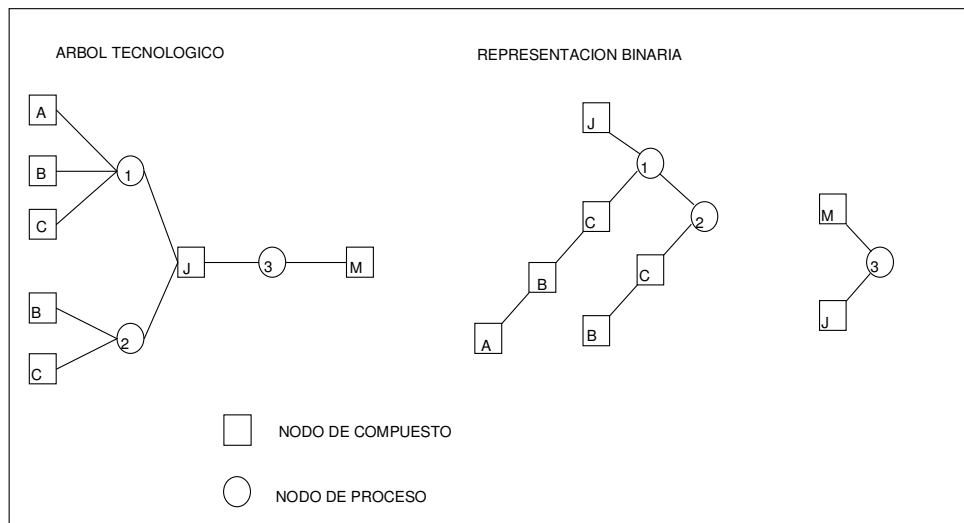


Figura II.5. Representación de las Cadenas Petroquímicas

La representación de árboles binarios permite el acceso independiente a cada nodo de compuesto y se tiene un número constante de descendientes para cada nodo. Esta estructura de datos requiere que parte de la información se duplique. Esto se debe a que algunos compuestos forman parte de más de un árbol tecnológico, y cuando cada nodo representa un compuesto, la información se repite para cada nodo de compuesto. Para evitar duplicar en lo posible la información, se emplea un vector con la información de compuestos. Este vector tiene una línea para cada compuesto, con la cual son relacionados los árboles tecnológicos. En dicha línea se conserva toda la información correspondiente a él, como puede ser el precio, el nombre completo, la fórmula química, su densidad, etc., además del identificador que permita relacionarlo con los nodos de compuestos. Así los nodos de compuesto sólo requieren el coeficiente de balance de masa o coeficiente insumo-producto y del identificador del compuesto y se evita duplicar información. El coeficiente insumo-producto es particular para cada compuesto en cada proceso y muestra los requerimientos reales de materias primas en cada proceso. El identificador del compuesto permite relacionar cada uno de estos con el renglón correspondiente del vector que contiene la información completa de cada compuesto. La estructura descrita simula la representación gráfica de una red de procesos. Figura II.6.

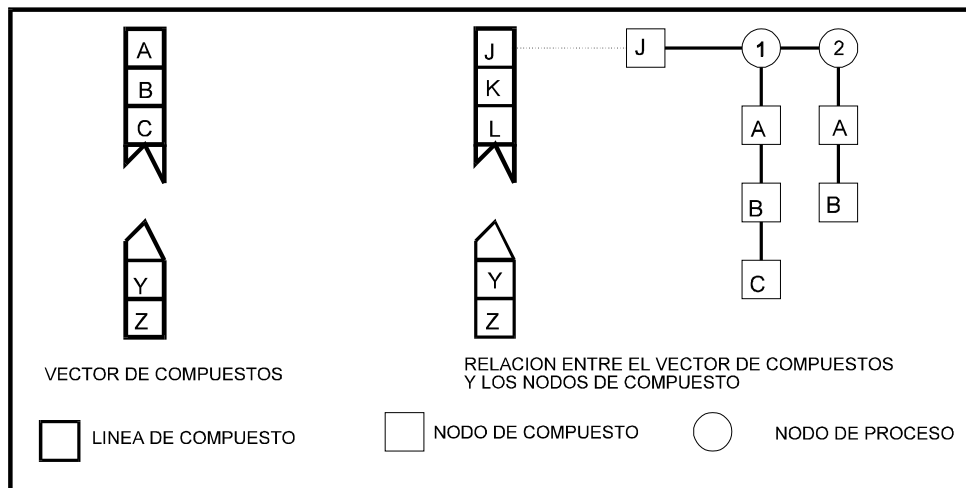


Figura II.6. Representación del Vector de Compuestos

Esta representación de la estructura de la IPQ, en la que interactúan las representaciones binarias con los vectores de compuestos sigue los principios de las bases de datos relacionales, donde el conjunto de las representaciones binarias y el vector de compuestos corresponde cada cual a una tabla.

Chávez [18] enfoca la simulación de la Industria Petroquímica considerando en ésta la interacción de muchos procesos individuales, que si bien forman cadenas, cada uno busca únicamente su mejor posición (valor de productos menor al precio internacional), sin importar qué sucede con los otros procesos que forman la cadena.

2.4.3 Herramientas Auxiliares

Como ya se ha dicho, el objetivo fundamental del programa desarrollado es el análisis de cadenas petroquímicas, por ello es necesario tomar de la base de datos sólo aquellos procesos que se deben de considerar. Para facilitar la integración de cadenas se desarrollaron varias herramientas auxiliares que se incluyeron en el conjunto de programas de cómputo. Estas herramientas permiten realizar las siguientes acciones:

Se generan los árboles tecnológicos corriente abajo (árbol corriente abajo: conjunto de los procesos que pueden emplear un compuesto determinado como materia prima y así sucesivamente hasta llegar a los productos finales) y corriente arriba (árbol corriente arriba: conjunto de procesos que elaboran los compuestos usados como materia prima para elaborar un producto y así sucesivamente hasta llegar a los petroquímicos básicos) y copiar los archivos correspondientes al archivo en el que se está trabajando (ver Figuras II.7 y II.8).

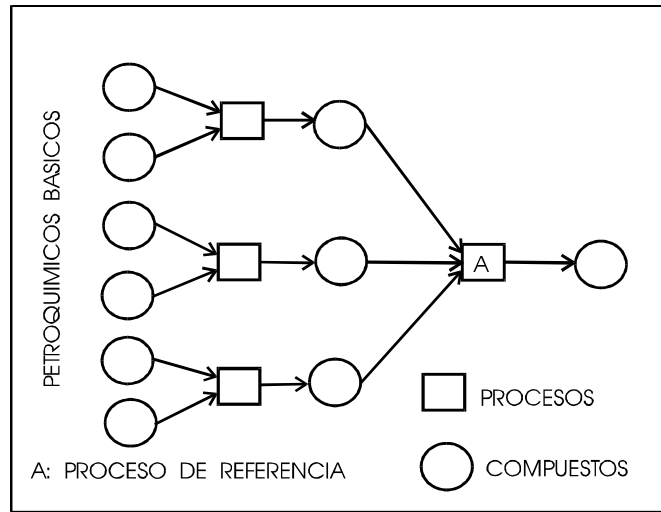


Figura II.7. Cadenas Petroquímicas Corriente Arriba

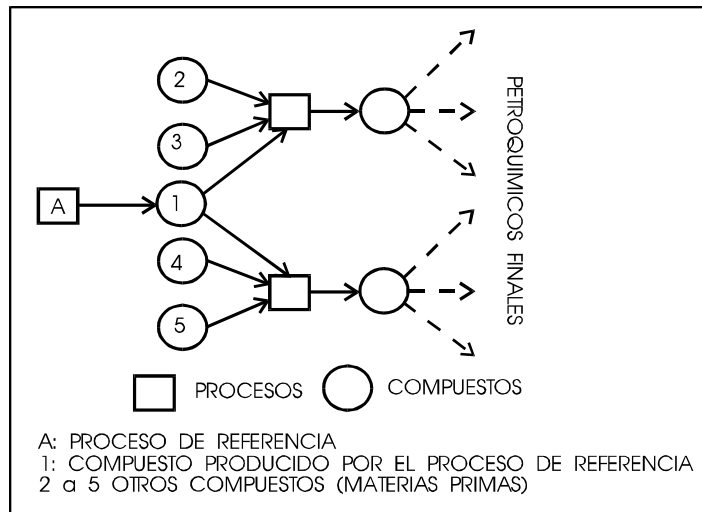


Figura II.8. Cadenas Petroquímicas Corriente Abajo

2.4.4 Requisitos Para Poder Realizar la Estructuración de una Cadena Petroquímica

La aplicación de algoritmo de recorrido debe de hacerse sólo cuando se ha recopilado la información suficiente para fundamentar adecuadamente los cálculos que se efectúan. Los requisitos que se deben cumplir son los siguientes:

- ↪ Determinar todos los procesos a incluir en el análisis de las cadenas seleccionadas.

- ↗ Todos los procesos a considerar deben formar parte de un archivo de datos. Los procesos no incluidos pueden incorporarse si se recopila la información suficiente.
- ↗ Establecer un precio internacional o un precio de referencia contra el cual pueda compararse el algoritmo de recorrido el valor que obtenga para el producto final de una cadena. Esto es necesario para poder establecer si la cadena entera es o no competitiva.
- ↗ Establecer un precio de referencia para todos los petroquímicos intermedios incluidos en la cadena para el algoritmo de recorrido. En el caso de que algún compuesto, consumido al interior de la cadena, no sea elaborado por ningún proceso, el algoritmo de recorrido asumirá que este compuesto se importa y debe de asignarle un costo que corresponderá al precio de referencia que se haya determinado.
- ↗ Para los petroquímicos intermedios se debe establecer si existen demandas exógenas a las cadenas consideradas. Establecer correctamente estas demandas evitará subdimensionar la capacidad instalada de los procesos involucrados.
- ↗ Determinar el porcentaje mínimo aceptable de capacidad de la planta instalada que se utiliza. Este porcentaje será común a todas las plantas.
- ↗ Aplicar recursivamente el algoritmo de recorrido cuando se analice la estructuración de una cadena petroquímica para más de un período.
- ↗ Para los análisis que incluyan la parametrización de los costos de servicios, de la tasa anual de recuperación de la inversión (ROI), los días de operación de la planta al año o el porcentaje de depreciación anual es necesario modificar el archivo que contiene la información de las bases de cálculo. Los valores de las variables antes mencionadas son comunes a todos los procesos.
- ↗ Para parametrizar el costo de los petroquímicos básicos o de los compuestos exógenos a la cadena, se requiere modificar el precio en todos los archivos que los incluyan y expresarlos en su equivalente en USD.

2.4.5 Limitaciones en la Aplicación del Algoritmo de Recorrido

De la aplicación del algoritmo de recorrido se obtiene la estructura de la Industria Petroquímica. Es decir, para cada periodo analizado se obtiene la capacidad instalada de cada planta, la producción asignada a cada una de ellas, el valor del producto y el valor agregado para los productos de cada uno de los procesos o tecnologías consideradas, la cantidad de plantas a instalar y la inversión que para ello se requiere.

- ↗ El algoritmo de recorrido sólo puede presentar los resultados
- ↗ El algoritmo de recorrido sólo realiza la estructuración de las cadenas petroquímicas en base a los datos disponibles. En el caso de que los datos empleados provengan de pronósticos, el resultado que se obtenga de la aplicación del algoritmo de recorrido estará condicionado a la validez de los pronósticos efectuados.
- ↗ El algoritmo de recorrido no permite realizar parametrizaciones para procesos individuales dentro de una cadena de las variables incluidas en las bases de diseño, ya que las bases de diseño son comunes a todos los procesos.

No es posible parametrizar en forma directa el valor de los petroquímicos intermedios producidos por la cadena. Sólo en el caso de que el algoritmo de recorrido determine que todos los procesos para elaborar un producto no cumplen con el porcentaje mínimo de ocupación de la capacidad instalada, y por tanto no se produce en compuesto correspondiente, se tomará en cuenta el precio de referencia (considerando en dicho caso que el compuesto se importa). Si el algoritmo de recorrido considerara siempre el precio de referencia en sus cálculos se podría parametrizar su valor.

3 Bibliografía

- [1] W. Leontief, "The Leontief Input-Output Model," 2007.
- [2] D. F. Rudd, S. Fathi-Afshar, A. Treviño, and M. A. Stadtherr, *Petrochemical Technology Assesment*. New York, U.S.A: John Wiley & Sons, Inc., 1981.
- [3] D. M. Himmelblau and T. F. Edgar, *Optimization of Chemical Processes*. Singapure: MacGraw-Hill International Editions, 1989.
- [4] L. M. Goreux and A. S. Manne, (Ed.), "Multi-Level Planning: Case Studies in Mexico," Netherlands: North-Holland Publishing Company - American Elsevier Publishing Company, Inc., 1973.
- [5] D. F. Rudd, "Modeling the Development of the Intermediate Chemical Production Technologies," *Chemical Engineering Process*, vol. 80, 1984.
- [6] A. Sophos, "Multiobjective Analysis and Planning of the Development of U.S. Petrochemical Industry and the Synthesis of Distillation Columns Sequences with Energy Integration Schemes," Minnesota, U.S.A.: University of Minnesota, 1981.
- [7] M. A. Stadtherr, "A System Study of The Petrochemical Industry," Wisconsin, U.S.A.: University of Wisconsin, 1978.
- [8] R. N. Saxena, "An Aproach to the Simulation of The Development U.S. Petrochemical Industry," Wisconsin, U.S.A.: University of Wisconsin, 1978.
- [9] R. H. Day, *Adaptative Processes and Economic Theory. Adaptative Economics Models*: Academic Press Inc., 1975.
- [10] A. A. Treviño and D. F. Rudd, "On Planning an Integrated Mexican Petrochemical Industry," *Engineering and Process Economics*, vol. 5, pp. 129-142, 1980.
- [11] S. Fathi-Afshar, D. Maisel, F. D. Rudd, A. Treviño, and W. W. Yuan, "Advances in Petrochemical Technology Assessment," *Chemical Engineering Science*, vol. 36, pp. 1487-1511, 1981.
- [12] J. K. Mikkelsen, "A system Study of the Oil and Petrochemical Industry in Western Europe with Special Considerations to this Future Industry in Norway," U.S.A.: University of Wisconsin-Madison, 1979.
- [13] M. Sokic and D. Stevancevic, "The Optimal Structure of the System of the Petrochemical Industry," *Chemical Engineering Science*, vol. 38, 1983.
- [14] M. Santiago, O. A. Iglesias, and C. N. Pamiagua, "Optimal Technology Paths for Chemical Processes," *Computers and Chemical Engineering*, vol. 10, pp. 421-431, 1986.
- [15] A. Sophos, E. Rotstein, and G. Stephanopoulos, "Multiobjective Analysis in Modeling the Petrochemical Industry," *Chemical Engineering Science*, 1980.
- [16] M. Sigurdsson, "Modelling of the Production and Trade Petrochemicals in the World," U.S.A.: University of Wisconsin-Madison, 1986.
- [17] J. T. Bell, "Modeling of the Global Petrochemical Industry," Madison, U.S.A.: University of Wisconsin-Madison, 1990.
- [18] O. E. Chavez, "Structural Simulation in the Analysis of the Chemical Industry," Madison, U.S.A.: University of Wisconsin-Madison, 1986.
- [19] F. Rodríguez and C. Escobar Toledo, "Metodología para la Evaluación de Tecnologías y su Aplicación en el Cálculo del Valor Agregado en Cadenas Petroquímicas," in *Instituto Mexicano de Ingeniería Química*. vol. Abril D.F., México: Instituto Mexicano de Ingeniería Química (IMIQU), 1994.

Capítulo III.

Métodos de Descomposición, Programación Matemática y Métodos de Ayuda para la Toma de Decisiones. Estado del Arte.

1 Métodos de descomposición. Estado del Arte.

“Parece, entonces, que fuera indispensable tomar el sistema completo en consideración para obtener una solución rigurosa de los problemas relativos a algunas partes del sistema económico. Pero esto sobrepasaría el análisis matemático y de los métodos prácticos de cálculo, aún si los valores numéricos de todas las constantes pudieran ser asignados. El objeto de este capítulo es mostrar cómo se puede evitar esta dificultad, mientras se mantenga un cierto nivel de aproximación, para llevarlo a cabo con la ayuda de símbolos matemáticos a través de un análisis útil de las cuestiones más generales que este sujeto de estudio trae consigo.” [A. Cournot, 1838, page 108. Recherche sur les principes mathématiques de la théorie du bien-être.]

El algoritmo de descomposición fue propuesto por primera vez por Dantzig and Wolfe [1]. Su algoritmo se caracteriza por la descomposición de un problema grande de programación lineal de bloque angular en subproblemas más pequeños, más manejables.

A partir de los artículos de Dantzig and Wolfe, se han desarrollado otros procedimientos para resolver problemas similares; de los cuales podemos citar a Arrow and Hurwicz [2], Lasdon [3], Kornai and Liptak [4], Geoffrion [5], Armand [6], Mesarovic, Macko and Takahara [7], Bensoussan [8], Burton, Daman and Loughridge [9], Collomb and Zylberberg [10], Escobar and Tremolieres [11], Escobar-Toledo [12], [13], entre otros.

La mayoría de las técnicas de programación matemática para la descomposición de grandes sistemas se han basado en el algoritmo de descomposición de Dantzig and Wolfe. Lo anterior se reafirma en uno de los trabajos de Mesarovic [7], quien reconoce que los grandes sistemas complejos invariablemente se formulan en sistemas más pequeños usando la técnica de descomposición, cada uno de ellos con sus propias metas y restricciones.

Dantzig and Wolfe refieren que para adaptarse a la jerarquía existente de los niveles de decisión, las organizaciones económicas se estructuran en sistemas de planificación económica a varios niveles.

Para caracterizar las interrelaciones entre la planificación a varios niveles y el procedimiento jerarquizado, debe uno referirse a la metodología de Arrow and Hurwicz de asignación de recursos con descentralización a través de los precios basados en los muy antiguos trabajos de Walras [14].

Comúnmente los elementos principales del proceso se representan esquemáticamente en la figura III.1.

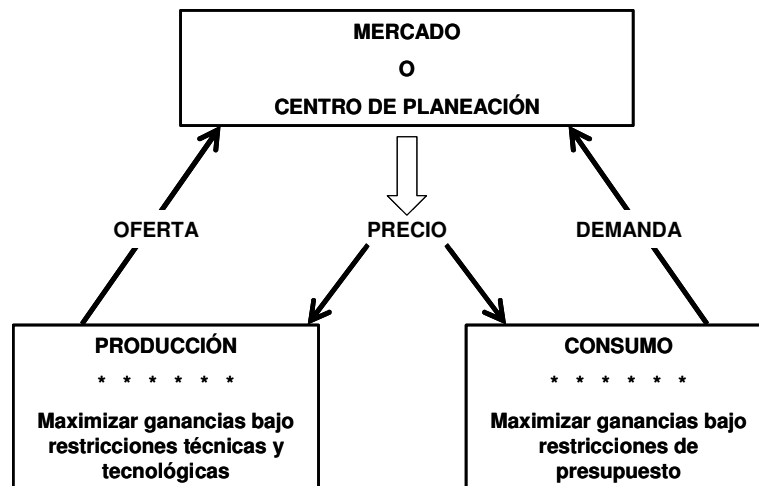


Figura III.1. Jerarquía e información descentralizada

Desde el punto de vista de estructura jerarquizada pueden distinguirse dos niveles conceptuales:

- ↗ En el nivel superior, la coordinación es llevada a cabo por el mercado o por un centro de planificación conocido como Unidad Central (UC). En cada ciclo la UC revisa los precios a fijarse aumentando los precios de los bienes con demanda excedente y bajando los precios de los bienes en oferta excedente.
- ↗ En el nivel inferior, un conjunto de productores y un conjunto de consumidores reciben los precios propuestos para los diversos bienes. Entre estas alternativas técnicamente realizables, cada empresa selecciona y transmite en respuesta, un vector de producciones netas que maximizan su ganancia a partir de los precios fijados. Por otra parte, cada consumidor, considerando sus restricciones presupuestales y los precios fijados, hace una proposición de demanda de los bienes que maximizan su función de utilidad.

Recordemos que existen dificultades en el problema de la planificación económica: el cálculo y la transferencia de información. Si admitimos que toda la información sobre los parámetros del problema está disponible para el centro de planificación, será necesario un procedimiento para encontrar la mejor solución de un problema de gran dimensión. Aparte de las dificultades numéricas y de cómputo, sería necesario considerar las dificultades para hacerle llegar a la UC toda la información. En principio cada unidad económica posee la información que le concierne: los consumidores conocen sus preferencias y los productores conocen sus posibilidades técnicas. Es así que un método de descomposiciones sugiere un cálculo jerarquizado con información parcialmente descentralizada; los cálculos que realice el centro no necesitarán el conocimiento de las técnicas utilizados por los diversos subsistemas.

Por otra parte, en un esquema coordinado, es necesario considerar la coherencia entre la lógica, el procedimiento y el mecanismo que se requiere representar. La coordinación en el ejemplo propuesto, no asegura generalmente una descentralización eficaz si ésta no se basa en un modelo económico de hipótesis muy restrictivas sobre todo cuando existen

interrelaciones entre los diversos subsistemas. De aquí que entonces sea necesaria una intervención más amplia de la autoridad central, por ejemplo transmitiendo no sólo precios sino cantidades o un orden jerárquico de resolución de los problemas de los diferentes subsistemas.

Así por ejemplo, podría decirse que un problema local de optimización es separable del programa global, si el conocimiento de los “precios duales” es suficiente para asegurar que el óptimo local sea compatible con el óptimo global.

Una de las contribuciones más importantes a este respecto la realizó Malinvaud [15].

Este tipo de técnica de descomposición basada en el algoritmo de Dantzig and Wolfe, realizan solamente la partición de las variables de decisión y de las funciones objetivo en conjuntos más pequeños e individuales. La suposición implícita es que todas las variables bajo control así como los objetivos de la UC pueden descomponerse en objetivos para las divisiones y que sería igual a la suma de los objetivos de las divisiones.

Sin embargo, Kornai and Liptak [16] reconocieron que algunas de estas variables pueden no estar bajo el control directo de la UC. No obstante su algoritmo supone también que el objetivo de la UC es la suma de las funciones objetivo de las divisiones que pueden entrar en conflicto con las de la UC. También para un sistema jerárquico en general, una suposición de este tipo es menos restrictiva que la utilizada por Dantzig and Wolfe. Por lo tanto, es necesaria una forma diferente de coordinar y optimizar los sistemas jerárquicos. Su algoritmo está basado en la Teoría de Juegos.

Retomando la revisión hecha en literatura encontramos que Lasdon [17] considera que la solución de los problemas que involucran problemas reales es frecuentemente obstruida por el tamaño. “*El problema es simplemente que es demasiado grande.*”

Los enfoques para resolver programas matemáticos grandes pueden ser divididos en dos clases: métodos directos y técnicas de partición o descomposición.

- ↪ Los métodos directos especializan un algoritmo existente a una clase particular de problemas. Estos son los más comunes en programación lineal, donde la herramienta básica es el método simplex.
- ↪ Los métodos indirectos están caracterizados por una descomposición del sistema original en subsistemas, cada uno con un subproblema independiente más pequeño. Dado que los subsistemas interactúan, resolviendo los subproblemas, en general, no se producirá la solución correcta.

El enfoque multinivel propone que se tomen en cuenta las interacciones, definiendo uno o más subsistemas de “segundo nivel”, los cuales influyen de alguna forma a los subsistemas originales, definidos en el primer nivel. Esta influencia puede tomar muchas formas, dependiendo del problema original, el tipo de descomposición del primer nivel, etc., y debe ser permitida evidentemente para cuando el sistema es inicialmente

descompuesto. La meta del segundo nivel es coordinar las acciones de las unidades del primer nivel, de tal forma que se obtenga la solución del problema original.

Uno puede extender esta idea definiendo subsistemas de tercer nivel, cada uno de los cuales coordina un número de unidades de segundo nivel, etc. La estructura resultante tiene la forma de una pirámide de unidades de toma de decisiones.

Lasdon propone que un sistema puede ser visto como un número de actividades fundamentales.

Cada actividad es considerada como una “caja negra” a la cual fluyen ciertas entradas (mano de obra, materia prima, dinero) y salidas (productos terminados, beneficios, etc.). Estas entradas y salidas serán llamadas productos. La cantidad de cada actividad, la cual es una medida numérica de que tanto de ésta es operada será llamada el nivel de actividad.

El problema de determinar todos los niveles de actividad tales que (1) todas las restricciones de los productos son satisfechas y (2) la cantidad total del producto especial requerido o producido es maximizada o minimizada es un programa matemático.

Posteriormente, Kornai [18] realiza una descripción sobre las características comunes de los métodos de descomposición.

Para un problema de programación matemática, el conjunto de sus datos iniciales es denotado por D . El vector de la solución óptima es denotado por P .

Si un método directo se utiliza en lugar de la descomposición, entonces se realiza la siguiente transformación sin un desvío, en una simple operación:

$$D \Rightarrow P \qquad \text{Ec. III.1}$$

Esto sucede, por ejemplo, cuando un problema de programación lineal es resuelto por el método simplex.

Utilizando un método de descomposición, se obtiene de D a P por una ruta indirecta. Primero que todo, el conjunto de datos D es dividido de acuerdo con la regla de descomposición. Un subconjunto es D_0 , los datos centrales, los otros subconjuntos son D_1, D_2, \dots, D_n los datos por sectores o unidades de producción descentralizadas. Comenzando por estos datos, la primera iteración se lleva a cabo. El primer cálculo central está basado sobre los datos centrales:

$$D_0 \rightarrow [M_0^1, B_1^1, B_2^1, \dots, B_n^1] \qquad \text{Ec. III.2}$$

en el cual M_0^1 es el contenido de la memoria central al final de la primera iteración, y B_i^1 es la salida de información central obtenida del primer cálculo central al final de la primera iteración.

Sobre la base de datos por sectores, el primer cálculo que se realiza es:

$$D_i \rightarrow [M_i^1, F_i^1] \quad (i = 1, \dots, n) \quad \text{Ec. III.3}$$

en el cual M_i^1 es el contenido de la memoria del sector "i", al final de la primera iteración, y F_i^1 es la salida de la información sectorial obtenida del cálculo sectorial "i" y transferido para el cálculo central al final de la primera iteración.

La primera iteración es seguida por la segunda iteración, y así sucesivamente hasta la iteración "s". Las transformaciones hechas en las "s" iteraciones son:

$$[M_i^{s-1}, F_1^{s-1}, F_2^{s-1}, \dots, F_n^{s-1}] \rightarrow [M_0^s, B_1^s, B_2^s, \dots, B_n^s] \quad \text{Ec. III.4}$$

Esta transformación es la función de respuesta del centro:

$$[M_i^{s-1}, B_i^{s-1}] \rightarrow [M_i^s, F_i^s] \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad \text{Ec. III.5}$$

Las funciones respuesta son de carácter determinista (dejando fuera las consideraciones de los casos degenerados). La información de entrada se convierte en una información de salida inequívoca.

Las funciones de respuesta incluyen una regla de memorización: Lo que está almacenado en la memoria central y en la sectorial desde los datos iniciales, los flujos de información entrantes recibidos antes de la iteración "s", y los resultados de los cálculos antes de la iteración "s". Además, éstos incluyen una regla de información liberada: Qué mensaje debe enviar el sector al centro y viceversa.

Las iteraciones prosiguen hasta la última, iteración "s". En esta conexión es necesaria una regla de terminación para prescribir las condiciones bajo las cuales el centro debería liberar la salida de información central terminal $B_i^s = B_i^*$.

Esta información de salida es la instrucción para llevar a cabo las operaciones terminales. Además, se debe establecer una regla de cálculo-solución:

$$[M_i^s, B_i^s] \rightarrow P_i^* \quad \text{Ec. III.6}$$

El vector $P_i^* = [P_1^*, \dots, P_n^*]$ obtenido como resultado de la ecuación III.6 es idéntico con la solución P óptima del problema original sin descomponer o es una aproximación aceptable. Es decir, de cualquier forma que se observe el resultado óptimo del problema original, debe ser conocido. Lo cual nos lleva a un proceso de centralización-descentralización de las decisiones y viceversa.

La especificación de un procedimiento de descomposición debe tener las siguientes características:

- ↳ La regla de descomposición del conjunto de datos iniciales

- ↗ Las funciones respuesta de la parte central y la sectorial
- ↗ La especificación de la información de entrada y salida fluyendo entre los niveles.
- ↗ La regla de terminación
- ↗ La regla de cálculo-solución

De acuerdo con Kornai [18] la utilización e interpretación de los métodos de descomposición pueden ser las siguientes:

- ↗ Procedimiento de cálculo matemático. El propósito original de los métodos de descomposición fue de carácter de cálculo. Éstos sirven para calcular la solución de problemas de programación matemática de gran escala.

Cuando se examinan los métodos de descomposición a partir de este punto de vista, un significado no institucional puede ser atribuido a los conceptos de “centro” y “sector”. Pero los cálculos “central” y “sectorial” son llevados a cabo en la misma computadora. Esta terminología sirve solo para denotar las diferentes partes de un algoritmo complejo y, adecuadamente, los bloques de rutinas de la computadora. Un problema de una estructura dada es más fácil resolver con un método de descomposición que con un método directo.

Desafortunadamente, no hay suficiente experiencia para decidir exactamente cuáles son tales casos, ya que no han sido publicados resultados experimentales que muestren cuál método es más eficiente bajo ciertas condiciones [19].

- ↗ Modelo teórico descriptivo de planificación. En este caso, no se realizan cálculos numéricos con un método de descomposición, pero se utilizan sólo las propiedades cualitativas clarificadas teóricamente del método para la descripción de algunas características de los procesos de planificación actual y para su modelación abstracta.

Ninguno de los métodos de descomposición es apropiado como modelo general para representar todas las características principales de la planificación. Su papel es más limitado. Cada método de descomposición puede perturbar uno u otra característica de una sección pequeña del proceso de planificación.

En el caso de Findeisen [20] un sistema complejo jerárquicamente ordenado tiene las siguientes definiciones:

- ↗ Existe un sistema de control que significa que existen influencias sobre el sistema para que se comporte de una manera deseada. Este sistema puede ser un sistema económico, un proceso tecnológico, un sistema ecológico o un sistema que contiene recursos que deben ser repartidos entre varios subsistemas. Figura III.2.

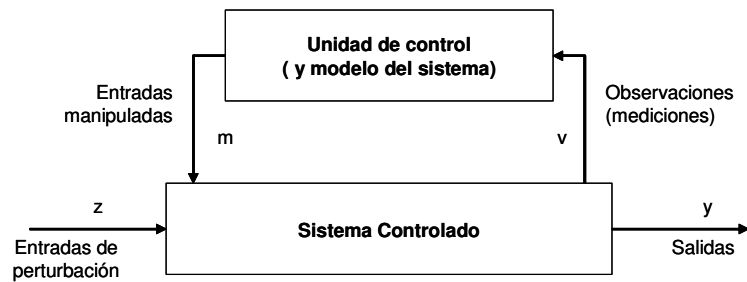


Figura III.2. Esquema de un sistema de control

- ↪ El sistema es complejo porque contiene un arreglo de elementos cuyos productos están interconectados con insumos como sucede en plantas industriales.

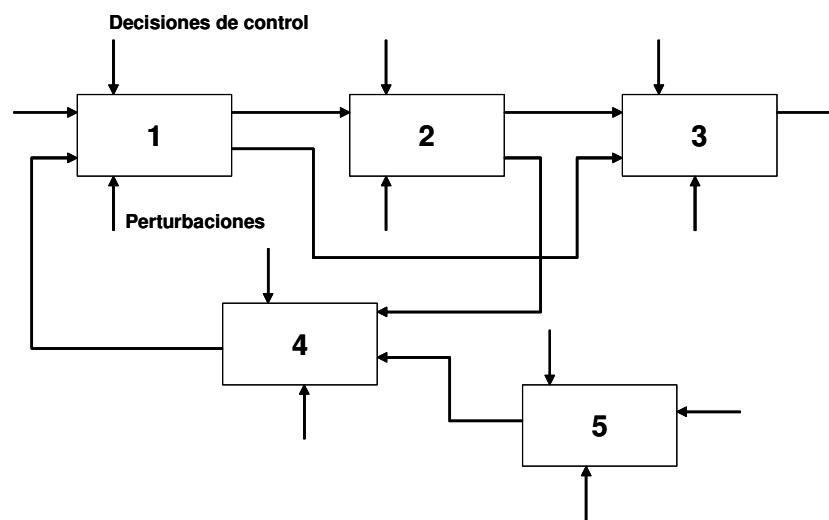


Figura III.3. Esquema de un sistema complejo

- ↪ El sistema es jerárquico porque contiene estructuras que pueden ser ordenadas de diferente manera.

Findeisen propone dos definiciones fundamentales en este tipo de estructuras jerárquicas.

- ↪ El concepto de multicapas, dónde el control de un sistema se lleva a cabo a través de capas, cada una de las cuales actúa en diferentes intervalos de tiempo.
- ↪ El concepto multinivel, dónde el control de un sistema complejo interconectado se divide en metas locales, una vez que se han introducido los subsistemas que deben ser controlados y que es coordinado por una unidad central

En el primer caso se consideran diferentes horizontes de tiempo, siendo la capa más alta la que tiene el mayor horizonte. El modelo se usa en cada capa dónde el grado de detalle

debe ser considerado de diferente forma siendo el nivel más alto el que tiene menores detalles.

En el segundo caso, en el concepto de multinivel se introducen metas locales y una coordinación apropiada, que ha sido inspirada en los métodos de descomposición de la programación matemática. Dicha descomposición se usa para resolver problemas de optimización, cuya meta es simplemente ahorrar esfuerzos computacionales. Sin embargo, en el enfoque multinivel el sistema puede ser perturbado y los modelos locales son inadecuados por lo que es necesario que exista un ente controlador o unidad central.

En los sistemas jerárquicos existe una característica común: la toma de decisiones ha sido dividida. Además esta división es una manera de controlar la estructura jerárquica en forma dependiente de la unidad central. Esto significa que existen varias unidades de decisión en la estructura, pero solamente algunas de ellas tienen acceso a las variables de control. Las otras que se encuentran en el nivel más alto de la jerarquía, son las que definen las metas y tienen como papel coordinar a las unidades de nivel inferior.

Un punto de vista más reciente lo presenta Anandalingam [21] quien escribe que la interconexión resultante de los subsistemas puede tomar diferentes formas, aunque la más común es la forma jerárquica en la cual una unidad dada (o tomador de decisiones), coordina a las unidades (o tomadores de decisión) de un nivel inferior. Figura III.4.

Un sistema descompuesto de esta forma es conocido como “descentralizado a varios niveles”.

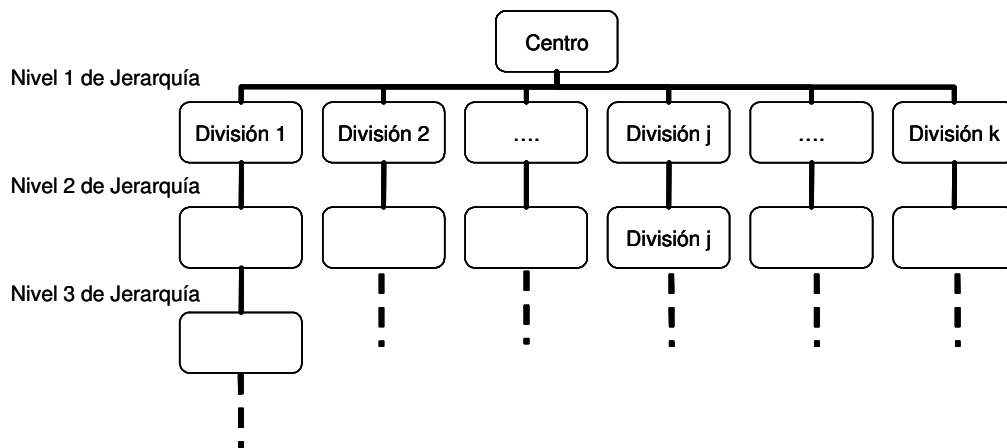


Figura III.4. Sistema Jerárquico Descentralizado

La información disponible para un tomador de decisiones sobre un nivel dado y la forma en la cual el tomador de decisiones puede hacer uso de esta información para influenciar o controlar a otro tomador de decisiones ha sido objeto de varios estudios [22], [23], [24], [25], [26].

Son de particular importancia los análisis sobre cómo asegurar que todos los tomadores de decisión, actuando de acuerdo a sus propias metas, alcancen la meta global del sistema.

La modelación de los sistemas multinivel descentralizados que permitan a todas las unidades tener sus propios objetivos, puede dividirse en dos casos:

- ↪ Sistemas descentralizados para los cuáles existe un sólo nivel central (quién tomará las decisiones) en el nivel más alto, llamado la Unidad Central (UC) y varios niveles abajo con diferentes unidades que se le denominan divisiones o seguidores, y
- ↪ Sistemas jerárquicos a varios niveles, donde existen varios niveles de decisión con un tomador de decisiones en cada nivel.

Este autor, basa su teoría en un comportamiento económico propuesto por Stackelberg [27], postulando que en cada caso, el comportamiento consiste en que la UC toma sus decisiones primero y las divisiones reaccionan optimizando sus propios objetivos, condicionados por la decisión de la UC.

Las divisiones se coordinan a través de precios o de cantidades de recursos que se pueden utilizar y que se encuentran bajo el control de la UC. La UC envía información tentativa sobre los precios o las cantidades de recursos que se pueden utilizar por las divisiones, cada una de las cuales debe transmitir los planes óptimos de producción basada en esta información y en sus objetivos individuales. En las etapas sucesivas del algoritmo, los planes tentativos de las divisiones son coordinados por la UC, quien modifica su información. Un plan óptimo para la UC, emerge cuando no existe información que deba ser modificada.

Existen otros trabajos de interés para esta parte de la tesis que se basan en White and Simmons [28], donde se discute que un sistema complejo como los que se encuentran en sectores industriales, está intrínsecamente estructurado, es decir que puede ser observado como un conjunto de sistemas organizados interconectados. Explotando esta estructura, es posible descomponer el problema de controlar un sistema complejo en un subconjunto de subproblemas interrelacionados. Cada subproblema puede resolverse independientemente de los otros con interconexiones entre los subproblemas en los que existe algún tipo de coordinación.

Este enfoque lleva naturalmente al estudio de métodos de control jerárquicos a varios niveles. En casos donde la UC pueda formular los problemas en términos de problemas de programación lineal y no-lineal, existen buenas herramientas ya probadas.

Desde el punto de vista de la Investigación de Operaciones, el control de un sistema muy grande es difícil ya que, entre otros problemas, la tarea de formular modelos y objetivos adecuados, es compleja.

En el contexto petrolero se conocen algunas tentativas de formalización de modelos descentralizados: unas atacando el problema de descentralización entre varias refinerías [8], [9] y otros la descentralización interna entre varias unidades de refinación.

2 Programación Matemática

Enseguida nos proponemos proporcionar una visión muy resumida de la Programación Lineal, la Programación Entera Mixta y la utilización de redes, considerando que para los estudiosos de la Investigación de Operaciones (IO), éstas son conocidas.

2.1 Programación Lineal

Los problemas de Programación Lineal se caracterizan por la existencia de un gran número de soluciones que satisfacen ciertas condiciones llamadas de “base” para cada problema.

Una solución que satisfaga tanto las condiciones básicas del problema como el objetivo (Función Objetivo) dado, recibe el nombre de solución óptima. El problema de programación lineal se establece siempre por un modelo matemático que se expresa por ecuaciones y/o desigualdades lineales.

Estas relaciones son de la forma:

$$\begin{array}{l}
 a_{11} x_1 + a_{12} x_2 + \dots + a_{1j} x_j + \dots + a_{1n} x_n = b_1 \\
 a_{21} x_1 + a_{22} x_2 + \dots + a_{2j} x_j + \dots + a_{2n} x_n = b_2 \\
 \text{-----} \\
 a_{i1} x_1 + a_{i2} x_2 + \dots + a_{ij} x_j + \dots + a_{in} x_n = b_i \\
 \text{-----} \\
 a_{m1} x_1 + a_{m2} x_2 + \dots + a_{mj} x_j + \dots + a_{mn} x_n = b_m \\
 x_1, \dots, x_j, \dots, x_n \geq 0
 \end{array}$$

En donde:

a_{ij} son coeficientes conocidos,
 b_i son los “lados derecho” conocidos
 x_j son variables.

Este conjunto de ecuaciones que representa el problema, necesita además una función lineal que expresa el objetivo (la “función objetivo”) y que es la que se maximiza o se minimiza.

$$\text{Max } c_1 x_1 + c_2 x_2 + \dots + c_j x_j + \dots + c_n x_n \qquad \text{Ec. III.7}$$

Este sistema tiene diferentes formas de expresión matemática:

$$\text{Max } \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad \text{Ec. III.8}$$

Sujeto a que:

$$\sum_j a_{ij} x_j = b_i \quad \forall i = 1, \dots, m$$

$$\text{con } x_j \geq 0 \quad \forall j = 1, \dots, n$$

Restricciones formadas por un conjunto de igualdades o desigualdades.

Vectorialmente:

$$\text{Max } CX$$

$$AX = B$$

$$X \geq 0$$

Ec. III.9

Puede observarse que el sistema contiene “m” ecuaciones y “n” incógnitas.

2.2 Descripción a grandes rasgos del Método Simplex

Se parte de una base cualquiera (vértice) y mediante el algoritmo de Dantzig [29] se puede pasar a otro vértice siempre y cuando en este punto se experimente una mejora en la función objetivo (F.O.). Cuando ya no se puede pasar de un vértice a otro contiguo, con un mejor valor (más grande o más pequeño dependiendo de si el problema es maximizar o minimizar) para la función objetivo, es que se ha alcanzado el óptimo. El que se pueda efectuar el procedimiento depende de la propiedad de convexidad de los programas lineales. Los hiperplanos de restricciones general un “casco” o “cono” que siempre es convexo, y por lo tanto no presenta máximos o mínimos locales y siempre pasando de un valor a otro mejor de la F.O., se llegará al óptimo en un número finito de pasos.

Si una solución básica factible contiene “m” variables positivas, se llama solución básica factible no degenerada; si una de las “m” variables es cero, entonces la solución es degenerada.

A un problema de programación lineal, llamado ‘primal’, está siempre asociado su ‘dual’ de gran importancia para llevar a cabo parametrizaciones y de ayuda para interpretar adecuadamente el problema original (el ‘primal’).

A continuación se expone el problema dual asociado al primal:

Primal	Dual
$\text{Max } Z = g_1 X_1 + g_2 X_2$	$\text{Min } F = b_1 u_1 + b_2 u_2$
s.a.q.:	s.a.q.:
$a_{11} X_1 + a_{12} X_2 \leq b_1 \{u_1\}$	$a_{11} u_1 + a_{22} u_2 \geq g_1$

Primal	Dual
$a_{21}X_1 + a_{22}X_2 \leq b_{21} \{u_2\}$	$a_{12}u_1 + a_{22}u_2 \geq g_2$
$X_1, X_2 \geq 0$	$u_1, u_2 \geq 0$
En el óptimo:	u_1, u_2 variables duales asociadas al primal
$Max Z \equiv Min F$	

Generalización:

- ↔ La columna (j) de los coeficientes en el primal es igual a la línea (j) de los coeficientes en el dual.
- ↔ La línea de los coeficientes de la función objetivo del primal es igual a la columna de los términos constantes del lado derecho del dual.
- ↔ La columna de los términos constantes del lado derecho del primal es igual a la línea de los coeficientes de la función objetivo del dual.
- ↔ Las desigualdades y el sentido de la optimización se invierten en los dos problemas.

Las relaciones entre el problema dual y el problema primal se expresa de este modo:

Primal (Maximización)	Dual (Minimización)
Función objetivo	Términos constantes del lado derecho
Términos constantes del lado derecho	Función objetivo
Columna (j) de los coeficientes	Línea (j) de los coeficientes
Línea (i) de los coeficientes	Columna (i) de los coeficientes
Variable $j \geq 0$	La relación j es una desigualdad del tipo (\geq)
Variable (j) sin restricción de signo	La relación j es del tipo (=)
La relación i es del tipo (\leq)	La variable i es del tipo (≥ 0)
La relación i es del tipo (=)	La variable (i) es sin restricción de signo

La solución óptima es el valor de todas las variables de decisión en el óptimo así como el de las variables de holgura.

Si ciertas variables se encuentran en su cota inferior, otras se podrán encontrar en su cota superior, a éstas se les llama "variables fuera de la base". La F.O. está determinada por el conjunto de restricciones contenido en el modelo.

A cada variable fuera de la base le corresponde un "costo reducido" asociado. Este costo representa el efecto que sobre la función objetivo tiene un incremento marginal de esa variable.

$$\text{Costo reducido} \approx \frac{\Delta Z}{\Delta X}$$

A cada restricción que se encuentre bajo la forma de una desigualdad se encuentra asociada una variable de holgura. Esta holgura es una variable que tiene una interpretación importante en el contexto de la toma de decisiones. Las variables de holgura, tampoco pueden tomar un valor negativo.

Una variable de holgura fuera de la base corresponde a una restricción activa que se satisfizo bajo la forma de una ecuación, y entonces de una igualdad.

Una variable de holgura que se encuentre en la base y sea positiva, corresponde a una restricción inactiva que no incide sobre el valor de la función objetivo en el óptimo.

Para cada restricción, se calcula simultáneamente el valor marginal del recurso que esta restricción pudiera representar, llamado también “precio sombra”. Este valor marginal representa el efecto que sobre la función objetivo tiene un incremento marginal de este recurso, es decir, del valor del lado derecho de la restricción.

De aquí que:

$$\text{Valor marginal}_i \approx \frac{\Delta Z}{\Delta b_i}$$

Donde b_i , es el valor correspondiente al lado derecho de una restricción; este valor puede llamarse también “disponibilidad”.

2.3 Las grandes familias de los programas lineales

Existen varias maneras de clasificar los programas lineales. Se puede por ejemplo, clasificarlos en términos de la estructura del modelo. Aquí se presentan algunas de las estructuras más frecuentemente utilizadas en programación lineal. Ciertos modelos de estas grandes familias pueden presentarse como combinaciones de estas estructuras. Sin embargo, el hecho de describirlas puede facilitar la modelación de varios problemas en dominios muy diferentes.

2.3.1 La estructura de ingreso

Las variables de decisión corresponden al nivel de un cierto número de actividades. Los recursos necesarios para llevar a cabo estos niveles de actividades se obtienen proporcionalmente. Las restricciones corresponden generalmente a la disponibilidad limitada de los recursos. Esta estructura se presenta en varios problemas tales como la planificación o programación de la producción

2.3.2 La estructura de mezcla

En estos problemas, la cantidad de cada recurso requerido para llevar a cabo una actividad no es fijo y debe también determinarse de manera de respetar un cierto número de restricciones de calidad. Este tipo de estructuras necesita, generalmente, la utilización con variables de doble índice (x_{ij}) es la cantidad del ingrediente “ i ” utilizado para efectuar la actividad “ j ”. Esta estructura se utiliza en problemas de refinación de petróleo, de composición de productos, etc.

2.3.3 La estructura multiperiodo

Estos problemas presentan la particularidad de necesitar de decisiones dinámicas, ya que las decisiones tomadas en un período dado, tienen una influencia sobre los recursos disponibles en períodos sucesivos. Las variables de decisión contienen subíndices por cada período y uno de ellos es el subíndice “ t ” que indica el paso del tiempo. Esta estructura se utiliza en problemas de planificación o de programación de la producción, en problemas de gestión financiera, etc. muchas veces en estos problemas la multiperiodicidad se debe a la demanda que de un producto que debe ser satisfecha en cada uno de los períodos que representan el horizonte de planificación.

2.3.4 La estructura de cobertura

Este tipo de estructuras se parecen a los problemas de ingreso, salvo que en este caso se trata más bien, de que al decidir el nivel de cada actividad se debe satisfacer un conjunto de restricciones de tipo menor o igual. El ejemplo más elocuente, es el de la fabricación de horarios para personal de manera de satisfacer una demanda dada. Otro ejemplo es aquél en donde se elige el lugar donde se deben colocar puntos de servicio.

2.3.5 La estructura multietapas

Este tipo de estructuras presenta una analogía con las empresas integradas verticalmente, pero pueden extrapolarse a varias empresas en donde la característica es que el producto de una unidad de producción se vuelve el insumo, el recurso o la materia prima de otra unidad de producción. La modelación se parece a los problemas con estructura multiperiodo y pueden combinarse con esta última. Así las variables pueden tener varios subíndices que representen la actividad, la etapa y el transcurso del tiempo.

2.3.6 La estructura en forma de redes

Esta estructura puede utilizarse para problemas de transporte pero también para problemas de camino crítico, de flujos, etc.

En la utilización de cada modelo de programación lineal existe un cierto número de hipótesis que se refieren al sistema que se desea representar:

↳ Hipótesis de certidumbre

Todos los parámetros del modelo se conocen con absoluta certidumbre y desde este punto de vista el modelo de optimización es determinista. En realidad pueden existir varios coeficientes que contengan algún tipo de incertidumbre y por lo tanto de riesgo. Si

se desea que el modelo se mantenga como determinista un análisis de sensibilidad permitirá estudiar el efecto que sobre la solución tengan las variaciones de los valores de los parámetros. En resumen, todos los parámetros, a_{ij} , b_i , c_j deben conocerse con certidumbre. No obstante, algunos de estos parámetros podrán estar sujetos a incertidumbre, pero en ese caso o bien las operaciones de parametrización o bien la distribución de probabilidades de alguno de ellos servirían para cumplir con esta suposición.

↳ Hipótesis de linealidad

La función objetivo y la estructura de las restricciones son expresiones lineales de las variables de decisión. En particular los rendimientos marginales son constantes para cada actividad tomada por separado.

↳ Hipótesis de proporcionalidad

La cantidad de cada recurso utilizado para cada actividad dada es proporcional al valor del nivel de actividad, no existiendo por lo tanto, un consumo fijo; de la misma manera, la contribución a la función objetivo de una actividad dada es también proporcional al valor del nivel de la actividad. En resumen, cada unidad de cada variable de decisión x_j contribuye en c_j unidades a la función objetivo y en a_{ij} unidades en la restricción considerada.

↳ Hipótesis de aditividad

El valor de la función objetivo es igual a la suma de las contribuciones de cada una de las actividades; de la misma manera, la cantidad de recursos utilizados es igual a la suma de los recursos utilizados por cada una de las actividades. Esta propiedad de aditividad excluye por lo tanto las propiedades de complementariedad. Tales contribuciones, son, por lo tanto independientes de los valores de las variables de decisión.

↳ Hipótesis de divisibilidad

Cada variable de decisión es decir, cada nivel de actividad puede tomar un nivel real cualquiera, por ejemplo un valor fraccionario. Esto sucede aún si todos los parámetros que definen un problema de programación lineal son números enteros. Si una variable debiera necesariamente tomar valores enteros entonces será necesario formular el modelo con una restricción adicional que daría por resultado que se tuviera la programación en números enteros.

2.4 Programación Entera Mixta

La programación mixta-entera es una extensión de la programación lineal, aplica un número limitado de variables especiales adicionales para ser incluidas en un modelo. A estas variables se les permite tomar solamente valores enteros. La inclusión de estas variables enteras amplía el campo del tipo de problemas que pueden ser formulados y resueltos.

Una de las hipótesis básicas en PL consiste en suponer que las variables de decisión pueden tomar todos los valores reales que pertenezcan a un dominio definido por la intersección de restricciones lineales.

En realidad, existen varias aplicaciones donde los valores tomados por las variables de decisión, sólo tienen sentido si son enteros. La programación lineal en números enteros se interesa en el caso donde un problema de optimización puede modelarse bajo la forma de un PL donde no obstante, ciertas variables de decisión deben tomar valores enteros.

↳ El Problema:

Consideremos un problema combinatorio de optimización (P):

$$(P) \text{ Max } cx$$

s.a.q.

Ec. III.10

$$x \in X \subset \{\text{enteros}\}^n$$

Donde x^* sería la solución óptima (P).

La solución óptima de un problema combinatorio como el mostrado, se encuentra siempre dentro de la región factible, es decir en un punto interior del polígono de soluciones, pero no pertenece a uno de los vértices como sucede con la programación lineal.

Un Problema combinatorio común como el que se muestra en la Figura III.5, es un problema de programación entera.

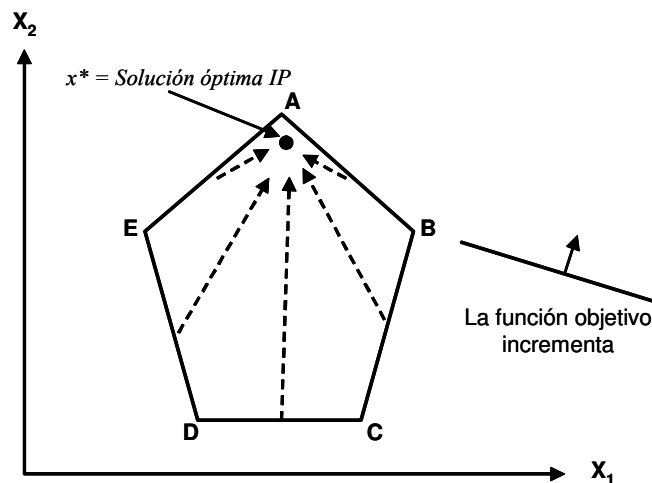


Figura III.5. ¿Cómo se comporta la solución óptima entera con respecto a la función objetivo y las restricciones?

Como puede observarse las “ n ” combinaciones posibles están representadas por los valores enteros que pueden tomar las variables $x \in X \subset \{\text{enteros}\}^n$, en donde n es el número de variables sujetas a la restricción.

La solución óptima de un problema combinatorio como el mostrado, se encuentra siempre dentro de la región factible, es decir en un punto interior del polígono de soluciones, pero no pertenece a uno de los vértices como sucede con la programación lineal. Figura III.6.

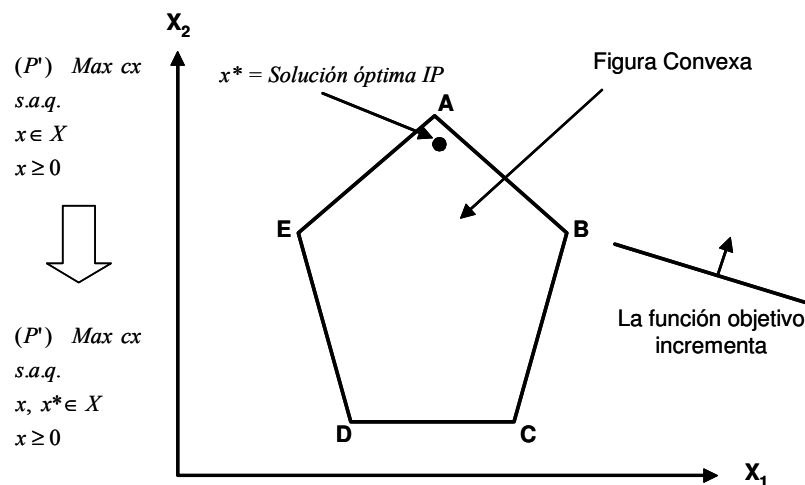


Figura III.6. ¿Qué pasa si se incluye la solución entera óptima como una restricción?

Este tipo de variables en restricción construidas adrede se les llama “restricciones de integralidad.”

Es conveniente señalar que la adición de restricciones de integralidad, transforma algunas de las propiedades de PL. Por ejemplo, deja de ser verdad que la solución de un problema se encuentre necesariamente en un punto extremo del poliedro y por lo tanto, la técnica de solución debe pasar por un proceso de enumeración implícita de todos los puntos admisibles. Es por esta razón que la solución de este tipo de problemas representa un esfuerzo de cálculo importante ya que aumenta exponencialmente según el número de variables que deban tomar valores enteros. El problema es también por esta razón, combinatorio. Por otra parte, los razonamientos del dual asociado, no tienen sentido.

Con frecuencia se desprecian las restricciones de integralidad para resolver el problema, este caso se conoce como. “relajación” del problema original. Una solución entera puede obtenerse por redondeos de la relajación. Es importante señalar que una solución redondeada no satisface forzosamente el conjunto de restricciones del problema original.

La Figura III.7 que sigue, presenta una ilustración de un programa en números enteros.

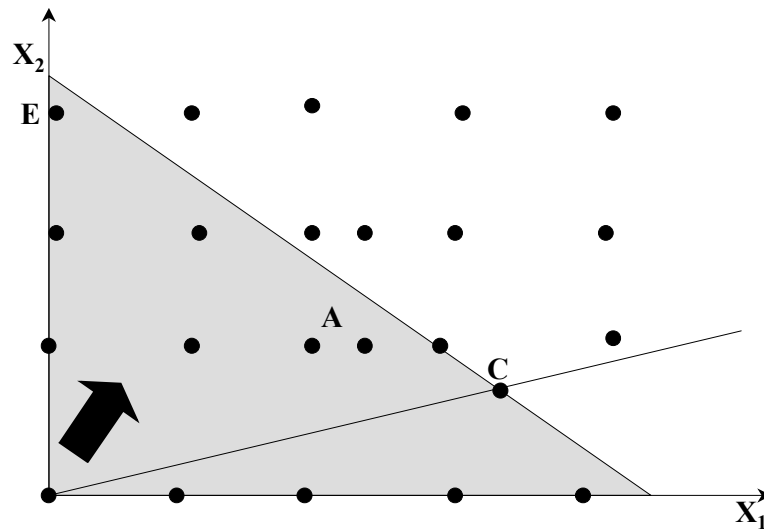


Figura III.7. Representación gráfica de la solución de un programa con números enteros

Se puede constatar que:

- ↗ La solución del problema se sitúa en el punto E, mientras que el de relajación se sitúa en el punto C.
- ↗ Ninguno de los puntos vecinos de C, obtenidos por redondeo de los valores de las variables, es admisible.
- ↗ El punto A, es una solución admisible, que es también un óptimo local, al igual que los puntos vecinos de A, obtenidos cambiando el valor de una de las variables. El valor del punto A no proporciona a la F.O. un valor más grande que el óptimo. Por lo tanto, no se puede verificar la optimalidad de un punto sólo con las propiedades locales.

2.5 Métodos de Solución

Entre los métodos de solución utilizados en programación entera se encuentra el de la enumeración implícita. Este consiste en separar el conjunto de soluciones admisibles en regiones distintas en las cuales se buscará la solución de un problema de PL sin las restricciones de integralidad. En la Figura III.8 se presenta un ejemplo de este método, indicando como puede subdividirse la región admisible en dos partes. Una parte donde X_2 es nula ($= 0$) y otra donde $X_2 \geq 1$, de esta forma se elimina la región donde se encuentra la solución no entera, C.

Las regiones se van subdividiendo de más en más partes hasta la solución del PL relajado que corresponda o satisfaga ciertas restricciones de desigualdad. Cada vez que una región se subdivide se elimina ésta por medio de restricciones apropiadas, una parte que sólo puede contener la solución del problema. Se despliega así en un árbol llamado árbol de enumeración implícita. Cada una de las regiones corresponde a un nodo de este árbol. Figura III.8.

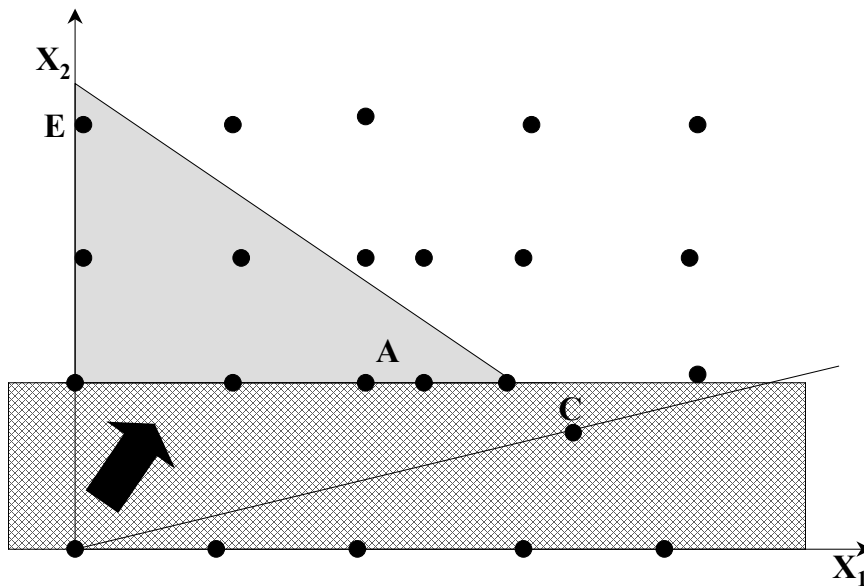


Figura III.8. Representación del Método de Enumeración Implícita para un PL con números enteros

2.6 Optimización en Redes

2.6.1 Significado de los modelos de redes

Los modelos de optimización en redes son un caso especial de los problemas de programación lineal.

Para nuestro propósito, una red es definida como un grafo que consiste de nodos y arcos que conectan diferentes pares de nodos. Cada arco tiene una dirección. Un árbol es una red especial que tiene exactamente p nodos y $p-1$ arcos interconectados y no puede contener retroalimentaciones.

Las redes de transporte son diagramas que ayudan a elaborar un modelo matemático para analizar la distribución de materiales desde ciertos puntos de origen hasta ciertos puntos de consumo, destino, almacenamiento.

Una red es un conjunto de nodos conectados por arcos. Los nodos son puntos donde se origina o termina algún tipo de flujo de materiales, mientras que los arcos, son canales a través de los cuales los materiales fluyen (o se trasladan). Una ruta es una secuencia de arcos que unen dos nodos.

Un árbol es un conjunto de arcos que conectan nodos sin formar circuitos cerrados. Los tipos de análisis que se pueden hacer, responden las preguntas siguientes:

- ↳ ¿Cuál es la distribución de menor costo?

- ↗ ¿Cuál es la ruta más corta entre dos nodos?
- ↗ ¿Cuál es el flujo máximo que puede existir entre dos nodos?
- ↗ ¿Cuál es la ruta con máxima capacidad entre dos nodos?

Entre las aplicaciones más importantes de la optimización en redes se encuentra el llamado 'problema de transporte'.

La descripción matemática de un problema de transporte clásico es la siguiente:

Supóngase que existen m puntos de abastecimiento (o de oferta) donde cierta mercancía debe transportarse a n puntos de demanda. Específicamente, por ejemplo, existen i plantas cuya capacidad de producción sólo es capaz enviar S_i productos mientras que en los puntos de demanda j , se requieren al menos D_j . Los valores de S_i y D_j se encuentran fijos en un cierto intervalo del horizonte de planificación. El costo asociado de transportar las mercancías de la planta i a los puntos de demanda j es c_{ij} . El objetivo es seleccionar para la duración del horizonte, un 'plan de rutas' que minimice los costos totales de transporte:

$$\text{Min } \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \tag{Ec. III.11}$$

s.a.q.

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq S_i \quad \forall i = 1, 2, \dots, m \text{ (Oferta)} \tag{Ec. III.12}$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \geq D_j \quad \forall j = 1, 2, \dots, n \text{ (Demanda)} \tag{Ec. III.13}$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j$$

La Figura III.9 presenta cómo se puede construir la red.

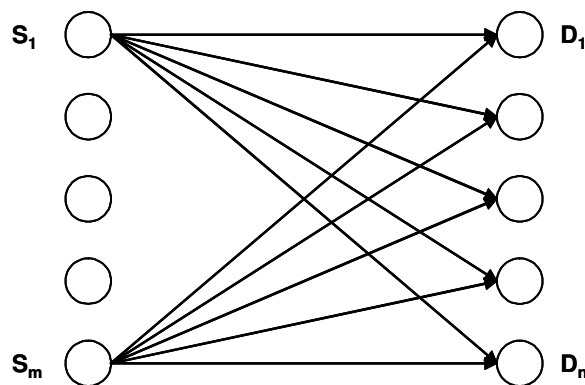


Figura III.9. Representación esquemática de una red

Sin duda es necesario establecer que:

$$\sum_{i=1}^m S_i \geq \sum_{j=1}^n D_j \quad \text{Ec. III.14}$$

No se analizarán aquí los métodos de solución a este problema; éstos pueden consultarse en Wagner [30] entre otras muchas obras de Investigación de Operaciones.

Este tipo de problemas ha dado lugar a otros, basados en la optimización en redes, como el problema de transbordo, que ha sido utilizado muy a menudo en la Ingeniería Química para hacer uso eficiente de energía en redes e intercambio de calor [31] y también a problemas de asignación y de la ruta más corta o su equivalente, la ruta más larga en la que está basado el método del camino crítico, también muy usado en problemas de ingeniería [32], e incluso en problemas de reemplazo de equipo. Otros tipos de aplicaciones se refieren al llamado problema del vendedor viajero (Traveling Salesman), así como en la programación de tareas.

En resumen, se pueden tener las siguientes aplicaciones de modelos en una red:

1. TRANSBORDO/TRANSPORTE

Minimizar el costo de Distribución de productos

2. RUTA MÁS CORTA

Minimizar el costo o tiempo de recorrido entre 2 nodos extremo

3. PERT/CPM (RUTA MÁS LARGA)

Encontrar la secuencia de actividades que requiere del mayor tiempo para su terminación.

4. FLUJO MÁXIMO

Determinar la máxima cantidad de flujo total que puede pasar entre 2 nodos extremos

5. CAPACIDAD MÁXIMA

Determinar ruta con máxima capacidad entre 2 nodos extremos

6. ASIGNACIÓN

Asignar uno a uno “n” recursos a “n” actividades en forma óptima

7. ÁRBOL DE EXPANSIÓN MÍNIMA

Determinar el conjunto de arcos que conecten todos los nodos de la red al menor costo.

2.6.2 Formulación General

La formulación general puede describirse de la siguiente manera:

Una vez definida la red es útil especificar para el periodo del horizonte bajo consideración, una capacidad de flujo $u_{ij} \geq 0$ de un flujo total que principia en el nodo i y termina en el nodo j .

Otras especificaciones importantes para caracterizar la red, se refieren a los valores de los flujos T_k en cada nodo k . Si T_k es positiva, se estará expresando que una mayor

cantidad de flujos salen del nodo respecto de los que entran y viceversa cuando T_k sea negativa. Si T_k es cero, todos los flujos entrantes deben salir del nodo k . Por ello es posible formular que:

$$\sum_{k=1}^p T_k = 0 \quad \text{Ec. III.15}$$

Otra característica importante es que los datos de costo, c_{ij} , deben proporcionarse por unidad de flujo que atraviesa los arcos (i,j) .

Considérese ahora que x_{ij} es la cantidad de flujo en los arcos (i,j) durante el Horizonte de Planificación (HP). Un modelo de optimización de una red de considerable generalidad y aplicación es:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p c_{ij} x_{ij} \quad \text{Ec. III.16}$$

s.a.q.:

$$\sum_{j=1}^p x_{kj} - \sum_{i=1}^p x_{ik} = T_k \quad \forall k = 1, 2, \dots, p \quad \text{Ec. III.17}$$

$$0 \leq x_{ij} \leq u_{ij} \quad \forall i, j \quad \text{Ec. III.18}$$

A la restricción III.17 se le llama la ecuación de conservación de flujo o de balance de materia.

2.6.3 Problema de la Red Generalizada

Llamemos ahora, x_{ij} la cantidad de capacidad en una unidad de producción i la que produce el producto j durante algún periodo del HP. La capacidad de la unidad productora i es S_i (en unidades de producto por unidad de tiempo). Existen n diferentes productos medidos en unidades de peso o volumen; la demanda del producto j , es D_j medida en las mismas unidades. Supongamos también que una unidad de capacidad de la planta i que produce el producto j , proporciona a_{ij} unidades del producto. El costo de de producción de una unidad del producto j que se fabrica en la planta i es c_{ij} . Entonces el modelo matemático se transforma en:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad \text{Ec. III.19}$$

s.a.q.:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq S_i \quad \forall i = 1, 2, \dots, m \quad \text{Ec. III.20}$$

$$\sum_{i=1}^m a_{ij} x_{ij} \geq D_j \quad \forall j = 1, 2, \dots, n \quad \text{Ec. III.21}$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \quad \text{Ec. III.22}$$

Si acaso un producto no pudiera ser producido en una planta, se elimina x_{ij} en el modelo expresado en las ecuaciones III.19 a la III.22. Este modelo resulta ser un problema de programación lineal, que se le ha llamado también de transporte generalizado.

En nuestro caso, teniendo en cuenta sólo las ecuaciones III.21 y III.4 sujetas a que $\sum_{k=1}^p T_k = 0$ y que, además, $\sum_{j=1}^p x_{kj} - \sum_{i=1}^p x_{ik} = T_k, \forall k = 1, 2, \dots, p$, se tendrá el algoritmo de recorrido que, a través de la restricción III.21, genera un efecto inductivo en toda la cadena.

En nuestro caso la función objetivo III.19 se reemplaza por un cierto número de criterios que hacen posible luego, utilizar los Métodos de Ayuda para la Toma de Decisiones (MCDA por sus siglas en inglés).

3 Métodos de Ayuda a la Toma de Decisiones

Los métodos de análisis multicriterio, también llamados “métodos de análisis con criterios múltiples”, tienen por objetivo proporcionar al tomador de decisiones, herramientas que les permitan resolver un problema donde varios puntos de vista (criterios), la mayoría de las veces contradictorios, deben tomarse en cuenta. La primera constatación que debe hacerse, cuando se abordan este tipo de problemas, es que no existe forzosamente una decisión que sea la mejor, simultáneamente, para todos los puntos de vista (criterios) [33].

3.1 Enfoques con decisiones multicriterio

Los beneficios de los métodos Multicriterio, descritos en la literatura, son que éstos son muy simples, convenientes y de fácil uso, es fácil de aprender a implementar y proveer un camino eficiente para resolver problemas multicriterio [34], [35], [36].

Las técnicas de métodos multicriterio se clasifican en tres grupos:

- ✦ Teoría de la utilidad de múltiples criterios (MAUT, por sus siglas en inglés).
- ✦ Métodos de sobreclasificación (Outranking Methods – OM por sus siglas en inglés)
- ✦ Métodos interactivos (IM, por sus siglas en inglés)

Los métodos de utilidad de múltiples criterios (MAUT) consisten en la agregación de factores desde el punto de vista de una función objetivo, la cual será optimizada. La función objetivo, para el tomador de decisiones, es el punto principal para el análisis. Los procedimientos para construir la función objetivo para el tomador de decisiones, son las de consumo de tiempo y requieren de un análisis cuidadoso y consistente, sobre las preferencias del tomador de decisiones. La suposición que subyace es que las funciones son restrictivas. Sin embargo, si la función de utilidad está disponible para el tomador de decisiones, el problema se reduce a un simple caso de maximización directa de la función objetivo. MAUT, está soportada por paquetes de cómputo, tales como “Logical Decision”; para el Análisis Jerárquico Multicriterio (AHP), el análisis se soporta por paquetes de cómputo tales como “Expert Choise” y “Criterium decision Plus” [37], [38].

Los métodos de sobreclasificación (OM) generalmente se construyen a través de una relación de sobreclasificación, la cual representa las preferencias del tomador de decisiones. Los métodos de sobreclasificación (OM) suponen que el tomador de decisiones puede, quiere y sabe definir los cambios entre los objetivos [39]; lo anterior implica que, la no agregación de la función de utilidad puede ser derivada. Los rangos entre los cuales se analizan los criterios, estarán en base a la comparación entre pares de éstos. Los paquetes de cómputo que utilizan este tipo de metodología son: PROMCALC-GAIA [40], ELECTRE [41], MACBETH [36], entre otros.

Los OM operan como funciones escalares entre las posibles alternativas de cada criterio, cuando el tomador de decisiones proporciona pesos a los criterios. El tomador de decisiones juega y analiza con un número dado de parámetros los cuales establecen las relaciones de sobreclasificación. En general una metodología de OM, consiste en: la construcción de la relación de sobre clasificación y en seguida, la explotación de estas relaciones.

Entre otras ventajas de los métodos multicriterio, son: que se pueden manejar relaciones de multicriterio complejas y se pueden utilizar variables cualitativas en el problema de toma de decisiones [35].

Los alcances comunes en esta categoría de modelos incluyen la incorporación de varias metas y/o criterios. Las metas múltiples se alcanzan ya sea simultánea o secuencialmente, utilizando una estructura priorizada a varios niveles. La forma de alcanzar las metas puede llevarse a cabo con la aplicación de la programación por metas (Goal Programming) y/o la programación por metas preventivas.

El Análisis Jerárquico Multicriterio [37], [38], debe considerarse como una muy importante aportación de la escuela francesa, que tiene por característica las nociones de sobreclasificación que representan las preferencias claramente establecidas por el tomador de decisiones, considerando la información de la que dispone.. Dentro de esta escuela, también pueden considerarse métodos que requieren de información complementaria sobre las preferencias del tomador de decisiones.

Así, la ayuda multicriterio a la toma de decisiones no consiste solamente en una familia de técnicas de agregación de preferencias consideradas sobre un conjunto dado. Se trata de modelar las preferencias y definir un conjunto de decisiones. En esta escuela deben considerarse a Roy [34], Vincke [42], Brans [43], [44], Schärliig [45], entre otros.

Ambas metodologías ayudan a que los tomadores de decisiones relacionen los factores intangibles o cualitativos a tangibles, de lo subjetivo a lo objetivo. También ofrecen la metodología para integrar la complejidad, con objetivos factibles, estableciendo sus prioridades y determinando un valor global para cada alternativa de solución.

La metodología PROMETHEE [46], [43], [44], [47], de la cual se hará uso extensivo en el presente trabajo, toma en cuenta, por su parte, varias condiciones que son:

- ↗ Consideración de las diferencias entre las evaluaciones de las acciones de cada criterio.
- ↗ Eliminación de los efectos de escala entre criterios enunciados de manera subjetiva u objetiva.
- ↗ Incomparabilidad admitida. Conceptualizando las comparaciones de sobreclasificación en: preferencia estricta, indiferencia e incomparabilidad que permitirá la búsqueda de información y las funciones de utilidad para y del tomador de decisiones.
- ↗ Aportación de información suplementaria.
- ↗ Aspectos de los criterios considerados en conflicto.
- ↗ Interpretación correcta de los pesos o importancia de cada criterio.

3.2 Operabilidad de la metodología PROMETHEE

Bajo la notación donde $a_i = i$ -ésima alternativa y $g_j =$ evaluación del criterio j , entonces $g_j(a_i)$ representa la evaluación del criterio j sobre la i -ésima alternativa. Los datos básicos de un problema multicriterio consisten en la evolución de la Tabla III.1.

Tabla III.1. Tabla de evaluación

a	$g_1(\cdot)$	$g_2(\cdot)$	---	$g_j(\cdot)$	---	$g_k(\cdot)$
a_1	$g_1(a_1)$	$g_2(a_1)$	---	$g_j(a_1)$	---	$g_k(a_1)$
a_2	$g_1(a_2)$	$g_2(a_2)$	---	$g_j(a_2)$	---	$g_k(a_2)$
a_3	$g_1(a_i)$	$g_2(a_i)$	---	$g_j(a_i)$	---	$g_k(a_i)$
a_n	$g_1(a_n)$	$g_2(a_n)$	---	$g_j(a_n)$	---	$g_k(a_n)$

Las relaciones de dominancia asociadas con un problema multicriterio son:

$$\begin{cases} g_j(a) \geq g_j(b) \\ g_k(a) > g_k(b) \\ g_j(a) = g_j(b) \end{cases} \Leftrightarrow aPb$$

$$\begin{cases} g_s(a) > g_s(b) \\ g_r(a) < g_r(b) \end{cases} \Leftrightarrow aRb$$

Figura III.10. Relaciones de Dominancia

En la Figura III.10 P , I , y R indican preferencia, indiferencia e incomparabilidad, respectivamente.

La incomparabilidad se explica de la siguiente manera: si una alternativa es mejor que otra en un criterio s , y esta última es mejor que la primera en un criterio r , es imposible decidir cuál es mejor sin información adicional. Ambas alternativas son, por lo tanto, incomparables.

Como información adicional se puede tener:

- ↪ Pesos que asignan una importancia relativa de los criterios
- ↪ Agregar una función que reúna todos los criterios y sea de una sola variable, tal que sea posible obtener un problema mono-criterio, para el cual si existiría una solución óptima.

Muchos métodos multicriterio que han sido propuestos parten de la misma tabla de evaluación (Tabla III.1), pero las variaciones entre ellos dependen de la información adicional que ellos requieran.

El propósito de todos los métodos multicriterio es reducir el número de incomparabilidades (R). Una manera de lograr ésto es construyendo relaciones de rangos, ya sea de superioridad o de inferioridad. En tal caso, no todas las incomparabilidades son eliminadas pero la información es fidedigna.

Para construir un método de resolución de problemas multicriterio adecuado, se deben considerar los siguientes:

Requisito 1. La amplitud de las desviaciones entre la evaluación de las alternativas dentro de cada criterio debe ser tomada en cuenta:

$$d_j(a,b) = g_j(a) - g_j(b) \quad \text{Ec. III.23}$$

Requisito 2. Como la evaluación $g_j(a)$ de cada criterio está expresada en sus propias unidades, los efectos de escala deben ser completamente eliminados. No es aceptable obtener conclusiones dependiendo de la escala en la cual las evaluaciones están expresadas.

Requisito 3. En el caso de comparaciones entre pares de alternativas, un método multicriterio apropiado debe proveer la siguiente información:

a es preferente que b

a y b son indiferentes

a y b son incomparables

Esto tiene como propósito reducir tanto como sea posible el número de incomparabilidades (R), pero sólo cuando esto sea realista.

Requisito 4. Diferentes métodos multicriterio necesitan diferente información adicional y operan bajo diferentes procesos de cálculo. Es por lo tanto importante desarrollar métodos que sean entendibles para el tomador de decisiones.

Requisito 5. Un procedimiento adecuado no debe incluir parámetros técnicos que no tengan significado para el tomador de decisiones.

Requisito 6. Un método apropiado debe proveer información sobre la naturaleza contradictoria de los criterios.

Requisito 7. En muchos de los métodos multicriterio se asignan pesos de relativa importancia a cada criterio. Usualmente el tomador de decisiones titubea fuertemente al asignar los pesos. Un método apropiado debe ofrecer herramientas de sensibilidad para probar fácilmente conjuntos o series de pesos.

El método PROMETHEE toma en cuenta todos los requisitos antes mencionados.

3.2.1 Modelo de la información con PROMETHEE

La información adicional que se requiere para emplear PROMETHEE es particularmente clara y entendible, ésta consiste en:

- ↪ Información entre los criterios
- ↪ Información dentro de cada criterio.

3.2.2 Información entre los criterios

La Tabla III.1 debe ser completada con los pesos de relativa importancia (w_j) de los diferentes criterios. Estos pesos deben ser números positivos, e independientes de las unidades de medición de los criterios. Tabla III.2.

Tabla III.2. Pesos de relativa importancia

$g_1()$	$g_2()$...	$g_i()$...	$g_k()$
w_1	w_2	...	w_i	...	w_k

El peso más elevado, representa el criterio con más importancia. Estos pesos deben estar normalizados, es decir que:

$$\sum_{j=1}^k w_j = 1 \tag{Ec. III.24}$$

3.2.3 Información dentro de cada criterio

La estructura de preferencias de PROMETHEE está basada en comparaciones de pares de alternativas evaluadas en los criterios. Se considera la desviación entre las evaluaciones de dos alternativas. Para desviaciones pequeñas, el tomador de decisiones asignará una preferencia pequeña para la mejor alternativa, e incluso puede considerar que no hay preferencia alguna si él considera que la desviación es insignificante.

PROMETHEE considera que las preferencias son números reales que varían entre 0 y 1. Esto significa que para cada criterio el tomador de decisiones tiene en mente una función del tipo:

$$P_j(a,b) = F_j[d_j(a,b)] \quad \text{Ec. III.25}$$

Dónde:

$$d_j(a,b) = g_j(a) - g_j(b)$$

y, para la cual:

$$0 \leq P_j(a,b) \leq 1$$

En el caso de que el criterio deba ser maximizado, esta función daría la preferencia de a sobre b, debido a las desviaciones observadas entre sus evaluaciones sobre el criterio $g_j(\cdot)$. Esta función debe tener la forma que indica la Figura III.11.

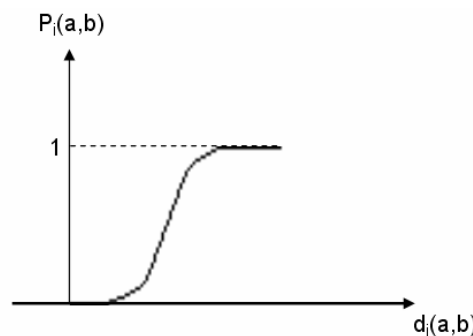


Figura III.11. Función de preferencia

Las preferencias son iguales a cero cuando las desviaciones son negativas. Cuando los criterios deben ser minimizados, la función de preferencia debe invertirse:

$$P_j(a,b) = F_j[-d_j(a,b)] \quad \text{Ec. III.26}$$

El par $\{g_j(\cdot), P_j(a,b)\}$ es llamado criterio generalizado asociado al criterio $g_j(\cdot)$, para cada criterio debe ser definido el criterio generalizado.

La metodología PROMETHEE propone seis tipos de funciones de preferencia, las cuales se muestran en la Tabla III.3. En cada caso necesitan ser definidos 0, 1 ó 2 parámetros cuyo significado es claro:

- ↪ q es el límite de la indiferencia; es decir, es la desviación más grande que se considera insignificante por el tomador de decisiones.
- ↪ p es el límite estricto de la preferencia; es decir, es la desviación más pequeña que se considerada como suficiente para generar una preferencia amplia.

↪ s es un valor intermedio entre p y q, éste define el punto de inflexión de la función de preferencia. Se recomienda determinar primero q y p, para después obtener s como un valor intermedio entre estos parámetros.

Tabla III.3. Funciones de preferencia

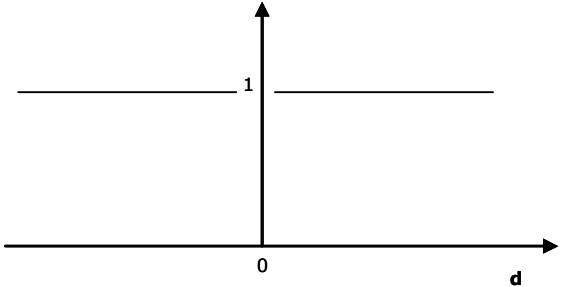
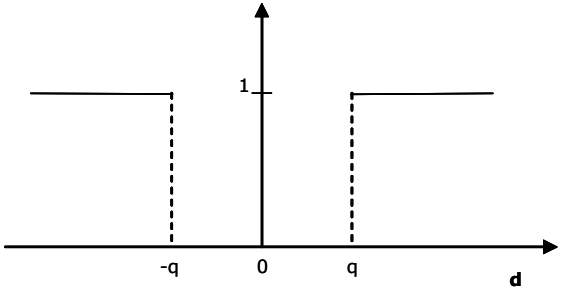
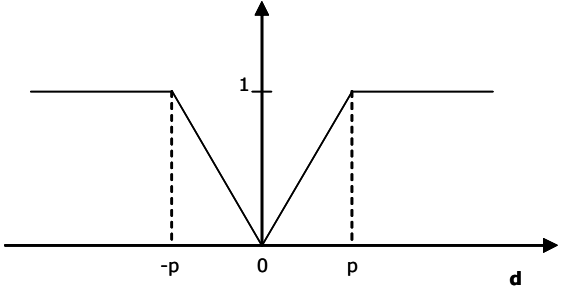
Criterio Generalizado	Forma	Parámetros a fijar
Tipo 1. Criterio Natural 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ 1 & d > 0 \end{cases}$	Ninguno
Tipo 2. Criterio en forma de U 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq -q \\ \frac{d+q}{2q} & -q < d < q \\ 1 & d \geq q \end{cases}$	q
Tipo 3. Criterio en forma de V 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq -p \\ \frac{d+p}{2p} & -p < d < p \\ 1 & d \geq p \end{cases}$	p

Tabla III.4. Funciones de preferencia (continuación)

Criterio Generalizado	Forma	Parámetros a fijar
<p>Tipo 4. Criterio de nivel</p>	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq -q \\ 0.5 & -q < d \leq q \\ 1 & d > q \end{cases}$	p, q
<p>Tipo 5. Forma V con indiferencia</p>	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq -q \\ \frac{d+q}{p-q} & -q < d \leq q \\ 1 & d > q \end{cases}$	p, q
<p>Tipo 6. Criterio Gaussiano</p>	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq -s \\ 1 - \exp\left(-\frac{d^2}{2s^2}\right) & -s < d \leq s \\ 1 & d > s \end{cases}$	s, (desviación estándar)

Tan pronto como la tabla de evaluación (Tabla III.1) sea construida, y los pesos w_j y los criterios generalizados $\{g_j(\cdot), P_j(a, b)\}$ estén definidos para $i=1,2,\dots,n$; $j=1,2,\dots,k$, el procedimiento PROMETHEE puede ser aplicado.

3.2.4 Clasificación I y II de PROMETHEE

Para explicar la clasificación I y II de PROMETHEE es necesario definir dos conceptos, índices de preferencia agregados y flujos de categoría superior.

$$\begin{cases} \pi(a,b) = \sum_{j=1}^k P_j(a,b)w_j \\ \pi(b,a) = \sum_{j=1}^k P_j(b,a)w_j \end{cases} \quad \text{Ec. III.27}$$

$\pi(a,b)$ expresa con que grado a es preferente que b sobre todos los criterios y $\pi(b,a)$ expresa como b es preferente que a . En muchos de los casos hay criterios en los cuales a es mejor que b , y también hay criterios para los cuales b es mejor que a , por consiguiente $\pi(a,b)$ y $\pi(b,a)$ son usualmente positivos.

Cuando $\pi(a,b)$ es prácticamente igual a 0 implica una frágil preferencia global de a sobre b , y cuando $\pi(a,b)$ es prácticamente igual a 1 implica una fuerte preferencia global de a sobre b .

Una vez que $\pi(a,b)$ y $\pi(b,a)$ son calculados para cada par de alternativas de A (A =conjunto de alternativas) puede construirse una gráfica donde se representan los índices de preferencias agregadas de cada criterio. Ver Figura III.12.

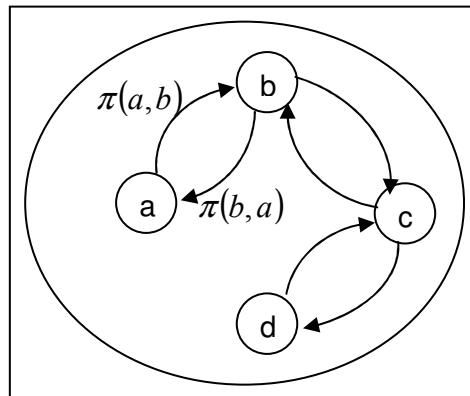


Figura III.12. Grafico de índices de preferencias agregadas.

3.2.5 Flujos de categoría superior

Cada alternativa a es comparada contra $(n-1)$ alternativas del conjunto de alternativas A , de donde se definen los dos siguientes flujos de categoría:

↳ Flujo de categoría positivo

$$\phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(a,x) \quad \text{Ec. III.28}$$

↪ Flujo de categoría negativo

$$\phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(x, a) \quad \text{Ec. III.29}$$

donde x son todas las alternativas diferentes de a .

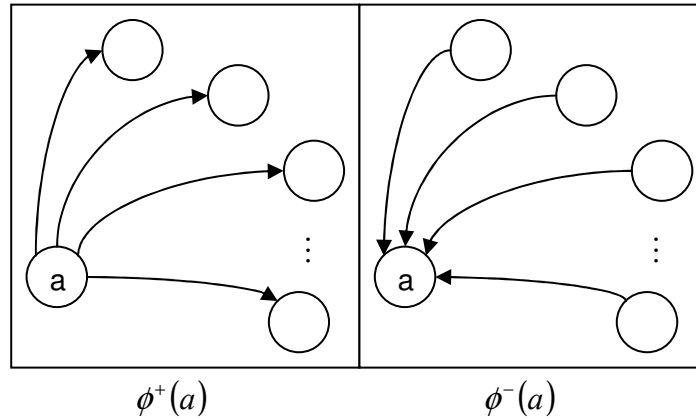


Figura III.13. Flujos de categorías de PROMETHEE

$\phi^+(a)$, expresa cómo una alternativa a es de categoría superior que todas las demás alternativas. Éste es su poder, su carácter dominante.

$\phi^-(a)$, expresa cómo una alternativa a es de categoría inferior que todas las demás alternativas. Ésta es su debilidad, su carácter de inferioridad. Ver Figura III.13.

3.2.6 La clasificación parcial. PROMETHEE I

La clasificación parcial de PROMETHEE I (P^I, I^I, R^I) es obtenida de los flujos de categorías superior e inferior. Ambos flujos usualmente no inducen hacia la misma clasificación. PROMETHEE I obtiene sus conclusiones con base a las siguientes relaciones (Figura III.14):

$$\left\{ \begin{array}{l} aP^I b \quad \text{si} \quad \left\{ \begin{array}{l} \phi^+(a) > \phi^+(b) \text{ and } \phi^-(a) < \phi^-(b), \text{ ó} \\ \phi^+(a) = \phi^+(b) \text{ and } \phi^-(a) < \phi^-(b), \text{ ó} \\ \phi^+(a) > \phi^+(b) \text{ and } \phi^-(a) = \phi^-(b) \end{array} \right. \\ \\ aI^I b \quad \text{si} \quad \phi^+(a) = \phi^+(b) \text{ and } \phi^-(a) = \phi^-(b) \\ \\ aR^I b \quad \text{si} \quad \left\{ \begin{array}{l} \phi^+(a) > \phi^+(b) \text{ and } \phi^-(a) > \phi^-(b), \text{ ó} \\ \phi^+(a) < \phi^+(b) \text{ and } \phi^-(a) < \phi^-(b) \end{array} \right. \end{array} \right.$$

Figura III.14. Relaciones de PROMETHEE I

Donde: (P^I, I^I, R^I) representan, respectivamente, preferencia, indiferencia e incomparabilidad.

Cuando $aP^I b$, un alto poder o dominancia de a es asociado a una baja debilidad de a con respecto a b , la información de ambos flujos de categoría es consistente y puede por lo tanto ser considerada segura.

Cuando $aI^I b$, ambos flujos, positivo y negativo, son iguales.

Cuando $aR^I b$, la alternativa a es buena en algunos criterios donde b es débil, y de manera inversa b es buena en algunos otros criterios donde a es débil, en tales casos la información que ambos flujos proveen no es consistente. PROMETHEE I es prudente y no decide cuál alternativa es mejor en tales casos, el tomador de decisiones debe cargar con esta responsabilidad.

3.2.7 La clasificación completa de PROMETHEE II

PROMETHEE II se encarga de hacer una clasificación completa (P^{II}, I^{II}) . El flujo neto de dominancia puede ser considerado como:

$$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a) \quad \text{Ec. III.30}$$

Este es el balance entre los flujos de dominancia positivo y negativo

$$\begin{cases} aP^{II} b & \text{si } \phi(a) > \phi(b) \\ aI^{II} b & \text{si } \phi(a) = \phi(b) \end{cases} \quad \text{Ec. III.31}$$

Cuando se considera PROMETHEE II, todas las alternativas son comparables, pero la información obtenida puede ser más discutible, debido a que mucha información se pierde por considerar la diferencia de la ecuación III.30

4 Bibliografía

- [1] G. B. Dantzig and P. Wolfe, "Decomposition Principle for Linear Programs," *Operations Research*, vol. 8, pp. 101-111, 1960.
- [2] K. J. a. H. Arrow, L., "Decentralization and computation in resource allocation.," in *Essays in economic and econometrics* Chapel Hill, N.C.: University of North Carolina Press, 1960.
- [3] L. Lasdon, "A Multilevel Technique for Optimization," Cleveland, Ohio: Case Institute of Technology, 1964.
- [4] Liptak and Kornai, "Two-Level Planning," *Econometrica*, vol. 33, pp. 141-169, January 1965.
- [5] A. Geoffrion, "Elements of large-scale mathematical programming," *Management Science, Theory*, 1970.
- [6] R. Armand, "La décentralisation des décisions par les prix," *METRA*, vol. 7, 1968.
- [7] M. Mesarovic, D. Macko, and Y. Takahara, "Theory of Hierarchical Multilevel Systems.," *Academic Press*, 1970.
- [8] A. Bensoussan, *Decentralization in management*. Bruxelles: European Institute for Advance Studies in Management, 1972.
- [9] R. Burton, W. Daman, and D. Loughridge, "The economics of decomposition: resource allocation vs transfer pricing.," *Decision Sciences*, vol. 5, 1974 1974.
- [10] J. C. Collomb and A. Zylberberg, "Critère du profit et objectifs Quantitatifs à travers d'une procédure de planification décentralisée," *R.A.I.R.O. Recherche Opérationnelle*, vol. 11, 1977.
- [11] C. Escobar and R. Tremolieres, "Décentralisation, prix de transfert et contrôle de gestion dans les Raffineries," Aix en Provence, Belgium. IAE, W.P. 128, 1978.
- [12] C. Escobar Toledo, "Modèles de décentralisation, prix de transfert et coordonnabilité dans les systèmes de Raffinage et la Planification du Gaz naturel.," Aix en provence, Belgium: Université d'Aix-Marseille. Groupe de Recherche e Analyse de Système et Calcul Economique (ERA-CNRS No 640), 1979.
- [13] C. Escobar Toledo, "Descentralización y Coordinación de un Sistema Jerárquico de Oferta de Productos Petrolíferos y Petroquímicos," in *Memoria del Simposio: Modelos Matemáticos para la Planeación Energética*, Universidad Nacional Autónoma de México, 1983, pp. 85-112.
- [14] L. Walras, *Elements of pure economics, or the theory of social wealth*. London: George Allen, 1954.
- [15] E. Malinvaud, "Decentralized procedures for planning.," in *Activity Analysis in the Theory of Growth and Planning*, E. Malinvaud and M. O. L. Bacharach, Eds. London: Macmillan., 1967, pp. 170-208.
- [16] J. P. Aubin, *Multigames and decentralization in management*. University of South Carolina, U.S.A., 1973.
- [17] L. Lasdon, "Optimization Theory for Large Problems," in *Series in Operations Research* U.S.A.: THE MACMILLAN COMPANY, 1970.
- [18] J. Kornai, "V.3. Thoughts on Multi-Level Planning Systems," in *Multi-Level Planning: Case Studies in Mexico*, L. M. Goreux and A. S. Manne, Eds. Netherlands: North-Holland Publishing Company - American Elsevier Publishing Company, Inc., 1973, pp. 521-550.

- [19] T. M. Hogan, "A comparison of information structures and convergence properties of several multisector economic planning procedures," Center for Research in Management Science, University of California, Berkeley, California, U.S.A. Technical Report No. 10, May 1979.
- [20] W. Findeisen, F. N. Bailey, M. Brdys, K. Malinowski, P. Tatjewski, and A. Wozniak, "Control and coordination in hierarchical systems," in *International Series on Applied Systems Analysis* Great Britain: John Wiley & Sons, 1980.
- [21] G. Anandalingam, "A mathematical programming model of decentralized multi-level systems," *The Journal of the Operational Research Society*, vol. 39, pp. 1021-1033, November 1998.
- [22] G. B. Dantzig and P. Wolfe, "The decomposition algorithm for linear programming," *Econometrica*, vol. 9, 1961.
- [23] R. M. Burton and B. Obel, "The multi-level approach to organizational issues of the firm-a critical review," *Omega*, vol. 5, pp. 395-414, 1977.
- [24] Y. M. I. Dirickx and L. P. Jennegren, *Systems Analysis by Multi-Level Methods: With Applications to Economics*. New York, U.S.A.: Wiley, 1979.
- [25] W. H. Cooper, H. J. Leavitt, and M. W. Shelly, *New Perspectives in Organization Research*. New York, U.S.A.: Wiley, 1964.
- [26] A. Charnes, R. W. Clower, and K. O. Kortanek, "Effective control through coherent decentralization with preemptive goals," *Econometrica*, vol. 35, pp. 294-319, 1967.
- [27] H. Van Stackelber, *The Theory of the Market Economy*. U.S.A.: Oxford University Press, 1952.
- [28] G. W. T. White and M. D. Simmons, "Analysis of complex systems.," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences.*, vol. 287, 1970.
- [29] G. B. Dantzig, "Programming of Inter-Dependent Activities II, Mathematical Model," Headquarters, U.S.A., Washington, D.C. 6, 1949.
- [30] H. M. Wagner, *Principles of Operations Research with Applications to Managerial Decisions*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice/Hall International, Inc., 1969.
- [31] M. M. El-Halwagi and V. Manousiothakis, "Mass exchanger networks," *American Institute of Chemical Engineering Journal*, vol. 35, pp. 1233-, 1989.
- [32] M. M. El-Halwagi, "Pollution Prevention via Process Integration, Systematic Design Tools," U.S.A.: Academic Press, 1997.
- [33] M. Tamiz, *Multi-Objective Programming and Goal Programming, Theories and Applications*: SPRINGER, 1996.
- [34] B. Roy, *Méthodologie Multicritère d'aide à la Décision*. Paris: Económica, 1985.
- [35] T. C. Escobar, F. E. Esparza, L. Puente, and D. Uquillas, "Modelos para la Jerarquización y selección óptima de proyectos de investigación y desarrollo Tecnológico," in *Ciencia Ed.* vol. 5 México: Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos (IMIQU), 1990, pp. 45-61.
- [36] C. A. Bana e Costa, Vansnick, J.C, "The MACBETH approach: Basic ideas, software and an application," in *Advances in Decision Analysis*, N. Maskens, Roubens, M. (Ed), Ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [37] T. L. Saaty, "Fundamentals of Decision Making and Priority. Theory with the Analytic Hierarchy Process." vol. 6 Pittsburgh, U.S.A.: RWS Publications, 1994.

- [38] T. L. Saaty and L. G. Vargas, "Decision Making with the Analytic Hierarchy Process." vol. 7 Pittsburgh, U.S.A.: RWS Publications, 1994.
- [39] B. Roy and D. Bouyssou, "Aide Multicritère à la decision. Méthodes et cas," in *Economica* Paris, 1993.
- [40] J. P. Brans and B. Mareschal, "PROMCALC & GAIA: A new decision support system for multicriteria decision aid.," *Decision Support Systems*, vol. 12, pp. 297-310, 1994.
- [41] B. Roy and P. Bertier, "La Méthode ELECTRE II. Une Application au Média-Planning," North-Holland Publishing Company, 1973.
- [42] P. Vincke, "L'aide Multicritère à la Décision," in *Editions de l'Université Libre de Bruxelles* Bruselas, 1989.
- [43] J. P. Brans and B. Mareschal, *PROMETHEE: a new family of outranking methods in multicriteria analysis*: J. P. Brans, 1984.
- [44] J. P. Brans and P. Vincke, "A preference ranking organization method: The PROMETHEE method for MCDM," *Management Science*, vol. 31, pp. 647-656, 1985 1985.
- [45] A. Schärliig, *Décider sur plusieurs critères*: Chap. 8; pp 182-188. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne 1990.
- [46] J. P. Brans, *L'ingénierie de la décision. Elaboration d'instruments d'aide à la décision. Méthode PROMETHEE*. Quebec, Canada: Université Laval, 1982.
- [47] J. P. Brans and B. Mareschal, *PROMETHEE-GAIA. Une Méthodologie d'Aide à la Décision en Présence de Critères Multiples*. Paris, France: Ellipses, 2002.
- [48] A. Schärliig, "Pratiquer Electre e Prométhée. Capítulo 11, pp 129-143. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. Lausanne, 1996.

Capítulo IV.

Desarrollo de la Metodología.

1 Marco de referencia de la metodología

En esta parte nos parece adecuado reafirmar la definición¹ de método y metodología, ya que ambos conceptos se utilizarán a la par.

- ↪ Método (lat. *methodus*, del gr. *méthodos*). Conjunto de operaciones ordenadas con que se pretende obtener un resultado.
- ↪ Metodología. Ciencia que estudia los métodos del conocimiento.

Tomando en cuenta la definición estricta de método y metodología, la presente investigación se fundamenta con el estudio de diferentes métodos desarrollados para modelar, representar e interpretar el comportamiento de un gran sistema de procesos. Este tipo de sistema debe tomar en cuenta su estructura y sus diferentes objetivos (técnicos y económicos) para mejorar su operación. Es decir, nuestro trabajo es estudiar los conceptos y los métodos establecidos y desarrollados para la planificación y la toma de decisiones para sistemas complejos y a partir de ello, proponer un nuevo enfoque logístico² que pueda ser implementado en beneficio del sistema.

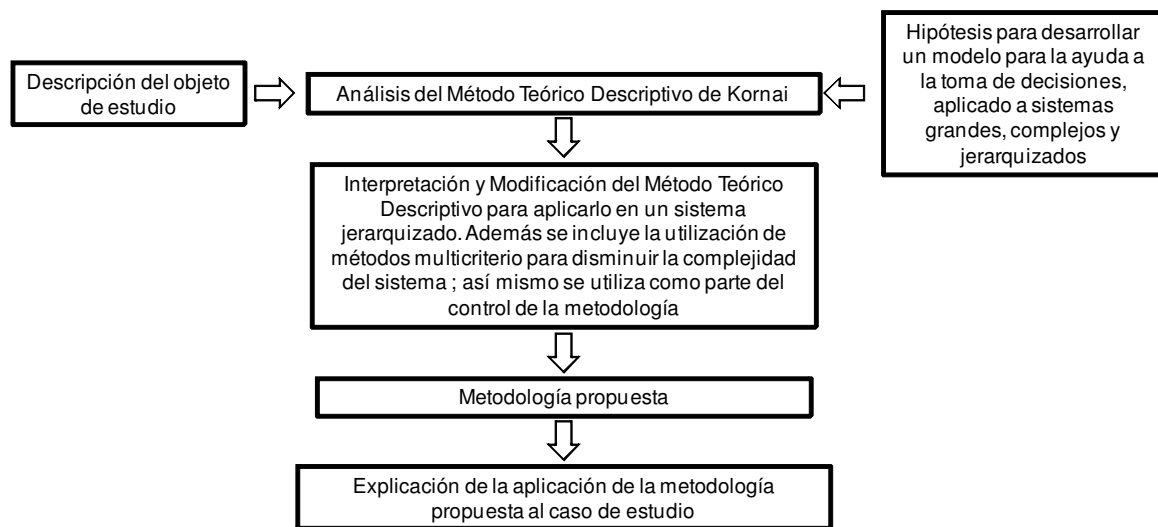
De acuerdo a Descartes [*Discurso del Método, 1637*] el individuo se enfrenta con la realidad de un problema (observación), establece juicios entre causa y efecto y emite hipótesis que han de ser corroboradas o verificadas.

La metodología que proponemos para organizar la aplicación de los conceptos y métodos analizados en los capítulos anteriores encuentra circunscripción con los cuatro preceptos de Descartes, es decir: confrontar la evidencia, reducción del fenómeno en pequeñas partes, estudio de las causas y los efectos y reconstrucción total del fenómeno en estudio.

En el siguiente esquema se muestra de forma muy general, la secuencia de pasos que se seguirán para desarrollar la metodología.

¹ Diccionario Larousse, 2003.

² Logística: Conjunto de métodos y medios relativos a la organización de un servicio, de una empresa, etc. Diccionario Larousse, 2003.



1.1 El objeto de estudio

Para poder realizar la observación, debemos definir el sistema a analizar. En nuestro caso y apegándonos al quehacer de un ingeniero químico, estudiaremos aquellos sistemas de proceso grandes y complejos, en donde se involucran aspectos técnicos, económicos y de planificación, los cuales podrán ser divididos en diferentes subsistemas o unidades de operación.

De acuerdo a lo estudiado en el Capítulo I, todo sistema está situado dentro de un cierto entorno que lo rodea y lo envuelve total y absolutamente, por lo que el sistema se encuentra en un constante flujo, de fluidez, de “diálogo”, en donde se modifican y reconstruyen alternativa y continuamente entre sí, acoplándose de forma mutua y recíproca.

El sistema de nuestro interés tiene las siguientes características:

- ↻ Busca mantenerse como un sector prioritario y estratégico para la economía nacional.
- ↻ Transforma recursos naturales no-renovables en productos de alto valor agregado que generan bienestar y progreso.
- ↻ Busca ahorrar o generar divisas.
- ↻ Articularse con otras ramas productivas.

Adicionalmente, este tipo de sistemas:

- ↻ Operan eficientemente con escalas competitivas,
- ↻ Mejoran sus curvas de aprendizaje y sus tecnologías de producción
- ↻ Seleccionan cuidadosamente:
 - a) los procesos de producción con los cuales participarán, de acuerdo a la oferta y demanda, en el balance mundial,
 - b) sus productos corriente arriba y corriente abajo,

- c) su investigación y desarrollo tecnológico para obtener mayor competitividad y,
↪ Deben considerar maximizar los valores agregados de sus productos

1.2 Premisas³

- i. Que el sistema de proceso se encuentre dentro del marco de referencia que hemos establecido para esta investigación: la Teoría de Sistemas; de tal forma que se pueda realizar una representación del sistema a través de un modelo, el cual se pueda resolver con la utilización de una serie de herramientas matemáticas.
- ii. Que el sistema de proceso debe permanecer en conjunto gracias a procesos dinámicos y no por ataduras predeterminadas y rígidas. Estos procesos deben mantener relaciones dinámicas con su entorno a través de las cuales conserven sus características con relación a éste, siendo capaces de adaptarse, dentro de ciertos límites, a sus modificaciones.
- iii. Que debido a su carácter de sistema debe tener “comunicación” para coordinar y ordenar su propio proceso.
- iv. Que debido a su carácter de sistema, los bienes producidos tengan una repercusión dentro de la economía.
- v. Que debido a su complejidad el sistema pueda ser dividido en una unidad central (UC) y varios subsistemas o unidades de producción, permitiendo que cada uno de ellos asuman sus propias decisiones en cuanto a la parte del proceso que les corresponde, tomando en cuenta el bien común entre ellos y su unidad central de una manera consensuada.

1.3 Hipótesis⁴ de trabajo para el diseño de la metodología.

- ↪ Que debido al tamaño del sistema y su interdisciplinariedad con otras áreas del conocimiento, tenga la capacidad de ser modelado con sus respectivos objetivos y restricciones.
- ↪ Que debido al tamaño del sistema y su interdisciplinariedad con otras áreas del conocimiento, el número de variables a definir para su modelación es excesivamente grande como para resolver el modelo en una sola iteración de cálculo.
- ↪ Que debido a su tamaño y complejidad, el sistema se caracterice por tener varios objetivos, los cuales no deberán buscar la optimización⁵ en su operación, sino más bien tiendan a mejorar todas las partes en que se ha descompuesto el sistema
- ↪ Que permita utilizar varios métodos para la toma de decisiones combinándolos con otros métodos de selección y programación para alcanzar las metas de la unidad central y de las partes en que el sistema ha sido descompuesto.

³ Premisa: Afirmación o idea que se tiene como cierta y que sirve de base a un razonamiento o a una discusión, Diccionario Larousse 2004

⁴ Hipótesis: (gr. Hipótesis, suposición) Suposición de una cosa, sea posible o imposible, para sacar de ella una consecuencia. Proposición que resulta de una observación o de una inducción y que debe ser verificada. Hipótesis de trabajo: Suposición que se establece como base de una investigación que puede confirmar o negar su validez. Diccionario Larousse 2004.

⁵ En el sentido del término utilizado en programación matemática.

1.4 Metodología propuesta para el análisis de sistemas grandes y complejos

Habiendo establecido los fundamentos teóricos en los Capítulos I, II y III, y habiendo definido el sistema de interés para estudio junto con sus hipótesis a corroborar en la aplicación del caso de estudio, comenzaremos a construir la metodología.

Como marco de referencia hemos establecido la modelación a varios niveles; con base a esta estructura el sistema se caracterizará no sólo por su descomposición en subsistemas, sino también éstos últimos tendrán una jerarquía de cálculo y solución.

Es de nuestro interés utilizar el modelo teórico descriptivo de planificación presentado por Kornai [1], por tal motivo lo volveremos a citar y para su mejor interpretación teórica, realizamos un ejemplo gráfico de su propuesta.

Utilizando el método de descomposición, se llega de D a P por una ruta indirecta. Primero que todo, el conjunto de datos D es dividido de acuerdo con la regla de descomposición. Un subconjunto es D_0 , la información de la Unidad Central; los otros subconjuntos son D_1, D_2, \dots, D_n , los cuales representan la información proporcionada por los subsistemas o unidades de producción descentralizadas. Comenzando por esta información, la primera iteración se lleva a cabo. El primer cálculo central está basado en la información de la Unidad Central:

$$D_0 \rightarrow [M_0^1, B_1^1, B_2^1, \dots, B_n^1] \quad \text{Ec. IV.1}$$

en el cual M_0^1 es el contenido de la memoria de la Unidad Central al final de la primera iteración, y B_i^1 es la salida de información central obtenida del primer cálculo central, al final de la primera iteración.

Sobre la base de datos por subsistemas, el primer cálculo que se realiza es:

$$D_i \rightarrow [M_i^1, F_i^1] \quad (i = 1, \dots, n) \quad \text{Ec. IV.2}$$

en el cual M_i^1 es el contenido de la memoria del subsistema "i", al final de la primera iteración, y F_i^1 es la salida de la información del subsistema obtenida del cálculo realizado por este mismo subsistema "i" y transferido para el cálculo de la Unidad Central al final de la primera iteración.

La primera iteración es seguida por la segunda iteración hasta la iteración "s". Las transformaciones hechas en las "s" iteraciones son:

$$[M_i^{s-1}, F_1^{s-1}, F_2^{s-1}, \dots, F_n^{s-1}] \rightarrow [M_0^s, B_1^s, B_2^s, \dots, B_n^s] \quad \text{Ec. IV.3}$$

Esta transformación es la función de respuesta de la Unidad Central:

$$[M_i^{s-1}, B_i^{s-1}] \rightarrow [M_i^s, F_i^s] \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad \text{Ec. IV.4}$$

Las funciones respuesta son de carácter determinista (dejando fuera las consideraciones de los casos degenerados, es decir, donde alguno de los flujos de información no sea transmitido a la unidad central o a otro subsistema). La información de entrada se convierte en una información de salida unívoca.

Las funciones de respuesta incluyen una regla de memorización, es decir que lo que está almacenado en la memoria central y en la del subsistema desde los datos iniciales, los flujos de información entrantes, recibidos antes de la iteración "s", y los resultados de los cálculos antes de la iteración "s", quedan registrados. Además, estos flujos de información incluyen una regla de información liberada: El mensaje que debe enviar el subsistema al centro y viceversa.

Las iteraciones prosiguen hasta la última, iteración "s". En esta conexión es necesaria una regla de terminación para prescribir las condiciones bajo las cuales la Unidad Central debería liberar la salida terminal de información central, $B_i^s = B_i^*$.

Esta información de salida es la instrucción para llevar a cabo las operaciones terminales. Además, se debe establecer una regla de cálculo-solución:

$$[M_i^s, B_i^s] \rightarrow P_i^* \quad \text{Ec. IV.5}$$

El vector $P_i^* = [P_1^*, \dots, P_n^*]$ obtenido como un resultado de la ecuación IV.5 es idéntico con la solución P óptima del problema original sin descomponer o es una aproximación aceptable. Es decir, de cualquier forma que se observe, el óptimo del problema original debe ser conocido, lo cual nos lleva a una centralización-descentralización, y viceversa.

La especificación de un procedimiento de descomposición debe tener las siguientes características:

- ↗ La regla de descomposición del conjunto de la información inicial
- ↗ Las funciones respuesta de la Unidad Central y la de cada subsistema
- ↗ La especificación de la información de entrada y salida que fluye entre los niveles
- ↗ La regla de terminación
- ↗ La regla de cálculo-solución

Aplicando el modelo de Kornai a un sistema estructurado por una unidad central y un solo subsistema se tendría la representación de la Figura IV.1.

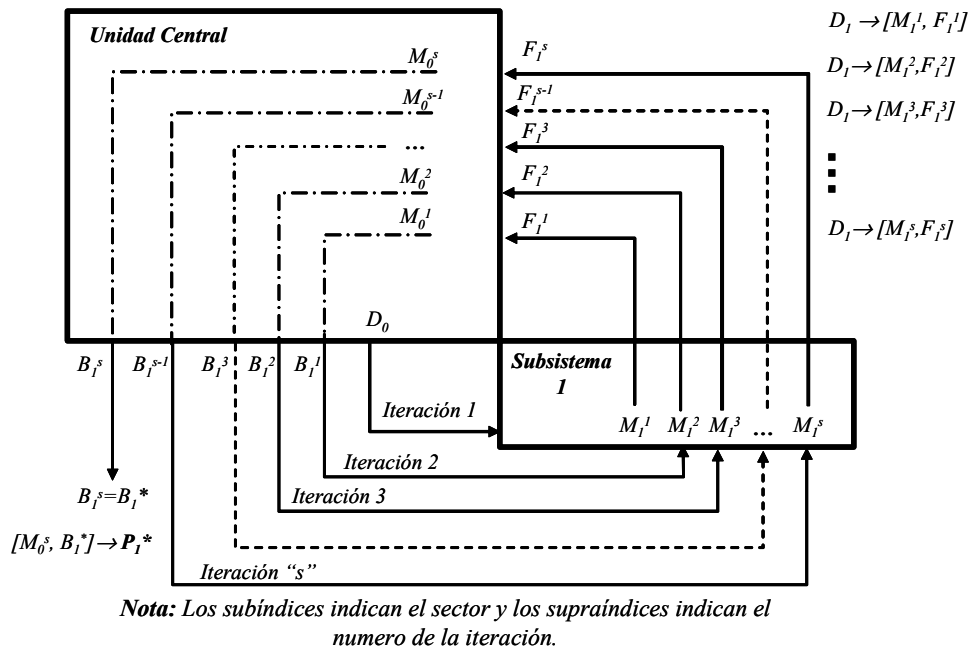


Figura IV.1. Representación del algoritmo de Kornai suponiendo que el sistema se descompone en la Unidad Central y un solo subsistema

Función Respuesta de la Unidad Central al Subsistema

$$[M_0^{s-1}, B_1^{s-1}] \rightarrow [M_1^s, F_1^s]$$

Siendo:

M_0 es la memoria de la unidad central.

B_i es la información que la unidad central manda al subsistema "i".

M_i es la memoria del subsistema "i"

F_i es la respuesta que envía el subsistema "i" a la unidad central.

"s" es el número de iteraciones llevadas a cabo en cada subsistema "i"

Transformación hecha en el Subsistema para la Unidad Central

$$[M_1^{s-1}, F_1^{s-1}] \rightarrow [M_0^s, B_1^s]$$

$$D_1 \rightarrow [M_1^s, F_1^s]$$

Siendo:

D_i los datos disponibles para la unidad "i"

\rightarrow Indica la transformación de los datos en el subsistema "i".

Regla de Cálculo de Solución

$$B_1^s \rightarrow B_1^*$$

$$[M_0^s, B_1^*] \rightarrow P_1^*$$

Siendo:

B_1^* la información terminal con la cual la Unidad Central dejará de realizar las iteraciones hechas en el subsistema 1.

P_1^* representa el vector en donde se almacena la memoria de la Unidad Central después de "s" iteraciones y la información B_1^*

Figura IV.2. Descripción matemática del método de Kornai

En la Figura IV.3 se vuelven a mostrar las funciones de transformación que realiza la UC sobre los subsistemas y la función de respuesta de los subsistemas a la UC.

Generalizando para “n” subsistemas

Función Respuesta de la Unidad Central

$$[M_0^{s-1}, B_i^{s-1}] \rightarrow [M_i^s, F_i^s] \quad \text{para } i=1, 2, 3, \dots, n \text{ [sectores]}$$

*Transformación hecha en el subsistema para la
Unidad Central*

$$[M_i^{s-1}, F_i^{s-1}] \rightarrow [M_0^s, B_i^s]$$

Regla de Cálculo de Solución

$$B_i^s \rightarrow B_i^* \quad \text{para } i= 1,2,3, \dots, n \text{ [sectores]}$$

$$[M_0^s, B_i^*] \rightarrow P_i^* \quad \text{para } i= 1,2,3, \dots, n \text{ [sectores]}$$

$$P_i^* = [P_1^*, P_2^*, \dots, P_n^*]$$

Figura IV.3. Ecuaciones generalizadas del método de Kornai

Resulta pertinente señalar que el vector D_i (ecuación IV.2) en donde se almacena la memoria del subsistema “i” y el flujo de información de respuesta que realiza este mismo subsistema a la UC, funciona solamente como un operador compuesto por estas dos partes.

1.4.1 Características del modelo teórico descriptivo

En este modelo no se realizan cálculos numéricos con un método de descomposición; sólo se utilizan las propiedades cualitativas definidas de éste método para la descripción de las características de los procesos de planificación actual y para su modelación abstracta.

Ningún método de descomposición es apropiado como modelo general para representar todas las principales características de la planificación. Su papel es más limitado. Cada método de descomposición puede perturbar una u otra característica de otra sección del sistema de planificación.

Por otra parte, Kornai [2] nos expresa que el utilizar algoritmos de descomposición se pueden cometer dos errores. El primero es hacer conclusiones económicas más allá de las que se deben hacer a partir de las cualidades computacionales del algoritmo de descomposición. Resolver un problema con programación lineal con un método directo puede ser interpretado como el trabajo de la oficina de planificación central de una economía centralizada que posee toda la información. Por el contrario, todos los métodos

de descomposición tienen que ser considerados como el modelo de un proceso de planificación en el cual, parte de la información es almacenada en la oficina de planificación central y parte en las unidades de planificación sectorial que representa a los subsistemas. La tarea de los cálculos de planificación también es dividida entre el centro y los subsistemas. Sería un gran error hacer cualquier conclusión con respecto a las ventajas y desventajas de la centralización completa o de la descentralización parcial de planificación a partir de la experiencia computacional descrita, refiriéndose a qué método es más conveniente en la mayoría de los casos.

Similarmente, el realizar experimentos numéricos para comparar la eficiencia de los diferentes métodos de descomposición puede ser útil en lo concerniente a las técnicas de computación, pero no en la utilización de la teoría económica subyacente.

Otro error se presenta en el caso del tipo de utilización sobre el cual se modela generalmente cada algoritmo. Permítasenos denotar por interpretación tipo (b1) y tipo (b2).

- ↳ Interpretación tipo (b1): La serie de iteraciones representa la preparación de la decisión, es decir, del plan final. El centro y los subsistemas negocian sólo en papel, B_i^s y F_i^s expresan sólo el intercambio de información y no afecta directamente el trabajo real de la economía. En este caso, el vector \mathbf{P} , que se obtiene como resultado final ó el plan aceptado finalmente (la decisión), controla los procesos reales del sistema económico: producción, distribución y consumo.
- ↳ Interpretación tipo (b2): La información que sale de cada iteración (B_i^s y F_i^s) afecta directa e inmediatamente al trabajo real de la economía, y controla el proceso real de producción, distribución y consumo. Es verdad que tal decisión no es óptima, de hecho puede no ser completamente factible, pero debe ser corregida en la práctica, ya que aún ésta es una decisión. El algoritmo muestra la forma en que estas decisiones posiblemente no factibles convergen con \mathbf{P} , la decisión óptima y factible.

En el caso de la interpretación (b1), el algoritmo es el modelo descriptivo de la preparación de la decisión para la planificación. Por el contrario, en el caso de la interpretación (b2) el algoritmo es el modelo de la operación y el control de corto plazo del sistema económico.

Como ya se ha estudiado en el Capítulo III, el problema de la planificación económica es el cálculo y la transferencia de información.

1.4.2 Niveles del sistema económico

Las organizaciones especializadas en controlar la economía y en actividades relacionadas tales como recopilación y procesamiento de información, preparación de decisiones y planificación se encuentran en los niveles superiores de la economía. Estas pueden ser denotadas como organizaciones de control. Algunas de estas organizaciones trabajan independientemente unas de otras, en el mismo nivel. Otras tienen relaciones de subordinación y superordenación. [1]

Se han realizado estudios de las relaciones de subordinación y superordenación, jerarquías y quasi-jerarquías en los sistemas económicos modernos.

La Figura IV.4 muestra un esquema de jerarquía perfecta. El sistema tiene tres niveles; en el nivel superior está el centro C_0 , en el nivel de en medio están los subcentros C_1 , C_2 y C_3 y en el nivel inferior las organizaciones reales R_1 , R_2, \dots, R_6 . Cada organización está subordinada a otra. La única excepción es el centro, el cual no está subordinado por ninguna otra organización.

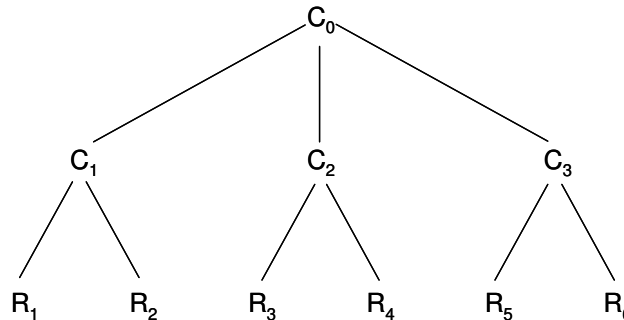


Figura IV.4. Jerarquía perfecta

Algunas observaciones de las organizaciones multi-nivel son:

- ↗ 1. No hay sistemas económicos de un solo nivel. Todas las economías reales son multi-nivel.
- ↗ 2. No hay jerarquías perfectas. Es característica de todos los sistemas reales no tener relaciones puras de sub y super ordenación, existen a cada lado del sistema dobles o múltiples subordinaciones, cadenas o relaciones de sub y super ordenación de diferentes longitudes,
- ↗ 3. En varios ejercicios de planificación de la economía en varios sistemas, países y regiones que han sido consideradas, existen procesos de planificación multinivel.

1.4.3 Dirección de los flujos de información

En el curso de la planificación fluye información entre las organizaciones del sistema económico. La dirección del flujo de información es horizontal y se presenta entre organizaciones que se encuentran al mismo nivel. Es vertical, si el flujo de información se presenta entre organizaciones que tienen una relación de subordinación o superordenación, una con otra. Finalmente, la dirección del flujo de información es indeterminada si el coordinador y el coordinado de la información no se encuentran en el mismo nivel.

1.4.4 Tipos de información

En el modelo teórico descriptivo de planificación de Kornai, se definen cinco tipos de información:

1. Los precios sombra
2. Indicadores de eficiencia
3. Estimaciones de entradas y salidas reales del sistema.
4. Programas de acción específica.
5. Indicadores financieros.

Es característica de los sistemas de planificación reales que todos los tipos de información citados anteriormente (o aún algunos otros tipos) fluyen simultáneamente, en todas direcciones.

Kornai and Liptak [3] reconocieron que algunas variables del sistema no pueden estar bajo el control directo de la UC. No obstante, realizan la suposición de que el objetivo de la UC es la suma de las funciones objetivo de las divisiones que pueden entrar en conflicto con las de la UC, y proponen un algoritmo basado en dos niveles de planificación.

Este algoritmo presenta el enfoque multinivel, el cual propone que se tome en cuenta las interacciones definiendo uno o más subsistemas de "segundo nivel" los cuales influyen, de alguna forma, los subsistemas originales, definidos en el primer nivel. Esta influencia puede tomar muchas formas, dependiendo del problema original y del tipo de descomposición del primer nivel.

De esta forma dejan en claro que se puede extender esta idea definiendo subsistemas de tercer nivel, cada uno de los cuales coordina un número de unidades de segundo nivel, y así consecutivamente.

Por otro lado, existe un problema de interdependencia en la planificación para un sistema grande que es complejo. Éste se analiza a través de un sistema de modelos de optimización correspondiente a "n" niveles de jerarquización con sus respectivos subsistemas; en el nivel más alto se tendrá un modelo de la UC multisectorial y en los niveles más bajos los diferentes subsistemas en que se ha dividido el sistema, que representan funcionalmente los sectores o unidades de producción. [4]

Si este sistema de modelos es una representación del mundo real, la pregunta sería ¿cómo podría ser utilizado para tomar decisiones?

Si se aplica el enfoque de equilibrio general, el sistema entero de modelos debería ser resuelto simultáneamente. Una decisión basada en esta solución debería entonces ser "óptima" en el sentido de que podría tomar en cuenta todas las posibles interacciones dentro del sistema. Esta decisión óptima podría ser interpretada como la solución que prevalecería en un mercado perfectamente competitivo, haciendo las suposiciones

usuales de ausencia de externalidades⁶, economías de escala, etc. Alternativamente, esta solución podría ser interpretada como la toma de decisión centralizada, si el centro tuviera el conocimiento perfecto de la economía del sistema entero.

Aplicando el enfoque del equilibrio parcial, solo un componente del sistema sería resuelto. Por ejemplo, si una decisión de inversión es hecha en un cierto sector del sistema, sólo el modelo de ese sector particular necesita ser resuelto. Sin embargo, para utilizar este enfoque es necesario saber cierta información sobre el resto del sistema. Si el modelo es construido con programación matemática, la información requerida puede ser expresada en forma de los precios sombra, los cuales debería reflejar los costos de oportunidad de los factores utilizados por el sector analizado de los bienes producidos por éste y por el resto de los sectores económicos.

Si las decisiones hechas en una parte del sistema (el subsistema en este ejemplo) no pueden afectar la escasez económica en el resto del sistema, la toma de decisiones descentralizada es fácil. Pero, si estas decisiones afectan el precio de alguno de los bienes o factores usados en el resto del sistema, se requiere un procedimiento iterativo para alcanzar la optimalidad.

La toma de decisiones descentralizada sin iteraciones es un procedimiento simplificado. Sin embargo puede haber pérdida de información de los subsistemas.

Bajo el enfoque de interdependencia se reafirma que no es suficiente transmitir instrucciones hacia abajo. También es necesario enviar información resumida sobre las posibilidades técnicas de la producción y la perspectiva del mercado, del nivel más bajo al más alto. De esta forma un modelo por subsistema se puede construir a partir de estudios detallados conducidos a nivel de proyecto.

Findeisen [5] propone un sistema de control para la descomposición de sistemas grandes y cita que existe un sistema de control que significa que existen influencias sobre el sistema para que se comporte de una manera deseada. Este sistema puede ser un sistema económico, un proceso tecnológico, un sistema ecológico o un sistema que contiene recursos que deben ser repartidos entre varios subsistemas.

Este autor trabaja con estructuras jerarquizadas y una de sus clasificaciones es el concepto multinivel, en el cual se introducen metas locales y una coordinación apropiada, que ha sido inspirada en los métodos de descomposición de la programación matemática, en donde dicha descomposición se usa para resolver problemas de optimización, cuya meta es simplemente ahorrar esfuerzos computacionales. Sin embargo, en el enfoque multinivel el sistema puede ser perturbado y los modelos locales son inadecuados por lo que es necesario que exista un ente controlador que es justamente lo que se denomina la Unidad Central.

⁶ La palabra externalidad significa la forma en que la comunicación entre unidades y sus decisiones pueden ser influenciadas por otras unidades de su mismo nivel jerárquico y por lo tanto no a la unidad central.

Anandalingam [6] trabaja con un modelo jerarquizado a varios niveles en donde la información disponible para un tomador de decisiones sobre un nivel dado y la forma en la cual el tomador de decisiones puede hacer uso de esta información para influenciar o controlar a otro tomador de decisiones.

El caso que nos interesa analizar y aplicar es la modelación de los sistemas multinivel descentralizados como sistemas jerárquicos a varios niveles, donde existen varios niveles de decisión con un tomador de decisiones en cada nivel.

Como ya se ha comentado en el Capítulo III, el control de un sistema muy grande es difícil ya que, entre otros problemas, la tarea de formular modelos y objetivos adecuados, es compleja.

Otro de los estudios realizados, que nos permite concatenarlo con los estudios realizados por Anandalingam es el que realizaron White and Simons [7] quienes discuten que un sistema complejo como los que se encuentran en subsistemas industriales, está intrínsecamente estructurado, es decir como un conjunto de sistemas organizados interconectados. Explotando esta estructura, es posible descomponer el problema de controlar un sistema complejo en un subconjunto de subproblemas interrelacionados. Cada subproblema puede resolverse independientemente de los otros con interconexiones entre los subproblemas en los que existe algún tipo de coordinación.

Para realizar el sistema de control, tomaremos la idea desarrollada por Escobar Toledo [8]. La Figura IV.5 propone un esquema de descomposición y jerarquización utilizando flujos de información a los cuales se les llamó variables de coordinación, las cuales funcionan como los controles del sistema a resolver.

En este sentido, Rudd and Watson [9], propusieron un enfoque multinivel para problemas de Ingeniería Química, sobre todo para el diseño de plantas interconectadas, basándose en precios de transferencia entre niveles para al final hacer la observación de que la solución se alcanza cuando la demanda de los subsistemas y la oferta de cada uno de éstos, se minimiza en términos absolutos, acorde con el sistema de precios en cada etapa de la optimización.

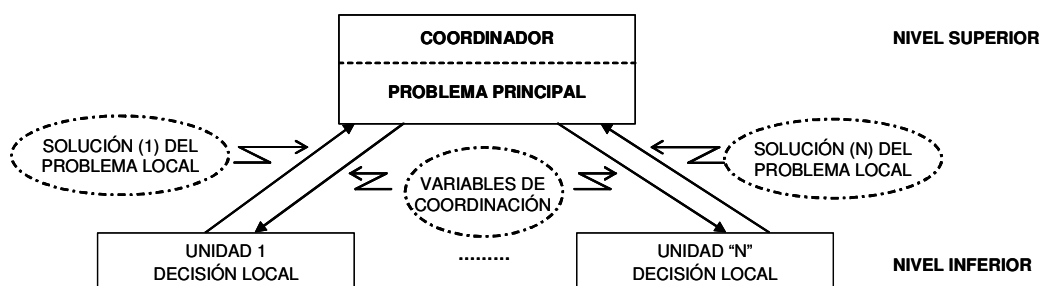


Figura IV.5. Esquema de descomposición y coordinación propuesto por Escobar Toledo.

No es suficiente, entonces, transferir instrucciones hacia niveles inferiores. También es necesario enviar un resumen de la información sobre las posibilidades de producción y las perspectivas del mercado de los niveles inferiores hacia los superiores.

Tomando en cuenta todo lo anterior, la metodología que proponemos se fundamenta en el modelo teórico descriptivo de planificación de Kornai, en el cual se descompone el sistema en varios subsistemas, utilizando una estructura jerarquizada para coordinar las iteraciones que hay que realizar para alcanzar las metas en común entre la unidad central y cada subsistema. Para controlar estos subsistemas utilizaremos flujos de información entre la unidad central y cada subsistema, además de variables de coordinación para controlar el sistema junto con parámetros de decisión que utiliza la unidad central para finalizar con las iteraciones que resolverán el sistema.

1.5 Estructura de la metodología propuesta

Específicamente nos interesa analizar un proceso químico caracterizado por su tamaño y su complejidad.

La Figura IV.6 presenta un esquema simple de un proceso químico que puede ser dividido en varios subprocesos, es decir en varios subsistemas, cuyas condiciones de operación dependen de factores externos, los cuales pueden ser representados por un ente exógeno representado por la UC.

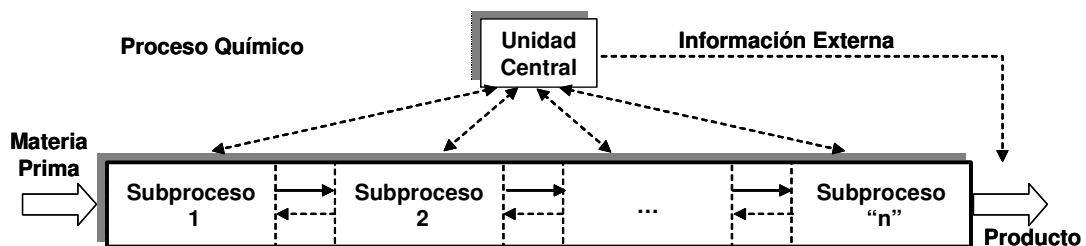


Figura IV.6. Representación de un proceso químico

El proceso representado por la Figura IV.6 se puede observar que, siguiendo el flujo de izquierda a derecha, comienza a partir de la (s) materia (s) prima (s) necesaria (s) para producir el producto, de tal forma que el producto intermedio obtenido del subproceso 1 se convierte en la materia prima del subproceso 2, y así sucesivamente, hasta obtener el producto final deseado. En esta misma figura, las líneas punteadas representan los flujos de información que deben ser coordinados por la unidad central; sus puntas representan la dirección del flujo de la información entre la UC y cada subsistema. Hay que recordar que la producción está regida por el mercado; es por ello que se marca en esta figura una flecha que va de la UC hacia el producto. Esta acción causaría que dentro del sistema, cuando existiere una modificación en la demanda del producto final, el sistema se modificaría, tomando en cuenta esta variación. La modificación realizada se representaría como un flujo de información para cada subsistema, con una dirección inversa a la del proceso de producción inicial, como queda indicado en la figura anterior con las flechas punteadas.

Por este motivo, proponemos analizar un sistema cuyas interacciones se establezcan, en primer lugar, entre la unidad central y el último subproceso o unidad de producción (“n”), utilizando una coordinación jerarquizada, dentro del marco de referencia establecido por el modelo teórico descriptivo propuesto por Kornai con el enfoque de utilización tipo (b2), en el cual las decisiones y el control se van tomando, de tal forma que la planificación se vaya modificando de acuerdo a los requerimientos diarios de la producción, la distribución y el consumo de cada subsistema.

Tomamos como suposición que jerárquicamente el sistema se descompone en tres niveles; el primero es la UC, el segundo el subproceso de producción 2 y el tercero el subproceso de producción 1. Nótese que seguimos la secuencia de interdependencia del proceso desde el producto final hasta la materia prima.

En este ejemplo, la UC puede ser interna o externa al proceso analizado, la cual coordinará su producción en función de la demanda del producto final que requiere el mercado.

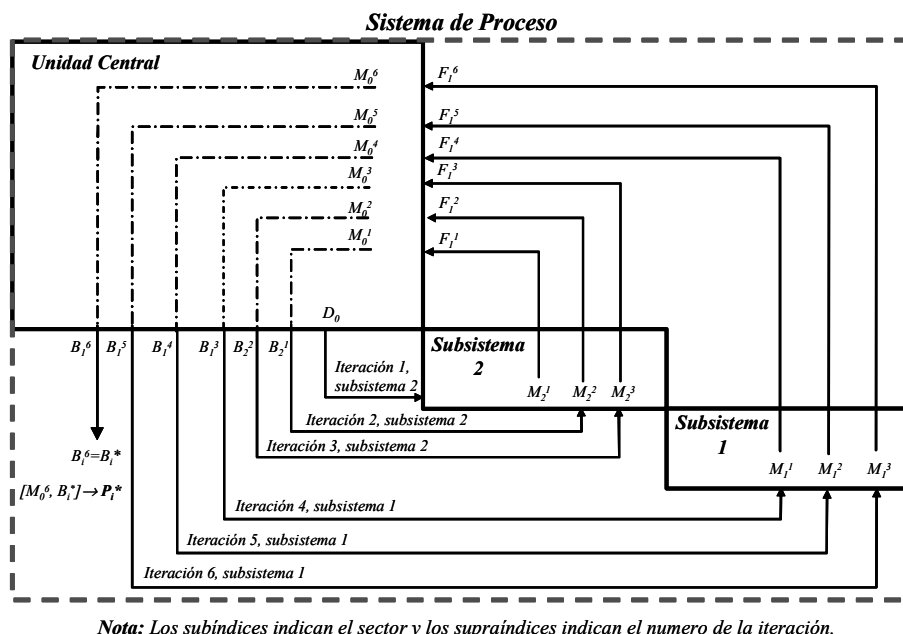


Figura IV.7. Propuesta de descomposición de un sistema de procesos

El esquema de la Figura IV.7 presupone que sólo existen 3 iteraciones en cada subsistema, pero esto es sólo a modo de ejemplo, ya que puede haber hasta “s” iteraciones en cada subsistema, como lo propone Kornai. Nótese que cada iteración en cada subsistema carece de un control, que de acuerdo a Escobar Toledo [8] son las variables de coordinación y los parámetros de decisión que establece la Unidad Central, haciendo decrecer la entropía generada por dejar que la planificación se lleve a cabo solamente por las “fuerzas del mercado”.

En la Figura IV.8 muestra de forma esquemática y generalizada la metodología que se propone aplicar al caso de estudio, utilizando variables de coordinación y parámetros de decisión, los cuales servirán de control para terminar el número de iteraciones hechas en cada subsistema de la producción resultante de la división del proceso químico analizado.

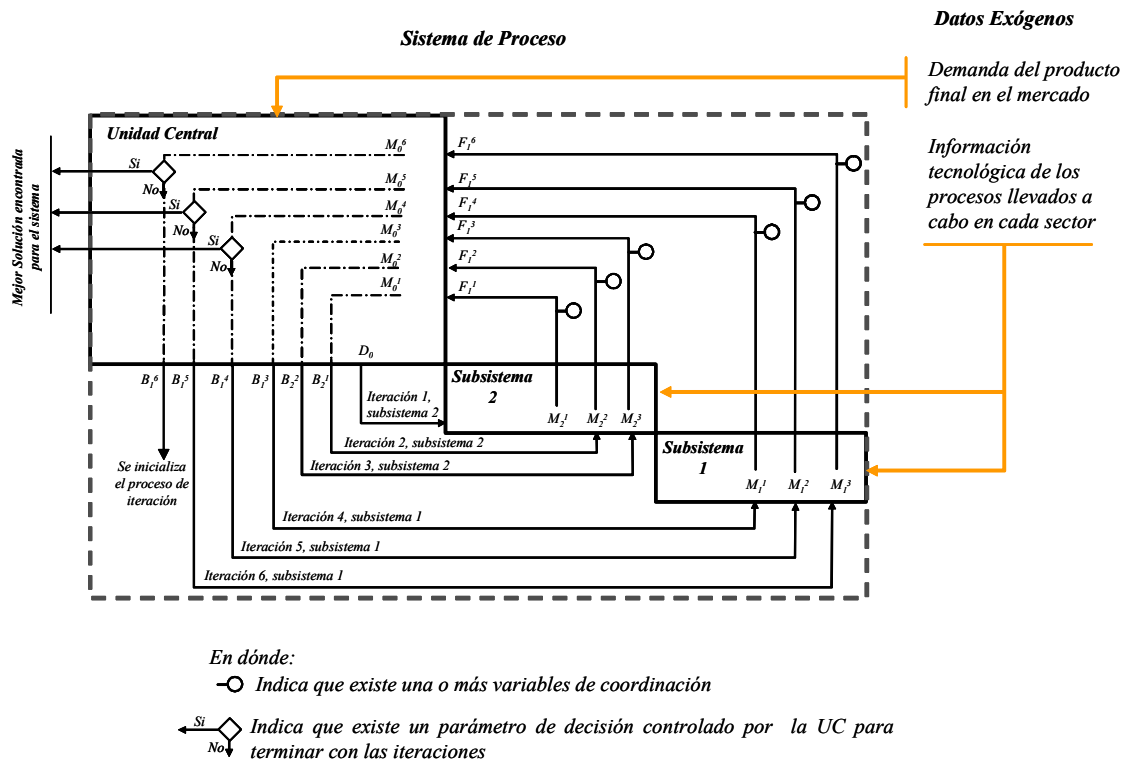


Figura IV.8. Metodología propuesta para aplicar al caso de estudio

Considerando las tres iteraciones mostradas en la Figura IV.8, es posible describir la secuencia de producción generalizada para cualquier proceso. Para ello, es necesario conocer la demanda externa al sistema, que es la fuerza directriz para que funcione el sistema. Una vez conocida esta demanda, la inducción de la cantidad de producción de los productos dentro del sistema podrá ser calculada. Desde este punto de vista, la primera iteración del subsistema 2, correspondería a la búsqueda de información tecnológica externa para poder construir cada uno de los procesos de producción, siguiendo la secuencia de insumo/producto que corresponda a cada producto final. Normalmente, pueden existir diversas tecnologías alternativas, por lo que en la iteración correspondiente será necesario prever la existencia de un conjunto de éstas.

Así, la segunda iteración correspondería a elegir las mejores tecnologías para cada producto final. Sin embargo, esta selección está controlada por la UC, quien debe proporcionar los criterios bajo los cuales esta selección debe ser operada.

Una vez seleccionadas las mejores tecnologías concomitantes con los criterios establecidos por la UC, el subsistema 2 envía a ésta la selección realizada.

La tercera iteración correspondería a seleccionar aquellos productos que resulten los mejores de acuerdo también, a los mismos criterios que fueron establecidos por la UC para que los resultados de cada criterio se reflejen en beneficio tanto del subsistema 2 como de la UC. Esta decisión se envía como información a la UC, quien controla esta selección.

En la cuarta iteración, se involucra al subsistema 1, para que éste asegure la disponibilidad de las materias primas que requiere el subsistema 2. El subsistema 1, también tendrá necesidad de allegarse información tecnológica para llevar a cabo la producción de los insumos solicitados por el subsistema 2. En este caso, la UC controla la cantidad del recurso que es el origen de todas las materias primas del subsistema 1, las cuales se convertirán en los productos que satisfarán los requerimientos de la demanda.

En la quinta y sexta iteraciones, una vez que el subsistema 1 ha elegido las mejores tecnologías para procesar el recurso, considerando las restricciones controladas por la UC, el primero realiza la programación de la producción, considerando los mejores rendimientos de productos que serán los insumos del subsistema 2.

Durante todas las iteraciones, la UC habrá almacenado en su memoria todas las informaciones recibidas de los subsistemas 1 y 2 para tomar la decisión final.

1.6 Oportunidades analizadas del modelo teórico descriptivo para su aplicación en la metodología propuesta

La descripción de los párrafos anteriores presenta un panorama general de los diferentes enfoques que se han desarrollado para los métodos de descentralización – jerarquización, para la planificación de sistemas grandes y complejos. En esta sección analizaremos las oportunidades que podemos aprovechar para desarrollar nuestra metodología.

Para el método de Kornai, considerando la interpretación tipo (b2), la unidad central y los subsistemas jerarquizados negocian de tal forma que B_i^s y F_i^s expresan un intercambio de información y podrán afectar la marcha de otros sectores o unidades. De esta forma, es el vector P_i el que transfiere la decisión final, después de haber negociado cada subsistema sus propias metas junto con las metas de la unidad central, lo que lleva a una decisión.

Como no es explicado el algoritmo correcto a utilizar en el método de descomposición para cada subsistema, se propone utilizar un método para la ayuda en la toma de decisiones para cada iteración del subsistema 2, debido a que nuestra metodología se enfoca precisamente en este subsistema para tomar las mejores alternativas de producción. Posteriormente, para el subsistema 1, en la primera iteración se realiza un balance de materia y energía y con esos datos se propone realizar un modelo de programación matemática para satisfacer las metas de los productores primarios del proceso de producción, tomando en cuenta las metas de los productores secundarios.

Otra característica que hay que señalar de este método, es que no considera una jerarquización de los subsistemas (aunque Kornai lo explica posteriormente), sólo como es señalado oportunamente, para iniciar cada transformación en cada subsistema, la UC divide y reparte la información necesaria para comenzar dichas transformaciones. Esta información, guardada en la memoria de la UC se modifica al recibir la función respuesta de cada subsistema “ i ”. Se dice que la memoria se crea propiamente como tal, después del primer cálculo.

Además, el método de Kornai no considera un flujo de información entre los subsistemas ni tampoco un sistema de control, el número de iteraciones realizadas en cada subsistema no termina sólo si se cumple con la regla de, la cual puede ser interpretada de diferentes formas, de acuerdo al sistema que se esté trabajando. Al no tener un control las iteraciones pueden ser infinitas, o por el contrario, la solución del problema puede ser inexistente.

Como lo cita acertadamente Kornai, cada unidad económica posee la información que le concierne: los consumidores conocen sus preferencias y los productores conocen sus posibilidades técnicas. Es así que un método de descomposiciones sugiere un cálculo jerarquizado con información parcialmente descentralizada; los cálculos que realice el centro no necesitarán del conocimiento de las técnicas utilizadas por los diversos subsistemas, cada uno de ellos con sus propias metas y restricciones, es decir las decisiones de los subsistemas están descentralizadas. En un esquema coordinado, es necesario considerar la coherencia entre la lógica, el procedimiento y el mecanismo que se requiere representar.

La coordinación generalmente no asegura una descentralización eficaz si ésta no se basa en un modelo con hipótesis muy restrictivas sobre todo cuando existen interrelaciones entre los diversos subsistemas. De aquí que entonces sea necesaria una intervención más amplia de la Unidad Central, por ejemplo transmitiendo no sólo precios sino cantidades o un orden jerárquico de resolución de los problemas de los diferentes subsistemas.

1.7 Estructura de la metodología aplicada al caso de estudio: La Industria Petroquímica

La mayoría de los modelos que se han consultado en la literatura, acerca de la planificación de la Industria Petroquímica (IPQ), persiguen un objetivo específico, como ha quedado demostrado en el Capítulo II.

Por ejemplo, Rudd [10] establece que la función objetivo busque la operación tal, que satisfaga la demanda de los productos a un mínimo costo total de producción para la industria. Treviño [11], Sophos [12] y Mikkelsen [13] buscan optimizar linealmente la producción con base a la minimización del consumo de materias primas, con la restricción de cumplir los balances de materia. Otros autores se enfocan a estudiar el comportamiento de los precios, etc.

Para poder proyectar el comportamiento de la IPQ se requieren considerar aspectos químicos, tecnológicos, económicos, de ingeniería y de planificación. Dada la interacción que existe entre estos factores, el análisis que tome en cuenta el mayor número de éstos en forma adecuada será el más fidedigno.

En el corto plazo, la IPQ puede ajustarse a los cambios en las condiciones de oferta-demanda de los productos finales y de los petroquímicos básicos variando el factor de utilización de la capacidad instalada para las plantas existentes, así como algunas otras variables de operación.

En el largo plazo, en cambio, la IPQ se ajusta al crecimiento de los mercados expandiendo la capacidad instalada para los diferentes procesos, e incluso con la adopción de nuevas tecnologías que eliminan las obsoletas.

Para la IPQ el desarrollo tecnológico es primordial, ya que continuamente surgen nuevos procesos que pueden modificar la rentabilidad de las plantas ya existentes, la viabilidad de proyectos futuros y alterar la estructura de las cadenas.

Es un hecho que la IPQ requiere del uso intensivo de capital. El monto de la inversión requerida para construir una planta petroquímica puede equivaler al valor de la producción total de la planta durante dos o tres años, o incluso más. Esto, aunado a las variaciones y ciclos de la oferta, la demanda y los precios de las materias primas y productos involucrados, hace importante que además de evaluar el funcionamiento de la estructura de la IPQ, que se pueda hacer lo mismo con la incorporación de nuevas tecnologías a la estructura vigente, proponiendo que se lleve a cabo a partir de petróleo crudo en vez de los líquidos contenidos en el gas natural y de éste mismo, como se había planeado en la década de los años 60; esto es, emular su funcionamiento en diversos periodos de tiempo llamados el Horizonte de Planificación (HP) y obtener información para la evaluación con criterios múltiples de las alternativas estudiadas. En este caso, la dupla producto/proceso es muy importante y para la emulación propuesta, es totalmente indisoluble.

Es así como se propone un nuevo tipo de modelo de coordinación con múltiples niveles, es decir, una nueva formulación de la teoría que explica cómo es posible obtener, a través de las decisiones tomadas jerárquicamente a nivel de unidades descentralizadas, los mejores resultados globales para el conjunto de procesos insumo-producto que caracteriza a la IPQ. En este modelo de descentralización un subsistema del sistema considerado, produce un bien intermedio, utilizando para ello, por una parte insumos externos, pero sobre todo recursos internos producidos por los otros subsistemas, los cuales no pueden a su vez ser producidos sin el bien intermedio que les debe ser proporcionado por el primer subsistema.

No obstante a que utilizaremos como marco de referencia el modelo teórico descriptivo, en la metodología propuesta, en el cual no es necesario ningún algoritmo de descomposición, sin embargo utilizaremos este modelo para poner de relieve las propiedades de la descripción del sistema y las características del proceso de planificación y así completar el modelo abstracto.

De acuerdo a la revisión de métodos para la planificación de sistemas grandes y complejos del Capítulo II, a la fecha tales autores no han considerado la posible utilización de los métodos multicriterio para la toma de decisiones para realizar la planificación de la IPQ. En la metodología que proponemos, verificar esta posibilidad representa una de las contribuciones más importantes para el conocimiento científico, sin dejar de lado la programación matemática, después de haber utilizado dichos métodos.

Una de las hipótesis a comprobar en este caso de estudio es la decisión de utilizar o no una cantidad dada de petróleo crudo para destinarla a la producción de petroquímicos básicos en lugar de seguir exportándolo; la cantidad de petroquímicos básicos daría lugar a seguir un cierto número de rutas tecnológicas para producir productos intermedios y, finalmente, los productos finales elegidos que irán a la industria manufacturera para producir objetos, utensilios y partes de plásticos de diferentes tipos y fibras sintéticas.

Sin el afán de ser repetitivos, el sistema (la IPQ) se analizará a partir de los productos finales, de tal forma que el esquema presentado en la Figura IV.8 se aplicará para modelar éste. Así el nivel más bajo, el tercer nivel, será representado por los productores de los petroquímicos básicos; éstos se encargan de procesar la materia prima (petróleo crudo en este caso) para proporcionar insumos que serán procesados en el segundo nivel de la jerarquía, es decir, los productores de petroquímicos intermedios y finales. Por su parte, la unidad central representa el primer nivel de la jerarquía. Cada iteración realizada está controlada por sus respectivas variables de coordinación y en su caso por parámetros de decisión establecidos por la unidad central para poder llegar a las metas tanto de los productores de petroquímicos intermedios y finales como de los petroquímicos básicos y en conjunto, lograr las metas globales sugeridas por la unidad central.

Los productores de petroquímicos finales, a partir de una demanda (exógena al sistema) enviada por la unidad central, necesitan conocer cuáles serán las variables de control, coordinadas por la unidad central, definiendo cuatro criterios a evaluar junto con su respectiva función, necesarios para aplicar específicamente el método PROMETHEE [14], [15], [16], [17].

Los métodos Multicriterio son útiles para jerarquizar proyectos de forma tal que se determine el orden de preferencia de los proyectos creados a través del modelo de planificación para seleccionar un subconjunto de los proyectos como parte del plan obtenido previamente. La idea que subyace en esta metodología es comparar el conjunto de acciones o alternativas en cada etapa de la cadena petroquímica en estudio, congruente con la información dada al sistema de modelos; es con cada uno de los elementos que representa el valor del producto y que para la evaluación que nos ocupa, llamaremos "criterios" que representan en realidad un objetivo parcial.

Realizando el ejercicio de fungir como unidad central la autora de esta tesis, se definen los siguientes criterios:

- ↗ Maximizar el valor agregado
- ↗ Minimizar el uso de la energía destinada a los servicios
- ↗ Minimizar la inversión total
- ↗ Minimizar los peligros a la salud y ambiente.

Para la evaluación que se propone también será necesario evaluar el valor del producto considerando el retorno de la inversión (ROI).

Hay que recordar que para producir cada petroquímico final, existe más de una ruta tecnológica a evaluar, lo que caracteriza a esta parte del sistema como compleja.

Las rutas elegidas se “cruzan” aplicando los principios de teoría de redes, utilizando la técnica del algoritmo de recorrido propuesta por Rodríguez [18], que se aplica a partir de los productos finales hasta los insumos básicos requeridos para satisfacer una demanda exógena al sistema. El algoritmo de recorrido ya ha sido explicado en el Capítulo III.

La evaluación de los criterios junto con el valor del producto se realizará a través de las rutas de producción utilizando el algoritmo de recorrido. Esta evaluación representa la primera iteración del subsistema 2 en la Figura IV.8.

La Figura IV.9 muestra un esquema de producción de petroquímicos.

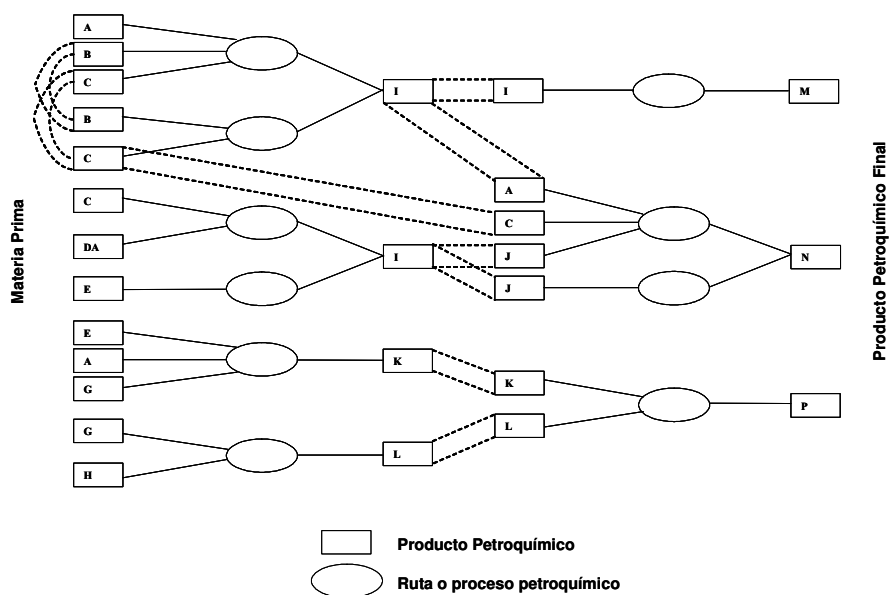


Figura IV.9. Esquema de producción de petroquímicos

Los métodos multicriterio, PROMETHEE II específicamente, se utilizarán para disminuir la complejidad de evaluación de cada ruta tecnológica existente para cada petroquímico. Con su aplicación, observando los cuatro criterios establecidos, se seleccionará la mejor

ruta tecnológica de proceso y posteriormente se seleccionarán los mejores petroquímicos que cumplan con los cuatro criterios establecidos por la unidad central. Estos cálculos representan la iteración 2 y 3 del subsistema 2 indicados en la Figura IV.8.

Posteriormente, los productores de petroquímicos básicos deben de analizar la factibilidad técnica de sus procesos para saber si podrán satisfacer la demanda de petroquímicos básicos. Este cálculo representa la primera iteración del subsistema 1, su variable de control será la cantidad de crudo a procesar, fijada por la unidad central.

Para conocer si las metas globales son cumplidas, el subsistema 1 se encargará de realizar un modelo de programación lineal para saber si la demanda se satisface y por último modificará este modelo para que calcule el número de unidades de proceso (refinerías) necesarias para alcanzar el mismo objetivo citado al principio de este párrafo, utilizando programación entera mixta. Estos cálculos representan las iteraciones 2 y 3 que se realizan en el subsistema 1.

No se debe olvidar que todos los resultados obtenidos en cada iteración de cada subsistema deben ser enviados como flujos de información a la unidad central, para mantener la coordinación y tomar las decisiones pertinentes.

Se aclara que en la presentación del análisis de la IPQ Mexicana, Apéndice I, las iteraciones se consideran con numeración consecutiva, es decir, el subsistema 2 que se llamará productores de petroquímicos intermedios y finales contendrá las iteraciones 1,2 y 3 y el subsistema 1, que será llamado productores de petroquímicos básicos, contendrá las iteraciones 4, 5 y 6. Adicionalmente a la demanda, el modelo que proponemos deberá contar con información técnica de los procesos, la cual se considera exógena al sistema.

1.7.1 Tipo de información a utilizar en el caso de estudio

- ↪ 1. Precios sombra: precios que se desvían de los precios reales usados en las transacciones, tales como el que propondremos para alimentar el crudo a una refinería petroquímica. En esta clase, se encuentran por supuesto, las variables duales de un programa de programación matemática. Este tipo de precios son obtenidos por la unidad central que recomienda un precio (llamado también de “cuenta”) para inducir la eficiencia a través de un sector o unidad de producción, en este caso el de la Industria Petroquímica.
- ↪ Indicadores de eficiencia. Muestran la eficiencia marginal del capital invertido para proporcionar un mayor valor agregado, por ejemplo. Un mayor valor agregado, debería en principio aumentar el empleo y generar un efecto multiplicador de las inversiones en el sector o sectores involucrados. Existen también aquellos denominados de beneficio/costo, tales como el Retorno de la Inversión (ROI) que implica una ganancia o del valor del producto y, por supuesto el costo total de producción.
- ↪ Estimados de los coeficientes de insumo producto en la industria química principalmente para representar la cantidad de producto que se puede producir por unidad de insumo o su inversa, así como la energía real necesaria para llevar a

cabo los procesos y traducida en servicios de electricidad, calor, agua de enfriamiento, vapor, etc.

- ↳ Programas de acción específicos, tales como producción de nuevos productos/procesos, donde se emplearán nuevas tecnologías. Aquí debe agregarse la información técnica relativa a procesos de transformación.

1.8 Comentarios Generales

El mayor aporte científico de este proyecto es la utilización combinada de herramientas provenientes de la Investigación de Operaciones para reducir la complejidad del sistema. Esta complejidad es provocada por los elementos combinatorios que existen para elegir las rutas tecnológicas.

Por otra parte el problema de planificación descentralizada a varios niveles, se resolverá aplicando la metodología diseñada para el caso de estudio, utilizando criterios múltiples, sin sujetarse a una sola función objetivo.

Se ha propuesto que los criterios a evaluar en este capítulo, estén relacionados con los costos y disponibilidad de las materias primas, los requerimientos de energía, el valor del producto, su valor agregado y la repercusión que tienen estos procesos a la salud humana y al ambiente.

De acuerdo al Capítulo I, el modelo se encuentra representado en forma de una jerarquía, donde sus elementos son: 1) Las fuerzas estratégicas que tengan por meta aumentar la productividad y delinear una ventaja competitiva. 2) Las actividades de las cadenas petroquímicas que den lugar al reconocimiento de su valor. 3) Las características de las tecnologías disponibles.

2 Bibliografía

- [1] J. Kornai, "V.3. Thoughts on Multi-Level Planning Systems," in *Multi-Level Planning: Case Studies in Mexico*, L. M. Goreux and A. S. Manne, Eds. Netherlands: North-Holland Publishing Company - American Elsevier Publishing Company, Inc., 1973, pp. 521-550.
- [2] J. Kornai, "Multi-level programming - a first report on the model and on the experimental computation," *European Economic Review*, 1969.
- [3] Liptak and Kornai, "Two-Level Planning," *Econometrica*, vol. 33, pp. 141-169, January 1965.
- [4] L. M. Goreux and A. S. Manne, (Ed.), "Multi-Level Planning: Case Studies in Mexico," Netherlands: North-Holland Publishing Company - American Elsevier Publishing Company, Inc., 1973.
- [5] W. Findeisen, F. N. Bailey, M. Brdys, K. Malinowski, P. Tatjewski, and A. Wozniak, "Control and coordination in hierarchical systems," in *International Series on Applied Systems Analysis* Great Britain: John Wiley & Sons, 1980.
- [6] G. Anandalingam, "A mathematical programming model of decentralized multi-level systems," *The Journal of the Operational Research Society*, vol. 39, pp. 1021-1033, November 1998.
- [7] G. W. T. White and M. D. Simmons, "Analysis of complex systems.," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences.*, vol. 287, 1970.
- [8] C. Escobar Toledo, "Descentralización y Coordinación de un Sistema Jerárquico de Oferta de Productos Petrolíferos y Petroquímicos," in *Memoria del Simposio: Modelos Matemáticos para la Planeación Energética*, Universidad Nacional Autónoma de México, 1983, pp. pp. 85-112.
- [9] D. Rudd and C. Watson, *Strategy of Process Engineering*. United States of America: John Wiley & Sons Inc., 1968.
- [10] D. F. Rudd, S. Fathi-Afshar, A. Treviño, and M. A. Stadtherr, *Petrochemical Technology Assesment*. New York, U.S.A: John Wiley & Sons, Inc., 1981.
- [11] A. A. Treviño, "Integrated Systems Study of the Development of the Mexican Petrochemical Industry," U.S.A.: University of Wisconsin-Madison, 1979.
- [12] A. Sophos, E. Rotstein, and G. Stephanopoulos, "Multiobjective Analysis in Modeling the Petrochemical Industry," *Chemical Engineering Science*, 1980.
- [13] J. K. Mikkelsen and D. F. Rudd, "Development of a Norwegian Petrochemical Industry," *Engineering and Process Economics*, 1981.
- [14] J. P. Brans, *L'ingénierie de la décision. Elaboration d'instruments d'aide à la décision. Méthode PROMETHEE*. Quebec, Canada: Université Laval, 1982.
- [15] J. P. Brans and B. Mareschal, *PROMETHEE: a new family of outranking methods in multicriteria analysis*: J. P. Brans, 1984.
- [16] J. P. Brans and P. Vincke, "A preference ranking organization method: The PROMETHEE method for MCDM," *Management Science*, vol. 31, pp. 647-656, 1985 1985.
- [17] J. P. Brans and B. Mareschal, *PROMETHEE-GAIA. Une Méthodologie d'Aide à la Décision en Présence de Critères Multiples*. Paris, France: Ellipses, 2002.

- [18] F. Rodríguez and C. Escobar Toledo, "Metodología para la Evaluación de Tecnologías y su Aplicación en el Cálculo del Valor Agregado en Cadenas Petroquímicas," in *Instituto Mexicano de Ingeniería Química*. vol. Abril D.F., México: Instituto Mexicano de Ingeniería Química (IMIQ), 1994.

Capítulo V.

**Caso de Estudio:
Aplicación de la metodología.**

**RECUPERACIÓN DEL VALOR
AGREGADO Y LA PRODUCTIVIDAD
DE LA INDUSTRIA PETROQUÍMICA
MEXICANA.**

1 Introducción.- Objetivos, hipótesis, justificación del caso de estudio y metas a alcanzar.

Los objetivos específicos que se persiguen en este estudio de caso, son:

- i. Fortalecer las estructuras tecnológicas de la Industria Petroquímica (IPQ), que contribuyan a promover la eficiencia, la competitividad y la capacidad innovadora de la industria y a reducir la dependencia del exterior en este campo disminuyendo las importaciones, según se muestra en el Apéndice I.
- ii. Planificar las inversiones en la IPQ a través del establecimiento de prioridades. Para ello es imprescindible no sólo una participación estatal en las inversiones, sino también la coordinación con el sector privado en la determinación de la inversión conjunta en la IPQ.
- iii. Evitar que la planificación de la IPQ se elabore a posteriori, o sobre bases endeble y rudimentariamente especulativas. Por ello, se debe contemplar la forma de inducir una estructura tecnológica propia, teniendo presente, por lo tanto, que el actual aparato productivo de la IPQ no puede ser transformado en el corto plazo; es decir, se trata de inducir, mediante mecanismos determinados por un ente denominado la Unidad Central (UC), una forma de producción de bienes PQ necesarios, que partan de los recursos que el país posee por una parte y que considere, por otra, las necesidades de sus habitantes.

Las hipótesis que se establecen son:

- iv. Que es deseable establecer para la Industria Petroquímica un rol estratégico concediéndole además, un carácter prioritario, con base a la oportunidad que ésta representa para aprovechar nuestros recursos naturales, ahorrar divisas y fortalecer la integración industrial del país. En virtud de que los hidrocarburos (gas natural y petróleo crudo) son la base y el punto de partida de ésta y tomando en cuenta que la elaboración de los productos que se obtienen de la primera transformación química pertenece al Estado, la política energética está entonces ligada directamente a la planificación de esta industria. Al mismo tiempo, esta planificación es base para las siguientes transformaciones químicas y representa la interfase entre los requerimientos de energía secundaria y las materias primas para la elaboración de productos finales, que son a su vez la fuerza motriz de diversas industrias manufactureras.
- v. Que se propicie la formulación de estrategias, planes y programas específicos para la producción de petroquímicos básicos, intermedios y finales para las Industrias Manufactureras que procesan los insumos mencionados, para estimular por este camino las inversiones productivas que el país requiere.
- vi. Que el futuro desarrollo de la Industria Petroquímica Nacional no puede basarse solamente en programar metas de corto plazo; es necesario también responder a los cuestionamientos de cómo, para qué y para quién producir, bajo la óptica de una planificación sectorial de mediano y largo plazos.
- vii. Que tener agrupada a la IPQ por cadenas productivas, aclara la situación de interdependencia de un grupo de petroquímicos considerados dentro del esquema de producción nacional. El análisis por cadenas productivas establece, de esta

manera, la intersección existente de un producto final con todos sus insumos e inversamente, las interacciones de éste con todos sus derivados, siendo el conjunto de los petroquímicos finales los que dan el efecto inductivo a toda la IPQ.

- viii. Aumentar el Valor agregado en toda la Industria y demostrar que la cadena de valor aumenta considerablemente, respecto de la sola exportación de crudo. A este respecto, observemos como un producto de consumo proveniente de la IPQ, aumenta su valor de manera inequívoca, tal y como se muestra en la siguiente tabla:

Petróleo crudo	1.0
Polietileno como materia prima	8.0
Bolsa de polietileno	12.0
Botella de polietileno elaborada a partir de poli(tereftalato de etileno)	72.0
Playera de poliéster elaborada a partir de p-xileno	170.0
Pelota elaborada a partir de poli-cloruro de vinilo	40.0
Suéter elaborado a partir de acrilonitrilo	150.0

Con los objetivos e hipótesis planteados, la justificación del caso de estudio se expresa a continuación:

En una economía mixta, la planificación de la IPQ debe consistir en un proceso adaptativo de programación del desarrollo de la IPQ, involucrando a las empresas de los sectores público y privado participantes de la producción, dentro de un marco de estrategias que conlleven al cambio estructural.

Para tal fin, se requiere de una planificación que permita instrumentar metas cualitativas en forma cuantitativa, haciendo factible la búsqueda de alternativas en un contexto de optimización de recursos.

En las industrias de proceso, como es el caso de la IPQ, la dependencia es muy alta, ya que un bien producido fluye entre las unidades de un mismo sistema intercambiando productos, de tal modo que un desequilibrio de cualquiera de las partes repercutirá sobre el costo social, la balanza comercial y la rentabilidad financiera de otras unidades, empresas y sectores. Aún sin que existan relaciones explícitas entre productos intermedios, la interdependencia puede darse si tales productos compiten por más de un sólo recurso escaso.

Las metas que se persiguen en el caso de estudio son:

- ↗ Contribuir a evaluar, jerarquizar, recuperar y elevar el valor económico de insumos de producción y tecnologías de cadenas petroquímicas, para reiniciar la producción de materias primas necesarias para la producción de petroquímicos en función de costos competitivos, rentabilidad adecuada y criterios de valor.
- ↗ Identificar un número determinado de insumos petroquímicos, provenientes del proceso de jerarquización de cadenas petroquímicas, para tomar decisiones respecto de estudios de mercado propuestos para este caso.

2 Presentación de la metodología aplicada al caso de estudio

En este capítulo se aplica la metodología desarrollada en el Capítulo IV al caso de estudio que se ha seleccionado: La Industria Petroquímica Mexicana.

En nuestro caso se analiza el potencial existente en la producción de petroquímicos finales (PQ Finales) a partir de petróleo crudo a través de la producción secuencial de petroquímicos básicos (PQ Básicos), petroquímicos intermedios (PQ Intermedios) hasta llegar a los PQ Finales, de acuerdo a un estudio de mercado realizado de forma exógena al sistema.

Se establece que el horizonte de planificación (HP) será de 19 años, comenzando en 2009 como año base para el primer periodo y posteriormente se analizarán 3 periodos más de 6 años cada uno, el segundo periodo se define de 2009 a 2015, el tercer periodo de 2015 a 2021 y el cuarto periodo de 2021 a 2027.

A continuación, en la Figura V.1 se muestra un diagrama de flujo, el cual sólo bosqueja de forma general, las iteraciones que se proponen en la metodología; posteriormente, se detallará con precisión utilizando la teoría de sistemas de coordinación y descentralización a varios niveles, llamada también planificación multinivel.

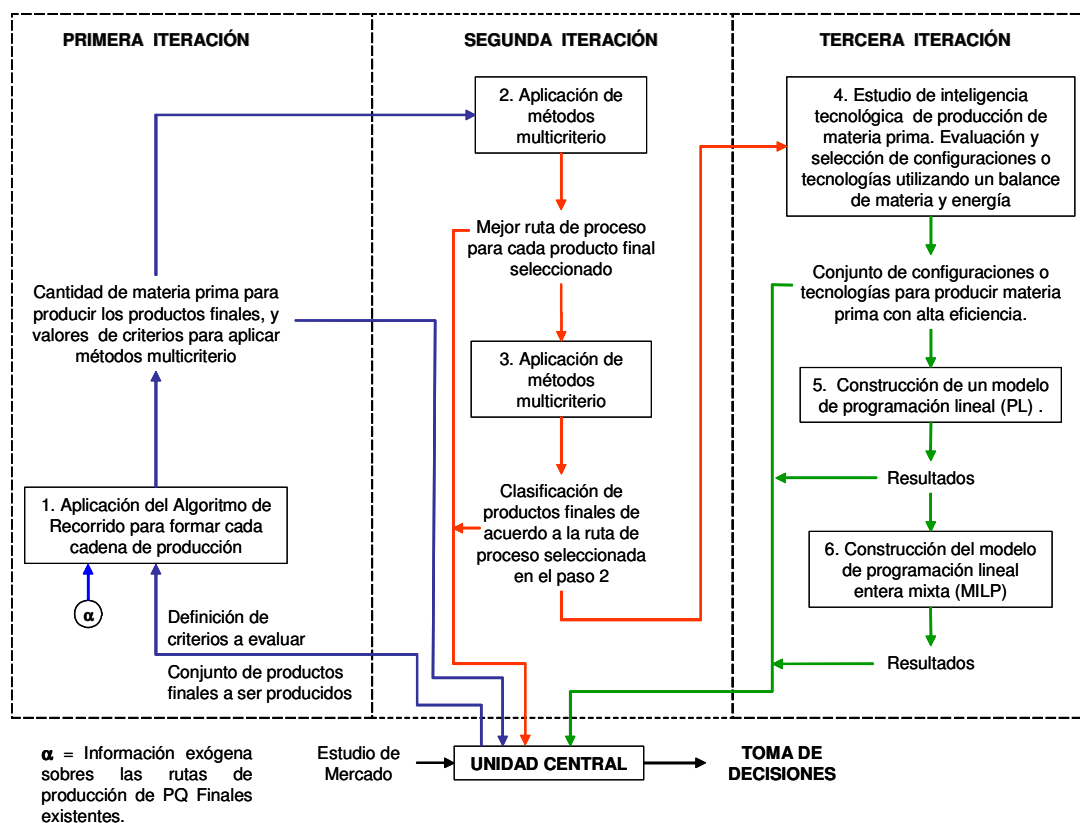


Figura V.1. Diagrama de flujo de la metodología propuesta aplicada al caso de estudio

Como puede observarse, la Figura V.1 muestra 3 iteraciones a realizar dentro de la metodología. Se presentan como tal, debido a que la unidad central (UC) controlará y decidirá si los resultados de cada acción en cada una de estas son adecuados para alcanzar los objetivos propuestos en la solución del sistema presentado, de lo contrario se tendrá que volver a realizar la acción.

El diagrama que se presenta en la Figura V.2, muestra los tres niveles que propone la metodología para analizar la factibilidad de alcanzar los objetivos propuestos. Para mayor facilidad de lectura, se decidió utilizar un color para marcar las acciones que deben realizarse en cada nivel junto con sus respectivas iteraciones. El color azul corresponde al primer nivel con la primera iteración y la primera acción (marcada con el número 1 en la Figura V.2); el color rojo representa el segundo nivel junto con la segunda iteración, la cual está formada por dos acciones (marcados con los números 2 y 3 en la Figura V.2), que deben realizarse tantas veces sea necesario para cumplir con los requerimientos de la UC. Finalmente el color verde corresponde al tercer nivel; como puede observarse, éste está compuesto por tres acciones (marcados por los números 4, 5 y 6 de la Figura V.2). Las respectivas abreviaturas que aparecen en este diagrama se encuentran explicadas abajo del diagrama.

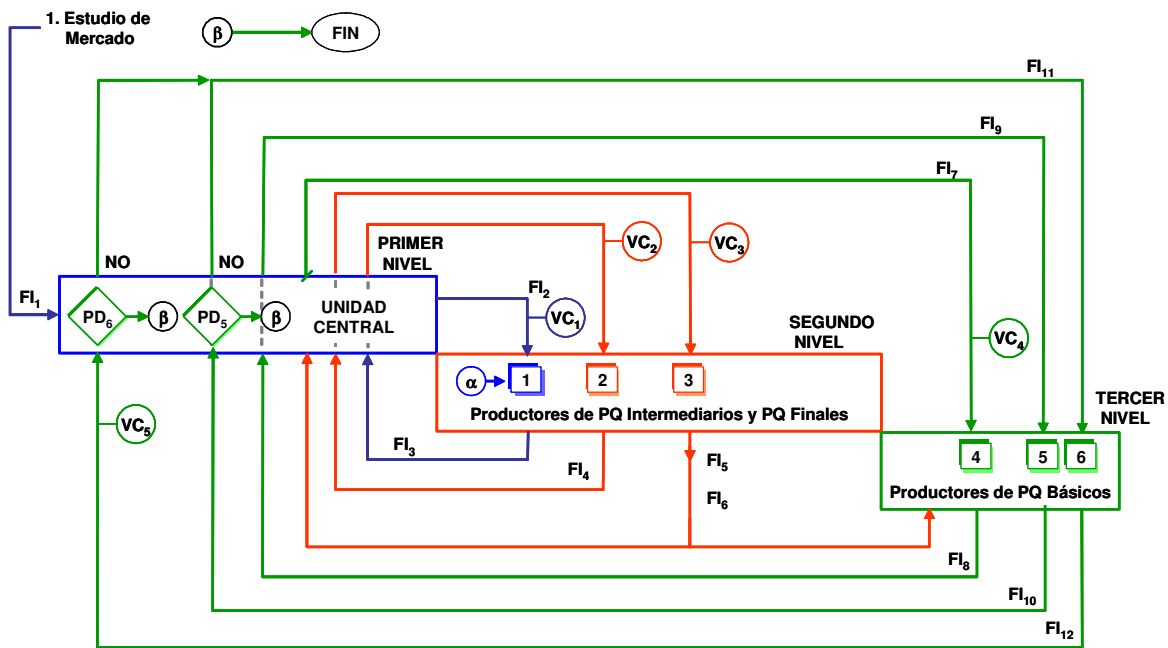


Figura V.2. Diagrama detallado basado en la metodología para resolver un sistema de planificación a varios niveles.

Donde:

FI_i = Flujo de información "i" entre niveles.

VC_j = Variables de coordinación entre las unidades de decisión local "j", las cuales realizarán las acciones correspondientes a su iteración y nivel.

PD_j = Parámetros de decisión de la UC para cada uno de los flujos de información enviados por cada una de las unidades de decisión local "j"

Es importante observar que la Figura V.2 muestra los flujos de información (FI) que envía la UC a cada uno de los actores que realizarán las acciones requeridas por la UC, representan las unidades locales de decisión en cada nivel de descentralización. De igual forma, se debe recordar que cada actor es autónomo para decidir la forma en que obtendrá los resultados requeridos por la UC, ya que se encuentran descentralizados. En efecto, la UC tendrá el papel de coordinarlos a través de las variables de coordinación (VC) definidas para en cada nivel y en sus respectivas iteraciones y con los parámetros de decisión (PD) también establecidos por la UC, para alcanzar los objetivos principales del sistema.

El primer nivel de descentralización está representado por la UC, que es el actor que controlará y tomará las decisiones. El segundo nivel de descentralización está representado por los productores de petroquímicos intermedios y finales, quienes deberán realizar la primera iteración (Acción 1) tomando en cuenta los flujos de información FI_1 , FI_2 y las variables de coordinación VC_1 , enviando sus resultados a la UC a través de FI_3 . La segunda iteración involucra nuevamente a los mismos actores (UC y los PPQ Intermedios junto con los PPQ Finales) para realizar las Acciones 2 y 3 que integran la segunda iteración, tomando en cuenta las VC_2 y VC_3 y enviando sus resultados a través de los FI_4 , FI_5 y FI_6 . El tercer nivel de descentralización está representado por los productores de petroquímicos básicos (PPQ Básicos). En este nivel se realizan tres iteraciones definidas por las Acciones 4, 5 y 6. El actor representante de este nivel debe tomar en cuenta los FI_7 , FI_9 y FI_{11} junto con las VC_4 , de acuerdo al diagrama de la Figura V.2, y enviará sus resultados a través de FI_8 , FI_{10} y FI_{12} a la UC. En esta tercera iteración la UC debe tomar decisiones comparando la información recibida por las Acciones 5 y 6 contra parámetros de decisión (PD) que ella misma ha establecido, y entonces se dará por resuelto el problema o comenzarán nuevamente las iteraciones. Se debe notar que cada iteración está ligada con la siguiente debido a que el flujo de información saliente de cada acción se convierte en el flujo de información entrante necesario para realizar las acciones de cada una de ellas.

Para puntualizar, la UC es el actor que controlará y tomará las decisiones y se encuentra en el primer nivel de descentralización. Los productores de PQ Intermedios y Finales (PPQF) y los productores de PQ Básicos (PPQB) serán los actores que participarán en el segundo y el tercer niveles de descentralización.

En las Figuras V.3 y V.4 se proporciona una descripción detallada de las acciones realizadas (identificadas con números) dentro de la metodología, así como de los flujos de información (FI), variables de coordinación (VC) y los parámetros para la toma de decisiones (PD), formulados como preguntas, de cada uno de los actores participantes.

**UNIDADES LOCALES DE DECISION
(ELEMENTOS DESCENTRALIZADOS)**

- 1: UC \Leftrightarrow PPQF: Investigación y construcción de las rutas de proceso disponibles para cada PQ Final. De la aplicación del algoritmo de recorrido se podrá conocer los PQ Intermedios de cada ruta de proceso.
- 2: UC \Leftrightarrow PPQF: Selección de la mejor ruta de proceso que cumpla con los criterios de evaluación definidos por la UC para cada PQ Final. Aplicación de los métodos multicriterio (PROMETHEE II)
- 3: UC \Leftrightarrow PPQF: Selección de PQ Finales mediante la aplicación de métodos multicriterio (PROMETHEE II)
- 4: UC \Leftrightarrow PPQB: Investigación de las mejores configuraciones para producir PQ Básicos con un alto rendimiento. Estudio de Inteligencia Tecnológica.
- 5: UC \Leftrightarrow PPQB: Desarrollo de un modelo de programación lineal (PL).
- 6: UC a PPQB: Desarrollo de un modelo de programación entera mixta (MILP)

FLUJOS DE INFORMACIÓN

- FI₁**: \Leftrightarrow UC: Demanda de cada PQ Final a evaluar; obtenida a través de un estudio de mercado.
- FI₂**: UC \Leftrightarrow PPQF: Demanda de PQ Finales a evaluar y definición de las variables de coordinación (VC₁).
- FI₃**: PPQF \Leftrightarrow UC: Rutas de proceso existentes para cada PQ Final evaluadas con el Método Generalizado de Redes (MGR).
- FI₄**: PPQF \Leftrightarrow UC: Conjunto de rutas de proceso seleccionadas y jerarquizadas para cada PQ Final tomando en cuenta las variables de coordinación (VC₂).
- FI₅**: PPQF \Leftrightarrow UC, PPQF \Leftrightarrow PPQB: Conjunto de PQ Finales seleccionados y jerarquizados tomando en cuenta las variables de coordinación (VC₃).
- FI₆**: PPQF \Leftrightarrow UC, PPQF \Leftrightarrow PPQB: Demanda de PQ Básicos necesarios para producir los PQ Finales.
- FI₇**: UC \Leftrightarrow PPQB: Disponibilidad total de crudo a procesar.

FLUJOS DE INFORMACIÓN

- FI₈**: PPQB \Leftrightarrow UC: Configuraciones de refinerías seleccionadas tomando en cuenta las variables de coordinación (VC₄). Balance de materia y energía, inversión y valor agregado para cada configuración.
- FI₉**: UC \Leftrightarrow PPQB : Información para el modelo LP: Φ_1 's de los PQ Finales jerarquizados, rendimientos de producción de cada configuración de refinación seleccionada, α_i (coeficientes de insumo producto para cada PQ Final jerarquizado, Ton PQ básico/Ton PQ final) y demanda de PQ Finales.
- FI₁₀**: PPQB \Leftrightarrow UC: Resultados del modelo LP.
- FI₁₁ = FI₉**: UC \Leftrightarrow PPQB: Información para el modelo MILP
- FI₁₂**: PPQB \Leftrightarrow UC: Resultados del modelo MILP, Precio del crudo que puede pagar la refinería.

Figura V.3. Descripción de las acciones realizadas en cada nivel y los flujos de información requeridos y/o enviados por la UC

Donde \Leftrightarrow representa el flujo de información saliente y/o entrante, tal como ya fue explicado en el capítulo 1.

VARIABLES DE COORDINACIÓN

VC₁: Inversión (Inv), Valor Agregado (VA), Valor del Producto (VP), Índice de daños a la salud y el ambiente (PS) y Energía consumida (Energía). Cada ruta de producción de PQ Finales se debe incluir el 25% de ROI (Valor definido por la UC)

VC₂: Cada criterio a evaluar debe cumplir con los siguientes parámetros:

Función	Criterio	% Peso
Min	Inv	20%
Max	VA	48%
Min	PS	15%
Min	Energía	17%

VC₃: VC₂ ;

Donde: Φ_i es el flujo neto con los que las rutas de producción de PQ Finales fueron seleccionadas jerárquicamente. (cf. Capítulo 1).

VC₄: Rendimientos de producción de cada PQ Básico, Costos de Operación e Inversión totales.

VC₅: La función objetivo del modelo de PL y, en su caso, la del MILP debe cumplir:

$$0 \leq \sum \Phi_i^* \in \{ \Phi_i \text{ de PQ evaluados} \}$$

Donde: Φ_i^* son los mejores valores de Φ_i de cada PQ Final jerarquizado por PROMETHEE II, y

$$\Phi_i^* > 0$$

PARÁMETROS PARA LA TOMA DE DECISIONES, FORMULADOS COMO PREGUNTAS

PD₅: ¿Oferta de PQ Finales \geq Demanda Requerida?

PD₆:

1. ¿Oferta de PQ Finales \geq Demanda Requerida?
2. ¿Valor Agregado _{Total} > 10% del Valor Agregado _{Industria PQ}?
3. ¿Inversión _{Total} > 25% Rentabilidad?
4. ¿Valor del Producto _{Total} > Precio del crudo en el Mercado Internacional?
5. ¿Consumo de Energía _{Total} < Demanda de Gas Natural equivalente en ft³/día?

Figura V.4. Descripción de las variables de coordinación (VC) y los controles de decisión (preguntas de decisión) definidos por la UC

A continuación se comienza a aplicar la metodología. Para mayor facilidad de comprensión en el diagrama de la Figura V.5, se mostrarán los tres niveles de descentralización pero sólo con la acción correspondiente a la primera iteración, junto con sus flujos de información y variables de coordinación. Posteriormente se irá completando a medida que la metodología se vaya desarrollando.

2.1 Iteración número 1.- Primer Nivel.

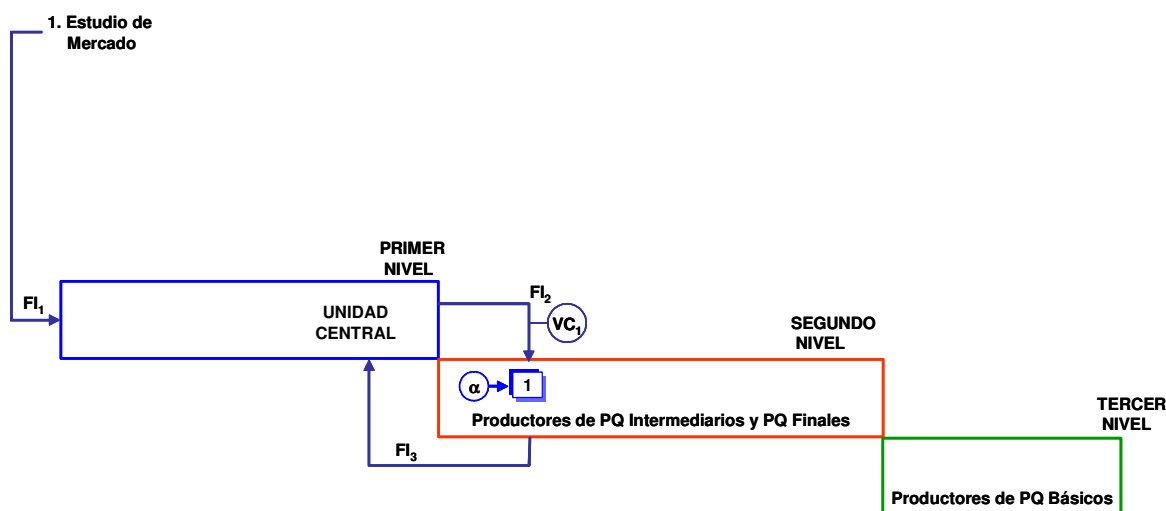


Figura V.5. Representación de la primera iteración dentro del diagrama de coordinación.

La Figura V.5 muestra la primera acción que deberá realizar el productor de petroquímicos intermedios y finales, la cual será construir las rutas de producción de los PQ Finales demandados por el mercado. Para ello necesita información técnica y económica para lograr construir las rutas de producción. En este estudio se ha considerado que esta información es exógena y se encuentra representada por el parámetro α . Esta información es el resultado de una búsqueda exhaustiva de los procesos y productos que forman una cadena de producción. En nuestro caso, utilizamos realmente la información del Process Economic Program [1], considerando que para el periodo de estudio no ha habido ningún cambio significativo.

Actualmente en México no se produce en una secuencia de procesos petroquímicos finales. Por el contrario, existe un conjunto de productores que sólo producen hasta un cierto petroquímico intermedio, el cual es vendido a otro conjunto de productores para producir los petroquímicos finales que tengan mayor demanda en el mercado. Uno de los objetivos de la presente investigación, es probar que la integración por cadenas productivas es más eficiente para lograr producir petroquímicos finales en una sola secuencia de procesos que hemos llamado "rutas de producción". Al contrario de lo que se describió arriba. Desde luego, se trata de hacer participar igualmente a la iniciativa privada, actualmente productora de petroquímicos finales e intermedios, no para que tenga que seguir las "órdenes" de la UC. Se trata más bien de una planificación coordinada y descentralizada, en donde la UC sólo cuida que las decisiones sean tomadas de tal forma que nuestros recursos naturales, el efecto sinérgico en toda la economía, el uso eficiente de la energía y el potencial daño al ambiente al ser humano, se consideren en el proceso de planificación sin menoscabo de maximizar la ganancia individual de los productores privados.

2.1.1 FI₁: Información exógena a la metodología.- a) Breve descripción sobre la selección los de petroquímicos finales.

La selección de los productos petroquímicos finales de la demanda final, como también se les denomina, cuya lista aparece en la Tabla V.1, se hizo de acuerdo a los requerimientos y consultas realizadas con PEMEX-PETROQUÍMICA, principalmente y con varios consultores especializados, así como de un estudio que los autores [2] de este modelo realizaron para PEMEX. La importancia de la cadena de los aromáticos fue expresada tanto por los funcionarios de PEMEX-PETROQUÍMICA, como por algunos consultores. La lista a la que se hace referencia son todos productos derivados de los aromáticos (benceno, tolueno y xilenos), así como del etileno y el propileno. Las referencias nacionales no se pueden divulgar, por tratarse de documentos privados, con cláusulas de secrecía. Se trata de una firma de consultoría denominada TEXNE, “Pre-feasibility Analysis of Royal Petrochem Aromatics Project” (septiembre de 2000) y del documento “Análisis de la posibilidad de participación de Petróleos Mexicanos en el Mercado Internacional de Petroquímicos y Derivados (1984-2010)”. Se consultaron también fuentes en Internet y la revista “Ambiente Plástico”¹, en particular del año 2005. Sin embargo la búsqueda sobre las recomendaciones anteriores nos llevó a varias publicaciones realizadas en Canadá.

Debemos destacar el estudio denominado “Aromatic Availability and Utilization Study for Alberta Economic Development and Alberta’s Industrial Heartland” realizado por T.J. McCann and Associates Ltd and Sigurdson & Associates (Marzo, 2003). Existen para la provincia de Alberta, en Canadá, varios otros estudios que fueron consultados a profundidad, tales como: “Canada’s Chemical industry. A Keystone Sector Contributing to our standard of living”, de la Association canadienne des fabricants de produits chimiques; “Alberta Polystyrene Production Options”, preparado para Alberta Department of Economic Development, por Harry Blair Consultants, en octubre de 2000 y “Alberta Propylene Upgrading Prospects” preparado para Alberta Department of Economic Development por T.J. McCann and associates y Sigurdson & Associates en marzo del 2001. En este caso, no es útil citar las referencias bibliográficas, ya que no se trata de documentos públicos.

Este estudio de mercado nos fue proporcionado por los autores referidos y no forman parte del desarrollo de la presente tesis; se trata en efecto, de información exógena que se utilizó para desarrollar la metodología empleada.

La Tabla V.1 enlista 12 petroquímicos finales a evaluar.

Tabla V.1. Lista de PQ Finales seleccionados exógenamente para su análisis y sus respectivas abreviaciones

Petroquímicos Finales		Abreviación por sus siglas en inglés
Anhídrido ftálico	=	PhA
(Hule) Estireno-butadieno	=	SBR
Poli(tereftalato de butileno)	=	PBT

¹ <http://www.ambienteplastico.com/>

Petroquímicos Finales		Abreviación por sus siglas en inglés
Poliéster (Fibras)	=	PEF
Poliestireno	=	PS
Polietileno de alta densidad	=	HDP
Polietileno de baja densidad	=	LDP
Polietileno lineal de baja densidad	=	LLDP
Poli(tereftalato de etileno) (Resinas y película)	=	PET
Polipropileno	=	PP
Poliuretano	=	PU
Resinas Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno / Estireno-Acrilonitrilo	=	ABS/SAN

2.1.2 FI₁: Información exógena a la metodología.- b) Estudio de mercado y pronóstico de los petroquímicos finales.

Los pronósticos de la demanda de los diferentes productos seleccionados, se efectuaron con un modelo llamado “a retardos escalonados”, que sirvió para pronosticar la demanda de cada uno de los mencionados productos de la Tabla V.2, a partir del 2005 y hasta el 2012. Para ello, se utilizaron tres escenarios de crecimiento del PIB manufacturero. Un escenario optimista con un crecimiento de 4.5% anual; otro pesimista con un crecimiento de 0.5% los primeros 3 años y luego de hasta 1.5% anual. Sin embargo, se decidió utilizar un escenario intermedio con un crecimiento del PIB de 1.5% los primeros 5 años y luego de 3% hasta el 2012, [3].

Como era de esperarse al aumentar la producción, las importaciones disminuyen y la demanda interna aumenta, cuestión que se refleja claramente en la tabla de pronósticos (Tabla V.2) que se presenta en este capítulo.

Para el pronóstico de los años 2013 al 2027, se utilizó la técnica de escenarios de Godet [4], [5] y Makridakis [6], tratando de que la demanda por los productos seleccionados, se pareciera a la demanda del Canadá (Alberta) que ocurriría antes del año 2012. Las razones de haber utilizado la demanda de Canadá, se debe a que: (1) el pronóstico que se realizó con información para México, deja de ser confiable después de 2012, debido a que la política macroeconómica del país es susceptible de cambiar; (2) el desarrollo de la Industria Petroquímica de México, no podría llegar a los niveles de producción pronosticados para Canadá. Esta demanda “ex post” es una demanda “ex ante” para los propósitos de nuestro trabajo. Para ello utilizamos tasas de crecimiento de acuerdo a cada producto seleccionado. Por lo tanto el germen de la prospectiva realizada con el método de los escenarios, fue el modelo con retardos escalonados por las razones expuestas anteriormente.

El modelo que se utilizó para cada uno de los petroquímicos finales, tiene la siguiente explicación, de acuerdo a Puente Moreno [2].

En el análisis económico, las variables endógenas no recogen instantáneamente el impacto que sobre ellas producen los cambios observados o inducidos por las variables exógenas. Tampoco se produce todo el efecto esperado en una sola unidad de tiempo, posterior al de la presentación de las causas.

En general, los efectos esperados se distribuyen con distinta intensidad sobre una sucesión de períodos. De aquí que el uso de los valores observados es equivalente a proponer las hipótesis de que las expectativas en el futuro están fuertemente basadas en las cantidades que se han observado y que, por lo tanto, no difieren de ellas de un modo sistemático. En efecto, en este tipo de modelos, los valores observados se caracterizan más bien como valores anticipatorios que proporcionan impulsos reales que tienden a cubrir un nuevo equilibrio entre el valor observado y el valor anticipatorio. Este es el principio de los modelos a retardos escalonados o con esperas adaptativas. Otra característica importante es que en este tipo de modelos es posible medir una componente de “arrastre”, o de impulso e incluso de inercia del consumo de períodos anteriores con un peso a veces tan importante como el de las variables explicativas o exógenas.

El modelo que sirvió de base para pronosticar los requerimientos de los petroquímicos finales seleccionados, incluye las siguientes variables:

$D_{i,t}$ = La demanda observada del petroquímico final “i” en el período “t”. La demanda observada es para todos los casos el consumo aparente (producción + importación – exportación).

$D_{i,t}^*$ = La demanda esperada tanto para el período de observación como para el de pronóstico del petroquímico “i” en el período “t”. La demanda esperada es un tipo de demanda “ex ante” que esperan o esperaron realizar los consumidores durante un cierto horizonte. La demanda esperada es calculada gracias al modelo utilizado [2].

$\hat{D}_{i,t}$ = La demanda calculada (para el período de observación o la pronosticada para el período de predicción) del petroquímico “i” en el período “t”. La demanda calculada es por definición, igual a la esperanza matemática de la función de demanda $[E(D_{i,t})]$, que a su vez está condicionada por un conjunto de variables exógenas o explicativas.

$PIBM_t$ = Producto interno bruto del sector manufacturero (a precios constantes) observado o pronosticado por medio de escenarios, exógenamente al modelo en el período “t” o en el período “t+n”.

$IMP_{i,t}$ = Las importaciones en volumen del petroquímico final “i” durante el período “t” o “t+n”.

t+n = al período comprendido entre las observaciones y el pronóstico. El horizonte de planificación (HP) para el pronóstico (“n”) abarca del año 2004 al 2027.

La razón de haber escogido como variable explicativa del modelo estructural al producto interno bruto del sector manufacturero es simple, ya que el PIB representa el Ingreso y el valor agregado total que este sector proporciona a la economía nacional. Desde luego, dentro del sector manufacturero se encuentra la Industria Química y dentro de ella una subdivisión de petroquímica, por lo que esta variable, agrega el comportamiento económico, de productividad y de fuente de ingreso en la economía mexicana. Por supuesto entre más crezca el PIB (considerado a través del enfoque de ingreso nacional), mayor demanda de petroquímicos habrá, toda vez que se producirá un efecto multiplicador de la demanda inducida hacia otros sectores de la economía. Por otra parte, se eligió como otra variable explicativa a las importaciones en volumen de cada uno de los petroquímicos seleccionados, debido a que la producción de éstos ha disminuido en forma dramática y las importaciones han crecido de forma exorbitante, tal como quedará demostrado en el Apéndice I. Aunque las importaciones están incluidas en el PIB, éstas sólo se refieren a las importaciones necesarias, cuando no se tienen los recursos naturales para su producción. Éste no es el caso de México por lo que la explicación del Consumo, está también relacionada con las importaciones.

2.1.3 FI₂: Demanda de PQ Finales a evaluar y definición de las variables de coordinación.

La demanda de los PQ Finales a evaluar se presenta en la Tabla V.2.

Tabla V.2. Demanda de los petroquímicos seleccionados para el HP (Ton/año)

Petroquímicos Finales	2009	2015	2021	2027
PhA	86,004	104,660	127,362	154,989
SBR	278,793	430,262	664,023	1,024,788
PBT	219,690	348,620	553,216	877,884
PEF	365,822	726,854	1,444,194	2,869,482
PS	544,608	970,625	1,729,891	3,083,088
HDP	1,039,893	1,707,132	2,802,500	4,600,702
LDP	1,061,016	1,484,879	2,078,071	2,908,237
LLDP	305,162	727,935	1,736,417	4,142,052
PET	1,704,280	2,099,414	2,586,160	3,185,757
PP	115,777	406,869	1,429,830	5,024,755
PU	220,313	312,079	442,067	626,200
ABS/SAN	528,639	886,581	1,486,885	2,493,655

Por lo que respecta al análisis que se debe tomar en cuenta para este capítulo, nuestra opinión es que la tasa de crecimiento del PIB manufacturero es demasiado optimista para los próximos 20 años. Así mismo los pronósticos estimados para el periodo 2012 a 2027, a través del escenario correspondiente al desarrollo petroquímico de Alberta, Canadá, fue también muy optimista, haciendo que las tasas de crecimiento de los diferentes productos sobrepasaran en algunos casos el 10% anual. Esto conduce a pronósticos de tipo exponencial que influyen sobre la demanda, acelerándola fuertemente para los años que

abarca nuestro horizonte de planificación. En la Tabla V.3 se presenta la tasa media anual de crecimiento² (TMAC) para cada PQ Final a evaluar.

Tabla V.3. Tasa media anual (TMAC) de crecimiento de los petroquímicos finales considerados en el estudio de caso

PQ Finales	TMAC
PhA	3.33%
SBR	7.50%
PBT	8.00%
PEF	12.12%
PS	10.11%
HDP	8.61%
LDP	5.76%
LLDP	15.59%
PET	3.54%
PP	23.30%
PU	5.98%
ABS/SAN	9.00%

Para el año 2006 el producto interno bruto manufacturero tuvo una tasa de crecimiento de 4.7% con respecto al año anterior, mientras que en el año 2007 su tasa apenas ha llegado al 0.4%. Dentro de la industria manufacturera se encuentra el sector de la industria química (sustancias químicas, derivados del petróleo, productos de hule y plástico) cuya tasa de crecimiento en 2006 fue de apenas 2.4% con respecto al año anterior y en 2007 tuvo un crecimiento nulo durante el segundo trimestre, según cifras del INEGI, [3].

No obstante, como ya se ha expresado, esta información se ha tomado como exógena en el desarrollo de la metodología, sabiendo que las cifras obtenidas podrán ser modificadas en el caso de que se tuvieran otras cantidades correspondientes a la demanda.

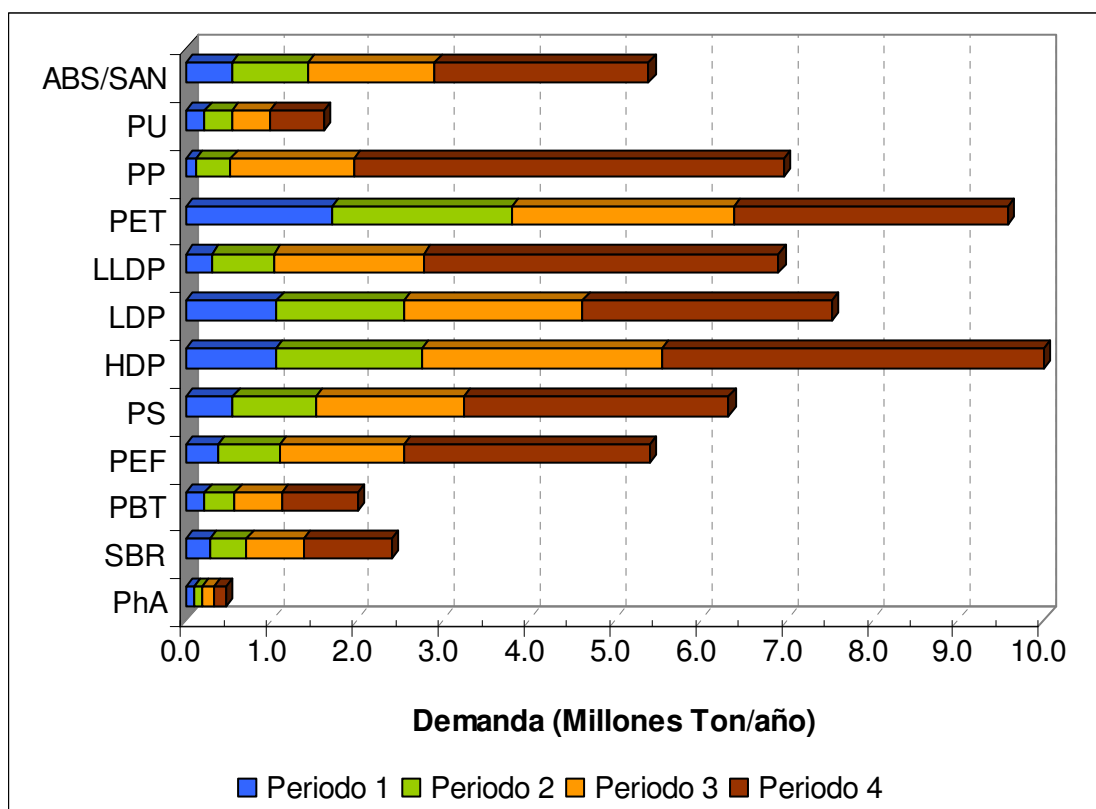
La Gráfica V.1 representa la demanda de productos petroquímicos finales desde 2009 hasta 2027, y puede observarse el comportamiento de la demanda de cada uno de los productos, siendo los de mayor demanda el polietileno de alta densidad (HDP), el lineal de baja densidad (LLDP) y el poliuretano (PU).

Es de observarse que la demanda de cada uno de los PQ Finales no presenta un crecimiento homogéneo, sino que de acuerdo a la Tabla V.3, la TMCA es variable.

$$TMAC = \left(\frac{D_t}{D_{t_0}} \right)^{\frac{1}{t}} - 1$$

² D_t = La demanda en cualquier periodo "t"

D_{t_0} = La demanda en un periodo base



Gráfica V.1. Pronóstico de la Demanda de Petroquímicos Finales para el HP

La UC definió cuatro criterios como variables de coordinación: 1) el valor agregado a lo largo de las rutas de producción para producir los PQ Finales, 2) las inversiones requeridas a lo largo de las rutas de producción de los PQ Finales, 3) la cantidad real de energía requerida por las diferentes rutas de producción considerando la producción de PQ Intermedios necesarios para lograr la producción de PQ Finales, y 4) el daño al ambiente y a la salud humana intrínseco a cada una de las rutas de producción.

Estos cuatro criterios equilibran la selección en la medida en que son representaciones de las tecnologías involucradas, del uso eficiente de los recursos naturales, de los aspectos económicos y de cuidado al ambiente y a la salud de la población.

Con los criterios anteriores se obtuvieron las mejores cadenas de producción para cada petroquímico final.

2.1.4 VC₁, Acción 1 y FI₃- Construcción de cadenas de procesos y productos y utilización del algoritmo de redes generalizadas.

Para comenzar este apartado, se debe explicar que las variables de coordinación, las cuales se han definido como las variables (criterios para MCDA) para coordinar el “diálogo” entre la UC y los productores de PQ Intermedios y PQ Finales que representan

las unidades locales de decisión con la UC y viceversa. No obstante, estas variables se encuentran asociadas a una función de maximización o minimización de los criterios definidos. Dicha función es necesaria para realizar la evaluación de la acción 2, como lo indica el diagrama de la Figura V.2. Por tal motivo se indican a continuación las respectivas funciones que debe cumplir cada criterio.

- ↪ Maximizar el valor agregado a lo largo de la cadena petroquímica para producir los petroquímicos finales, tomando en cuenta que el valor agregado se puede expresar como: valor del producto menos costos variables de producción para cada petroquímico en la cadena.
El valor del producto se define como: costos totales de producción más una tasa de interés ($i\%$) como retorno de la inversión, dónde $i = \text{rentabilidad}$. La UC considera una importancia para este criterio del 48% en peso.
- ↪ Minimizar el monto de las inversiones requeridas a lo largo de las cadenas para producir los petroquímicos finales, con una importancia para la toma de decisiones con un peso de 20%.
- ↪ Minimización de la cantidad real de energía requerida por los diferentes productos/procesos a lo largo de las cadenas petroquímicas para producir los productos finales con un peso de 17%.
- ↪ Minimización del riesgo de daño al ambiente y a la salud humana para todos los productos a lo largo de la cadena con una importancia de 15%.
- ↪

Como puede observarse el mayor peso es para el valor agregado debido a que es uno de los objetivos más importantes planteados en la presente tesis.

La explicación de los criterios es:

La minimización del consumo de energía de los procesos involucrados para cada cadena productiva, es importante debido al principio de conservación de la energía y al uso eficiente que de ésta se haga, lo cual conlleva también a contribuir al desarrollo sustentable.

Por lo que respecta a la maximización del valor agregado, este representa la oportunidad de agregar mayor valor a la cadena de producción incrementando el capital, el trabajo y la tecnología que son tres elementos importantes para el desarrollo económico del país y que tendrán efectos indirectos positivos para el resto de la economía [7].

La minimización de la inversión representa el uso de un recurso escaso, como lo es el recurso financiero, de tal forma de llevar a cabo la mejor utilización de éste. Cabe recordar que además, cada una de las inversiones requeridas en cada cadena se obtiene considerando 3 capacidades diferentes que daban lugar a 3 inversiones para cada cadena, reflejando así, las economías de escala.

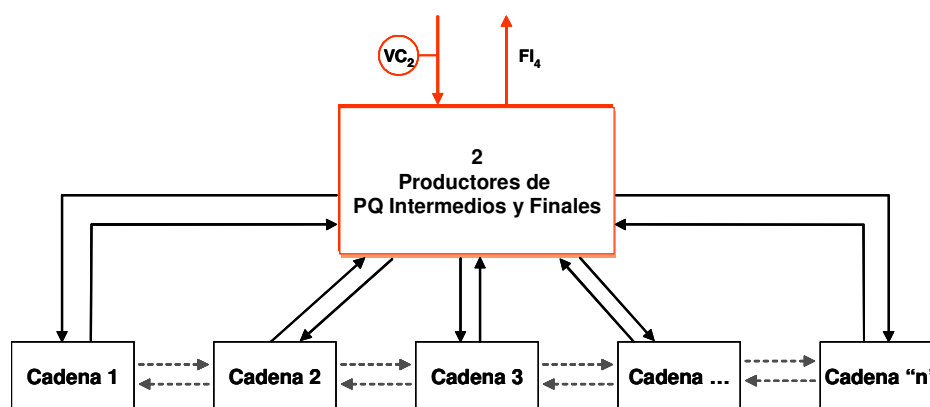
La minimización del daño al ambiente y a la salud humana, fue un parámetro que es importante, para evitar que los productos dentro de las cadenas pudieran tener consecuencias respecto al ambiente debido a la contaminación por sustancias químicas nocivas así como también a la salud humana, puesto algunas sustancias que se generan

en la producción de los petroquímicos, pueden producir daños tan importantes a la salud, como es el caso de productos que se ha demostrado claramente que son cancerígenos, entre otros.

La búsqueda de esta información se realizó de forma exhaustiva, ya que una sola fuente de información no contiene los datos requeridos para medir estos peligros. En la bibliografía se pueden observar las consultas realizadas [18-46].

Considerando que las unidades para medir estos daños se encuentran en la literatura en forma de índices, tomamos esta información y clasificamos y agrupamos la peligrosidad tanto para el ambiente como para la salud, de forma de agregar en uno sólo las características que se requerían. Se utilizó una escala arbitraria de 10 a 60, siendo 10 el que ocasiona menos peligros y 60 los que ocasionan el máximo peligro. Estos valores fueron normalizados para obtener los nuevos valores utilizados en la acción 2 correspondiente al diagrama de la metodología (Figura V.2).

La Figura V.6 es un esquema de descentralización interno, en el cual se han agrupado a los productores de PQ Intermedios y PQ Finales en un solo actor representativo en la metodología que se está proponiendo. En esta figura se puede observar que las rutas de producción se encuentran comunicadas unas con otras por los requerimientos de PQ Intermedios necesarios para construir una sola ruta de producción de cada PQ Final.



Alternativas de rutas de producción para un solo producto final demandado

Figura V.6. Diagrama representativo de la coordinación y toma de decisiones de los productores de PQ Intermedios y Finales

De forma más particular, la Figura V.7 muestra de forma general, que la producción de un solo PQ Final puede tener más de una ruta de producción. Todas estas rutas comienzan con una materia prima específica, la cual es transformada a un insumo intermedio, el cual a su vez se convierte en materia prima del siguiente proceso hasta llegar a la producción del producto final (*cf.* Capítulo 2, en particular el modelo insumo-producto de Leontief). Es por ello que cuando se habla de ruta de producción se debe de tener en cuenta que está formada por una secuencia de procesos y productos, que hemos considerado como inseparables para poder alcanzar el objetivo deseado.

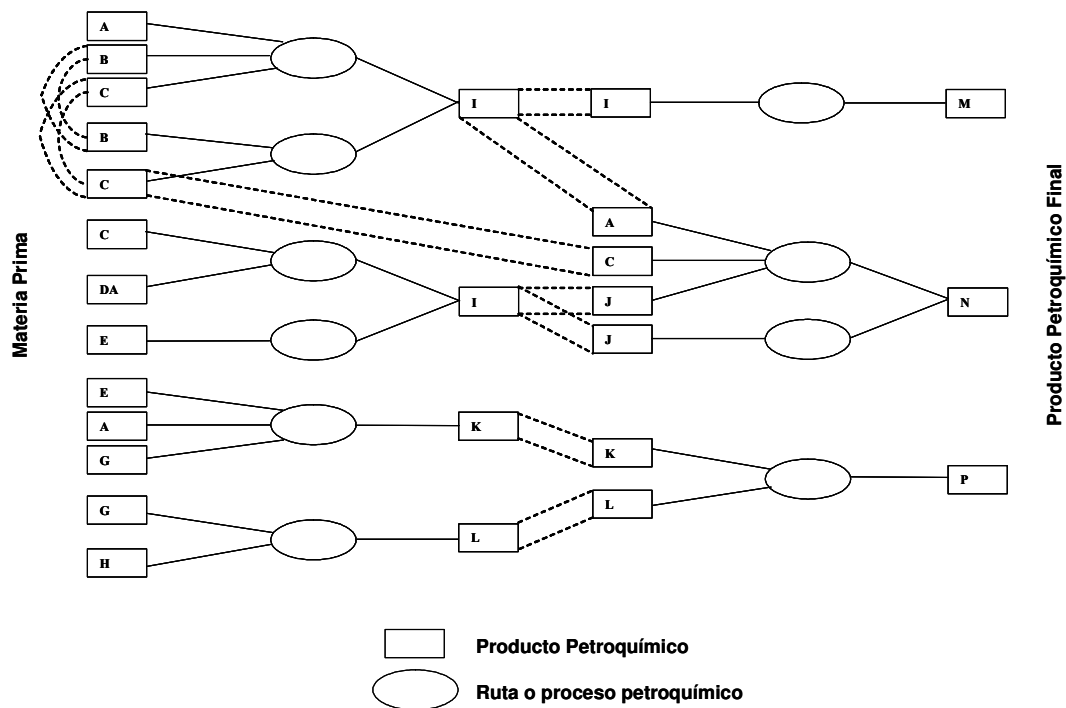


Figura V.7. Representación gráfica de las diferentes rutas de producción existentes para cada petroquímico seleccionado.

La construcción de rutas de proceso se realizó a través de la utilización del algoritmo de recorrido expresado matemáticamente como un problema de redes generalizado (GNP, por sus siglas en inglés). Sin el afán de ser repetitivos, de acuerdo al Capítulo III, se ha considerado importante recordar las ecuaciones con las que éste se desarrolló.

Para el algoritmo de recorrido, se han utilizado las siguientes restricciones:

Sea x_{ij} = la cantidad de flujo sobre el arco (i, j) durante el HP.

Así, el modelo de red generalizada es:

$$\sum_{j=1}^p x_{kj} - \sum_{i=1}^p x_{ik} = T_k \quad \text{para cada nodo intermedio "k"} \tag{Ec. V.1}$$

Donde T_k representa los valores de flujo neto de materias primas/productos/procesos en cada nodo "k", asociándoles además, diferentes atributos, consistentes con los cuatro criterios múltiples utilizados.

Se define que S_i , como la capacidad de producción de una planta petroquímica i ($i=1,2,3,\dots,m$), habiendo "n" diferentes productos finales cuya demanda por unidad de tiempo es conocida como D_j para cada producto j ($j=1,2,3,\dots,n$), incluyendo los diferentes procesos. Por su parte a_{ij} , indica la correspondiente producción que es concomitante con

las eficiencias de producción en términos de relaciones insumo/producto; es decir se trata de los coeficientes estequiométricos reales de las reacciones que se describen en la red.

Por lo tanto, se tienen que cumplir las siguientes restricciones adicionales:

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} \leq S_i \quad \forall i = 1, 2, \dots, m \quad \text{Ec. V.2}$$

y,

$$\sum_{i=1}^m a_{ij} x_{ij} \geq D_j \quad \forall j = 1, 2, \dots, n \quad \text{Ec. V.3}$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad \forall i \text{ y } j \quad \text{Ec. V.4}$$

La restricción (V.3), es la fuerza directriz para construir la red representada anteriormente, debido a que ésta induce la producción de cualquier producto en dicha red a través de la demanda tomada como una variable exógena.

Desde el punto de vista de la planificación descentralizada en varios niveles, significa que la UC ha solicitado a los productores de los petroquímicos finales, construir una red con la información necesaria para poder obtener la demanda inducida de los diversos productos que han sido seleccionados, obteniendo, además como atributos, su valor agregado, la cantidad de energía necesaria para hacer funcionar los procesos, la inversión de cada proceso de producción, incluyendo la capacidad de producción dada, de donde se pueden elegir tres de éstas y cada una con inversiones que son diferentes de acuerdo a la ecuación V.5:

$$Inv = b(Capacidad)^a \quad \text{Ec. V.5}$$

Donde a y b son constantes para cada proceso y cada capacidad. Esta ecuación representa las economías de escala.

Adicionalmente, para la utilización del algoritmo de recorrido se necesita la siguiente información de cada uno de los procesos-productos intermedios:

- ↗ Los coeficientes reales de insumo-producto que explotan el marco de la estequiometría de los compuestos químicos a través de reacciones que dan lugar a otros compuestos, denominados productos. Estos coeficientes se relacionan con las plantas de proceso con tecnología conocida.
- ↗ Costos totales de producción para todas las rutas de producción de la cadena.
- ↗ Índices de daño al medio ambiente y a la salud humana para cada producto a lo largo de las rutas de producción.

De la aplicación de este algoritmo se obtendrán los siguientes resultados representados por el FI_3 que envían los productores de petroquímicos intermedios y finales a la UC.

Se ha añadido el “Valor del Producto” (VP) de cada petroquímico final, como otro atributo, siendo una variable próxima al precio de todos los petroquímicos en una cadena de producción.

De haber utilizado precios reales con los que se comercializan estos productos, nos hubiéramos enfrentado al carácter volátil de los mismos, como quedó demostrado en el Capítulo 3.

Asimismo, intervienen la cantidad de energía real necesaria para cada proceso en cada ruta de producción y las Inversiones en toda la ruta de producción, considerando economías de escala.

Por último, el valor agregado en el sistema de los productos petroquímicos finales, representativa del valor que para la economía tendrá la recuperación de éste, de acuerdo al objetivo con el que se propuso este caso de estudio.

Estos resultados, corresponden a las variables de coordinación definidas para este nivel.

Debido a la extensión de cada una de las rutas tecnológicas, éstas se pueden consultar en el Apéndice III. La programación de este algoritmo se realizó por [8] y puede consultarse la bibliografía.

La Tabla V.4, presenta el número de rutas de proceso a través de las cuales se pueden producir los PQ Finales demandados.

Tabla V.4. Número de rutas de producción existentes para cada petroquímico final seleccionado

Petroquímicos Finales	No. de Rutas
PhA	2
SBR	14
PBT	14
PEF	9
PS	14
HDP	4
LDP	2
LLDP	4
PET	9
PP	4
PU	8
ABS/SAN	14

El número de combinaciones de las “n” rutas posibles, si se tomaran “n-m” cada vez, es:

$$C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!}$$

Donde m es el número de PQ Intermedios y Finales que participan en cada ruta de producción.

2.2 Iteración número 2. Segundo nivel.

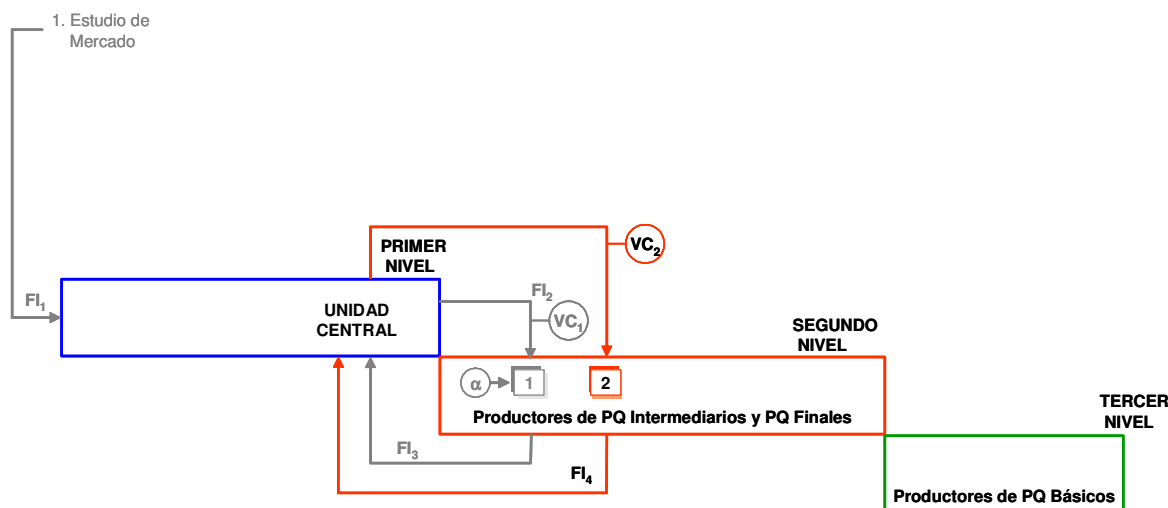


Figura V.8. Representación de la segunda iteración dentro del diagrama de descentralización con la ejecución de la Acción 2.

La Figura V.8 representa la segunda iteración en donde se ejecutará la Acción 2, seleccionando la mejor ruta tecnológica de cada PQ.

2.2.1 VC_2 , Acción 2 y Fl_4 . - Selección de la mejor ruta de producción para cada PQ Final. Resultados.

Para ejecutar la Acción 2 de acuerdo a la metodología, se utilizan los métodos multicriterio (MCDA, por sus siglas en inglés), específicamente PROMETHEE II, [9-14]. Para ello se deben alimentar las VC_2 calculadas en el apartado 2.2.4, además de la demanda para cada periodo del HP enviadas en Fl_2 .

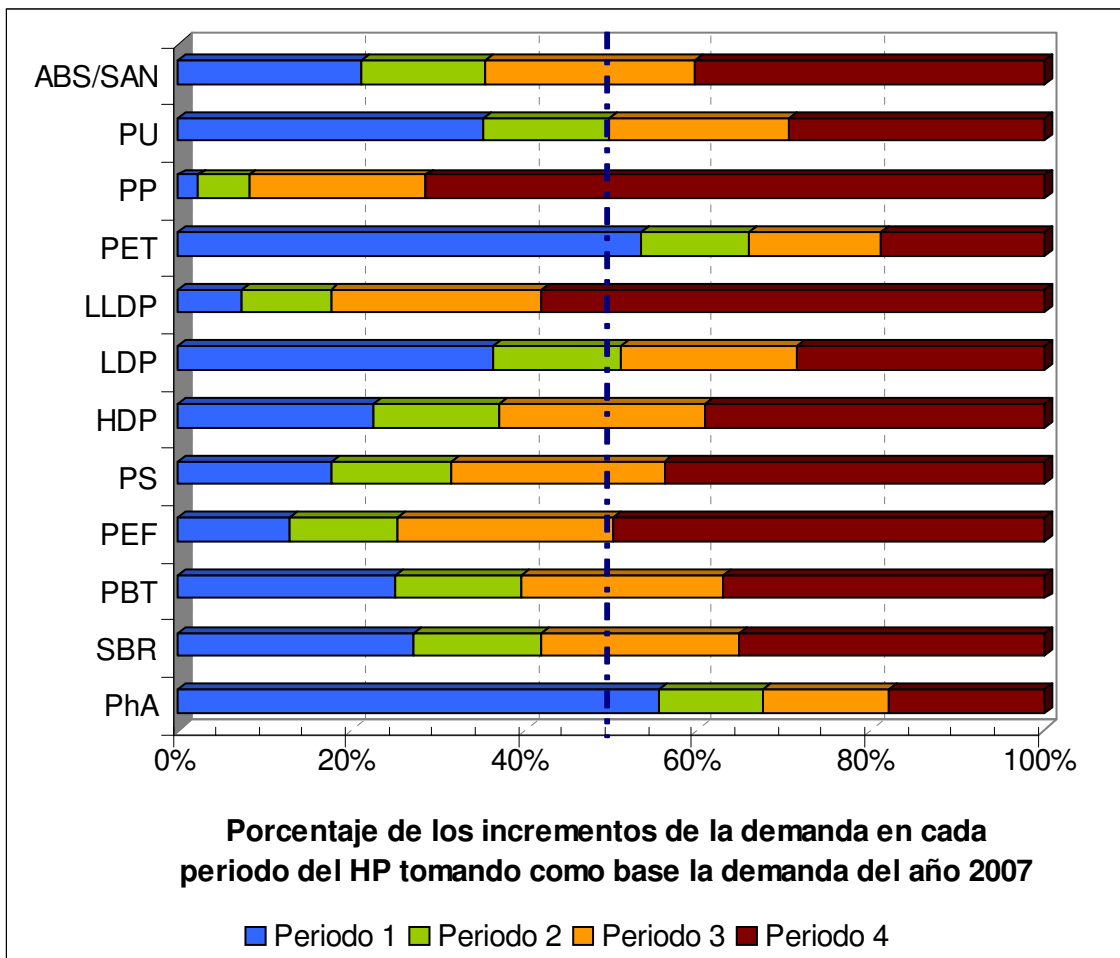
Para realizar esta evaluación el actor del segundo nivel de planificación tomará la demanda del año 2009 en el primer periodo, no obstante para los periodos 2, 3 y 4 e tomarán los incrementos de ésta utilizando la siguiente ecuación:

$$\Delta Demanda = Demanda_{t+1} - Demanda_t \quad \forall t = 2, 3, 4 \quad \text{Ec. V.6}$$

Esto es debido a que en dichos periodos sólo se evaluará el incremento de la demanda faltante del periodo " t " al periodo " $t+1$ ", para completar la demanda requerida en el periodo subsecuente, iniciando con el primer periodo " $t=1$ ". La Tabla V.5 muestra las cifras incrementales a ser evaluadas con este razonamiento. La Gráfica V.2 muestra el porcentaje equivalente de la demanda en cada periodo tomando como base el año 2027, el cual representa el total de la demanda a satisfacer en el HP.

Tabla V.5. Incrementos de la demanda con respecto al periodo “t”

PQ Final	Periodo 1 (2009)	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4
PhA	86,004	18,656	22,702	27,627
SBR	278,793	151,469	233,762	360,765
PBT	219,690	128,930	204,596	324,668
PEF	365,822	361,033	717,339	1,425,288
PS	544,608	426,017	759,266	1,353,197
HDP	1,039,893	667,239	1,095,368	1,798,202
LDP	1,061,016	423,864	593,192	830,166
LLDP	305,162	422,772	1,008,482	2,405,635
PET	1,704,280	395,134	486,746	599,597
PP	115,777	291,091	1,022,962	3,594,925
PU	220,313	91,766	129,989	184,132
ABS/SAN	528,639	357,942	600,304	1,006,770



Gráfica V.2. Porcentaje de los incrementos de la demanda en cada periodo del HP

Como puede observarse en la Gráfica V.2, en la mayoría de los casos el intervalo de la demanda del último periodo es considerablemente mayor a la de los otros periodos. Por ejemplo, los más sobresalientes son los incrementos que corresponden al LLDP y al PP ya que son iguales o mayores al 60% de la demanda faltante requerida. Si se toma como medida un incremento del 50% para cada periodo, también se puede observar que el PhA y el PET equivalen sobre el año base (2009) a más del 50% de los incrementos de los productos restantes.

Al finalizar la evaluación de las mejores rutas de producción de los PQ Finales, ésta será enviada a través del FI₄ a la UC. Estos resultados se pueden encontrar en el Apéndice III, sección 2.

Como ejemplo de la evaluación realizada, la Figura V.9 muestra la pantalla resultante del programa Decisión Lab [9-15] que se utilizó para hacer la evaluación de la mejor ruta de producción del PU.

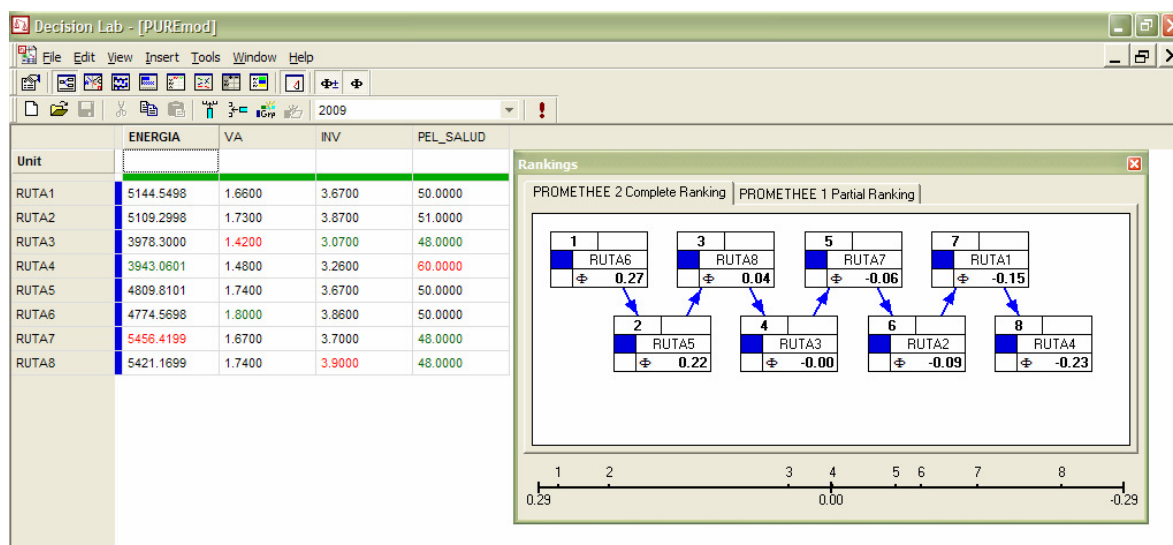


Figura V.9. Evaluación de la mejor ruta tecnológica para el Poliuretano en el periodo 1

La producción del PU tiene 8 diferentes rutas de producción. Utilizando PROMETHEE II se obtiene la jerarquización de cada una de las rutas, resultando en primer lugar aquella que con los valores más altos de Φ_i cumpla con la Max (VA), la Min (Energía), la Min (Inv) y la Min (Peligros a la Salud). En la Figura V.9 también se muestran los valores de los flujos netos de información (Φ_i) de cada una de las rutas evaluadas.

Antes de continuar presentando los resultados es importante recordar que en la evaluación realizada por PROMETHEE II, además de especificar los valores de cada criterio, la función que deben cumplir éstos y los porcentajes en peso de importancia de cada uno de ellos, también se debe especificar el criterio generalizado a utilizar en cada función.

Para la Max (VA), la Min (Energía) y la Min (Inversión) se utilizó el criterio generalizado en “V” dónde sólo hay que especificar el umbral de preferencia estricta “p” y para la Min (Peligros a la Salud y al medio ambiente) se utilizó el criterio generalizado de “niveles” en dónde hay que especificar el umbral de preferencia estricta “p” y el umbral de indiferencia “q” ya que como se mencionó anteriormente, los valores utilizados para la evaluación de este criterio se obtuvieron a partir de una escala de valores que fue normalizada.

La Figura V.10 representa la definición de cada criterio generalizado utilizado de acuerdo a la teoría de PROMETHEE, explicada en el capítulo 1.

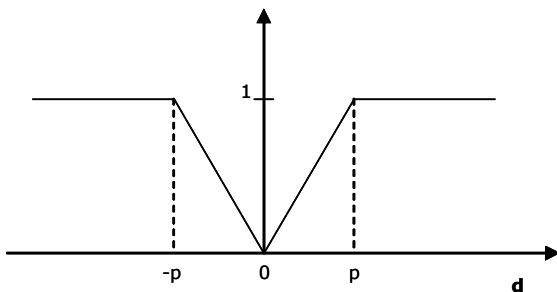
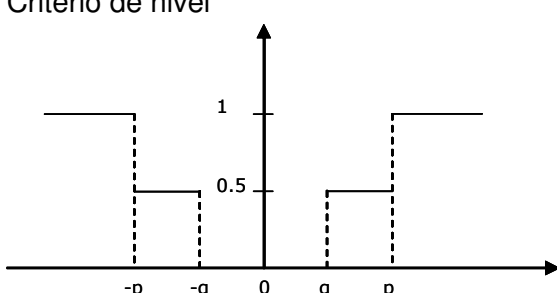
Criterio Generalizado	Forma	Parámetros a fijar
<p>Tipo 3. Criterio en forma de V</p> 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ \frac{d}{p} & 0 \leq d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	p
<p>Tipo 4. Criterio de nivel</p> 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ 0.5 & q < d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	p, q

Figura V.10. Criterios utilizados para la primera y segunda evaluación con PROMETHEE II (Acciones 2 y 3)

$P(d)$ representa la función de preferencia en función de la decisión “d” a tomar, mientras que p y q son los umbrales de preferencia e indiferencia, respectivamente.

Para los umbrales de preferencia estricta especificados también por la UC, se utilizaron las medianas de los valores, ya que el VA, la Energía y la Inversión tienen valores numéricos que expresan realmente la cuantificación de lo que cada uno significa para el tomador de decisiones. En cambio, para el criterio de peligros al ambiente y a la salud, es más adecuado considerar una forma de nivel, ya que este criterio está representado por índices agregados.

Posteriormente, la ejecución de la Acción 3 se realizará con las mismas consideraciones presentadas en este apartado.

Ahora, los resultados enviados a través de FI_4 a la UC se presentan en la Tabla V.6.

Tabla V.6. Ruta de producción seleccionada utilizando PROMETHEE II

PQ Final	Ruta Seleccionada para los diferentes PQ Finales para los periodos 1, 2, 3 y 4
PhA	Ruta I
PEF	Ruta I
SBR	Ruta XIV
HDP	Ruta IV
LDP	Ruta II
LLDP	Ruta IV
PBT	Ruta II
PS	Ruta II
PP	Ruta I
PU	Ruta VI
ABS/SAN	Ruta IV
PET	Ruta VIII

Adicionalmente se envía el valor del VA, Energía, Inversión y Peligros a la salud y al medio ambiente junto con las respectivas Φ_i calculadas.

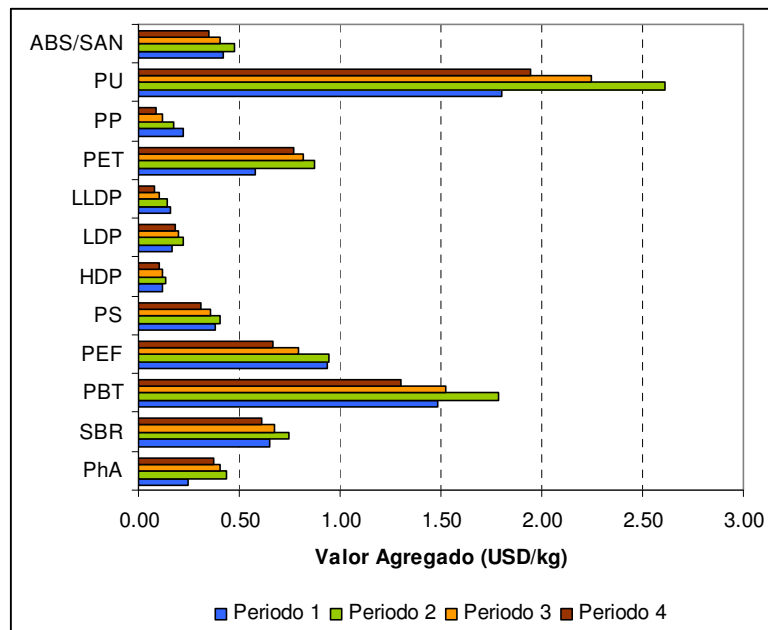
Para fines prácticos de análisis, se graficaron los valores de cada uno de los criterios evaluados. Los valores numéricos se pueden encontrar tabulados en el Apéndice III (Tablas 2, 3, 4 y 6 ap. III).

Los valores de los criterios de VA, Energía e Inversión se encuentran expresados de forma unitaria en USD constantes del 2006 por kg de producto final.

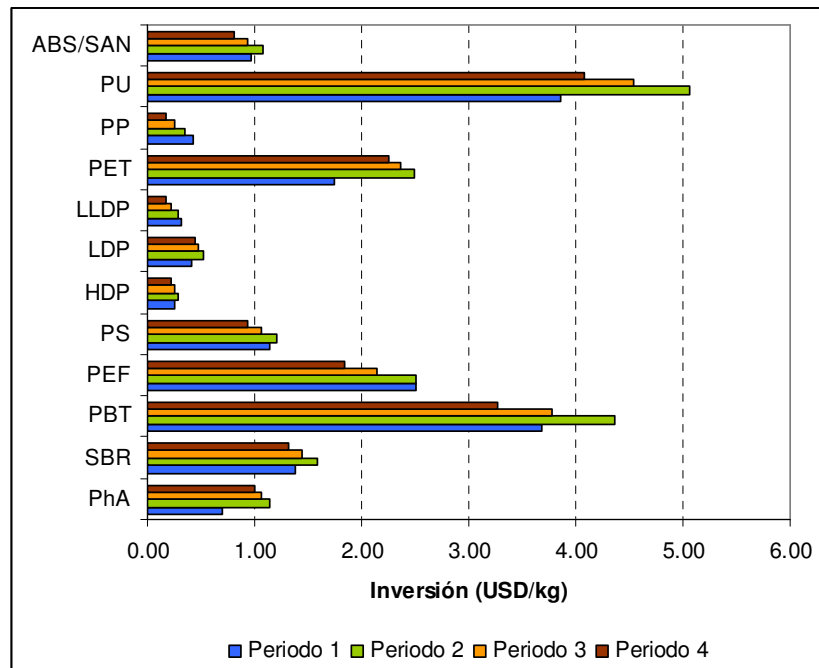
La Gráfica V.3 muestra claramente que los mayores valores agregados de las cadenas seleccionadas son para el PU, el PET, las PEF, y el PBT.

La Gráfica V.4 muestra que lo menores valores para la inversión fueron para el HDP, LDP, LLDP y el PP, considerando que para cada una de las rutas de producción se manejaron 3 diferentes capacidades, cada una de las cuales daba lugar a montos de inversión diferentes. (cf. Apéndice III)

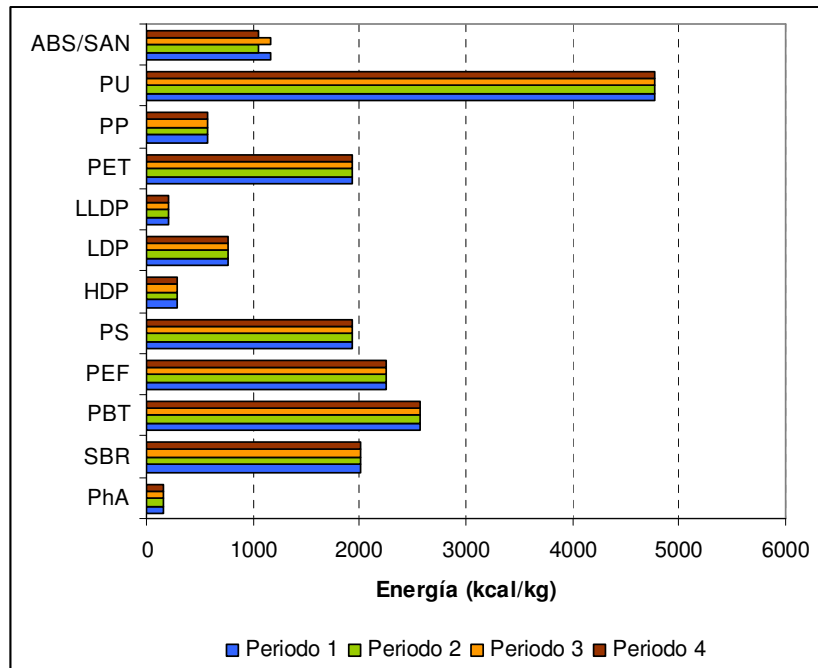
La Gráfica V.5 muestra que los valores para la energía consumida se mantienen constantes, y se observa también una ligera variación para el ABS-SAN. Esto demuestra que el comportamiento de la energía consumida reportada en kcal por unidad de kg de producto final producido en cada periodo es independiente de la demanda requerida en cada uno de ellos. Además, hay que considerar que en cada periodo evaluado resulta la misma ruta de producción para cada PQ Final. Los PQ Finales que cumplen con el requerimiento mínimo de energía son PhA, HPD, y LLDP.



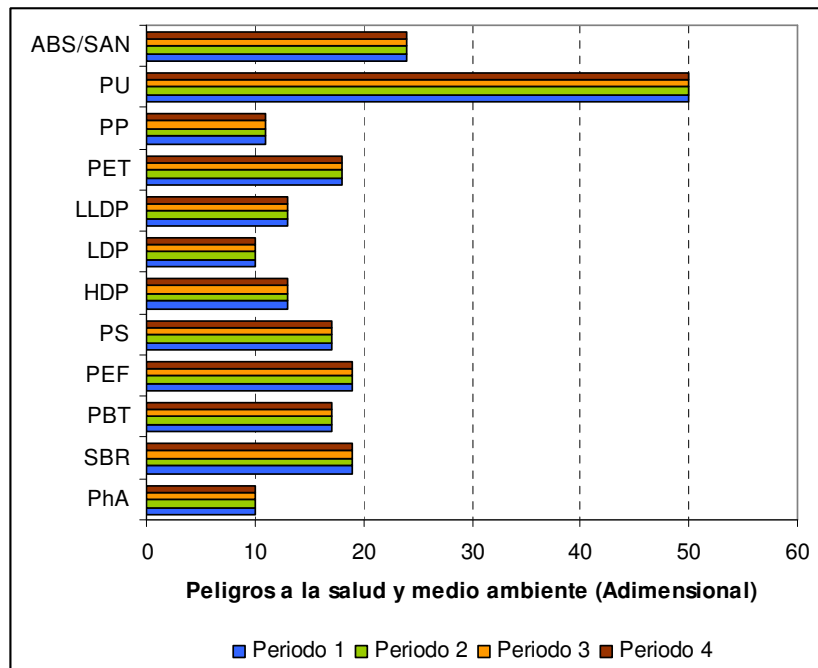
Gráfica V.3. Valor Agregado de las rutas seleccionadas para cada PQ Final en cada año del periodo del HP



Gráfica V.4. Valor de la Inversión de las rutas seleccionadas para cada PQ Final en cada periodo del HP



Gráfica V.5. Valor de la Energía de las rutas seleccionadas para cada PQ Final en cada año del periodo del HP



Gráfica V.6. Valor de los Peligros a la Salud y al Medio Ambiente de las rutas seleccionadas para cada PQ Final en cada periodo del HP

La Gráfica V.6 muestra también valores constantes para el índice de peligros al medio ambiente y a la salud en cada periodo evaluado, y en este caso es más fácil de comprender ya que para cada PQ Final resulta la misma ruta de producción en cada periodo. Los PQ Finales que cumplen con el requerimiento mínimo de peligros a la salud y al medio ambiente son PhA, LPD, y PP.

Como puede observarse de las Gráficas V.3 a la V.6, no todas las rutas de producción en cada periodo, muestran los mismos comportamientos para cada criterio seleccionado, lo que demuestra una situación de conflicto entre los diferentes criterios considerados. Por ejemplo, la ruta del PU tiene el mayor agregado, seguido por el PBT, entre todas las otras cadenas de cada producto, criterio que se maximiza; sin embargo, estas cadenas para los productos mencionados, muestran mayor inversión, mayor energía a utilizar en sus procesos de producción e igualmente mayores peligros a la salud y al ambiente (lo cual no sucede con la cadena seleccionada del PBT), cuando estos tres criterios deben minimizarse.

Debido a los resultados anteriores, surgió a discusión³ de si esta selección es suficiente para proseguir con la metodología. Varias discusiones al respecto se llevaron a cabo y se decidió que para complementar la elección de las rutas de producción deberían elegirse también los productos a manufacturar. Debido a que en la primera elección, la de las rutas, se utilizaron los métodos MCDA, era por lo tanto inherente al problema utilizar también el método PROMETHEE II con los mismos criterios explicados anteriormente.

2.2.2 Acción 3, FI₅ y FI₆- Jerarquización y selección de PQ Finales. Resultados.

Continuando con la segunda iteración iniciada en el apartado 2.3.1, la Figura V.11 presenta la Acción 3 que deber ser realizada por el mismo actor de la Acción 2. En ella se deben considerar las VC₃ que son iguales, en cuanto a definición que las VC₂, no así sus valores numéricos, ya que en este caso se deben considerar los valores de cada criterio de la mejor ruta tecnológica seleccionada en la Acción 2. Los resultados de la Acción 3 se envían a la UC y al tercer nivel de descentralización, en donde se define la tercera iteración, de acuerdo a la metodología propuesta, a través de los FI₅ y FI₆. Como ya se ha mencionado, el actor del tercer nivel son los PPQ Básicos.

³ Observaciones hechas por los Profesores Bertrand Mareschal, Jean-Pierre Brans y Carlos Escobar Toledo, en comunicación privada durante la presentación del artículo enviado para publicación a la revista *European Journal Operational Research (EJOR)*, denominado "Petrochemical Industry: Assessment and Planning using Multicriteria Decision Aid Methods".

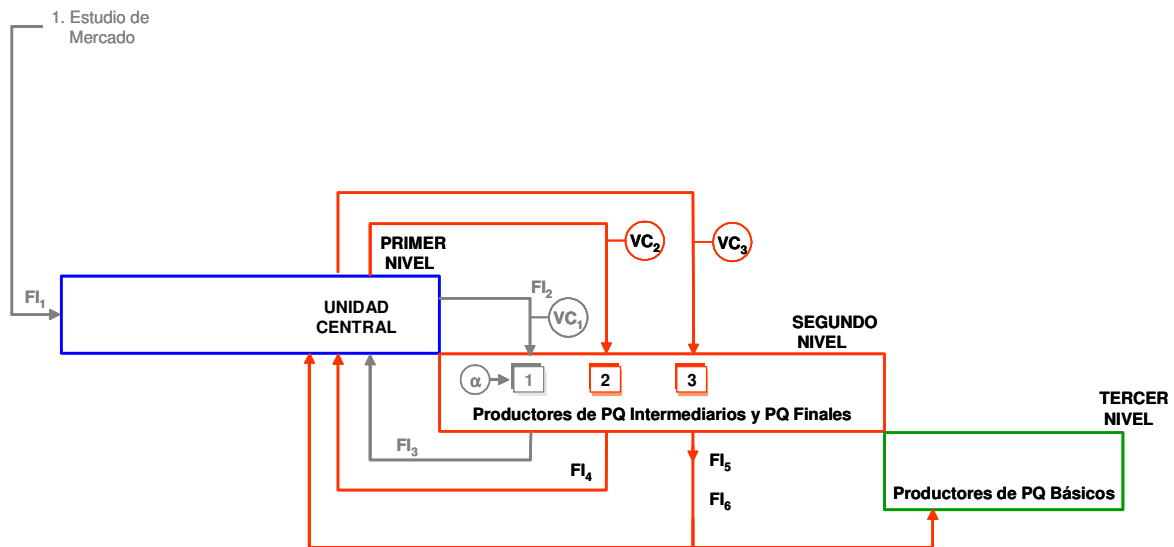


Figura V.11. Representación de la segunda iteración dentro del diagrama de descentralización con la ejecución de la Acción 3.

La Acción 3 efectúa la selección y jerarquización de los PQ Finales demandados. Como ya se ha dicho, la acción se ejecuta siguiendo el mismo procedimiento de la Acción 2.

La Figura V.12 presenta un ejemplo de la selección de los PQ Finales utilizando el software Decisión Lab y el método PROMETHEE II para el primer periodo del HP.

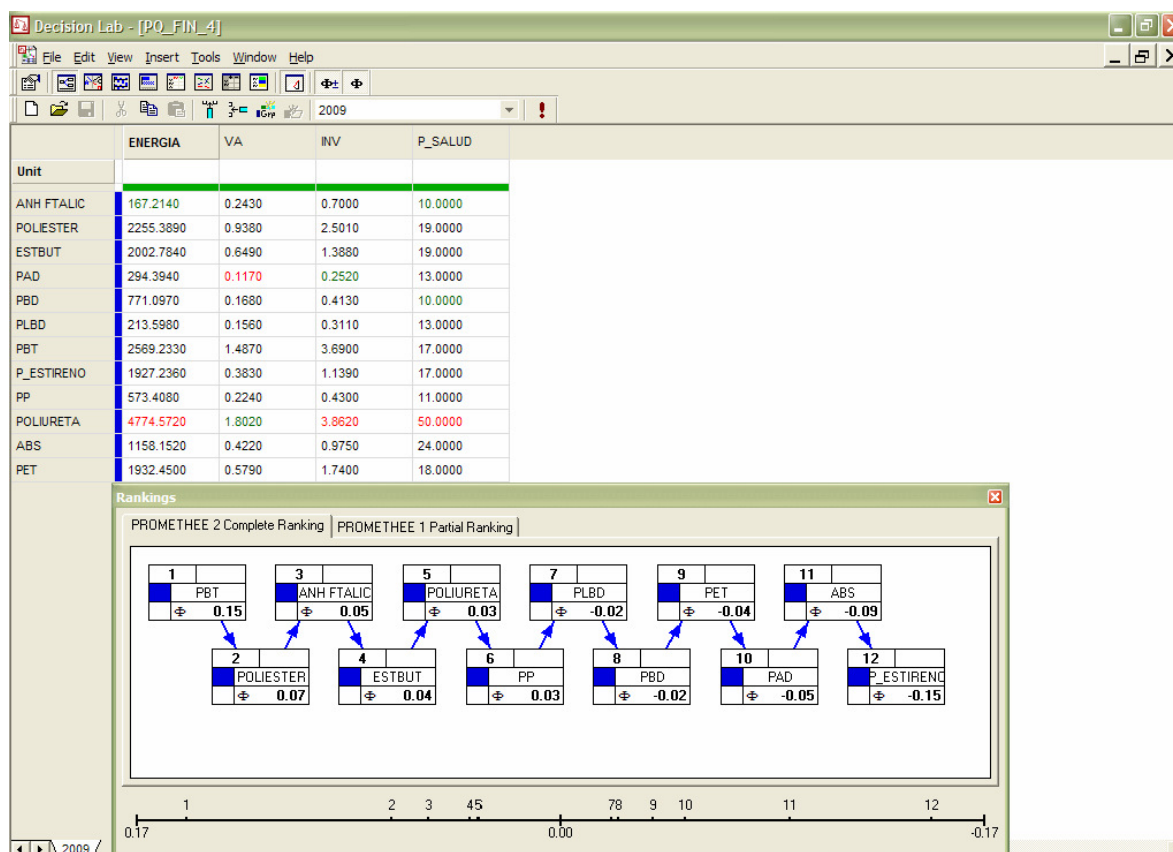


Figura V.12. Evaluación de los mejores PQ Finales en el periodo 1 del HP

La evaluación para los periodos 2, 3 y 4 del HP, realizada por PROMETHEE II se encuentra en el Apéndice III (Figuras 13, 14 y 15 ap. III).

En las Tablas V.7 y V.8 se muestra los resultados de la evaluación realizada en la Acción 3, en este caso se considera importante mostrar el valor de los flujos netos Φ_i que representan la diferencia entre los flujos más dominantes y los menos dominantes o “débiles” respecto a cada acción a (en nuestro caso cada uno de los productos a jerarquizar individualmente analizado) respecto de cualquier otra acción x (que representa cualquier otro de los productos) de los índices de preferencia agregados r para todos los criterios, es decir:

$$\text{Flujo saliente (dominante): } \Phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} r(a, x)$$

$$\text{Flujo entrante (parcial o totalmente) dominado: } \Phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} r(x, a)$$

$$\text{Flujo neto: } \Phi(a) = \Phi^+(a) - \Phi^-(a)$$

Así, entre mas alto sea $\Phi(a)$, mejor será la acción a, en este caso el petroquímico que habrá de seleccionarse jerárquicamente.

En esta acción la VC_4 se aplica toda vez que la selección realizada debe cumplir con $0 \leq \sum_i \Phi_i^* \in \{\Phi_i \text{ de PQ evaluados}\}$, sujeto a que $\Phi_i^* > 0$.

Aunque algunos valores de Φ_i cambian periodo a periodo, los valores estrictamente positivos de Φ_i correspondientes a cada petroquímico final se mantienen en todos los periodos, a excepción del polipropileno, que sólo puede producirse para el año 2009, de acuerdo a la solución obtenida.

Tabla V.7. PQ Finales jerarquizados de acuerdo a sus flujos netos de información (Φ_i) para cada PQ Final en los periodos 1 y 2 del HP

Jerarquía	Periodo 1 PQ Final	Φ_i	Periodo 2 PQ Final	Φ_i
1	PBT	0.1479	SBR	0.1479
2	PEF	0.0668	PBT	0.0668
3	PhA	0.0524	PhA	0.0524
4	SBR	0.0357	PEF	0.0357
5	PU	0.0327	ABS/SAN	0.0327
6	PP	0.0322	PU	0.0322
7	LLDP	-0.0205	LLDP	-0.0205
8	LDP	-0.0230	LDP	-0.0230
9	PET	-0.0367	PP	-0.0367
10	HDP	-0.0494	HDP	-0.0494
11	ABS/SAN	-0.0908	PET	-0.0908
12	PS	-0.1472	PS	-0.1472

Tabla V.8. PQ Finales jerarquizados de acuerdo a sus flujos netos de información (Φ_i) para cada PQ Final en los periodos 3 y 4 del HP

Jerarquía	Periodo 3 PQ Final	Φ_i	Periodo 4 PQ Final	Φ_i
1	PhA	0.1486	PBT	0.1987
2	PBT	0.1448	PhA	0.1305
3	PET	0.0502	PU	0.0991
4	PU	0.0357	PET	0.0863
5	SBR	0.0215	SBR	0.0425
6	PEF	0.0098	PEF	0.0129
7	LDP	-0.0039	LDP	-0.0237
8	PP	-0.0255	PP	-0.0670
9	LLDP	-0.0405	HDP	-0.0769
10	HDP	-0.0410	LLDP	-0.0843
11	ABS/SAN	-0.1202	ABS/SAN	-0.1429
12	PS	-0.1796	PS	-0.1752

En la Tabla V.9 se presentan los productos elegidos con los valores de $\Phi_i^* > 0$, de acuerdo a la metodología y concomitante, con las preferencias de la UC. Hay que recordar que los valores de los petroquímicos finales con valores de $\Phi^* < 0$ significa que éstos están dominados por aquellos petroquímicos finales con $\Phi^* > 0$. De acuerdo a los criterios utilizados para la evaluación.

Con los valores de $\Phi_i^* > 0$, se forma una jerarquía que expresa cuáles son el conjunto de los mejores productos para ser producidos, de acuerdo a su mejor ruta tecnológica (VC₄).

Tabla V.9. Flujos netos de información Φ_i^* para cada PQ Final en los periodos del HP

PQ Final Seleccionado	Φ_i^*			
	1	2	3	4
Periodo				
PBT	0.1479	0.1429	0.1448	0.1987
PEF	0.0668	0.0261	0.0098	0.0129
PhA	0.0524	0.1345	0.1486	0.1305
SBR	0.0357	0.0147	0.0215	0.0425
PU	0.0327	0.0377	0.0357	0.0991
PP	0.0322	---	---	---
PET	---	0.0275	0.0502	0.0863

Para el periodo 1 el PP se encuentra seleccionado en el sexto lugar, pero para los periodos 2, 3 y 4 el PP ya no es seleccionado, y en su lugar se selecciona el PET.

De acuerdo a la Tabla V.9, el ordenamiento de los productos en cada periodo se conserva, por lo cual se puede afirmar que la metodología hasta este momento es suficientemente robusta con respecto a la selección multicriterio llevada a cabo en dos pasos tanto en la selección de las cadenas como en la selección de los productos en cada periodo.

En efecto, recordemos que el Capítulo 2 se definió el concepto de robustez [16]. Una solución se dice que es robusta, cuando se proponen soluciones a un problema tan buenas como sea posible simultáneamente para diferentes conjuntos de datos plausibles y diferentes valores aceptables de los parámetros proporcionados por los datos. La noción de robustez es más amplia que en el concepto tradicional de solución óptima usada en investigación de operaciones, pero también es diferente de lo que se llama análisis de sensibilidad que consiste en estudiar cómo una solución dada cambia con las perturbaciones de los valores del modelo. Sin embargo en la mayoría de los problemas de decisión, la noción de solución óptima no tiene sentido, debido a que existen diferentes contradicciones desde el punto de vista del tomador de decisiones. En los análisis multicriterio se requiere de parámetros que muchas veces son subjetivos; así, en un

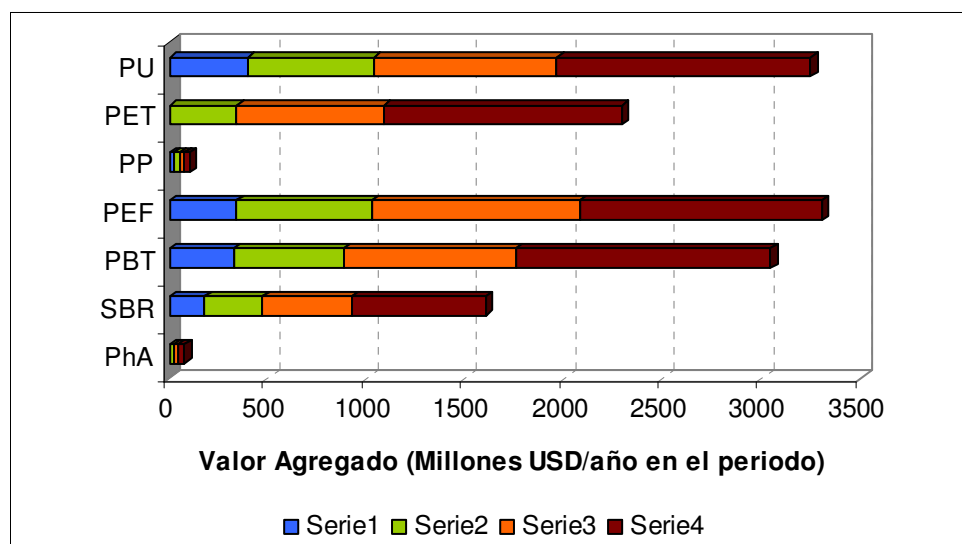
problema de decisión cuando se pueden tener diferentes escenarios sobre los datos alimentados al modelo y sus parámetros, no es posible saber cuál de ellos ocurrirá.

Otro concepto asociado a la robustez de los métodos multicriterio, se debe al hecho de proporcionar libertad al tomador de decisiones para escoger los valores de los parámetros. Ambas situaciones deben, por supuesto, combinarse.

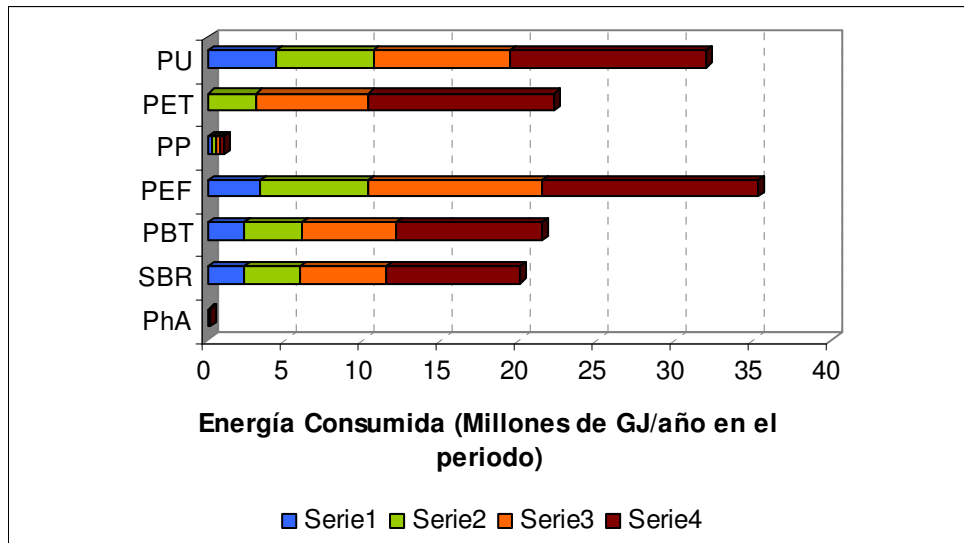
Así, en este caso, la definición del concepto de robustez expresa el hecho de que una solución obtenida de un conjunto de datos y un conjunto de valores para los parámetros en la metodología utilizada está lejos o no de otra solución, obtenida con otro escenario, y con datos diferentes a los que se les tiene asociados los valores de los parámetros del método. Por lo tanto, el concepto de robustez debe ser basado inevitablemente en la noción de distancia o disimilaridad entre soluciones.

En nuestro caso, tanto los datos del problema como los parámetros del método se probaron para elegir las cadenas de producción y la jerarquización sobre los productos petroquímicos que se seleccionaron. Esto es, la metodología utilizada es robusta en la medida en que los datos y los parámetros fueron utilizados de la misma manera y con los mismos criterios de decisión, proporcionando resultados siempre cercanos a las variaciones que pudieran tener los datos de la información tecnológica y económica y los parámetros utilizados.

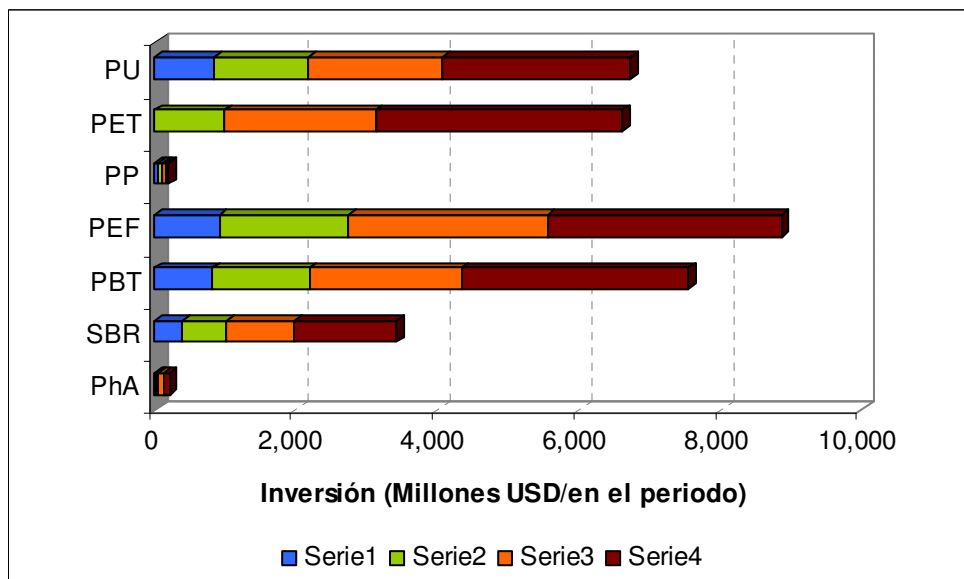
En las Gráficas V.7, V.8 y V.9 se muestran los valores de forma acumulada para los criterios de valor agregado, energía consumida e inversión de cada ruta de proceso para los PQ Finales jerarquizados y seleccionados. Los peligros a la salud y al medio ambiente se muestran en la Gráfica V.10, pero estos valores no son acumulados ya que permanecen constantes a través de los periodos debido a que la ruta de producción es la misma para cada PQ Final jerarquizado.



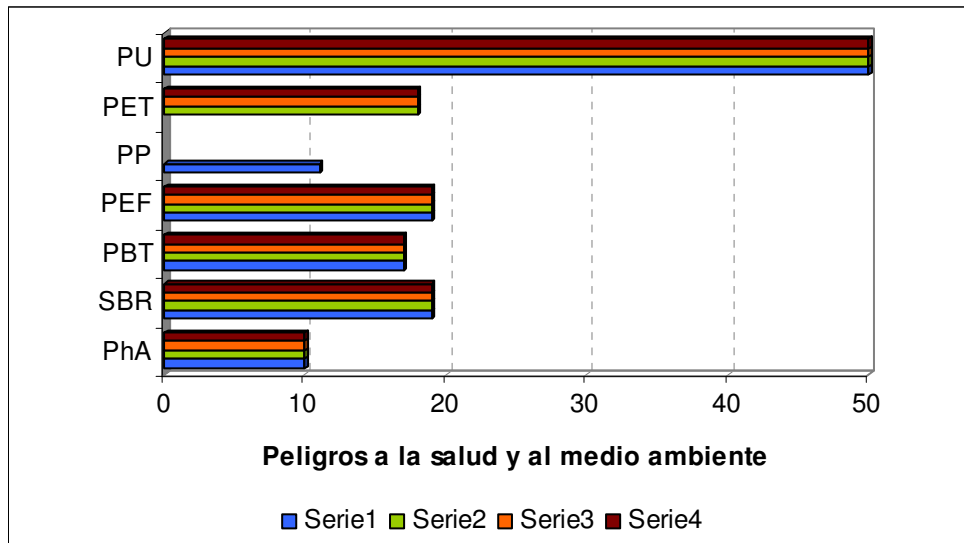
Gráfica V.7. Valores acumulados del VA para cada periodo en cada ruta de proceso de cada año del periodo de cada PQ Final con $\Phi_i^* > 0$



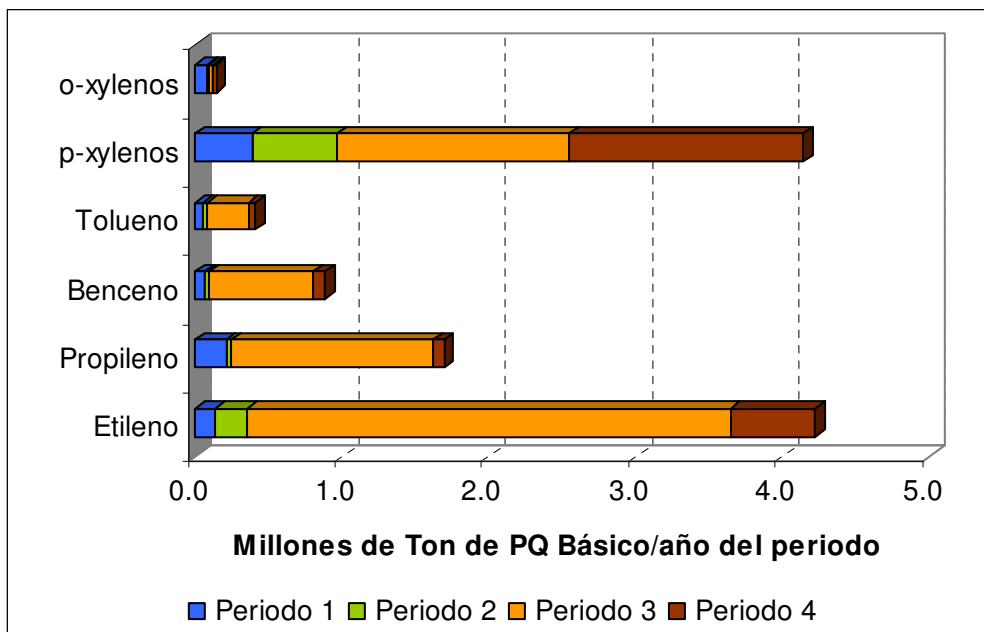
Gráfica V.8. Valores acumulados de la Energía consumida en cada ruta de proceso para cada año del periodo de cada PQ Final con $\Phi_i^* > 0$



Gráfica V.9. Valores acumulados de la Inversión en cada ruta de proceso para cada periodo de cada PQ Final con $\Phi_i^* > 0$



Gráfica V.10. Valores de los Peligros a la salud y el medio ambiente en cada ruta de proceso para cada periodo de cada PQ Final con $\Phi_i^* > 0$



Gráfica V.11. Demanda de cada PQ Básico requerido para satisfacer la demanda de PQ Finales seleccionados ($\Phi_i^* > 0$)

Los valores tabulados utilizados para las Gráficas V.7, V.8, V.9, V.10 y V.11 se encuentran en el Apéndice III (Tablas 7, 8, 9, 10 y 11. ap. III).

Para finalizar esta iteración se especifica que los valores presentados en la Tabla V.9 y los que se encuentran en las Gráficas V.7, V.8, V.9 y V.10 y V.11 representan el FI_5 y la cantidad de PQ Básicos requeridos para satisfacer la demanda de los PQ Finales jerarquizados y seleccionados representa el FI_6 .

2.3 Iteración número 3.- Tercer nivel

En esta sección comienza la tercera iteración propuesta en el esquema de descentralización. En la Figura V.13 se presenta la siguiente acción a realizar (Acción 4) por el actor representante del tercer nivel de descentralización: el productor de petroquímicos básicos (PPQB).

La UC transmite al PPQB la cantidad de crudo que tiene disponible para procesar en FI_7 . Por otro lado, los PQ Finales seleccionados y la cantidad de cada PPQ Básico requerida para satisfacer su demanda ya ha sido enviada al PPQB (resultados de la Acción 3).

La UC debe negociar con el PPQB la instalación de una refinería que produzca éstos con alto rendimiento con base al crudo utilizado para satisfacer la demanda de los petroquímicos finales, por lo que el PPQB debe encargarse de buscar las mejores configuraciones que cumplan con este requerimiento y debe programar su producción.

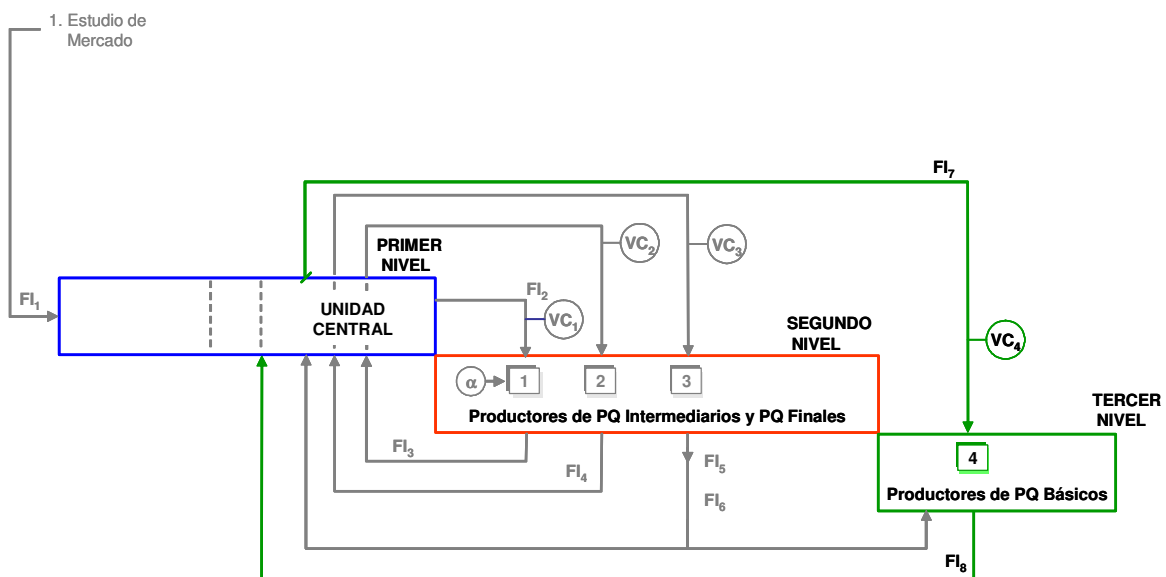


Figura V.13. Representación de la tercera iteración, Acción 4, dentro del diagrama de descentralización

2.3.1 $FI_7, VC_4, Acción 4$ y FI_8 .- Selección de configuraciones de refinería con alto rendimiento en la producción de PQ Básicos.

La cantidad de crudo disponible para procesar PQ básicos es de 2.5 Millones de Toneladas de crudo por año (50,000 barriles/día), teniendo como máximo 15 Millones de

Toneladas por cada periodo (aproximadamente 40,000 Millones de barriles de crudo). Al principiar el año inicial de cada uno de los periodos, se habrá tomado la decisión que corresponderá a todo el periodo y por lo tanto para todo el HP. Esta información es enviada a los PPQB en el FI₇.

La UC descentraliza las decisiones técnicas al PPQB, para que éste elija la o las configuraciones que más convengan para cumplir con la meta dada por la UC. Sin embargo, la UC y el PPQB deberán ponerse de acuerdo sobre el precio que tendrá el petróleo crudo para la producción de petroquímicos básicos requeridos, los cuáles son: etileno, propileno, benceno, tolueno, orto-xileno y p-xilenos (mezcla de xilenos).

El precio se acordará de acuerdo a la rentabilidad que la refinería desea tener y que es de 25% o superior de la Inversión que realice. Por lo que corresponde al precio del crudo, quedan de acuerdo en que éste se definirá tomando como marco de referencia el precio en el mercado internacional y a la vez en términos de los valores del producto de los petroquímicos finales en unidades de crudo equivalente.

Para iniciar este trabajo fue necesario realizar un estudio de inteligencia tecnológica respecto de las patentes tecnológicas desarrolladas para maximizar los rendimientos de petroquímicos básicos. Dicho estudio se puede consultar en el Apéndice II.

Una vez concluido el estudio de inteligencia tecnológica, se procedió a elegir 6 configuraciones, las que se pueden observar en el Apéndice II, apartado 9, en donde se muestran diagramas de bloque para cada una de ellas. En las Tablas V.10 y V.11 se encuentra resumida la información técnica y económica de cada configuración seleccionada para su evaluación.

Las variables VC₄ son los rendimientos que maximicen la producción de PQ Básicos a partir de crudo. Ver Tabla V.10.

Tabla V.10. Rendimientos de los diferentes productos de refinación característicos en cada configuración seleccionada para evaluación

Configuraciones	1	2	3	4	5	6
Producto	Rendimientos (%Peso)					
Etileno	8.7	16.1	18.3	18.9	22.5	26.0
Propileno	4.6	9.1	11.0	12.9	12.8	15.0
Butadieno	1.5	2.8	3.4	3.1	3.9	4.6
Aromáticos ^(a)	4.9	8.2	9.7	14.4	12.0	13.9
Total PQ básicos	19.7	36.2	42.4	49.3	51.2	59.5
Gasolina	2.3	3.9	4.7	8.4	5.6	6.4
Combustibles	69.8	47.6	38.3	22.6	25.5	12.7
Otros productos	8.2	12.3	14.6	19.7	17.7	21.4

^(a) En aromáticos se considera la producción de benceno, tolueno y mezcla de xilenos, principalmente orto-xileno y para-xileno.

Tabla V.11. Información económica de cada configuración seleccionada para evaluación

Configuraciones	1	2	3	4	5	6
Inversión Total (Millones USD)	346.5	450.4	517.4	570.6	595.9	686.1
Costos de Proceso (USD/Ton crudo)	56.64	76.70	90.18	95.55	103.17	118.00
(USD/barril crudo)	7.76	10.50	12.35	13.09	14.13	16.19

Desde el punto de vista del esquema de descentralización, la UC habrá de dejar que el productor de los petroquímicos básicos seleccione tales configuraciones y realice la programación de la producción con el fin de saber qué cantidad de los petroquímicos finales demandados puede ser realmente satisfecha a partir de la refinación de petróleo crudo.

No todos los tipos de crudo son igualmente adecuados para la producción de petroquímicos. En general, los crudos ligeros parafínicos son los más deseables para la producción de olefinas, mientras que los crudos nafténicos son generalmente más ventajosos para las refinerías típicas

Un factor importante en la selección de la secuencia adecuada del proceso, es conocer la gama de productos petroquímicos deseados. Mientras que las olefinas, en particular el etileno son producidas por pirólisis, el proceso de reformado catalítico es el indicado cuando se requiere una cantidad sustancial de aromáticos.

2.3.2 Breve descripción de las configuraciones a ser evaluadas en esta investigación.

↳ Configuración No. 1

Esta configuración representa el diagrama de proceso más simple en el que el crudo se fracciona en una unidad de destilación atmosférica, en tres productos:

1. Nafta y ligeros, los cuales se utilizan como materia en la unidad de pirólisis.
2. Destilados intermedios, que son desulfurados.
3. Gasóleo pesado (residuo atmosférico) que posteriormente se desulfura.

En la unidad pirolítica, se llevan a cabo reacciones que involucran la fractura o ruptura de moléculas de hidrocarburos en dos o más fragmentos más pequeños, de tal manera que se obtienen productos de peso molecular más bajo que la alimentación (metano, H₂, etileno, propileno, mezcla de butanos y butilenos y mezcla de aromáticos)

El metano (CH₄) producido en la unidad pirolítica es enviado a una unidad de reformado de vapor con el propósito de obtener hidrógeno, el cual a su vez sirve para alimentar a las plantas de hidrodesulfuración y de esta manera favorecer la autosuficiencia del proceso.

Esencialmente este proceso de reformado consiste de la oxidación parcial del hidrocarburo, bajo presión en presencia de vapor con una cantidad limitada de oxígeno. Este proceso puede proporcionar rendimientos tan altos como un 96% en volumen de H₂ más CO, con pequeñas cantidades de CO₂, CH₄, N₂ y Ar (con algo de H₂S y COS si la alimentación contiene azufre).

Por otro lado, los aromáticos producidos (producidos también en la unidad pirolítica) son extraídos y separados, mientras que el refinado se recircula a la unidad de pirólisis. En esta separación se obtienen benceno, tolueno, xilenos y una pequeña cantidad de gasolina de octano relativamente alto.

Esta configuración tiene el rendimiento más bajo de petroquímicos, aproximadamente el 21% (cf. *Apéndice II*), de todas las configuraciones analizadas.

↳ Configuración No. 2

Esta configuración es esencialmente la misma que la configuración 1, siendo la única diferencia que los destilados intermedios se envían a la unidad pirolítica.

En este caso, el hidrógeno adicional obtenido en la pirólisis de los destilados intermedios, equilibra casi totalmente los requerimientos de hidrógeno para las plantas de hidrodesulfuración.

En esta configuración se obtiene un rendimiento de petroquímicos de aproximadamente 36% (cf. *Apéndice II*).

↳ Configuración No. 3

En esta configuración se ha adicionado una planta de destilación al vacío, para procesar el residuo atmosférico (previamente hidrodesulfurado). En esta unidad de vacío se realiza una separación (flash) para producir gasóleo, que será utilizado como carga adicional en la unidad pirolítica y combustóleo. Esto trae como resultado que se obtenga un rendimiento más alto de petroquímicos, aproximadamente el 43%. (cf. *Apéndice II*).

↳ Configuración No. 4

Esta configuración cuenta con una unidad de desintegración catalítica (cracking catalítico) para el gasóleo de vacío, la cual no producirá cantidades significativas de materia prima para la unidad pirolítica, pero en cambio produce rendimientos considerables de propileno y aromáticos.

El cracking catalítico es usado principalmente para producir gasolina, olefinas C₃/C₄ e iso-butano, básicamente por la descomposición selectiva de destilados pesados. Debido a que las reacciones de cracking están dirigidas por catalizadores especialmente preparados, la gasolina producida contiene cantidades sustanciales de hidrocarburos de alto octanaje, tales como aromáticos, parafinas ramificadas y olefinas.

Debe adicionarse una unidad hidrotratadora para saturar la gasolina que contiene cantidades considerables de olefinas. Como está rica en aromáticos, se envía a las instalaciones de recuperación de aromáticos en donde los componentes alifáticos se recuperan y se envían a la unidad pirolítica.

Comparando este proceso con el de pirólisis directa del gasóleo de vacío, el rendimiento del etileno no cambia significativamente pero la producción de propileno y aromáticos es considerablemente mayor. El rendimiento de petroquímicos para este caso es aproximadamente del 50% (cf. *Apéndice II*).

↳ Configuración No. 5

En esta configuración una planta de hidrodesintegración (hydrocracking) ha reemplazado a la unidad de desintegración catalítica. La hidrodesintegración puede convertir fracciones pesadas en componentes ligeros saturados, los cuales son la materia prima más apropiada para la producción de olefinas.

Un complejo con esta configuración daría mayor rendimiento de etileno (22%), pero el aumento en el rendimiento total de petroquímicos es marginal (51%).

El proceso de hidrodesintegración representa la única ruta posible para crudos pesados con alto contenido de azufre, el cual en cualquier caso requerirá la desulfuración del combustóleo y sin conversión ulterior daría un rendimiento más bajo de destilados. (cf. *Apéndice II*).

↳ Configuración No. 6

Esta configuración se ha diseñado para obtener un máximo de petroquímicos y un mínimo de productos combustibles. Los fondos de la torre de vacío son hidrotratados severamente para lograr un máximo de conversión de destilados. El gasóleo de vacío virgen e hidrodesintegrado es posteriormente desintegrado en una unidad de hidrodesintegración convencional para saturar con hidrógeno el insumo de la planta pirolítica. La mezcla resultante que se alimenta a la unidad pirolítica contiene nafta virgen e hidrodesintegrada, gasóleo virgen e hidrodesintegrado y algunos materiales ligeros. Con estos insumos la operación de pirólisis se lleva a cabo con máxima eficiencia.

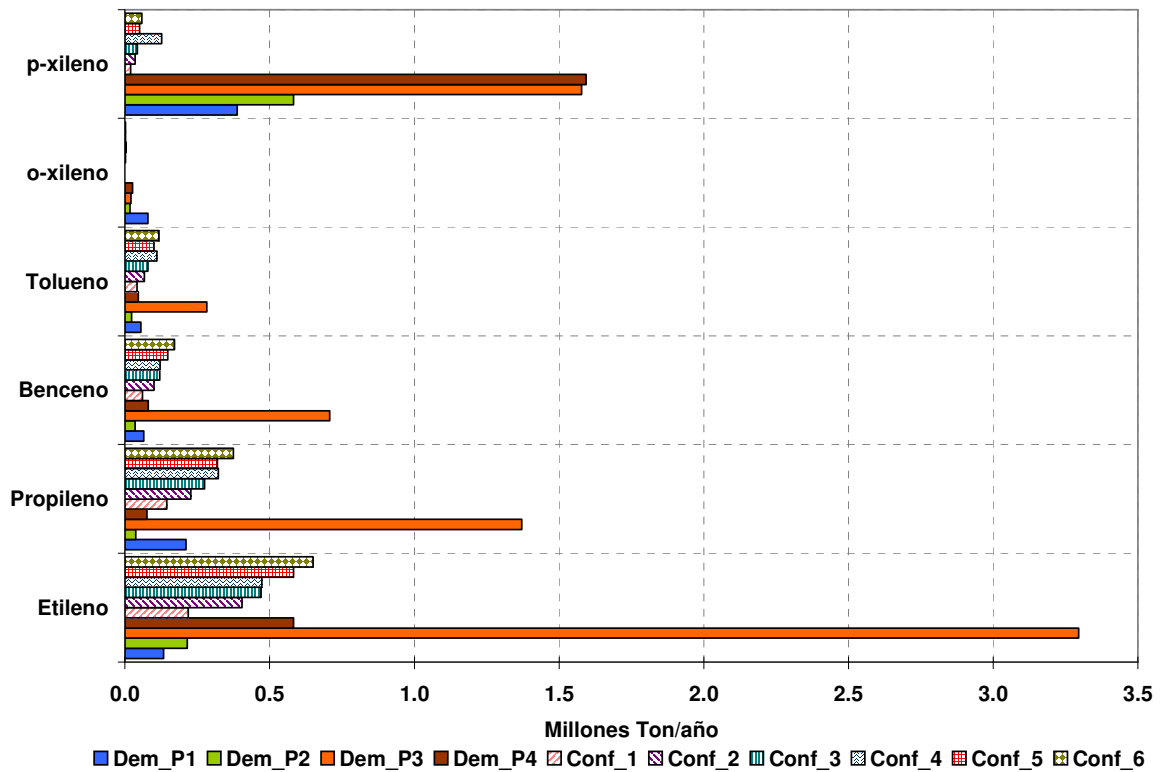
Debido a su alto contenido de hidrógeno, los materiales hidrotratados en particular, representan una materia prima adecuada para la unidad de pirólisis.

La configuración 6 produce el mayor rendimiento de productos petroquímicos (59%). El rendimiento de etileno, por sí solo, es comparable con los rendimientos para otros procesos modernos de desintegración de crudo. El rendimiento de subproductos también es superior al obtenido con las otras configuraciones (cf. *Apéndice II*).

Siguiendo con la metodología, los PPQB realizan el balance de materia y energía para cada configuración de refinería con alto rendimiento de PQ Básicos seleccionada, y pueden consultarse en el Apéndice III, apartado 3.2.

Debido a la gran cantidad de información resultante de cada balance para cada configuración de las refinerías en cada periodo, en la Gráfica V.12 se presenta la cantidad de cada PQ Básico a producir, si se cumpliera la demanda de todos los PQ Finales requerida en cada periodo del HP.

Esta información se envía a la UC a través del FI₈ y se presenta en la Gráfica V.12.



Gráfica V.12. Comparación de la producción de PQ Básicos de cada refinería seleccionada (procesando 2.5 Millones de Ton/año) contra la demanda de PQ Básicos requerida para producir PQ Finales con $\Phi_i^* > 0$ en cada periodo del HP

En la leyenda de la Gráfica V.12, cada una de las configuraciones representa la producción potencial de PQ Básicos de cada Refinería procesando la cantidad máxima de crudo, siendo la leyenda Dem P1, P2, P3 y P4 la demanda de petroquímicos básicos por periodo y Conf 1, 2, 3, 4, 5 y 6 las configuraciones analizadas.

Se demuestra que con una refinería de cada una de las seis configuraciones, con una cantidad de crudo de 2.5 Millones de Ton/año no se satisface la demanda requerida de PQ Básicos para la producción de PQ Finales seleccionados y jerarquizados en cada periodo del HP del sistema.

2.3.3 FI_9 y Acción 5.- Construcción del modelo de programación lineal.

La Figura V.14 representa la Acción 5 de la tercera iteración en el diagrama de descentralización a 3 niveles.

Para comenzar la Acción 5 el FI_9 que envía la UC a los PPQB es la información necesaria para desarrollar un modelo en programación lineal (PL), en el cual la función objetivo está compuesta por los flujos netos (Φ_i) obtenidos en la selección y jerarquización de los

petroquímicos finales además de un conjunto de restricciones que permitirán conocer la capacidad de producción de petroquímicos básicos en un conjunto de 6 configuraciones de refinерías, junto con la cantidad de petroquímicos finales que pueden ser producidos. La modelación en forma de PL, es concomitante con el método llamado PROMETHEE V (cf. Capítulo III)

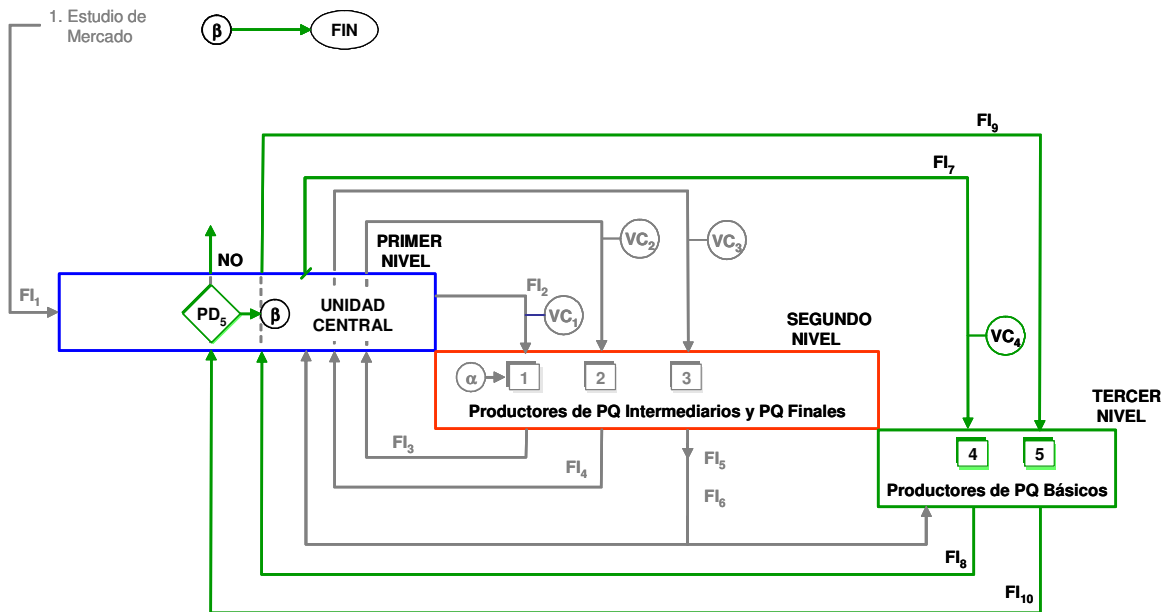


Figura V.14. Representación de la tercera iteración, Acción 5, dentro del diagrama de descentralización

Se define entonces la función objetivo como:

$$Max \sum_{i \in L} \phi_{i,j^* \in L,t} (PRFPQ_{i,j^* \in L,t}) \quad \forall t \quad \text{Ec. V.7}$$

Siendo $\phi_{i,j^* \in L,t}$ los flujos netos provenientes de PROMETHEE II, para cada petroquímico final, $(PRFPQ_{i,j^* \in L,t})$ en el periodo "t".

Antes de comenzar a definir las restricciones es necesario aclarar que cada una de ellas tendrá un nombre, el cual se identificará por estar dentro de corchetes cuadrados.

Sujeto a las siguientes restricciones⁴:

La UC ya ha definido una cantidad de crudo a utilizar en cada refinерía (FI_7) el cual se representará con el símbolo $(\#_i)$ y es de 2.5 Millones de Ton/año (50,000 barriles/día), en cada periodo "t". La UC define esta cantidad debido a que no desea distraer una

⁴ El HP abarca de los años 2009 a 2027 en periodos de 6 años cada uno.

cantidad de crudo mayor para no mermar las exportaciones de crudo que son todavía un elemento importante de la política económica del país.

Para los diferentes periodos del horizonte de planificación (HP), es posible incrementar la capacidad de procesamiento de crudo hasta un máximo de una cantidad fijada por la UC (15 Millones de Toneladas de crudo por año).

Llamaremos $[REUTCRU_{k,t}]$ el conjunto de restricciones que involucran la cantidad de crudo a procesar en cada configuración.

$$\begin{aligned}
 & [REUTCRU_{k,t}]: \\
 & PQCRU_{k,t} - (\#_t) = 0 \quad \forall "t"
 \end{aligned}
 \tag{Ec. V.8}$$

Donde $PQCRU_{k,t}$ es la cantidad de crudo disponible para la producción de petroquímicos básicos siendo " k ", la configuración de la Refinería.

$$\begin{aligned}
 & [TOTAL]: \\
 & \sum_{k=1}^K PQCRU_{k,t} \leq \text{Crudo total disponible en cada periodo "t"}
 \end{aligned}
 \tag{Ec. V.9}$$

donde $k = 1, 2, \dots, K$ el número de configuraciones seleccionadas

Se considera que el balance para las producciones de petroquímicos básicos en cada configuración pueda no ser cumplido en la estricta igualdad, permitiendo que el conjunto de variables definidas por $PRBPQ_{i,t}$, para la producción de cada petroquímico básico en cada configuración, sean variables de holgura para alcanzar la mayor producción de petroquímicos finales.

$\forall "t"; t = 1, \dots, T$

$$\begin{aligned}
 \text{Etileno :} & \quad \sum_{k=1}^K ce_{k,t} PQCRU_{k,t} - PRETL_t \leq 0 \\
 \text{Propileno :} & \quad \sum_{k=1}^K cp_{k,t} PQCRU_{k,t} - PRPRL_t \leq 0 \\
 \text{Benceno :} & \quad \sum_{k=1}^K cb_{k,t} PQCRU_{k,t} - PRBEN_t \leq 0 \\
 \text{Tolueno :} & \quad \sum_{k=1}^K ct_{k,t} PQCRU_{k,t} - PRTOL_t \leq 0 \\
 \text{o-xilenos :} & \quad \sum_{k=1}^K cox_{k,t} PQCRU_{k,t} - PROXIL_t \leq 0 \\
 \text{p-xilenos :} & \quad \sum_{k=1}^K cpx_{k,t} PQCRU_{k,t} - PRPXIL_t \leq 0 \\
 \text{Gasolinas :} & \quad \sum_{k=1}^K cg_{k,t} PQCRU_{k,t} - PRGASOL_t \leq 0 \\
 \text{Combustibles :} & \quad \sum_{k=1}^K cc_{k,t} PQCRU_{k,t} - PRCOMB_t \leq 0
 \end{aligned}
 \tag{Ec. V.10}$$

Donde:

$k = 1, 2, \dots, K$ el número de configuraciones seleccionadas ,

$$PRBPQ_{i,t} = \left\{ \begin{array}{l} PRETL, PRPRL, PRBUT, PRBEN, PRTOL, PRTOL, PROXIL, PRPXIL, \\ PRGASOL, PRCOMB \end{array} \right\},$$

$cip_{q,k,t} = \{ce_{k,t}, cp_{k,t}, cb_{k,t}, ct_{k,t}, cox_{k,t}, cpx_{k,t}, cg_{k,t}, cg_{k,t}, cc_{k,t}\}$ representan los rendimientos en % en peso de etileno, propileno, benceno, tolueno, xilenos (o-xileno y p-xileno), gasolina y combustible. Estos rendimientos son diferentes para configuración "k"; en el periodo "t" del H.P. Tales rendimientos permanecen constantes, aunque podrían modificarse gracias a una exhaustiva investigación para aumentarlos.

Para la producción de petroquímicos finales a partir de cada petroquímico básico utilizaremos los coeficientes definidos por la ecuación V.11.

$$\alpha_{i,l^* \in L,t} = \frac{\text{Ton de petroquímico básico}}{\text{Ton de petroquímico final } (l^* \in L)}
 \tag{Ec. V.11}$$

y: $PRFPQ_{i,l^* \in L,t} = \text{todos los petroquímicos finales } \forall "t"$

Por lo tanto,

$$\sum_i \alpha_{i,l^* \in L,t} PRFPQ_{i,l^* \in L,t} - PRBPQ_{i,t} \leq 0 \quad \forall "t"
 \tag{Ec. V.12}$$

Donde $PRFPQ_{i,l^* \in L,t}$ denota la producción del petroquímico final resultante de la selección multicriterio que describe todas las mejores rutas tecnológicas que han sido jerarquizadas y $l^* \in L$ para todos los petroquímicos finales y para toda "t" ($t = 1, \dots, T$), siendo $l^* \in L$ la

mejor ruta de proceso seleccionada por PROMETHEE II que pertenece al conjunto total de las rutas L .

Se debe entender que la ecuación V.12 se desarrolla para generar el conjunto de ecuaciones que representan la cantidad de los petroquímicos finales que pueden producirse a partir de cada uno de los petroquímicos básicos.

Finalmente, para las restricciones de la demanda se desarrolla la ecuación V.13, para cada petroquímico final seleccionado.

$[DEMANDFPQ]$:

$$PRFPQ_{i,l^* \in L,t} \leq Demand_{i,l^* \in L,t} \quad \forall i \in l^* \in L,t \quad \text{Ec. V.13}$$

Donde $Demand_{i,l^* \in L,t}$ fue calculada por un modelo econométrico y con un enfoque prospectivo, como ya ha sido aclarado en el apartado 2.1.2 de este capítulo.

2.3.4 FI₁₀ y PD₅.- Solución del modelo de programación lineal.

En la solución del programa lineal, utilizando el software LINGO v. 10.0 2006, para el primer periodo de la evaluación (2009), se observa que para tratar de satisfacer la demanda exógena de este año, se debe utilizar 1 refinera de cada configuración; es decir un total de 6 refineras con un procesamiento de crudo 2.5 Millones de Toneladas por año, por cada una de ellas, lo que da un total de 300,000 barriles de crudo por día procesado, generando una producción de petroquímicos básicos presentada en la Tabla V.12.

Tabla V.12. Oferta de PQ Básicos que puede satisfacer la refinera

Petroquímico Básico	Producción Ton/año	PQ básico para producir PQ final Ton/año	Superávit del PQ básico respecto a la demanda del PQ final Ton/año
Etileno	2,797,000	112,354	2,684,646
Propileno	1,665,000	210,971	1,454,029
Benceno	721,000	65,008	655,992
Tolueno	516,000	54,684	461,316
Xilenos (Totales)	342,000	342,004	----
p-Xilenos	332,000	332,004	----
o-Xilenos	10,000	10,000	----

Como puede observarse la operación de 6 refineras, para el año 2009, produce un exceso de petroquímicos básicos: etileno, propileno, benceno y tolueno que ya no son susceptibles de ser utilizados para satisfacer la demanda de los petroquímicos finales.

Sin embargo, no sólo se produjeron los petroquímicos básicos, sino que además hubo producción de combustibles y otros productos petroquímicos primarios, cuya producción se presenta en la Tabla V.13.

Tabla V.13. Producción de otros productos petroquímicos de las refinerías seleccionadas por el modelo LP

Otros productos de refinación primaria	Producción Ton/año
Gasolinas	786,000
Combustibles	5,415,000
Otros productos	2,758,000

Como puede observarse en la Tabla V.14, sólo se satisfacen un porcentaje de la demanda requerida para el anhídrido ftálico (PhA), fibras poliéster (PEF), que el estireno-butadieno (SBR), el poli(tereftalato de butileno) (PBT), el polipropileno (PP) y el poliuretano (PU) se satisfacen al 100%. Si se observa con detalle, para algunos de estos petroquímicos existe un excedente o un déficit mínimo; por otro lado el poliestireno (PS), el polietileno de alta (HDP), baja (LDP) y el lineal (LLDP), las resinas ABS-SAN y el poli(tereftalato de etileno) (PET) no se producen. En la Tabla V.14 se presentan los resultados obtenidos, los cuales forman el FI₁₀ enviado a la UC.

Tabla V.14. Porcentaje de la demanda de PQ Finales satisfecha por las refinerías seleccionadas por el modelo LP para el año 2009 (primer periodo del HP)

Petroquímico Final	Demanda Ton/año	Producción Ton/año	% Demanda Satisfecha
PhA	86,004	10,870	13%
PEF	365,822	288,491	79%
SBR	278,793	278,800	100%
PBT	219,690	219,700	100%
PS	544,608	0	0%
HDP	1,039,893	0	0%
LDP	1,061,016	0	0%
LLDP	305,162	0	0%
PP	115,777	115,800	100%
PU	220,313	220,300	100%
ABS/SAN	528,639	0	0%
PET	1,704,280	0	0%

Otro de los resultados interesantes de este programa lineal, son los precios duales resultantes para cada configuración, ya que de acuerdo a los valores obtenidos, la configuración 4 tiene el mayor valor del precio dual, lo que significa que para cumplir con la maximización de la función objetivo la configuración 4 es la que mejor contribuye a lograr esta meta. En la Tabla V.15 se presenta el número de veces que es mayor el precio dual de la configuración 4 en comparación a las otras configuraciones por unidad de

variación de su lado derecho, en este caso la cantidad máxima a utilizar de petróleo crudo.

Tabla V.15. Número de veces en que el precio dual de la configuración 4 es mayor que el precio dual de las otras configuraciones evaluadas.

Configuración de la Refinería	Número de veces que el precio dual de la configuración 4 es mayor:
1	6.5
2	3.6
3	3.0
5	2.5
6	2.2

Debido a que el modelo simplemente lineal no responde a la necesidad de elegir la mejor de las configuraciones de las refinerías y obtener el mejor programa de producción de la Refinería, se decidió modelar el problema utilizando programación entera mixta (MILP) con el fin de conocer el mejor subconjunto de las configuraciones y obtener un programa de producción más eficiente para la refinería para cada periodo del HP.

Por lo anterior, al llegar el FI₁₀ a la UC, se realiza entonces la primera pregunta de decisión, comparando los resultados contenidos en el FI₁₀ contra el parámetro de demanda de PQ Finales requerida. Es decir, la UC formula la siguiente pregunta:

- ↪ PD₅ : ¿La oferta de PQ Finales es mayor o igual a la demanda requerida por el mercado?

De acuerdo a los valores de la Tabla V.14, la respuesta a la PD₅ es negativa, por tal motivo la UC envía a los PPQB a ejecutar la Acción 6.

2.3.5 FI₁₁ y Acción 6.- Construcción del modelo de programación lineal entera mixta.

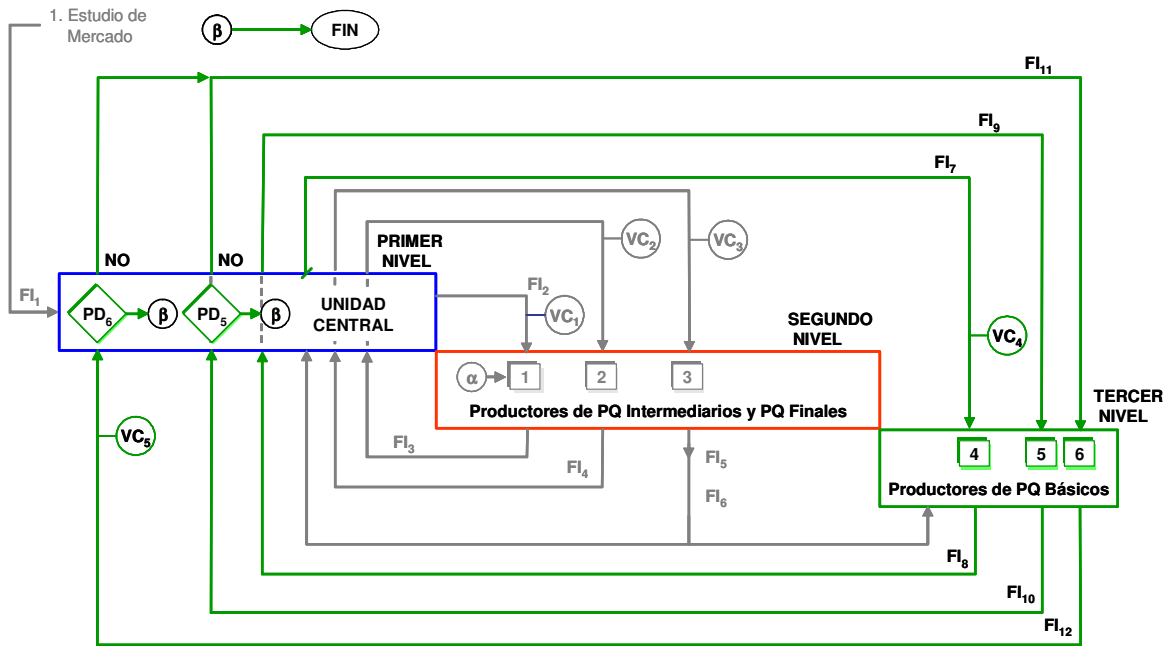


Figura V.15. Representación de la tercera iteración, Acción 6, dentro del diagrama de descentralización

En la Figura V.15 se presenta la última Acción que integra la tercera iteración.

La Acción 6 propone un enfoque en el marco de PROMETHEE V [12], para resolver el problema de la programación de la producción de la refinería teniendo 6 configuraciones tecnológicas alternativas. Este nuevo problema consiste en elegir, entonces, la o el conjunto de las mejores combinaciones tecnológicas y obtener el programa de producción de la refinería que incluya los petroquímicos básicos demandados por las rutas de los petroquímicos finales seleccionados a través de los valores de los flujos netos ($\phi_{i,l} \in L,t$) obtenidos de PROMETHEE II para el caso de los petroquímicos ordenados jerárquicamente, utilizados anteriormente en el modelo lineal. Debido a que se debe escoger el mejor programa de producción entre seis configuraciones, se utilizan variables enteras para que a través del modelo se decida el número de refinerías que son necesarias para cada configuración en cada uno de los períodos del HP, así mismo como el mejor programa de producción.

El FI₁₁ requerido para esta acción es igual al FI₉ utilizado para la Acción 5.

Al igual que en el modelo de PL se utilizó la función objetivo:

$$Max \sum_{i \in L} \phi_{i,l} \in L,t (PRFPQ_{i,l} \in L,t) \quad \forall t \tag{Ec. V.14}$$

Anteriormente ya se han definido los términos que constituyen esta ecuación.

La maximización mostrada en la función objetivo, está sujeta a las siguientes restricciones:

Se respetarán los mismos periodos para el HP definidos para el modelo de PL, además de las cantidades de crudo que utiliza cada configuración y el total de crudo disponible que ha definido la UC.

Sin embargo, ahora la cantidad de crudo que utiliza cada configuración está acompañado por un número entero, el cual definirá el programa, para conocer cuantas unidades de cada configuración son necesarias para satisfacer la demanda de petroquímicos finales.

$$\begin{aligned} & [REUTCRU_{k,t}]: \\ & PQCRU_{k,t} - (\#_i)(K_k) = 0 \quad \forall "t" \end{aligned} \quad \text{Ec. V.15}$$

Donde K_k es un número entero para cada configuración "k".

El balance total para todas las posibles configuraciones que pueden ser elegidas es entonces:

$$\begin{aligned} & [TOTAL]: \\ & \sum_{k=1}^K PQCRU_{k,t} \leq \text{Crudo total disponible en cada periodo "t"} \end{aligned} \quad \text{Ec. V.16}$$

donde $k = 1, 2, \dots, K$ el número de configuraciones seleccionadas

La producción de petroquímicos básicos "i" para cada configuración "k" es $[PRBPQ_{i,t}]$. En este modelo, el balance de la producción de petroquímicos básicos será de estricta igualdad con la cantidad de cada producto básico necesario para producir cada uno de los petroquímicos finales demandados, también se define de esta forma para no exceder lo que cada configuración puede producir de petroquímicos básicos.

\forall "t"; $t = 1, \dots, T$

$$\begin{aligned}
 \text{Etileno :} & \quad \sum_{k=1}^K ce_{k,t} PQCRU_{k,t} - PRETL_t = 0 \\
 \text{Pr opileno :} & \quad \sum_{k=1}^K cp_{k,t} PQCRU_{k,t} - PRPRL_t = 0 \\
 \text{Benceno :} & \quad \sum_{k=1}^K cb_{k,t} PQCRU_{k,t} - PRBEN_t = 0 \\
 \text{Tolueno :} & \quad \sum_{k=1}^K ct_{k,t} PQCRU_{k,t} - PRTOL_t = 0 \\
 \text{o - xilenos :} & \quad \sum_{k=1}^K cox_{k,t} PQCRU_{k,t} - PROXIL_t = 0 \\
 \text{p - xilenos :} & \quad \sum_{k=1}^K cpx_{k,t} PQCRU_{k,t} - PRPXIL_t = 0 \\
 \text{Gasolinas :} & \quad \sum_{k=1}^K cg_{k,t} PQCRU_{k,t} - PRGASOL_t = 0 \\
 \text{Combustibles :} & \quad \sum_{k=1}^K cc_{k,t} PQCRU_{k,t} - PRCOMB_t = 0
 \end{aligned}
 \tag{Ec. V.17}$$

Para la producción de petroquímicos finales se utilizarán los coeficientes de producción definidos en la ecuación V.10. Por lo tanto, en el modelo MILP, la restricción que debe de cumplir para la producción de éstos, son el conjunto de ecuaciones que se desarrollan para cada uno de ellos, de acuerdo a la ecuación V.18.

$$\sum_t \alpha_{i,l^* \in L,t} PRFPQ_{i,l^* \in L,t} - PRBPQ_{i,t} \leq 0 \quad \forall \text{ "t"}
 \tag{Ec. V.18}$$

La definición de cada uno de los términos de la ecuación V.18 se encuentra en la correspondiente al modelo PL.

Para la restricción de la demanda, se utilizará la misma que en el modelo PL.

$$\begin{aligned}
 & [DEMANDFPQ]: \\
 & PRFPQ_{i,l^* \in L,t} \leq Demand_{i,l^* \in L,t} \quad \forall i \in l^* \in L, t
 \end{aligned}
 \tag{Ec. V.19}$$

De la misma forma, cada uno de los términos de la ecuación V.19 se define en el modelo PL.

También se decidió modelar el hecho de que la refinería pueda o no estar en equilibrio entre lo que ésta produce y lo que se consume para satisfacer la demanda de los petroquímicos finales. Estos posibles superávits, deberían poderse comercializar y obtener con ello una ganancia de operación. Con esta idea, dentro del modelo (MILP), se incluyó una nueva ecuación que hemos llamado "GANANCIA", que será la diferencia de los productos básicos producidos que se utilizan para producir los petroquímicos finales menos el posible superávit de los primeros, ambos multiplicados por su precio de venta, menos los costos de producción total, para cada una de las configuraciones y para cada periodo del HP.

La función ganancia está definida por la ecuación V.20.

[GANANCIA]:

$$\sum_k \sum_i pqb_{i,k} * cip_{i,k} * PQCRU_{k,t} - \sum_k \sum_i pqb_{i,k} * \alpha_{i,l \in L,k} * PRFPQ_{i,l \in L,k,t} - \sum_k costop_k * PQCRU_{k,t} - SUMAGANA = 0 \quad \forall "t"$$

Ec. V.20

Donde: $pqb_{i,k}$ es el precio del petroquímico básico en el mercado, $costop_k$ es el costo de operación de la configuración “k” y $SUMAGANA$ es la variable que tomará el resultado de la operación indicada en la ecuación V.20.

Es importante hacer notar que todas las variables son mayores o iguales a cero.

2.3.6 FI₁₂ y VC₅- Solución del modelo de programación entera mixta.

El valor de la función objetivo: $Max \sum_{i \in L} \phi_{i,l \in L,t} (PRFPQ_{i,l \in L,t}) \quad \forall t$ se presenta en la Tabla V.16, tanto para el modelo de PL como para el modelo MILP; claramente se puede observar que la condición $0 \leq \sum_i \Phi_i^* \in \{\Phi_i \text{ de PQ evaluados}\}$ se cumple en cada uno de los periodos del HP. Esta información representa la VC₅.

Tabla V.16. Valores de la Función Objetivo para el modelo LP y MILP en cada periodo del HP

Modelo	Función Objetivo
PL periodo 1	0.0732
MILP periodo 1	0.0792
MILP periodo 2	0.0469
MILP periodo 3	0.0716
MILP periodo 4	0.1567

Los resultados de este modelo de programación entera mixta (MILP) son los que se muestran en la Tablas V.17 a la V.22 y en las Gráficas V.13 a la V.17 para cada periodo del HP.

La Tabla V.17 muestra que en cada periodo del HP el modelo MILP siempre seleccionó la configuración 4 para la refinería, de aquí se reafirma que la mejor refinería para la solución de este problema es la de la configuración 4, información que se había obtenido de los precios duales en la solución del modelo LP (Tabla V.15, apartado 2.5.4).

Tabla V.17. Número de refinerías de la configuración 4, ganancia, inversión y rentabilidad de cada periodo del sistema para todo el HP

Periodo	No. de Refinerías ^(b)	Ganancia Millones USD/año en el periodo	Inversión Total Millones USD/periodo	Rentabilidad ^(c) en cada año del periodo
1	6	6,229	3,420	1.82
2	5	5,049	2,850	1.77
3	6	5,968	3,420	1.74
4	6	5,912	3,420	1.73
Total	23	23,158	13,110	

^(b) De la configuración 4 seleccionadas por el modelo MILP

^(c) Calculada con respecto a la “ganancia marginal” resultante de la venta de los excedentes a través del modelo MILP.

De la Tabla V.17 se puede observar que la primera columna representa el periodo del HP, la segunda el número de refinerías a instalar en cada periodo, teniendo un total de 23 para todo el HP, la tercera columna representa las “ganancias” obtenidas del superávit de producción de las refinerías por cada año del periodo, la cuarta columna muestra la inversión que deberá realizarse para el número de refinerías de la configuración 4 necesarias para satisfacer la demanda de los petroquímicos seleccionados en cada periodo, obteniéndose un total de 13,110 Millones de USD para todo el HP. Se consideró conveniente calcular la rentabilidad en cada año del periodo que obtendría la refinería con la venta de las cantidades superávitarias, definida como el cociente de las ganancias entre la inversión para conocer el comportamiento económico de la solución, considerando únicamente los excedentes de las refinerías. Los resultados, que se presentan en la quinta columna, demuestran a simple vista que nuestra propuesta no es despreciable ya que se obtiene una alta rentabilidad en cada periodo del HP, solamente tomando en cuenta las ganancias que se obtendrían en un solo año de cada periodo; es decir los valores de la quinta columna aumentan al considerar que cada periodo tiene 6 años y que la inversión se realiza en un solo año del periodo.

Tabla V.18. Total de crudo procesado y Precio del Crudo en cada periodo del sistema para todo el HP

Periodo	Crudo bbl/periodo	Precio ^(d) USD/barril
1	109,500,000	56.89
2	91,250,000	55.33
3	109,500,000	54.50
4	109,500,000	53.99
Total	419,750,000	

^(d) Precio del crudo a USD nominales del 2007. Calculado con respecto a la ganancia resultante del modelo MILP.

La primera columna de la Tabla V.18 muestra la cantidad de crudo a procesar durante todo el HP, que es de 419.75 Millones de barriles de crudo por día equivalentes a 50 Millones de Toneladas de crudo por año, y la segunda columna de esta tabla es el precio al cual se podría pagar el crudo al productor de éste. No obstante, con las ganancias obtenidas, el petróleo crudo se podría pagar al productor de éste a un precio promedio de 55.18 USD/barril.

El productor de petroquímicos básicos puede no estar de acuerdo con estos precios, haciéndole saber a la UC que el precio al que el productor de crudo le vendería el insumo debe también satisfacer el requerimiento exigido por la UC de que éste debe ser al menos igual o mayor que el precio de exportación. Actualmente, este precio en octubre del 2007 era de 74 USD/barril, superior a los que se presentaron en la Tabla V.18.

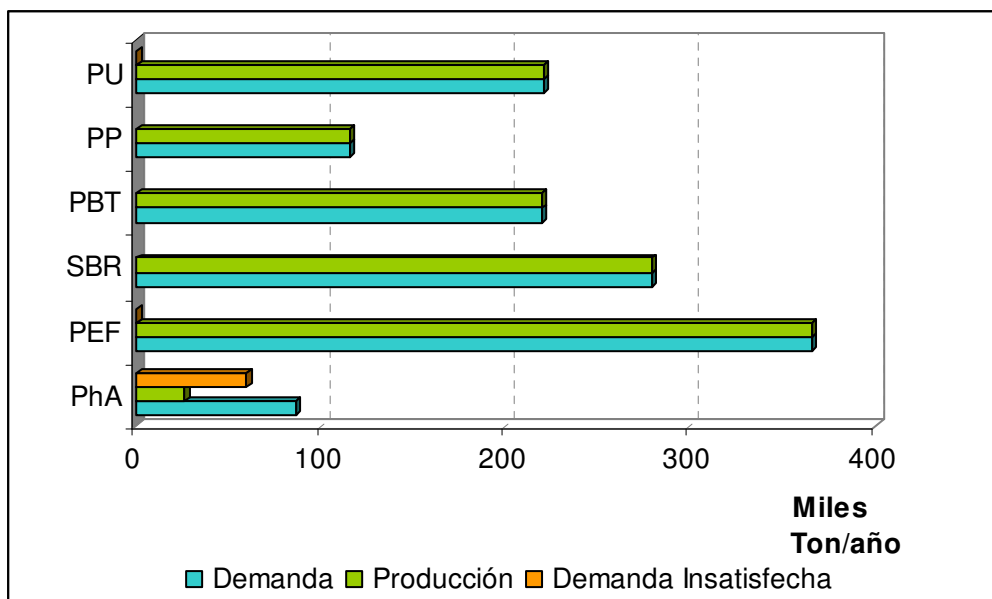
La UC debe ahora considerar que ese precio calculado a partir de la “ganancia” de la refinera por la venta del superávit de producción, no es realmente el precio al que pagaría el crudo, toda vez que al valorar el crudo a través de toda la cadena de producción periodo a periodo, es el valor total del producto desde el petroquímico final hasta el básico, el que indicaría el precio del crudo. La operación realizada es calcular el valor del crudo cuando se destina para producir petroquímicos básicos, intermedios y finales en cada periodo del HP.

Las Tablas V.19 a la V.22, muestran el balance de materia para cada periodo del HP entre las cantidades totales producidas de cada PQ básico y las que se destinan para las cadenas de producción; la diferencia se refiere a los excedentes de producción que son enviados al mercado para su venta en el mercado de los petroquímicos intermedios y finales. Las Gráficas V.13 a la V.16 muestran la demanda de PQ Final satisfecha con la producción de las refineras en cada periodo del HP. La Gráfica V.17 muestra esta misma comparación sólo que considerando la demanda total de PQ Finales de todo el HP contra su producción. Esta información integra el FI_{12} que es enviado a la UC.

Tabla V.19. Balance de producción de PQ Básicos para el periodo 1, considerando 6 refineras de la configuración 4.

Petroquímico Básico	Producción Miles Ton/año en el periodo	PQ Básico para producir PQ Final Miles Ton/año en el periodo	Enviado al Mercado de PQ Finales ^(e) Miles Ton/año en el periodo
Etileno	2,838	134	2,704
Propileno	1,938	211	1,727
Benceno	726	65	661
Tolueno	660	55	605
p-Xilenos	756	388	368
o-Xilenos	24	24	0

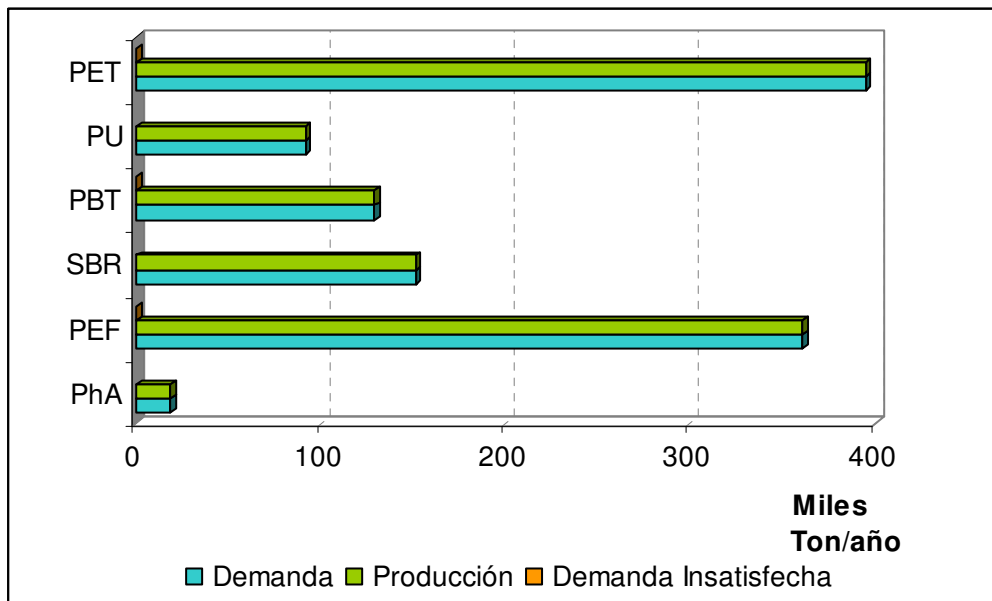
^(e) PQ Básicos que no se ocupan para producir PQ Finales debido a que al menos 6 de ellos no fueron jerarquizados y seleccionados por PROMETHEE II (Acción 3); es decir, el valor de $\Phi_i^* < 0$ para cada uno de estos PQ Finales no seleccionados.



Gráfica V.13. Comparación de la cantidad de PQ Finales producidos contra la demanda requerida en el periodo 1

Tabla V.20. Balance de producción de PQ Básicos para el periodo 2 considerando 5 refineries de la configuración 4.

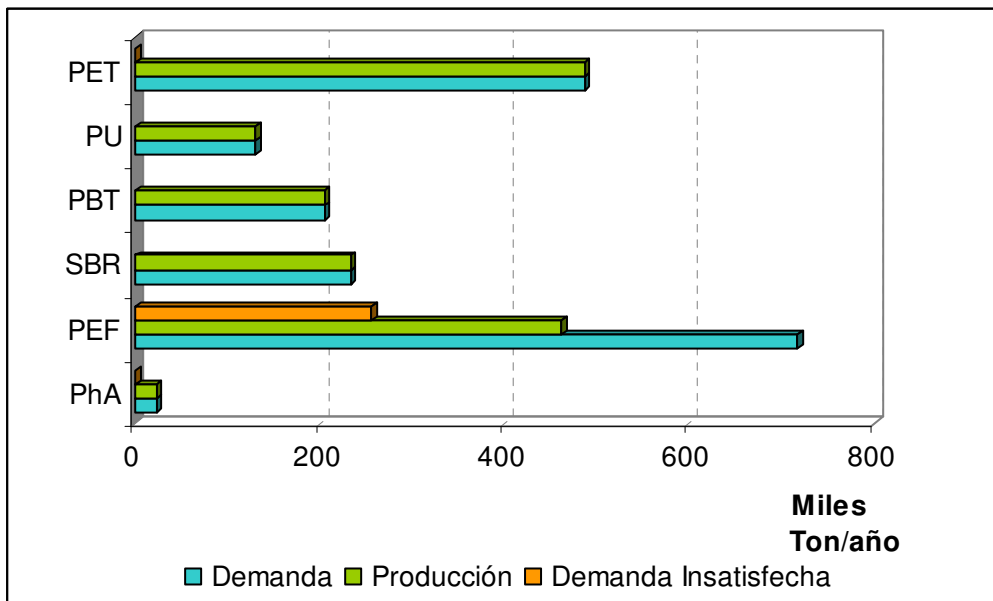
Petroquímico Básico	Producción Miles Ton/año en el periodo	PQ Básico para producir PQ Final Miles Ton/año en el periodo	Enviado al Mercado de PQ Finales Miles Ton/año en el periodo
Etileno	2,365	215	2,150
Propileno	1,615	38	1,577
Benceno	605	34	571
Tolueno	550	23	527
p-Xilenos	20	583	---
o-Xilenos	650	17	633



Gráfica V.14. Comparación de la cantidad de PQ Finales producidos contra la demanda requerida en el periodo 2

Tabla V.21. Balance de producción de PQ Básicos para el periodo 3 considerando 6 refinarias de la configuración 4.

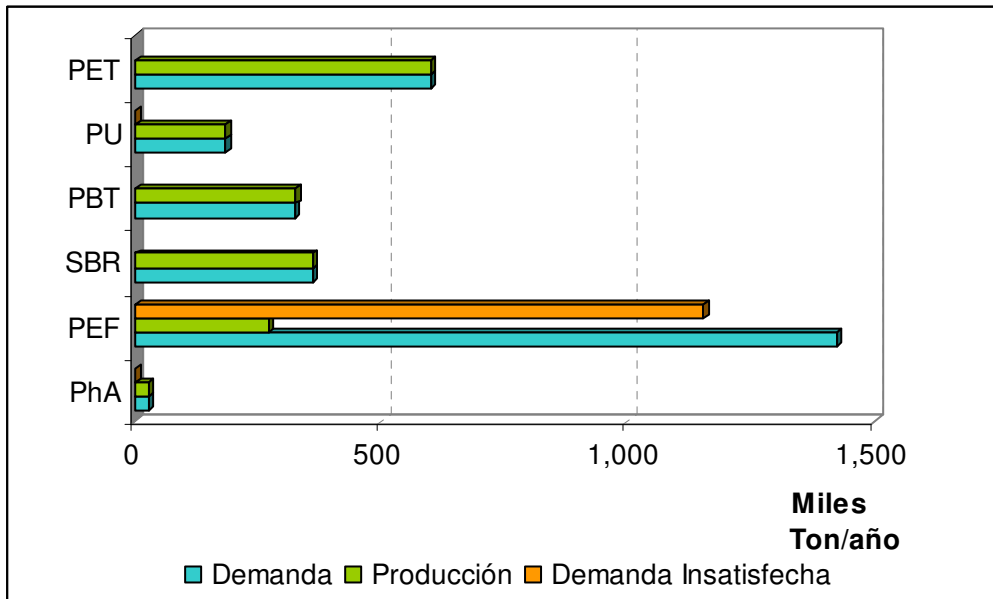
Petroquímico Básico	Producción Miles Ton/año en el periodo	PQ Básico para producir PQ Final Miles Ton/año en el periodo	Enviado al Mercado de PQ Finales Miles Ton/año en el periodo
Etileno	2,838	274	2,564
Propileno	1,938	53	1,885
Benceno	726	52	674
Tolueno	660	32	628
p-Xilenos	24	756	---
o-Xilenos	780	21	759



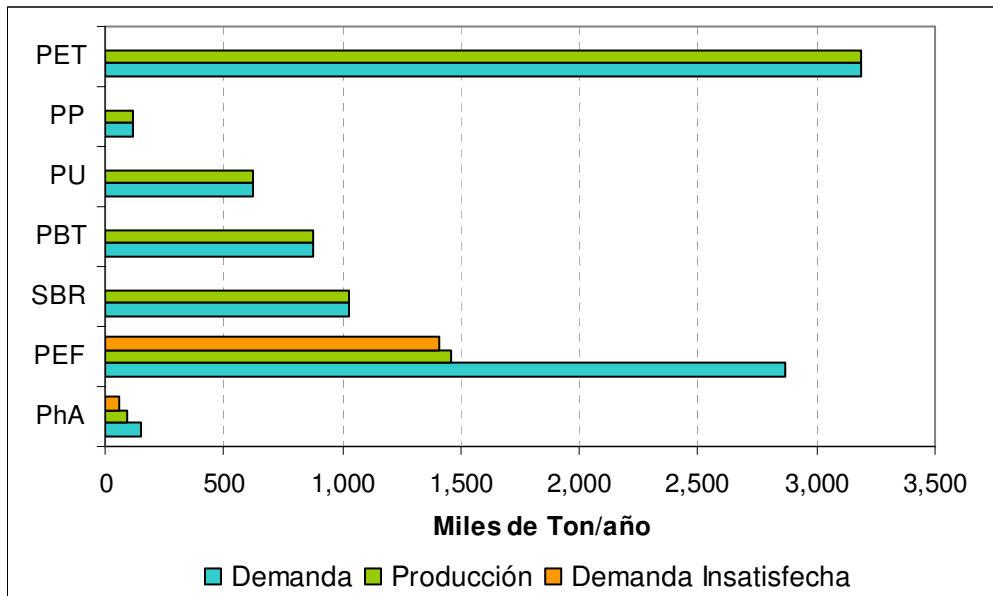
Gráfica V.15. Comparación de la cantidad de PQ Finales producidos contra la demanda requerida en el periodo 3

Tabla V.22. Balance de producción de PQ Básicos para el periodo 4 considerando 6 refinarias de la configuración 4.

Petroquímico Básico	Producción Miles Ton/año en el periodo	PQ Básico para producir PQ Final Miles Ton/año en el periodo	Enviado al Mercado de PQ Finales Miles Ton/año en el periodo
Etileno	2,838	261	2,577
Propileno	1,938	76	1,862
Benceno	726	80	646
Tolueno	660	46	614
p-Xilenos	24	756	---
o-Xilenos	780	24	756



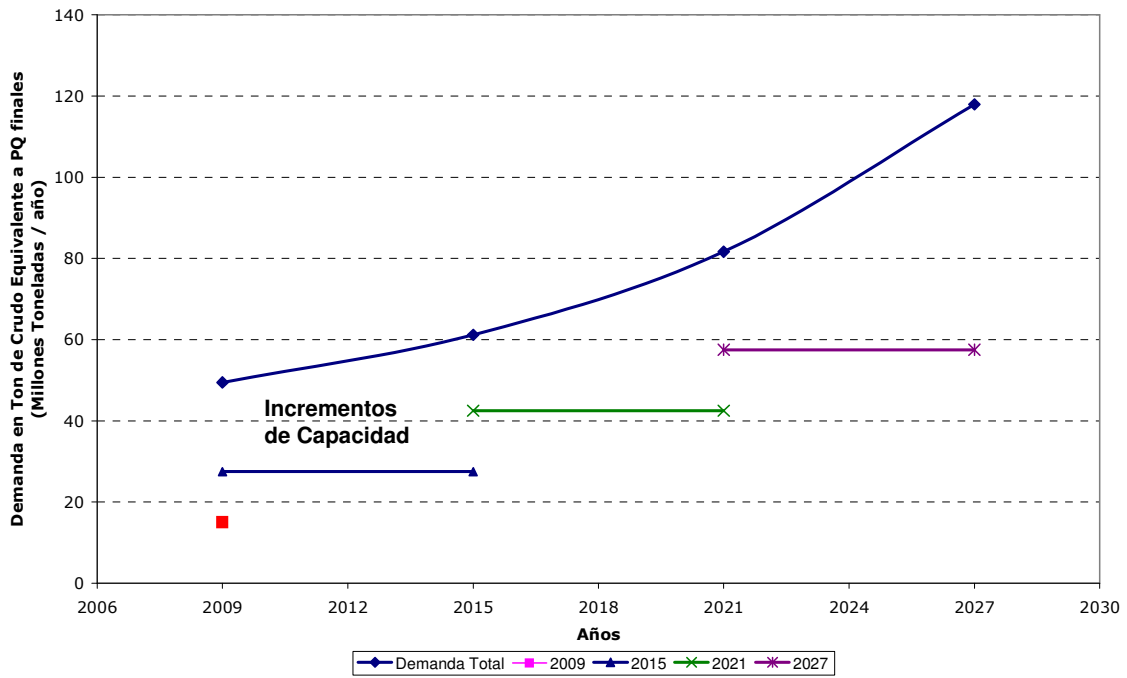
Gráfica V.16. Comparación de la cantidad de PQ Finales producidos contra la demanda requerida en el periodo 4



Gráfica V.17. Comparación de la cantidad de PQ Finales producidos contra la demanda requerida de todo el HP

Toda la información anterior representa el FI_{12} que se envía a de los PPQB a la UC junto con la VC_5 , discutida al principio de este apartado.

Para poder observar con detenimiento el comportamiento de la demanda de crudo equivalente, de haberse satisfecho la demanda de todos los petroquímicos finales cuya demanda se encuentra en la Tabla V.2, correspondientes al estudio de caso *versus* la cantidad que realmente se destina a ello, se presenta en la Gráfica V.18. La demanda (en línea continua) *versus* la oferta de crudo (en líneas discontinuas) representada por la operación del número de refinерías construidas por cada periodo del HP.



Gráfica V.18. Demanda de crudo equivalente a PQ Finales por cada periodo del HP

2.3.7 PD₆: Análisis del valor agregado, valor del producto e inversiones tomando en cuenta las cadenas de los PQ Finales seleccionados y las refinерías resultantes del modelo MILP.

Las siguientes tablas muestran los flujos totales acumulados por cada petroquímico final en cada uno de los periodos del HP.

Tabla V.23. Valor Agregado de las rutas, refinerías y totales para cada periodo del HP expresado en Millones USD/periodo

Periodo	Cadenas	Refinerías	Total	Total Acumulado
1	1,280	906	2,186	2,186
2	7,649	4,532	12,181	14,367
3	9,221	5,439	14,660	29,027
4	9,939	5,439	15,378	44,405
Total	28,089	16,316	44,405	

Tabla V.24. Valor del Producto de las rutas, refinerías y totales para cada periodo del HP expresado en Millones USD/periodo

Periodo	Cadenas	Refinerías	Total	Total Acumulado
1	3,229	1,300	4,529	4,529
2	17,599	6,499	24,098	28,627
3	22,307	7,799	30,106	58,733
4	24,998	7,799	32,797	91,530
Total	68,133	23,397	91,530	

Tabla V.25. Valor de la Energía de las rutas, refinerías y totales para cada periodo del HP expresado en Millones de GJ/periodo

Periodo	Cadenas	Refinerías	Total	Total Acumulado
1	12.85	17.86	30.71	30.71
2	66.62	89.31	155.93	186.64
3	90.38	107.17	197.55	384.19
4	105.67	107.17	212.84	597.03
Total	12.85	17.86	30.71	

Tabla V.26. Valor de la Inversión de las rutas, refinerías y totales para cada periodo del HP expresado en Millones USD/periodo

Periodo	Cadenas	Refinerías	Total	Total Acumulado
1	3,031	3,420	6,451	6,451
2	3,181	2,850	6,031	12,482
3	3,869	3,420	7,289	19,772
4	4,158	3,420	7,578	27,350
Total	14,239	13,110	27,349	

De acuerdo a la Tabla V.23, el valor agregado para todos los petroquímicos seleccionados que incluyen el de éstos pero también a los intermedios y básicos durante todo el HP, asciende a 28,089 millones de dólares a precios constantes del 2007. Así

mismo el valor agregado de las refinerías es de 3,473 millones de dólares a precios constantes del 2007. El valor total de este criterio tomando en cuenta las cadenas y las refinerías es de 44,405 millones de dólares a precios constantes del 2007, tomando en cuenta que el HP está formado por 19 años, se obtiene un promedio de 2,337 millones de USD/año. Este valor agregado, puede compararse contra el valor agregado⁵ que durante el año 2006, produjo la Industria Química incluyendo el subsector de refinación del petróleo en 2006 (20,518.83 Millones de dólares nominales- PIB de la industria química, derivados del petróleo, productos de caucho y plásticos-) y con el del subsector manufacturero (134,751.75 Millones de dólares nominales). Cabe hacer la aclaración que a la fecha estos son los valores disponibles dentro de la bibliografía [3].

Considerando el promedio anual del valor agregado de las cadenas junto con las refinerías representa un incremento de 1.73% anual durante todo el HP de la industria manufacturera y un incremento de 11.39% de la Industria Química.

Por su parte el valor de los productos petroquímicos a lo largo de toda su cadena de producción correspondiente, presentado en la Tabla V.24, asciende a 68,133 millones de dólares a precios nominales del 2007, en todo el HP, mientras que la Inversión total de las rutas de producción de los PQ Finales jerarquizados y seleccionados asciende a 14,046 millones de dólares a precios nominales del año 2007. Así mismo el valor del producto de las refinerías es de 23,397 millones de dólares a precios constantes del 2007. El valor total de este criterio tomando en cuenta las cadenas y las refinerías es de 91,530 millones de dólares a precios constantes del 2007, obteniéndose un promedio anual de 4,817 millones de USD/año. Si como es costumbre en el ámbito del cálculo económico, el valor total de los productos y las refinerías durante todo el HP se considerara una ganancia, la "rentabilidad" sobre la inversión obtenida (Tabla V.26) sería en promedio 3 veces mayor que la inversión anual promedio. Es necesario recordar que dentro del valor del producto, existe un término de 25% ROI (retorno de la inversión), valor que debería adicionarse a la cifra anterior.

Por último, en la Tabla V.25, la energía total requerida en todas las cadenas para todo el HP es de 12.85 Millones de GJ y el de las refinerías es de 17.86 Millones de GJ. Obteniendo el promedio anual total de sólo las cadenas de producción de petroquímicos finales se tendrá una cifra de 14.50 Millones de GJ/año. Si transformamos este valor a metros cúbicos de gas natural y luego a MM de ft³/día⁶ la cifra promedio durante todo el HP (19 años) es de 3,016 millones de pies cúbicos diarios, cifra que comparada con el consumo pronosticado por la Secretaría de Energía para el 2009, equivaldría al 42% del consumo en ese año; suponiendo que las refinerías son autosuficientes.

En la Tabla V.27 se puede observar el Valor total del crudo que incluye su refinación y la producción de petroquímicos finales, intermedios y básicos.

⁵ PIB = Suma de todo el valor agregado de todas las industrias que forman cada subsector manufacturero y así del sector de la Industria Química.

⁶ 1Mcal = 4.186 MJ = 9 m³ de Gas Natural a 20°C y 1 kg/cm² (PEMEX), de acuerdo a las conversiones utilizadas en el sector energético. 1m³ Gas = 35.31 ft³ de Gas.

Tabla V.27. Valores totales del crudo considerando la producción de PQ Básicos, Intermedios y Finales considerando las Refinerías.

Periodo	VP Total ^(f) USD/barril	Precio calculado USD/barril ^(g)	Total US\$/barril	Número de veces mayor al precio de exportación de la mezcla mexicana en octubre de 2007 (74 USD/barril)
1	100.72	56.89	157.61	2.13
2	91.51	55.33	146.84	1.98
3	105.19	54.50	159.69	2.16
4	109.28	53.99	163.27	2.21
Promedio:	101.68	55.18	156.85	2.12

^(f) En el valor del producto se consideran las rutas de producción seleccionadas para los PQ Finales jerarquizados y seleccionados más el valor del producto de la refinería.

^(g) Este precio calculado se obtiene de la venta de excedentes de PQ Básicos al mercado.

Así en el primer periodo del HP el valor del crudo es de 100.72 USD/barril hasta llegar en 2027 a 109.28 USD/barril con un promedio de 156.85 USD/barril, cifras que muestran la importancia de dedicar a la manufactura de los productos petroquímicos finales, intermedios y básicos ya descritos. A este volumen se le agrega por cada barril en promedio 55.18 USD/barril. Recordemos que el valor agregado de un barril de crudo exportado es casi nulo.

A continuación, en la Tabla V.28 se muestran los precios de crudo que se obtendrían si no se considerara el valor del producto de las refinerías.

Tabla V.28. Valores totales del crudo considerando la producción de PQ Básicos, Intermedios y Finales sin considerar las Refinerías

Periodo	VP Total ^(h) USD/barril	Precio calculado USD/barril	Total US\$/barril	Número de veces mayor al precio de exportación de la mezcla mexicana en octubre de 2007 (74 USD/barril)
1	29.493	56.89	86.383	1.17
2	32.148	55.33	87.478	1.18
3	33.957	54.50	88.457	1.20
4	38.053	53.99	92.043	1.24
Promedio:	33.41	55.18	88.59	1.20

^(h) En el valor del producto se consideran las rutas de producción seleccionadas para los PQ Finales jerarquizados y seleccionados más el valor del producto de la refinería.

Como puede observarse, independientemente a que si no se considera el valor del producto de las refinerías, el valor del crudo es mucho mayor a la cifra reportada en octubre de 2007.

Los flujos de VP pueden calcularse considerando su valor neto si se considerara el impuesto por la exportación de crudo por parte de la Secretaría de Hacienda, que es de

51% sobre el precio de venta por cada barril de crudo exportado, al menos en la Ley de Ingresos de esta Secretaría hasta este año; sin embargo, se sabe que esta ley ha sido modificada y al momento de redactar este trabajo, no se conocía con exactitud cuál sería el monto del impuesto. No obstante, cualquiera que éste fuera, los valores indicados del VP, son suficientemente grandes como para afirmar que el VP neto sería igualmente interesante.

Siguiendo con la última parte de la metodología, la UC responde a las preguntas que ella misma se planteó respecto de los parámetros con los que tendrá que tomar la decisión final:

PD₆:

↳ Pregunta 1.- ¿La oferta de los petroquímicos finales es mayor o igual a la demanda requerida?

Respuesta: De acuerdo a las Gráficas V.13, V.14, V.15 y V.16, la oferta de los petroquímicos finales seleccionados es mayor o igual a su demanda.

↳ Pregunta 2.- ¿El Valor Agregado Total es mayor al 10% del PIB del subsector Industria Química?

Respuesta: De acuerdo a la Tabla V.23, el Valor Agregado del sistema al final del HP es de 9,223 Millones de USD, que comparado con el PIB del subsector Industria Química representa el 45% más del reportado en 2006.

↳ Pregunta 3.- ¿La Inversión total es mayor al 25% de rentabilidad?

Respuesta: De acuerdo a las Tablas V.24 y V.26, al finalizar el HP se tiene un valor del producto de 19,029 Millones de USD y una inversión total de 27,350 Millones de USD, por lo que su cociente resulta aproximadamente del 70%.

↳ Pregunta 4.- ¿El precio del crudo incluyendo sólo las cadenas de producción de los petroquímicos finales es mayor o igual al precio del crudo del mercado internacional?

Respuesta: De acuerdo a la Tabla V.28, el precio del crudo en promedio es 1.20 veces mayor que el del mercado internacional; incluso, cuando se consideran las Refinerías, puede apreciarse de la Tabla V.27, que el precio del crudo en promedio es 2.12 veces mayor que el precio del crudo en el mercado internacional.

↳ Pregunta 5.- ¿El consumo de energía total del sistema es menor a la demanda de gas natural equivalente?

Respuesta: De acuerdo a la Tabla V.25 el consumo total de energía del sistema en todo el HP es de 125,095,881 GJ, cifra que representa 1,369 millones de pies cúbicos diarios que comparados con la prospectiva del consumo total de Gas Natural en 2009 [17] de 7,225 millones de pies cúbicos diarios, representaría el 19%.

De aquí que considerando los parámetros para tomar la decisión final, la UC los considera no solamente satisfactorios sino sumamente atractivos como para que la Industria Petroquímica mexicana se reactive dando lugar a un incremento considerable del Valor Agregado que directa e indirectamente, generará más empleos; su utilización por parte del sector manufacturero, contribuye al desarrollo sustentable y multiplica el valor de la sustitución de crudo que pudiera haber sido exportado. Igualmente, de manera importante, para poder expresar que la tasa marginal de sustitución de un barril de crudo para las manufactura de petroquímicos con respecto a solamente la exportación de éste,

es mayor que la unidad; esto último, expresa que no solamente se pagaría el precio de crudo que es parte de la política económica, sino que se generaría riqueza para el país, lo que la exportación de crudo no hace.

2.4 Sobre los resultados obtenidos

De acuerdo a la metodología utilizada durante esta investigación, los resultados obtenidos muestran que la IPQ debería convertirse en el motor de la industrialización, en virtud de que los hidrocarburos son la base y el punto de partida de ésta. Al mismo tiempo, la IPQ es la base para las siguientes transformaciones químicas y representa la interfase entre los requerimientos de las materias primas para la elaboración de productos finales, que son a su vez, la fuerza motriz de diversas industrias manufactureras de nuestro país.

Así, el objetivo general que se alcanzó es:

Haber analizado las posibles estrategias alternativas para este caso de estudio, con el cual se pretendió crear una metodología de análisis para el desarrollo de la IPQ. Para este caso, se consideró un horizonte de planificación hacia el año 2027 y se establecieron los requerimientos de petroquímicos básicos y sus materias primas, a través de la concepción de las diversas rutas tecnológicas para la elaboración de productos petroquímicos finales e identificando los requerimientos de inversión necesarios para la implantación de las estrategias evaluadas. La energía real que debe suministrarse como servicios a lo largo de toda la ruta de producción, el valor agregado y los valores de los productos básicos y finales elegidos para el caso de estudio en la investigación llevada a cabo así como los peligros al ambiente y la salud.

3 Bibliografía

- [1] Stanford Research Institute, *Process Economic Program*, 1998.
- [2] L. Puente Moreno, C. Escobar Toledo, and R. Barragán Acevedo, "Pronósticos y Prospectiva de la Demanda de los Productos Petroquímicos Seleccionados," in *Restitución del valor agregado y de la productividad de algunas cadenas improductivas de la industria petroquímica en México a través de la reestructuración, simulación y jerarquización tecnológica y de inversiones*, C. Escobar Toledo, Ed. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, México, D.F.: DGAPA, Facultad de Química, UNAM, 2006.
- [3] INEGI, *Producto Interno Bruto Trimestral. Estadísticas Económicas*. MEXICO: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (INEGI), 2007.
- [4] M. Godet, *Prospectiva y planeación estratégica*. Barcelona, España: SG Editores, 1991.
- [5] M. Godet, *De la anticipación a la acción. Manual de prospectiva y estrategia*: Marcombo, 1993.
- [6] S. Makridakis, *Forecasting: methods and applications*: Wiley, 1983.
- [7] W. Leontief, "The Leontief Input-Output Model," 2007.
- [8] E. Sevilla Juárez, "De los petroquímicos finales a los básicos: Resultados y representación gráfica de las cadenas petroquímicas.," in *Recuperación del Valor Agregado y la Productividad de la Industria Petroquímica Mexicana*, C. Escobar Toledo, Ed. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, México, D.F.: DGAPA, Facultad de Química, UNAM, 2006, pp. 1-40.
- [9] J. P. Brans, *L'ingénierie de la décision. Elaboration d'instruments d'aide à la décision. Méthode PROMETHEE*. Quebec, Canada: Université Laval, 1982.
- [10] J. P. Brans and B. Mareschal, *PROMETHEE: a new family of outranking methods in multicriteria analysis*: J. P. Brans, 1984.
- [11] J. P. Brans and P. Vincke, "A preference ranking organization method: The PROMETHEE method for MCDM," *Management Science*, vol. 31, pp. 647-656, 1985.
- [12] J. P. Brans and B. Mareschal, "Promethee-V: MCDM Problems with segmentation constraints," *INFOR*, vol. 30, pp. 85-96, 1992.
- [13] J. P. Brans and B. Mareschal, "The PROMETHEE VI procedure. How to differentiate hard from soft multicriteria problems," *Journal of Decision Systems*, vol. 4, pp. 213-223, 1995.
- [14] J. P. Brans and B. Mareschal, *PROMETHEE-GAIA. Une Méthodologie d'Aide à la Décision en Présence de Critères Multiples*. Paris, France: Ellipses, 2002.
- [15] J. P. Brans and B. Mareschal, "PROMCALC & GAIA: A new decision support system for multicriteria decision aid.," *Decision Support Systems*, vol. 12, pp. 297-310, 1994.
- [16] P. Vincke, "Robust Solution and Methods in Decision-Aid," *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, vol. 8, pp. 181-187, 1999.
- [17] Secretaría de Energía. Dirección General de Planeación Estratégica, *Prospectiva del mercado de gas natural 2006-2015*. México, D.F: SENER, 2006.
- [18] "Anilina." Septiembre, 2006. <http://www.itbaker.com/msds/englishhtml/a6660.htm>
- [19] "Diisocianato de difenil metano." Septiembre, 2006. <http://msds.ehs.cornell.edu/msds/siri/files/ccz/cczsr.html>
- [20] "Epiclorohidrina." Septiembre, 2006. <http://www2.hazard.com/msds/mf/cards/file/0043.html>

- [21] "Estireno-Butadieno." Septiembre, 2006.
<https://fscimage.fishersci.com/msds/98217.htm>
- [22] "Etilenglicol." Septiembre, 2006.
<http://www2.hazard.com/msds/mf/cards/file/0270.html>
- [23] "Etileno." Septiembre, 2006. <http://www2.hazard.com/msds/mf/cards/file/0475.html>
- [24] "Glicerina." Septiembre, 2006. <http://www2.hazard.com/msds/f2/ckn/cknvh.html>
- [25] "Metano." Septiembre, 2006. <http://www2.hazard.com/msds/mf/cards/file/0291.html>
- [26] "n-Butano." Septiembre, 2006.
<http://www2.hazard.com/msds/mf/cards/file/0232.html>
- [27] "n-Hexano." Septiembre, 2006.
<http://www2.hazard.com/msds/mf/cards/file/0279.html>
- [28] "Nitrobenceno." Septiembre, 2006.
<http://www2.hazard.com/msds/mf/cards/file/0065.html>
- [29] "Octeno." Septiembre, 2006. <https://fscimage.fishersci.com/msds/37660.htm>
- [30] "Óxido de Etileno." Septiembre, 2006.
<http://www2.hazard.com/msds/mf/cards/file/0155.html>
- [31] "Óxido de Propileno." Septiembre, 2006.
<http://www2.hazard.com/msds/mf/cards/file/0192.html>
- [32] "o-Xileno." Septiembre, 2006.
<http://www2.hazard.com/msds/mf/cards/file/0084.html>
- [33] "Pentano." Septiembre, 2006.
<http://www2.hazard.com/msds/mf/cards/file/0534.html>
- [34] "Poliéster." Septiembre, 2006.
http://www.dkgroup.com/display/tech_library/tech_library_detail.cgi?id_num=6&styl_eid=3
- [35] "Poliestireno." Septiembre, 2006. <https://fscimage.fishersci.com/msds/96831.htm>
- [36] "Polietileno de Alta Densidad." Septiembre, 2006.
<https://fscimage.fishersci.com/msds/58504.htm>
- [37] "Polietileno de Baja Densidad." Septiembre, 2006.
<https://fscimage.fishersci.com/msds/96963.htm>
- [38] "Polietilentereftalato." Septiembre, 2006.
<http://msds.ehs.cornell.edu/msds/siri/files/ckz/ckzpz.html>
- [39] "Poliol-poliéter." Septiembre, 2006.
<http://www2.hazard.com/msds/f2/bqs/bqsw.html>
- [40] "Polipropileno." Septiembre, 2006.
<http://www2.hazard.com/msds/mf/amoco/files/05123000.html>
- [41] "Poliuretano." Septiembre, 2006. <http://www2.hazard.com/msds/f2/cjy/cjygp.html>
- [42] "Propileno." Septiembre, 2006.
<http://www2.hazard.com/msds/mf/amoco/files/01258000.html>
- [43] "Toluendiamina." Septiembre, 2006.
http://www.dcchem.co.kr/product/p_petr/image/TDA.pdf
- [44] "Tolueno." Septiembre, 2006.
<http://www2.hazard.com/msds/mf/cards/file/0078.html>

Capítulo VI.

Conclusiones.

*La palabra se levanta
de la página escrita.
La palabra,
labrada estalactita,
grabada columna,
una a una letra a letra.
El eco se congela
en la página pétrea.*

*Ánima,
blanca como la página,
se levanta la palabra.
Anda
sobre un hilo tendido
del silencio al grito,
sobre el filo
del decir estricto.
El oído: nido
o laberinto del sonido.*

*Lo que dice no dice
lo que dice: ¿cómo se dice
lo que no dice?
Di
tal vez es bestial la vestal.*

*Un grito
en un cráter extinto:
en otra galaxia
¿cómo se dice ataraxia?
Lo que se dice se dice
al derecho y al revés.
Lamenta la mente
de menta demente:
cementerio es sementero,
simiente no miente.*

*Laberinto del oído,
lo que dices se desdice
del silencio al grito
desoído.*

*Inocencia y no ciencia:
para hablar aprende a callar.*

Octavio Paz. La palabra dicha.

1 Introducción

Se presenta en primer lugar lo concerniente al objetivo principal de la tesis: desarrollar una metodología estructurada con varios métodos utilizados en la planificación como lo son el enfoque multinivel para sistemas grandes y complejos y los métodos de ayuda para la toma de decisiones, específicamente el método multicriterio; también diferentes métodos pertenecientes a la investigación de operaciones, como la teoría de redes, en particular el algoritmo de recorrido, así como la programación lineal y en números enteros. Éstas fueron herramientas fundamentales para el desarrollo de la metodología presentada en el Capítulo IV.

En segundo lugar retomaremos el caso de estudio, Capítulo V, de dónde analizaremos el comportamiento y la validez de la metodología presentada.

Por último, haremos una revisión de los objetivos generales y las hipótesis generales planteadas para este estudio.

2 Acerca de la metodología

El desarrollo de la metodología, se enmarcó dentro de la Teoría de Sistemas debido a que uno de los propósitos inherentes a ella fue que su aplicación se realizara a un sistema grande y complejo, características requeridas para su descomposición. Como se presenta en el Capítulo IV, en la actualidad existen diferentes enfoques para resolver un sistema descompuesto en varios subsistemas, cuya solución individual para cada una de éstos debe ser en conjunto, la solución del sistema obtenido sin su descomposición.

En este trabajo se construye un método cuya aplicación resulta en una metodología, por ello se tomaron como base los cuatro principios de Descartes para poderla desarrollar.

Se decidió que la metodología debería poder ser aplicada a cualquier sistema grande y complejo con la flexibilidad de no describir matemáticamente cada una de las propiedades de éste; por el contrario debería tener la facilidad de poderse modelar de forma robusta. Por ello, seleccionamos el modelo desarrollado por Kornai en sus “pensamientos sobre sistemas de planificación multi-nivel”: el modelo teórico descriptivo de planificación.

Para su construcción se plantearon las siguientes premisas e hipótesis de trabajo:

Premisas:

- i. *Que el sistema de proceso se encuentre dentro del marco de referencia de la Teoría de Sistemas, de tal forma que se pueda realizar una representación del sistema a través de un modelo, el cual se pueda resolver con la utilización de una serie de herramientas matemáticas.*
- ii. *Que el sistema de proceso debe permanecer en conjunto gracias a procesos dinámicos y no por ataduras predeterminadas y rígidas. Estos procesos deben mantener relaciones dinámicas con su entorno a través de las cuales conserven sus características con relación a éste, siendo capaces de adaptarse, dentro de ciertos límites a sus modificaciones.*

- iii. *Que debido a su carácter de sistema debe tener “comunicación” para coordinar y ordenar su propio proceso.*
- iv. *Que debido a su carácter de sistema, los bienes producidos tengan una repercusión dentro de la economía.*
- v. *Que debido a su complejidad el sistema pueda ser dividido en una unidad central (UC) y varios subsistemas o unidades de producción, permitiendo que cada uno de ellos asuman sus propias decisiones en cuanto a la parte del proceso que les corresponde, tomando en cuenta el bien común entre ellos y su unidad central de una manera consensuada.*

Hipótesis de trabajo:

- i. *Que debido al tamaño del sistema y su interdisciplinariedad con otras áreas del conocimiento, tenga la capacidad de ser modelado con sus respectivos objetivos y restricciones.*
- ii. *Que debido al tamaño del sistema y su interdisciplinariedad con otras áreas del conocimiento, el número de variables a definir para su modelación es excesivamente grande como para resolver el modelo en una sola iteración de cálculo.*
- iii. *Que debido a su tamaño y complejidad, el sistema se caracterice por tener varios objetivos, los cuales no deberán buscar la optimización (en el sentido de programación matemática) en su operación, sino más bien tiendan a mejorar todas las partes en que se ha descompuesto el sistema.*
- iv. *Que permita utilizar varios métodos para la toma de decisiones combinándolos con otros métodos de selección y programación para alcanzar las metas de la unidad central y de las partes en que el sistema ha sido descompuesto.*

Sobre las premisas:

Las premisas i, ii y iii se fundamentan en el desarrollo y aplicación de la metodología al caso de estudio: La Industria Petroquímica. Recordemos que la estructura de la Industria Petroquímica es extremadamente compleja pues involucra miles de compuestos químicos a los que se asocia siempre uno o varios procesos de producción, los cuales forman una red ligada a través de los productos de un proceso que resultan ser la materia prima de otros. Para la mayoría de estos productos químicos, la ruta de producción que parte de las piedras angulares de esta industria (metano, etano, propano, butano pentanos y más pesados incluyendo los llamados compuestos aromáticos), no es única e incluye muchas posibles alternativas, de allí su aspecto combinatorio y complejo.

La premisa iv se fundamenta con la información del Apéndice I, en el cual se presentan las estadísticas necesarias para observar que la productividad de la Industria Petroquímica repercute en la economía nacional, ya que ella está incluida en el Producto Interno Bruto de nuestro país.

La premisa v se fundamenta en el Capítulo V. Utilizando el enfoque multinivel se dividió el sistema de estudio en 3 niveles, siendo el primero la Unidad Central, quién regula y coordina las decisiones tomadas de forma autónoma de tal manera que éstas últimas beneficien a todo el sistema en conjunto, siendo los otros dos los productores de petroquímicos intermedios y finales, por una parte y, por la otra, el productor de

petroquímicos básicos. Los resultados de la interacción entre niveles influyen de forma global en el sistema en conjunto.

Sobre las hipótesis de trabajo:

La hipótesis i, queda demostrada como cierta cuando se propone que la Industria Petroquímica es una gran red de procesos y productos, a éstos últimos los hemos denominado petroquímicos básicos, intermedios y finales. Actualmente, los petroquímicos finales no se producen de forma consecutiva, es decir, la ruta de producción se corta en algún petroquímico intermedio de acuerdo a las fluctuaciones de la demanda existente en el mercado, como quedó demostrado en el Apéndice I.

La hipótesis ii queda demostrada como cierta, únicamente con la definición del sistema a analizar; en este caso, la Industria Petroquímica. En el Capítulo II, se presentan varios estudios realizados en torno a la planificación de esta industria, cuya modelación es parcial para alcanzar objetivos específicos dentro de este sistema, resolviendo problemas definidos para ciertos objetivos como lo son el aumento de productividad, de ganancias, o el mínimo consumo de materia prima o energía; esto es debido a su complejidad y a la gran cantidad de datos requeridos en la modelación. Desde esta óptica, tales modelos nunca han sido globales en el sentido de la Teoría de Sistemas.

La hipótesis iii queda demostrada como cierta en el Capítulo V, en dónde la Unidad Central define cuatro variables de coordinación que involucran aumentar el valor agregado, minimizar el consumo energético de los procesos, minimizar la inversión y los peligros a la salud y al ambiente. La definición de estos criterios contribuye a mejorar los aspectos económicos, energéticos, ambientales subyacentes en el desarrollo sustentable de esta industria.

La hipótesis iv queda demostrada como cierta en el Capítulo V, ya que se utilizaron varios métodos para modelar la planificación de la Industria Petroquímica en nuestro país. *La planificación es un proceso que tiende a disminuir la entropía generada por dejar que ésta se lleve a cabo solamente por las fuerzas del mercado.*

3 Acerca del caso de estudio

La aplicación de la metodología en el caso de estudio, considera a la Unidad Central como un ente regulador y coordinador de las acciones realizadas por el segundo y el tercer nivel. Para llevar a cabo esta tarea, la Unidad Central define variables de coordinación y parámetros de decisión para cada una de las iteraciones realizadas en la planificación de esta industria siguiendo la metodología que se propone. De acuerdo a este estudio, los parámetros de decisión representan los cuestionamientos que al ser contestados por los niveles 2 y 3 (representados por los productores de petroquímicos intermedios y finales y por los productores de petroquímicos básicos respectivamente), definen la toma de decisiones. Si los flujos de información que se envían a la Unidad Central, como respuesta a una acción realizada por alguno de los actores del segundo y tercer nivel, no cumplen con los objetivos de ésta, se debe realizar nuevamente el cálculo siguiendo cada una de las iteraciones definidas.

En este caso, la Unidad Central recibe flujos de información que satisfacen los objetivos que se plantearon desde el principio. En el Capítulo V, se pueden encontrar las conclusiones específicas de estas acciones.

Este apartado tiene el propósito de retomar la información de los Apéndices I y II para realizar conclusiones de forma general para el caso de la Industria Petroquímica (IPQ).

La situación actual de la Industria Petroquímica Nacional es preocupante. La capacidad instalada se encuentra improductiva. Restituir el valor agregado que se genera en cada etapa de las cadenas petroquímicas, es una tarea urgente, si el país no desea incrementar las importaciones de los productos petroquímicos o de los productos manufacturados, que provienen de éstos, tales como fibras sintéticas, plásticos de todo tipo, hules y elastómeros, pinturas, barnices, detergentes, fertilizantes y muchos otros. Intercambiar petróleo bruto, exportándolo, o utilizar únicamente el gas natural como energético es un indicador de la dependencia de la exportación de un recurso no renovable, como lo son los hidrocarburos, lo cual es sumamente dañino para nuestra economía.

Por su parte, la iniciativa privada aumentó su dinamismo al tener mayores oportunidades de participación, pero no fue suficiente para llenar el espacio productivo dejado por el sector público y al mismo tiempo compensar la baja confiabilidad del suministro y precios no competitivos de las materias primas que PEMEX produce para consumo de la IPQ nacional, lo que finalmente condujo a desacelerar el dinamismo de la IPQ en su conjunto.

En la última década, han influido tres factores críticos en los cambios de la IPQ a nivel mundial, ampliamente aplicables a México: una ciclicidad severa en la obtención de ganancias, debida a la globalización de los precios de sus materias primas y los importantes efectos continuos y sostenidos de las curvas de experiencia o aprendizaje. En efecto, las dos materias primas básicas (petróleo crudo y gas natural) tienen un mercado independiente e igualmente cíclico pero de una gran trascendencia: la competencia en los mercados de los energéticos.

Estos tres factores críticos, en conjunto con los desequilibrios observados entre la oferta y la demanda, se han combinado para presentar a los actores de la IPQ varios dilemas; por ello estos actores han desarrollado estrategias para mejorar su producción aumentando el valor agregado a través de tecnologías cada vez más complejas.

La IPQ ha logrado a nivel mundial, suficiente flexibilidad para adaptarse a su siempre cambiante entorno; *esto último no ha sucedido en nuestro país.*

El valor agregado bruto de la IPQ se ha reducido, presentando una tasa de crecimiento anual negativa y su participación en el valor agregado bruto de la industria manufacturera y del total nacional también se redujo.

La capacidad instalada de PEMEX para producción de petroquímicos ha tenido muy poca variación y la producción de materias primas para la IPQ nacional ha disminuido continuamente.

De acuerdo a la metodología utilizada durante esta investigación, los resultados obtenidos muestran que la IPQ debería convertirse en el motor de la industrialización, en virtud de que los hidrocarburos son la base y el punto de partida de ésta. Al mismo tiempo la IPQ es la base para las siguientes transformaciones químicas y representa la interfase entre los requerimientos de energía secundaria y las materias primas para la elaboración de productos finales, que son a su vez, la fuerza motriz de diversas industrias manufactureras de nuestro país. Es deseable, entonces, establecer para la Industria Petroquímica un rol estratégico concediéndole además, un carácter prioritario, en base a la oportunidad que ésta representa para aprovechar nuestros recursos naturales, ahorrar divisas y fortalecer la integración industrial del país, realizando acciones que ayuden a fortalecer el desarrollo sustentable de nuestro país.

De toda esta investigación, se desprende que un plan de desarrollo para la IPQ, debe fundamentarse en:

- ↪ que no puede basarse solamente en programar metas de corto plazo, es necesario también responder a los cuestionamientos de cómo, para qué y para quién producir, bajo la óptica de una planificación sectorial de mediano y largo plazos, con un control jerárquico descentralizado.
- ↪ la elaboración específica de un programa integral de desarrollo de la IPQ, como un sistema, debe tratar de buscar congruencia entre las estrategias planteadas para la oferta de productos básicos de la IPQ, con la correspondiente a los productos de la IPQ secundaria y final, tratando de proporcionar para la primera, las prioridades de integración y diversificación y, para la segunda, el sentido y la dirección de inversiones estratégicamente deseables para el país.
- ↪ tener agrupada a la IPQ por cadenas productivas. Esto aclara la situación de interdependencia de un grupo de petroquímicos considerados dentro del esquema de producción nacional. El análisis por cadenas productivas establece, de esta manera, la intersección existente de un producto final con todos sus insumos e inversamente, las interacciones de éste con todos sus derivados, siendo el conjunto de los petroquímicos finales los que dan el efecto inductivo a toda la IPQ, a través de la demanda, que es la fuerza directriz de todo el sistema de modelos presentado.

4 Acerca de los objetivos de la tesis

Los objetivos de esta tesis fueron:

i. Proponer y desarrollar una metodología que permita analizar, jerarquizar y seleccionar las posibles tecnologías alternativas para el desarrollo de industrias de proceso como lo es la Industria Petroquímica, partiendo de petróleo crudo y considerando un horizonte de planificación de largo plazo. Para ello es necesario establecer los requerimientos de petroquímicos básicos y de

crudo a través de la concepción de las diversas rutas tecnológicas para la elaboración de productos de la demanda final.

Conclusión: Con la metodología utilizada se pudieron construir las rutas de proceso que finalizan en el poliuretano, las resinas poliéster, el polietilentereftalato, el poliestireno, el polibutilentereftalato, los polietilenos de alta densidad, baja densidad, y lineal de baja densidad, el hule estireno butadieno, las resinas acrilonitrilo–butadieno–estireno y estireno-acrilonitrilo, el anhídrido ftálico y el polipropileno, las cuales forman parte de la IPQ. Estas rutas de proceso representan las posibles estrategias alternativas para el desarrollo de esta industria. Como en todo proceso de planificación, este no se puede circunscribir a un solo periodo de análisis; por ello se consideró un horizonte de planificación desde el 2009 al 2027, dividido en 4 periodos de 6 años cada uno.

Se establecieron los requerimientos de petroquímicos básicos y sus materias primas: el petróleo crudo para este caso de estudio, por lo que se realizó un análisis utilizando una de las técnicas desarrolladas por la Inteligencia Tecnológica, los mapas tecnológicos.

Al llevar a cabo esta parte del estudio, podemos mencionar que la elaboración de mapas tecnológicos, permite generar una nueva visión de análisis en una de las áreas de aplicación específica, como lo es la Ingeniería Química. Particularmente, en el análisis de los procesos de producción de petroquímicos, la utilización de los mapas tecnológicos nos permitió valorar realmente los esfuerzos realizados por las diferentes compañías dedicadas a diseñar e implementar procesos de producción de olefinas y aromáticos y así poder discernir, del total de información acumulada durante la investigación bibliográfica, aquellas tecnologías que pueden utilizarse como ejes directrices para mejorar nuestra industria petroquímica.

A este respecto, a nivel internacional se demuestra la existencia de un fuerte interés sobre el valor de las cadenas de producción de olefinas a partir de crudo y la de producción de aromáticos a partir de naftas; esto quedó demostrado en el estudio realizado a través del desarrollo de la presente tesis, por los desarrollos tecnológicos logrados para mejorar y fortalecer la producción de petroquímicos básicos.

Del estudio de los procesos de refinación y petroquímicos, se tiene que:

La reformación y la descomposición de hidrocarburos destilados son las operaciones de transformación fundamentales para producir petroquímicos, sin olvidar que la destilación es el paso necesario para poder dividir el crudo en diferentes fracciones o cortes de hidrocarburos. Actualmente en nuestro país, estos procesos forman parte de una refinería cuyo objetivo principal es producir gasolinas y combustibles y, por lo tanto, con diferentes condiciones de operación que no consideran la obtención de rendimientos importantes para producir petroquímicos.

La utilización de catalizadores tipo metallocenos ha proporcionado a los productos de la polimerización nuevas características de aplicación; con lo cual su cadena de producción incrementaría tanto su valor agregado como el valor del producto.

Realizando la comparación de la tecnología con la cual fueron diseñadas las operaciones de reformado y descomposición utilizadas en nuestras refinerías con las que se reportan en la literatura, observamos que por lo menos el 50% de ellas fueron instaladas hace más de 30 años. Anteriormente nos dimos cuenta que, de acuerdo a la oficina internacional de patentes de Estados Unidos, la propiedad intelectual de los procesos de producción de aromáticos y olefinas de las compañías que se clasificaron como protectores de estas tecnologías, se reporta a partir de 1999. Lo anterior nos da una idea que la valoración de los petroquímicos se afirmó a partir de esta fecha. A este respecto, es necesario expresar que ha faltado llevar a cabo la simulación detallada de los procesos involucrados en las 6 configuraciones que se analizaron para producir petroquímicos básicos a partir de crudo. Estamos seguros que una simulación más detallada de cada proceso en cada configuración, proporcionará mucha más información sobre el diseño y la operación de éstas.

México cuenta aún con una importante cantidad de petróleo con alto contenido de azufre (crudo Maya), lo cual disminuye su valor de exportación. A pesar de ello, no deja de ser factible su procesamiento orientado a la producción de olefinas y aromáticos, con la ayuda de procesos intermedios, tales como los hidrotratamientos, para eliminar el contenido de azufre y maximizar la conversión en los insumos de interés.

Los esquemas de refinación propuestos en este trabajo, bajo el concepto de refinerías petroquímicas, se desarrollaron a principios de los años 70; sin embargo no han sido aprovechados en beneficio de esta industria debido a que las políticas energéticas les han restado importancia. No obstante, para este estudio fueron la base de aplicación del modelo matemático propuesto y el cálculo del algoritmo resultante para demostrar los objetivos de esta tesis.

Para identificar los esfuerzos realizados a nivel internacional para la elaboración de petroquímicos a partir del crudo, también se analizaron 6 configuraciones de refinería desarrolladas para mejorar y aumentar la producción de petroquímicos básicos. Ver Apéndice II.

El Apéndice II merece ser considerado como una aportación importante al campo del conocimiento de la Ingeniería Química, toda vez que la investigación realizada a través de la Inteligencia Tecnológica y los mapas tecnológicos, muestran el estado del arte en los procesos considerados.

Desde este punto de vista, creemos que cuando se plantea llevar a cabo una investigación, es necesario no solamente 'buscar' referencias para iniciarla; es necesario mejorar tales búsquedas bibliográficas, de patentes y de propiedad intelectual, para conocer a profundidad y de manera eficiente.

De esta forma se lograron construir las rutas tecnológicas de producción considerando la producción de petroquímicos desde el procesamiento del crudo para obtener petroquímicos básicos hasta su posible integración a las rutas de producción de petroquímicos finales.

La demanda de cada petroquímico final fue dada como información exógena al sistema y en función de ella, se calculó de forma inducida la demanda de los petroquímicos intermedios y finales requeridos para satisfacer dicha demanda.

El análisis, jerarquización y selección de las rutas de proceso de petroquímicos finales se realizó utilizando la teoría de redes y los métodos multicriterio, los cuales permitieron reducir la complejidad combinatoria de las rutas de producción.

Para la selección de la mejor configuración de refinación se diseñó un modelo, primero de programación lineal y, posteriormente, de programación entera mixta para cuantificar el número de unidades de refinerías requeridas para satisfacer la demanda de los petroquímicos.

Para la jerarquización y selección de las rutas de proceso se identificaron 4 criterios que incluyen los requerimientos de inversión necesarios para la implantación de las estrategias evaluadas, la energía real que debe suministrarse como servicios a lo largo de toda la ruta de producción, el valor agregado y valores de los productos básicos y finales elegidos, así como los índices de peligro a la salud y al ambiente.

Debido a que el valor del producto depende del valor agregado, se decidió tomar como criterios a evaluar, el valor agregado, la energía consumida, la inversión y los índices de peligro a la salud y al ambiente. Para el cálculo de los cuatro criterios ya mencionados en el párrafo anterior, fue necesario hacer balances de materia para cada una de las tecnologías intermedias de la cadena acorde con una demanda inducida, basada en la demanda del producto final, para poder seleccionar una capacidad de la planta adecuada a los requerimientos necesarios de cada producto intermedio de la cadena.

Para cada ruta de proceso analizada de cada uno de los productos terminales seleccionados, fue de gran importancia el empleo de los coeficientes "Insumo-Producto" para que los criterios estuvieran expresados por unidad de petroquímico final y poder así, realizar su comparación y evaluación para cada ruta tecnológica alternativa. Esto permitió realizar comparaciones entre rutas completas y no solo entre tecnologías.

En cuanto al análisis de las configuraciones de refinación, se logró estructurar conceptualmente la llamada Refinería Petroquímica, es decir, una secuencia de procesos de refinación primaria que, utilizando crudo como materia prima, sean capaces de alcanzar altos rendimientos de olefinas y aromáticos.

A este respecto podemos agregar que para la IPQ, el desarrollo tecnológico es primordial, ya que continuamente surgen nuevos procesos que pueden modificar la rentabilidad de las plantas ya existentes, la viabilidad de proyectos futuros y alterar la estructura de las cadenas. Es un hecho que la IPQ requiere del uso intensivo de capital. El monto de la inversión requerida para construir una planta petroquímica es muy alto; lo anterior, aunado a las variaciones y ciclos de la oferta, la demanda y los precios de las materias primas y productos involucrados, hace importante que además de evaluar el

funcionamiento de la estructura de la IPQ actual, se pueda hacer lo mismo con la incorporación de nuevas tecnologías a la estructura vigente.

Como ya se propuso, la producción de los petroquímicos básicos se lleva a cabo a partir de petróleo crudo en vez de los líquidos contenidos en el gas natural y de éste mismo, como se había planeado en la década de los años 60. La dupla producto/proceso es totalmente insoluble, además de ser muy importante para la aplicación de la metodología propuesta.

ii. Utilizar la metodología propuesta, también para hacer una planificación jerárquica a varios niveles, de tal manera de incrementar la posibilidad de llevar a cabo la restitución del valor agregado de la IPQ Mexicana.

Conclusión: Se logró desarrollar una metodología descentralizada a tres niveles de planificación para la IPQ, utilizando como base el modelo teórico descriptivo que propuso Kornai en 1973, con el objetivo de restituir el valor agregado de la IPQ.

La metodología empleada para calcular los valores de los productos determina, en gran medida, la validez de los resultados obtenidos. Estamos seguros de que es suficientemente general para poderse aplicar a todos los procesos involucrados y lo bastante precisa como para poder considerar fidedignos los resultados que de ella se obtuvieron.

Es importante recalcar que esta metodología es una nueva aportación a los campos del conocimiento de los sistemas jerárquicamente descentralizados utilizando, en lugar de la programación matemática para llegar a una solución, los métodos multicriterio que no solamente ayudaron a reducir la complejidad del sistema, sino que también dieron soluciones factibles y robustas para el proceso de planificación que se diseñó.

Por otra parte, la utilización de la programación matemática con números enteros fue posible gracias a que en la función objetivo modelada se introdujeron los valores resultantes de los llamados “flujos netos”, calculados por el método PROMETHEE II.

Con ello fue posible tomar decisiones respecto al número de refinerías con altos rendimientos de petroquímicos, necesarios para satisfacer la oferta de petroquímicos básicos, así como para elegir la mejor de las configuraciones tecnológicas de aquellas analizadas anteriormente.

La representación y modelación de la IPQ, se logró al emplear en forma simultánea, el concepto de algoritmo de recorrido y el concepto de cadena petroquímica.

El resultado que se obtuvo del algoritmo de recorrido aplicado a la IPQ, es la estructura de ésta (capacidades instaladas de los procesos involucrados) y la producción asignada a cada proceso incluido. La estructuración adicional de métodos multicriterio, permitió realizar comparaciones y reducir la complejidad combinatoria.

Para poder hacer comparaciones entre diferentes tecnologías y procesos fue necesario evaluarlos económicamente. Se requirió de una función de costos capaz de describir su comportamiento. La selección de procesos mediante algoritmos de recorrido emplea esta función en forma reiterada.

Por su parte, los métodos Multicriterio son útiles para jerarquizar decisiones de forma tal que se determine el orden de preferencia de las rutas de proceso a analizar utilizando del modelo de planificación, para luego seleccionar un subconjunto de posibles actividades de producción que pueden ser evaluados a nivel de proyecto como parte del plan obtenido previamente.

Este método consiste en establecer el perfil de juicios que caracterizan las reglas de preferencia de proyectos a clasificar, con relación a los criterios considerados, de forma de definir los productos, procesos y cadenas, que son mejores que otros.

Así se llevó a cabo la selección de las múltiples cadenas de los petroquímicos analizados para cada uno de los cuatro periodos del horizonte de planificación. De esta iteración resultó la selección de la mejor ruta de producción para cada petroquímico final.

En la siguiente iteración y tomando las mejores rutas seleccionadas para cada petroquímico final, se llevó a cabo la selección de los productos petroquímicos que respetaran los mismos criterios con los que se seleccionaron sus rutas de producción.

La selección de los petroquímicos finales, cuyo flujo neto de información es superior a cero ($\Phi_i > 0$) fueron:

Para el periodo 1:

PBT > PEF > PhA > SBR > PU > PP

Para el period 2:

SBR > PBT > PhA > PEF > ABS/SAN > PU

Para el period 3:

PhA > PBT > PET > PU > SBR > PEF

Para el periodo 4:

PBT > PhA > PU > PET > SBR > PEF

iii. Demostrar que la utilización de petróleo crudo puede competir, desde el punto de vista económico, con la exportación de éste para añadir valor a la cadena de producción de petroquímicos.

Conclusión: Este objetivo queda demostrado con los resultados obtenidos al finalizar la metodología. La metodología propone que la Unidad Central regulará, evaluará y

coordinará las acciones efectuadas por los actores de los niveles 2 y 3. Para la toma de decisiones se apoya en los parámetros de decisión que utiliza en la última iteración de cálculo del sistema. En consecuencia, para demostrar el logro del tercer objetivo planteado en esta tesis, retomaremos las interrogantes 2 y 4 del parámetro de decisión seis (PD₆). Capítulo V, apartado 2.3.6.

De acuerdo a lo resultados obtenidos el valor agregado del sistema estudiado al final del horizonte de planificación es de 9,223 Millones de USD del 2006, que comparado con el PIB de la subrama de la Industria Química, que reporta un valor de 20,518.83 Millones de USD del 2006, el valor agregado total para todo el horizonte de planificación del sistema analizado representa el 45% del PIB de la Industria Química de 2006.

En cuanto al sector de la Industria Manufacturera en donde está clasificada la subrama correspondiente a la Industria Química, el valor del PIB de 2006, de 134,751.75 Millones de USD, se incrementaría así en 7% al adicionarse el monto del valor agregado total para todo el horizonte de planificación del sistema analizado.

El valor del producto total promedio para todo el sistema (considerando las rutas de producción de petroquímicos más las refinerías) es de 156.85 USD/barril de crudo, como puede observarse en el Capítulo V, apartado 2.3.7, Tabla V.27.

Cabe recordar que para los resultados anteriores, se consideró un porcentaje para el retorno de la inversión del 25%, tanto para las rutas de producción de petroquímicos como para las refinerías; al momento actual de realizar estos cálculos el valor del petróleo crudo era de 77 USD/barril, aunque se ha previsto que llegue a 100 USD/barril.

Las cifras anteriores muestran la importancia de otorgar una oportunidad a la manufactura de los productos petroquímicos finales, intermedios y básicos analizados, más aún conociendo que las estadísticas reportan un valor agregado casi nulo en la exportación de un barril de crudo.

Es decir, si se obtuviera un ingreso por exportación de crudo utilizando el precio de 100 USD/barril de crudo, el sistema estudiado proporcionaría un ingreso adicional equivalente a casi 57 USD más por barril de crudo procesado para obtener petroquímicos.

5 Acerca de las hipótesis de esta tesis

i. Que existen tecnologías de proceso que permiten utilizar crudo como materia prima para procesar insumos petroquímicos y que podrían ser utilizadas para reactivar la IPQ y hacerla más competitiva.

ii. Que debido a que el precio de oportunidad del crudo es muy alto, y al parecer su exportación es muy rentable, el valor agregado (VA) y el valor del producto (VP) de la cadena de productos-procesos, partiendo desde los petroquímicos básicos hasta los finales, deben ser igualmente rentables que la sola exportación de crudo.

iii. Que se tratará de demostrar que la metodología que se propone para los objetivos antes mencionados, es robusta tanto en términos de la metodología que se aplicará y que las modelación utilizada es la más conveniente para llevar a cabo la planificación mencionada.

iv. Que al evaluar la posibilidad de implementar estas nuevas tecnologías, existe la oportunidad de aprovechar nuestros recursos naturales más eficientemente, generar mayor valor agregado y fortalecer la integración industrial del país.

La hipótesis i se confirma en el análisis realizado en el Apéndice II.

La hipótesis ii se confirma en la conclusión del tercer objetivo de esta tesis, presentada anteriormente.

La hipótesis iii se confirma a través de la conclusión del segundo objetivo de esta tesis.

La hipótesis iv se confirma con los resultados de esta tesis, ya que reactivando la Industria Petroquímica mexicana se origina un incremento considerable del valor agregado que directa e indirectamente generará más empleos; así mismo su utilización por parte del sector manufacturero contribuiría al desarrollo sustentable y, como ha quedado demostrado, multiplica el valor de la sustitución de crudo que pudiera haber sido exportado en casi 50%; esto último, expresa que no solamente se pagaría el precio de crudo que es parte de la política presupuestal, sino que se generaría riqueza para el país, lo que la exportación de crudo no hace.

Finalmente, queremos insistir en que el proceso de planificación propuesto por esta tesis, disminuye la entropía generada por dejar que ésta se lleve a cabo solamente por las “fuerzas del mercado”, es decir por la ley de oferta y demanda en dónde los demandantes deberían maximizar su satisfacción y los oferentes su ganancia, pero sin una real integración de las cadenas productivas con las cuales se generaría más riqueza y se disminuiría la entropía citada.

Oportunidades de investigación.

Creemos que de la presente investigación se generan oportunidades de investigación para la planificación, diseño y/o operación de sistemas complejos descentralizados. En efecto, la metodología creada debe poder ser adaptada a la planificación de otras industrias de proceso e, incluso, a nivel de procesos más detallados, cuya problemática en la toma de decisiones incluya la posibilidad de utilizar métodos con criterios múltiples. Tal podría ser el caso del diseño de nuevas plantas de proceso o de la reingeniería de plantas existentes, debido a que el concepto de “optimización” pierde validez al considerarse un solo objetivo, volviéndose ineficaz la descentralización de decisiones. En la operación de sistemas que se encuentren interconectados, la metodología que se diseñó en la presente tesis, puede ser igualmente útil, si tales interrelaciones tienen una secuencia concatenada.

Apéndice I.

Perspectiva de la Industria Petroquímica Mexicana.

1 Introducción

La Industria Petroquímica (IPQ) es una extensa red formada por un gran número de cadenas entrelazadas que elabora compuestos demandados por la economía. Estas cadenas inician con los productos obtenidos de la refinación del petróleo y del procesamiento del gas natural. En esta red, un mismo compuesto puede ser producido a través de diferentes cadenas, mediante procesos diferentes e incluso partiendo de distintos conjuntos de materias primas. El número de combinaciones de procesos capaz de producir un determinado producto final puede ser muy grande [1].

Una cadena (o ruta tecnológica) es concebida como una secuencia de procesos en la que los productos de uno o varios procesos son materia prima del siguiente. El primer proceso de cada secuencia (cadena) parte siempre de al menos una materia prima básica al sistema. Para la IPQ esta materia prima proviene de algún petroquímico llamado "básico". Las cadenas terminan con los productos finales, que son aquellos que salen del sistema en estudio y que son demandados por industrias no petroquímicas. Estos son, en su mayor parte, insumos para la Industria Manufacturera. Los productos de la demanda final se clasifican en este trabajo en: materiales poliméricos, fibras, hules sintéticos, farmoquímicos, aditivos para alimentos, lubricantes y combustibles, plaguicidas, propelentes y refrigerantes, químicos aromáticos, resinas, fibras, explosivos, colorantes y fertilizantes. Los petroquímicos intermedios son todos aquellos compuestos, elaborados por procesos petroquímicos, necesarios para producir petroquímicos finales partiendo de los básicos. Además, también se requiere de algunas materias primas que no son elaboradas por los procesos involucrados; éstas reciben la denominación de exógenas, siendo en general, productos químicos y especialidades.

2 Problemática de la Industria Petroquímica

En 1938, el Estado Mexicano se hizo cargo de la operación de la industria petrolera, logrando que de esa fecha a 1982, PEMEX llegara a ser la cuarta empresa petrolera del mundo y la quinta empresa petroquímica; hoy después de 20 años de un cambio a una política neoliberal, PEMEX ocupa un 14° lugar como empresa refinadora y en petroquímica ocupa el lugar 36° y se encuentra en declive.

En la última década, han influido tres factores críticos en los cambios de la IPQ a nivel mundial. Éstos son ampliamente aplicables a México: un comportamiento cíclico severo en la obtención de ganancias, debida a la globalización de los precios de sus materias primas (commodities) y los importantes efectos continuos y sostenidos de las curvas de experiencia o aprendizaje. En efecto, las dos materias primas básicas (petróleo crudo y gas natural) tienen un mercado independiente e igualmente cíclico pero de una gran trascendencia: la competencia en los mercados de los energéticos. Estos tres factores críticos, en conjunto con los desequilibrios observados entre la oferta y la demanda, se han combinado para presentar a los actores de la IPQ varios dilemas, cuyas estrategias han sido crear productos que contengan mayor valor agregado a través de tecnologías cada vez más complejas. Aunque la IPQ de varios países a nivel mundial está logrando, suficiente flexibilidad para adaptarse a su siempre cambiante entorno, en el caso de México, esta flexibilidad no se ha dado, principalmente por la confusión que se genera

respecto a sus materias primas (petróleo y gas natural), pues se les considera sólo y únicamente energéticos, cuyos derivados se tienen que vender a los precios que se demandan como energéticos, soslayándose la existencia de que exactamente los mismos productos son materias primas y piedras angulares de una industria mucho más eficiente que el precio de una caloría.

Por otro lado, el desempeño de la IPQ Mexicana está determinado por diversos factores, destacándose entre otros las políticas de explotación y procesamiento de los hidrocarburos, la política de inversión pública en cuanto a las actividades desarrolladas por PEMEX, la redefinición de los ámbitos de participación del sector público y privado, los precios y costos de los petroquímicos y la capacidad de reacción del sector privado para detonar oportunidades de inversión.

Al disminuir o desaparecer la producción de productos petroquímicos intermedios y finales en la IPQ Mexicana, ha disminuido también la disponibilidad de los insumos que la economía nacional requiere, provocando que las importaciones de dichos productos aumenten, especialmente la de los productos de la demanda final. Si consideramos que los costos de los productos de la demanda final son más altos que los de las materias primas que los producen, entonces el país está teniendo una desventaja significativa al exportar materias primas e importar productos de la demanda final.

En resumen, los problemas que agobian y detienen el crecimiento de la IPQ nacional son:

- ↺ Presenta un escaso crecimiento de su capacidad instalada total.
- ↺ La producción total de productos petroquímicos ha disminuido continuamente.
- ↺ El grado de utilización de la capacidad instalada total ha caído en forma continuada.
- ↺ Las importaciones totales de productos petroquímicos van en aumento.
- ↺ Las exportaciones totales de productos petroquímicos están disminuyendo.
- ↺ La competitividad interna se ha reducido año tras año, indicando que la producción nacional cubre cada vez menos al consumo interno y que ha sido necesario recurrir a las importaciones para su satisfacción; los petroquímicos intermedios presentan estas características, apuntando a un bajo nivel de integración de las cadenas productivas de la IPQ Mexicana.
- ↺ La competitividad externa total ha crecido poco y presenta altibajos, indicando una asistencia irregular al mercado externo.
- ↺ La inversión en la IPQ ha disminuido.
- ↺ Por lo tanto, la producción insuficiente o nula de un producto petroquímico a cualquier nivel dentro de una cadena productiva disminuye el nivel de integración y competitividad de ésta, al ser necesaria la importación de dicho producto y en el peor de los casos, la importación directa de las manufacturas que de otra forma, serían elaboradas localmente si la cadena productiva estuviera integrada.
- ↺ En un escenario donde disminuye la producción, el abasto de materias primas no es confiable y los precios de los productores nacionales no son competitivos, ha conducido a diversas empresas a realizar importaciones de sus materias primas, a

volverse distribuidores locales de los petroquímicos que anteriormente producían, o a salirse del mercado.

- ↪ Por otro lado y situando el análisis bajo el punto de vista tecnológico, la IPQ nacional no está debidamente integrada desde sus cimientos (la petroquímica de PEMEX), continuando con los productos intermedios (donde además de PEMEX también participa la iniciativa privada) y terminando en los productos finales, ha afectando negativamente la producción total.
- ↪ Para empeorar esta situación, a ningún lector puede escapar el hecho de que los productos manufacturados con insumos petroquímicos, se importan actualmente de China y la India o del sureste asiático, perjudicando seriamente nuestra economía, el empleo y la industrialización del país.

3 Estructura de la Industria Petroquímica Mexicana

La IPQ comprende la elaboración de todos aquellos productos que se derivan de los hidrocarburos del petróleo y del gas natural. La importancia de esta industria estriba en su capacidad para producir grandes volúmenes de productos a partir de materias primas de bajo costo.

Los productos finales, no se consumen generalmente de manera directa sino son utilizados por la industria manufacturera para fabricar bienes de consumo final (fibras, hules, fertilizantes, plásticos de toda índole, detergentes, pinturas, etc.).

A nivel mundial tiene relación con los productos petrolíferos que provienen de productos de refinación del petróleo: etileno, propileno, butilenos y algunos pentenos entre las olefinas, los hidrocarburos aromáticos, el benceno, el tolueno y los xilenos, cuyas materias primas básicas son las olefinas y los aromáticos. Los países que poseen gas natural, como México, obtienen etileno y propileno por un proceso criogénico de separación y luego a través de desintegración y con ello los productos etileno, metano e hidrógeno, pero causa que no sean autosuficientes en propileno por ser un subproducto del proceso.

Tomando como marco de referencia el Artículo 27 constitucional y las leyes y reglamentos secundarios que lo conforman, la IPQ se puede dividir en industria petroquímica básica, intermedia y final, la cual proporciona insumos a los diferentes sectores de la economía. Al respecto de lo anterior, en la Figura 1, ap. I se presenta un esquema general de esta división para su mejor entendimiento.

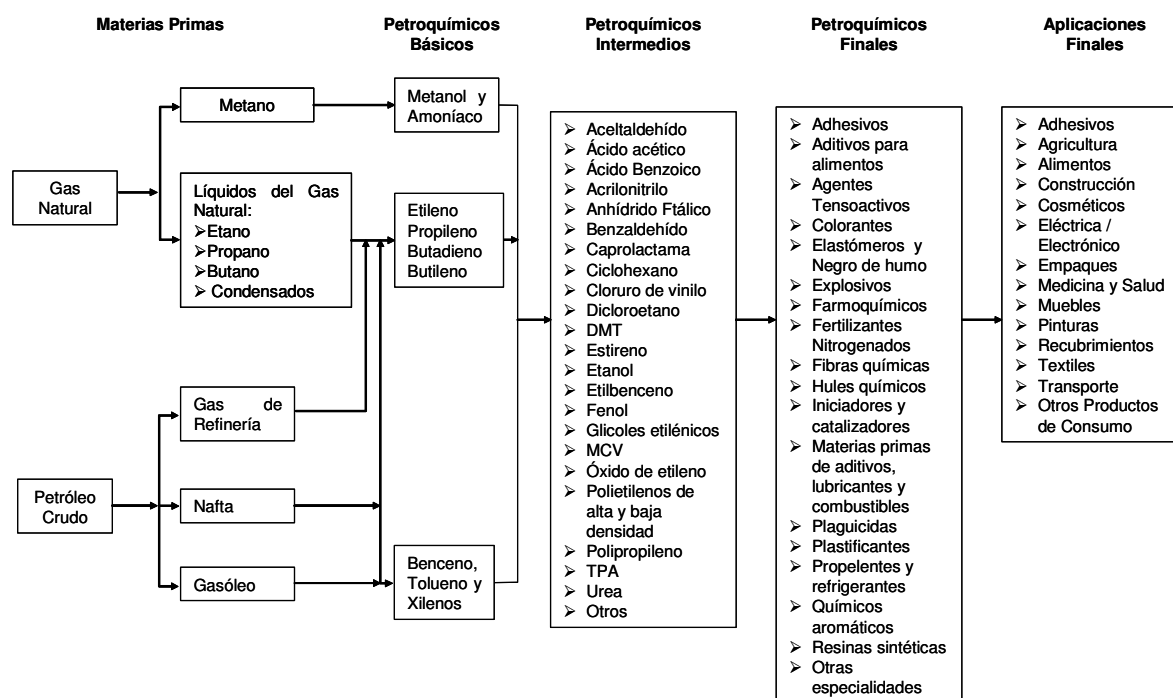


Figura 1, ap. I. Esquema General de la Industria Petroquímica

Fuente: Anuario Estadístico de la Industria Petroquímica, 2006.

En este trabajo, para hacer un mejor análisis del panorama de la IPQ Mexicana, ésta se dividirá en dos partes, la IPQ del sector público, representada por Petróleos Mexicanos (PEMEX), en particular la empresa PEMEX-Petroquímica, y la IPQ en su conjunto, considerando todas las subramas que la componen.

En lo que respecta al sector público, Petróleos Mexicanos (PEMEX), se reestructuró conforme a lo descrito en la “Ley Orgánica de Petróleos Mexicanos y Organismos Subsidiarios”, publicada en el Diario Oficial del 16 de julio de 1992, en cuatro subsidiarias:

- i. PEMEX Exploración y Producción: explora y extrae petróleo y gas natural.
- ii. PEMEX Refinación: elabora los productos de refinación.
- iii. PEMEX Gas y Petroquímica Básica: procesa, almacena, distribuye y transporta gas natural, produce petroquímicos básicos, no obstante que esta definición resulta en la realidad muy difusa.
- iv. PEMEX Petroquímica: produce petroquímicos básicos y no básicos.

Fue del dominio público que en octubre de 1996, la Secretaría de Energía (SENER) quiso definir que la desincorporación de activos de PEMEX Petroquímica, se haría a través de empresas filiales, con acciones cuyo capital social provendría de la propia paraestatal en 51%, mientras que el 49% restante hubiera podido ser suscrito por personas físicas o morales de cualquier nacionalidad. Como es sabido, esta iniciativa fracasó rotundamente,

aunque sí se crearon empresas filiales a PEMEX Petroquímica que permanecieron así hasta el 2004, en que nuevamente se reagruparon.

De acuerdo a la “Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en el Ramo del Petróleo en materia petroquímica” emitida por la Secretaría de Energía el 13 de noviembre de 1996, la que en resumen expresa que los derivados de las piedras angulares, petróleo y gas, que sean susceptibles de servir como materias primas básicas, serán elaborados en forma exclusiva por PEMEX u organismos subsidiarios o asociados a dicha institución, la extracción y refinación del petróleo crudo, están reservadas en forma exclusiva al Estado a través de PEMEX. Estas materias básicas se presentan en la Tabla 1. ap. I.

Tabla 1. ap. I. Materias Primas Consideradas Petroquímicos Básicos

1.	Etano
2.	Propano
3.	Butanos
4.	Pentanos
5.	Hexano
6.	Heptano
7.	Materia prima para el negro de humo
8.	Naftas
9.	Metano (cuando provenga de carburos de hidrógeno, obtenidos de yacimientos ubicados en el territorio nacional y se utilice como materia prima en procesos industriales petroquímicos)

Fuente: Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en el Ramo del Petróleo.

PEMEX Petroquímica¹ cuenta con ocho Centros de Trabajo que son: el Complejo Petroquímico Independencia, el Complejo Petroquímica Cangrejera, el Complejo Petroquímico Cosoleacaque, el Complejo Petroquímico Morelos, el Complejo Petroquímico Pajaritos, el Complejo Petroquímico Tula, el Complejo Petroquímico Escolín y la Unidad Petroquímica Camargo. Estas se dedican a la elaboración, comercialización y distribución de productos, tales como: acetaldehído, amoníaco, benceno, etileno, óxido de etileno, glicoles, ortoxileno, paraxileno, propileno, tolueno, xilenos, acetronitrilo, ácido cianhídrico, acrilonitrilo, polietileno de baja y alta densidad, metanol y cloruro de vinilo, para satisfacer la demanda del mercado nacional y una parte del mercado Internacional.

Su actividad fundamental son los procesos petroquímicos no básicos derivados de la primera transformación del gas natural, metano, etano, propano y naftas de Petróleos Mexicanos.

¹ <https://www.ptq.pemex.com/portal/PagSubMenuVisita.aspx?IdMenu=1&IdsMenu=9>

En diciembre de 1996, el Consejo de Administración de PEMEX autorizó la creación de empresas paraestatales filiales de PEMEX Petroquímica, a las que se transfirieron los activos fijos dedicados a la producción de petroquímicos no básicos².

Por último, la industria petroquímica privada, además de producir parte de los petroquímicos intermedios, produce petroquímicos finales. De acuerdo a datos de la Asociación Nacional de la Industria Química. Algunas empresas que forman la industria petroquímica privada son:

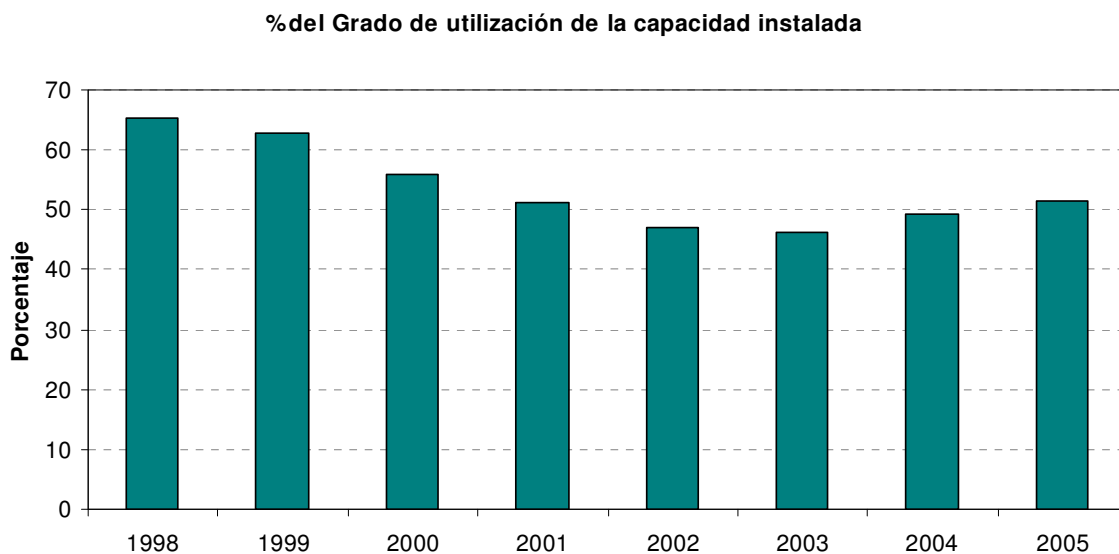
- | | |
|--|---|
| ↵ Celanese Mexicana, S.A. de C.V. | ↵ Industrias Monfel, S.A. de C.V. |
| ↵ Clariant México, S.A. de C.V. | ↵ Nitroamonia de México, S.A. de C.V. |
| ↵ Cytec de México, S.A. de C.V. | ↵ Oxiquímica, S.A. de C.V. |
| ↵ Derivados Macroquímicos, S.A. de C.V. | ↵ Petrotemex, S.A. |
| ↵ Derivados Maleícos, S.A. de C.V. | ↵ Petroderivados, S.A. de C.V. |
| ↵ Dow Corning de México, S.A. de C.V. | ↵ Policyd, S.A. de C.V. |
| ↵ Dynea México S.A. de C.V. | ↵ Poliestireno y Derivados, S.A. de C.V. |
| ↵ Fenoquimia, S.A. de C.V. | ↵ Polioles, S.A. de C.V. |
| ↵ Fenoresinas, S.A. | ↵ Quest International de México, S.A. de C.V. |
| ↵ Formoquimia, S.A. de C.V. | ↵ Resinas y Materiales, S.A. de C.V. |
| ↵ G.E. Plastics México, S.A. de C.V. | ↵ Rexcel, S.A. de C.V. |
| ↵ Grupo ICI de México, S.A. de C.V. | ↵ Mossi & Ghisolfi, S.A. de C.V. |
| ↵ Grupo Primex, S.A. de C.V. | ↵ Síntesis Orgánicas, S.A. de C.V. |
| ↵ Industrias Cydsa Bayer, S.A. de C.V. | ↵ Crompton Corporation S.A. de C.V. |
| ↵ Industrias Derivadas del Etileno, S.A. de C.V. | ↵ Univex, S.A. de C.V. |

3.1 Estadísticas del Anuario Estadístico de la Industria Petroquímica

La capacidad instalada de la industria petroquímica aumentó 0.4% en 2005, llegando a 35,216,008 toneladas anuales, mientras que en 2004 fue de 35,070,804 toneladas. Lo anterior, debido a los incrementos registrados principalmente en químicos aromáticos, plaguicidas, aditivos para alimentos, plastificantes, adhesivos, resinas sintéticas y agentes tensoactivos.

A pesar del ligero aumento en la capacidad instalada en la industria petroquímica, el grado de utilización de la misma fue de 51.5% durante 2005, con un aumento de 4.7% respecto a 2004. En 2004 el grado de utilización fue de 49.2%, 6.3% mayor al observado en 2003. Ver Gráfica 1. ap. I, [2].

² *Petróleos Mexicanos*. <http://www.pemex.gob.mx/>



Gráfica 1. ap. I. Porcentaje del grado de utilización de la capacidad instalada en petroquímica

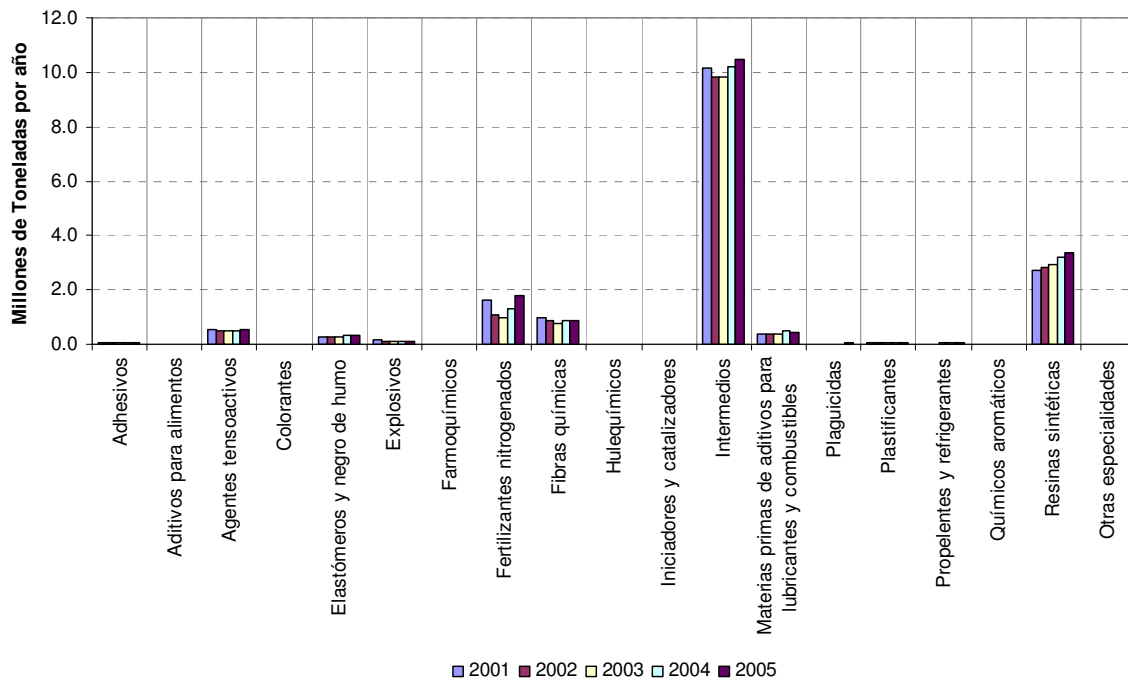
Fuente: Anuario Estadístico de la Industria Petroquímica 2006

Durante el periodo 2004-2005 se registró un aumento en la producción de petroquímicos de 5.1%, alcanzando un nivel de 18,126,790 toneladas. Entre 2003 y 2004 aumentó en 7.6%. La producción de la industria petroquímica pública aumentó 3.4%, con un nivel de 8.5 millones de toneladas en 2005, cifra superior a las 8.1 millones de toneladas alcanzadas en 2004. Ver Tabla 2 ap. I y Gráfica 2. ap. I.

Tabla 2. ap. I. Producción Total de Productos Petroquímicos en México (Miles de Toneladas por año)

Fuente: Anuario Estadístico de la Industria Petroquímica

Año	Producción
1998	21,697
1999	20,435
2000	18,709
2001	17,048
2002	16,090
2003	16,020
2004	17,242
2005	18,127



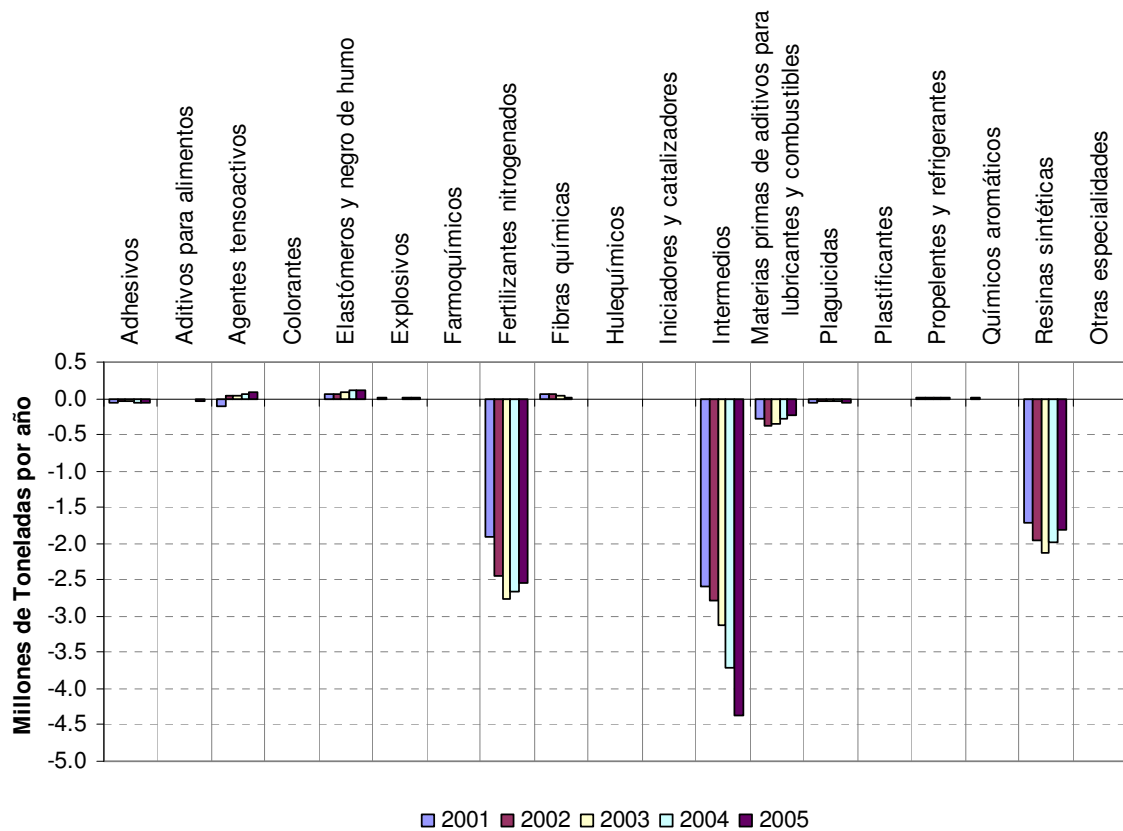
Gráfica 2. ap. I. Evolución de la Producción de la Industria Petroquímica

Fuente: Anuario Estadístico de la Industria Petroquímica 2005

Respecto a la industria petroquímica privada, cabe señalar que en 2005 se obtuvo una producción de 9.7 millones de toneladas, lo que representa un aumento del 6.7% respecto a las 9.0 millones de toneladas obtenidas durante 2004.

En cuanto a la balanza comercial³, se registró un déficit en 2005 para toda la industria petroquímica de 8, 964,285 toneladas, 3.8% mayor respecto a 2004. En este último año, se observó un déficit de 8, 639,201 toneladas, con un incremento de 3.1% respecto a 2003.

³ Balanza comercial = Exportaciones – Importaciones.



Gráfica 3. ap. I. Balanza comercial de la Industria Petroquímica

Fuente: Anuario Estadístico de la Industria Petroquímica 2005

La subrama de elastómeros y negro de humo mantuvo el mayor superávit en la balanza comercial durante 2005, seguida por agentes tensoactivos, explosivos y propelentes y refrigerantes. El mayor déficit en la balanza comercial durante 2005 se mostró en intermedios. Le siguen, en orden de importancia, las subramas de fertilizantes nitrogenados, resinas sintéticas, materias primas de aditivos para lubricantes y combustibles, adhesivos, plaguicidas, aditivos para alimentos, colorantes, hule químico, iniciadores y catalizadores, químicos aromáticos, fibras químicas, otras especialidades, farmoquímicos y plastificantes.

La competitividad de la industria petroquímica en el mercado interno aumentó 0.4% entre 2004 y 2005. La producción nacional atendió el 66.9% del consumo aparente en 2005, respecto a un 66.6% del 2004. En 2003 la industria petroquímica atendió el 65.4% del consumo aparente⁴. En el año 2005, ocho de las diecinueve subramas de la industria petroquímica mejoraron su competitividad interna, debido a que su producción nacional logró una mayor participación en el consumo aparente. En orden de importancia, mostrando los mayores crecimientos, destacan: otras especialidades, fertilizantes

⁴ Consumo Aparente = Producción + Importaciones - Exportaciones

nitrogenados, elastómeros y negro de humo, agentes tensoactivos, resinas sintéticas, materias primas de aditivos para lubricantes y combustibles, plastificantes y explosivos. Por el contrario, perdieron competitividad en el mercado interno las subramas de aditivos para alimentos, iniciadores y catalizadores, hules químicos, colorantes, adhesivos, farmoquímicos, intermedios, fibras químicas, propelentes y refrigerantes, químicos aromáticos y plaguicidas.

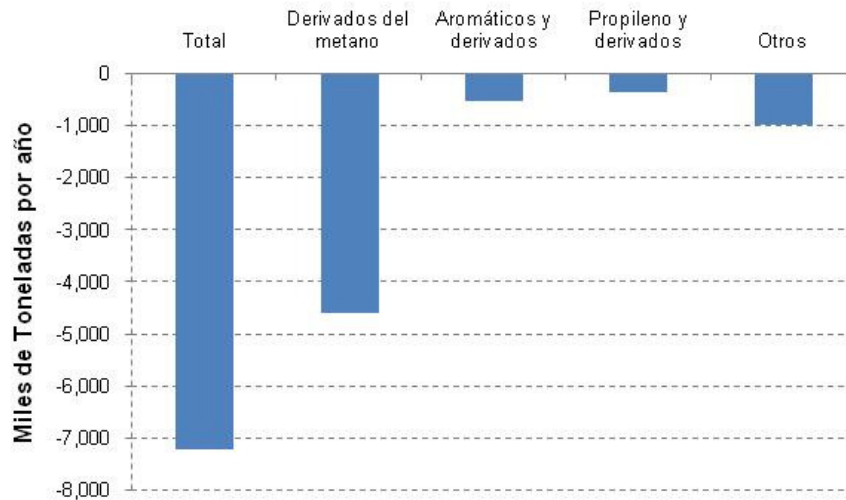
3.2 Estadísticas del Anuario Estadístico de PEMEX

Por lo que respecta a PEMEX se reporta también un déficit en la producción de petroquímicos derivados del metano, aromáticos, propilenos y sus derivados entre otros. Ver Tabla 3. ap. I, [3].

**Tabla 3. ap. I. Estadística de elaboración de productos petroquímicos
 [Miles de Toneladas]**

Fuente: Anuario Estadístico de PEMEX 2006

	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Total	13,448	13,292	11,513	9,961	7,991	6,836	5,994	5,889	6,085	6,223	6,219
Derivados del metano	5,862	5,961	5,067	4,374	3,019	2,271	1,752	1,663	1,383	1,668	1,242
Aromáticos y derivados	1,738	1,649	1,461	1,402	1,235	667	642	670	795	1,222	1,187
Propileno y derivados	477	446	377	243	193	180	127	115	125	116	104
Otros	2,230	2,147	1,519	996	848	1,083	1,065	1,133	1,564	1,145	1,246



Gráfica 4. ap. I. Decremento de la producción 1995-2005

Como puede observarse en la Gráfica 4. ap. I, la elaboración de productos petroquímicos ha disminuido fuertemente por el aumento en las importaciones, lo cual resulta en detrimento de la integración de cadenas.

Esto último es una de las evidencias que ofrecemos para reafirmar que la Industria Petroquímica debe reactivarse para producir productos con mayor valor agregado.

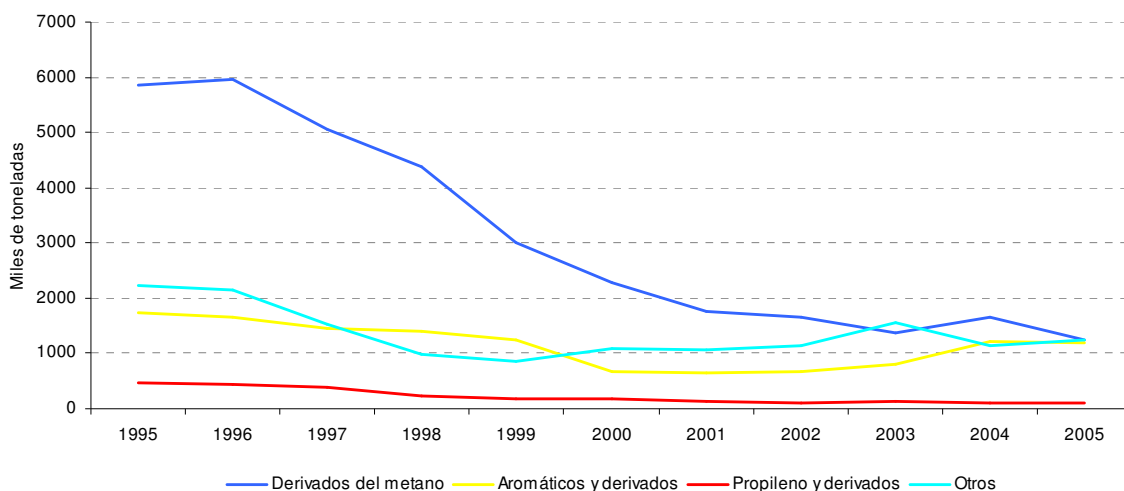
Como derivados del metano se consideran el amoniaco, anhídrido carbónico, metanol, metil terbutil eter. Los derivados del etano son: acetaldehído, cloruro de vinilo, dicloroetano, etileno, glicoles etilénicos, óxido de etileno, percloroetileno, polietileno de alta densidad y polietileno de baja densidad.

Los aromáticos y sus derivados son: aromáticos pesados, aromina 100, benceno, cumeno, estireno, etilbenceno, fluxoil, ortoxileno, paraxileno, tolueno, xilenos (mezcla) e hidrocarburos de alto octano.

En propileno y sus derivados son: acetonitrilo, ácido cianhídrico, acrilonitrilo, isopropanol, polipropileno y propileno.

En otros se incluyen los siguientes: ácido clorhídrico, ácido muriático, butano crudo, heptano, hexano, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno, pentanos, polímero petroquímico, refinado II, reformado pesado y tetracloruro de carbono.

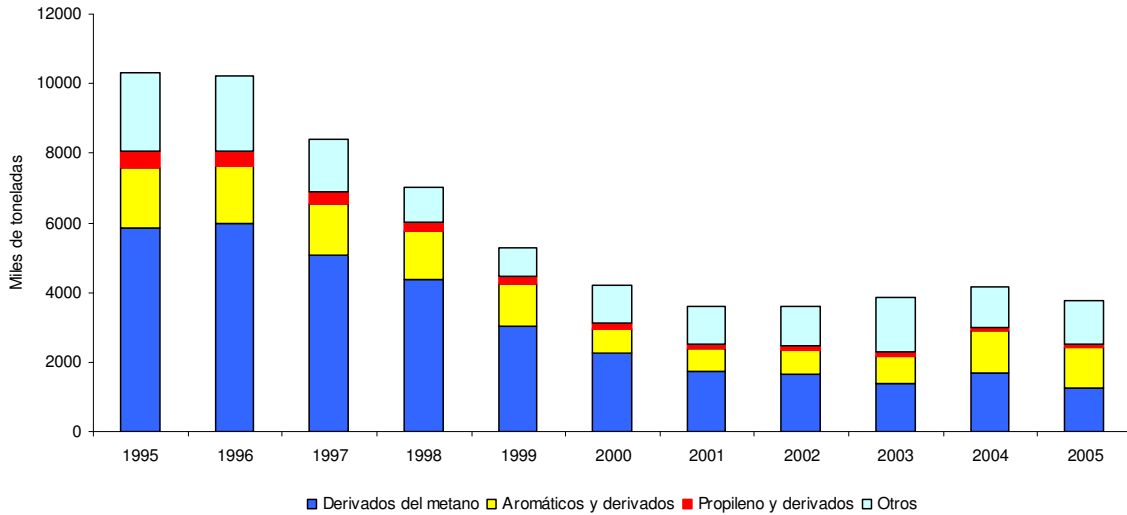
En la Gráfica 5. ap. I se muestra la disminución de la elaboración de petroquímicos básicos e intermedios, a partir de gas natural, etileno y propileno.



Gráfica 5. ap. I. Elaboración de Productos Petroquímicos

Fuente: Anuario Estadístico de PEMEX 2006

La Gráfica 6. ap. I presenta la evolución de la producción agregada de petroquímicos básicos e intermedios, en donde se observa una caída en la producción en los años 2001 y 2002 así como un ligero aumento en los años 2003 y 2004; no obstante, en el año 2005 se reporta una nueva disminución, respecto a la producción del año 2004.

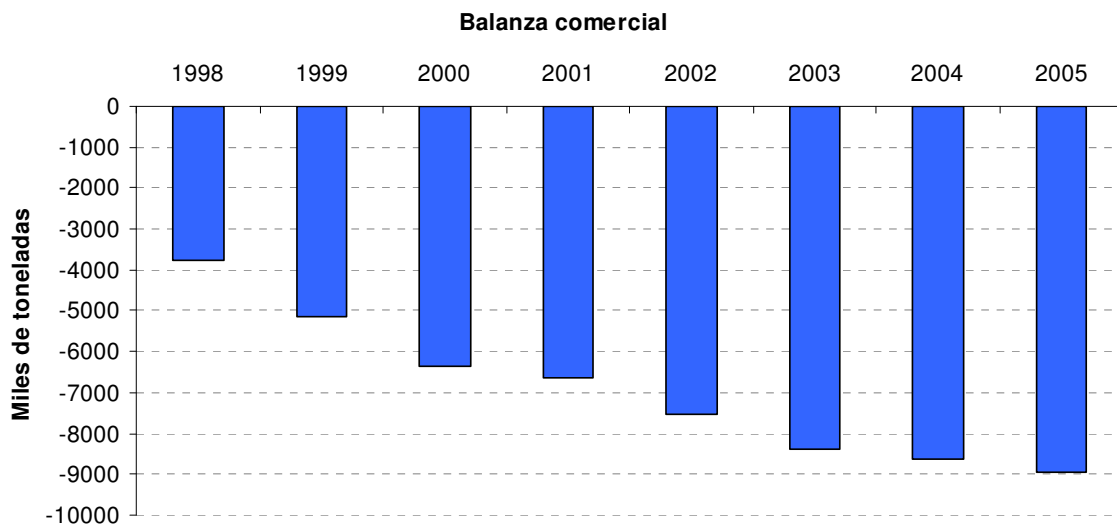


Gráfica 6. ap. I. Producción agregada de productos petroquímicos

Fuente: Anuario Estadístico de PEMEX 2006

Nuevamente aparece la disminución de la producción de los derivados mencionados en detrimento de la creación de mayor valor agregado así como de la importación de productos que podría elaborar la Industria Manufacturera, provenientes principalmente del Sureste Asiático.

La Gráfica 7. ap. I muestra la balanza comercial de petroquímicos que reporta PEMEX, como puede observarse, los números son negativos desde el 1998 y que han ido disminuyendo a través de los años. Obviamente, las importaciones de petroquímicos han ido aumentando mientras que las exportaciones han disminuido. Ésta gráfica reafirma lo expresado anteriormente.



Gráfica 7. ap. I. Balanza comercial de petroquímicos

Fuente: Anuario Estadístico de PEMEX 2006

3.3 Gas Natural como materia prima para producir petroquímicos

En materia del precio de venta del gas natural, basado en un “costo de oportunidad”, se ha generado el paro de las plantas de petroquímica públicas y de más de 40 plantas de la iniciativa privada en México.

En el sector privado de la IPQ se han perdido gran cantidad de empleos directos, su valor agregado y los impuestos correspondientes. Además, en las pequeñas y medianas empresas (PYMES) del plástico se han perdido plazas por falta de competitividad, debido a los altos precios internos de los insumos, mismos que ahora se importan.

Para aceptar los precios basados en el “costo de oportunidad del gas natural”, se requiere aplicar costos internos de producción, los cuales serían altamente competitivos si se modifica la política energética actual; con esos nuevos precios se puede generar un gran valor agregado en la actividad industrial⁵.

En la Tabla 4. ap. I se presenta el balance de gas natural 1995-2005 presentado en el reporte de la “Prospectiva del Gas Natural 2006-2015” editado por la Secretaría de Energía [4]. En este balance se puede ver claramente el porcentaje utilizado de gas natural para la producción de petroquímicos en comparación con la producción nacional de este recurso.

⁵ Escobar Toledo, C., et. al., *Restitución del valor agregado y de la productividad de algunas cadenas improductivas de la industria petroquímica en México a través de la reestructuración, simulación y jerarquización tecnológica y de inversiones.* [4]

Tabla 4. ap. I. Balance de Gas Natural 1995-2005
 (Millones de pies cúbicos diarios)

Fuente: Prospectiva del Gas Natural 2006-2015

	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Origen	3,353	3,629	3,835	4,155	4,207	4,372	4,454	4,863	5,322	5,750	5,952
Prod. Nacional	3,180	3,545	3,726	4,004	4,039	4,091	4,074	4,134	4,326	4,626	5,046
Gas de PEP ⁶ para operación	157	181	155	175	192	186	197	201	209	243	401
Gas de PEP para recirculaciones	283	334	299	282	243	240	242	193	214	311	400
Gas de PEP directo a Refinación	22	21	21	18	17	12	6	22	5	1	1
Producción de plantas PGPB ⁷	2,376	2,615	2,799	2,816	2,709	2,791	2,804	2,916	3,029	3,144	3,147
Directo de campos	190	277	381	599	750	752	710	697	763	815	998
Etano inyectado a Ductos	109	82	47	94	114	98	101	91	95	108	94
Otras corrientes	42	36	24	20	14	13	14	13	10	4	5
Importación	173	84	109	151	168	281	380	729	995	1,124	905
Importaciones por logística	50	56	68	130	163	206	228	338	468	609	656
Importaciones de PGPB por balance	123	28	41	21	6	75	152	392	527	515	249
Importación de gas natural licuado	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Destino	3,356	3,630	3,797	4,092	4,129	4,350	4,383	4,860	5,287	5,722	5,914
Demanda Nacional	3,335	3,594	3,760	4,060	3,993	4,326	4,358	4,855	5,287	5,722	5,890
Sector petrolero	1,376	1,392	1,334	1,361	1,295	1,286	1,310	1,290	1,323	1,405	1,483
PEP	325	364	357	374	399	442	505	500	515	593	692
PEMEX Refinación	135	140	180	194	198	207	230	238	270	262	276
PGPB	235	230	216	256	247	264	258	256	252	255	251
PEMEX Petroquímica	680	657	580	537	449	373	316	295	285	295	264
PEMEX Corporativo	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0

⁶ PEP: PEMEX Exploración y Producción

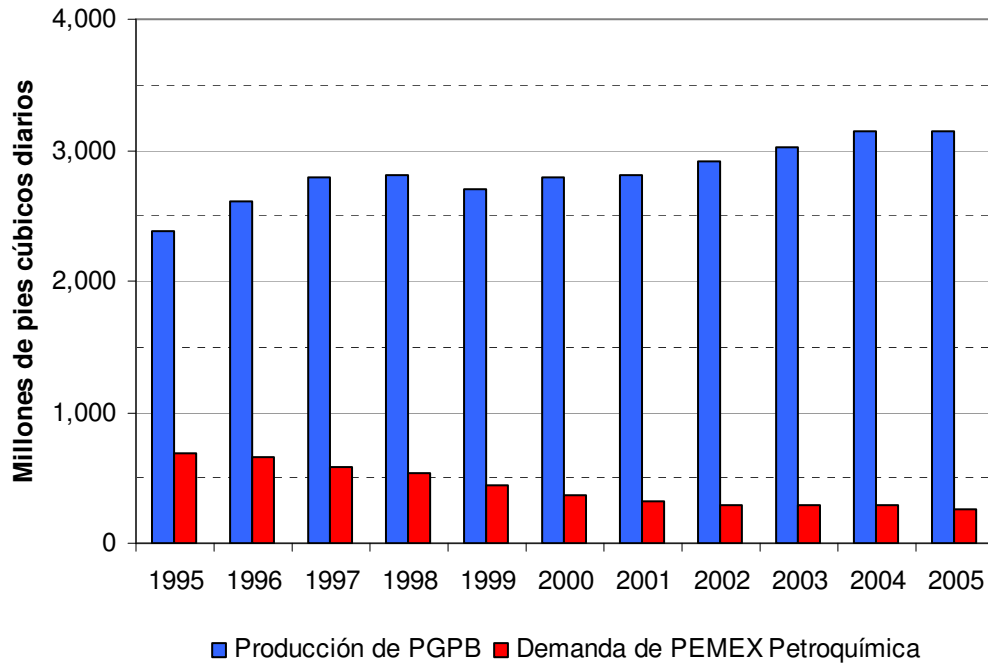
⁷ PGPB: PEMEX Gas y Petroquímica Básica

	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Sector petrolero – recirculaciones internas	495	661	805	904	777	930	967	999	1,104	1,203	1,350
Sector industrial	799	865	886	963	1,023	1,019	838	966	922	957	935
Sector eléctrico	589	596	653	756	821	1,011	1,157	1,506	1,836	2,050	2,014
Público	494	492	538	639	705	897	1,077	1,384	1,590	1,738	1,680
Comisión Federal de Electricidad	472	467	513	601	665	835	949	924	932	814	733
Luz y Fuerza del Centro	23	25	24	38	40	35	38	35	33	29	29
Productores Independientes de Energía	-	-	-	-	-	27	89	425	625	896	918
Privado	95	104	116	116	116	115	80	122	246	312	335
Autogeneración de electricidad	95	104	116	116	116	115	80	122	194	223	218
Exportación de electricidad	-	-	-	-	-	-	-	-	52	89	117
Sector residencial	57	60	62	56	57	60	64	71	81	86	86
Sector servicios	19	20	20	20	20	20	21	22	19	20	20
Sector auto transportes	-	-	-	-	0	1	1	2	2	2	2
Exportación	21	36	37	32	136	24	25	4	0	0	24
Consumo Aparente	3,332	3,593	3,798	4,123	4,071	4,348	4,429	4,859	5,321	5,750	5,927

Como puede observarse el gas natural destinado a PEMEX Petroquímica ha disminuido fuertemente, lo que indica menor producción para los derivados del metano. En el caso del gas enviado a PGPB, aunque se ha incrementado, no quiere decir que se haya destinado a la producción de petroquímicos; más bien el etano y otros licuables contenidos en el gas natural se han destinado al consumo de gas natural seco como energético.

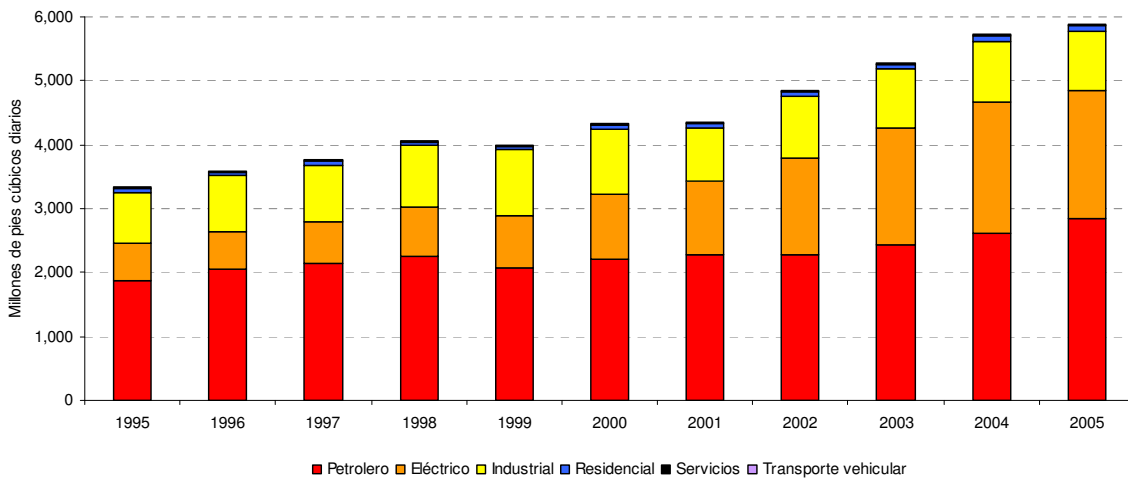
La Gráfica 8. ap. I muestra cómo la demanda de gas natural para su utilización en la producción de petroquímicos ha disminuido desde 1995 a 2005, en comparación con la producción del insumo realizada por PGPB.

La Gráfica 9. ap. I presenta los diversos sectores en los que se distribuye el gas natural. Claramente se aprecia que el sector petroquímico no aparece.



Gráfica 8. ap. I. Comparación de la producción de Gas Natural de PGPB contra la demanda de PEMEX Petroquímica

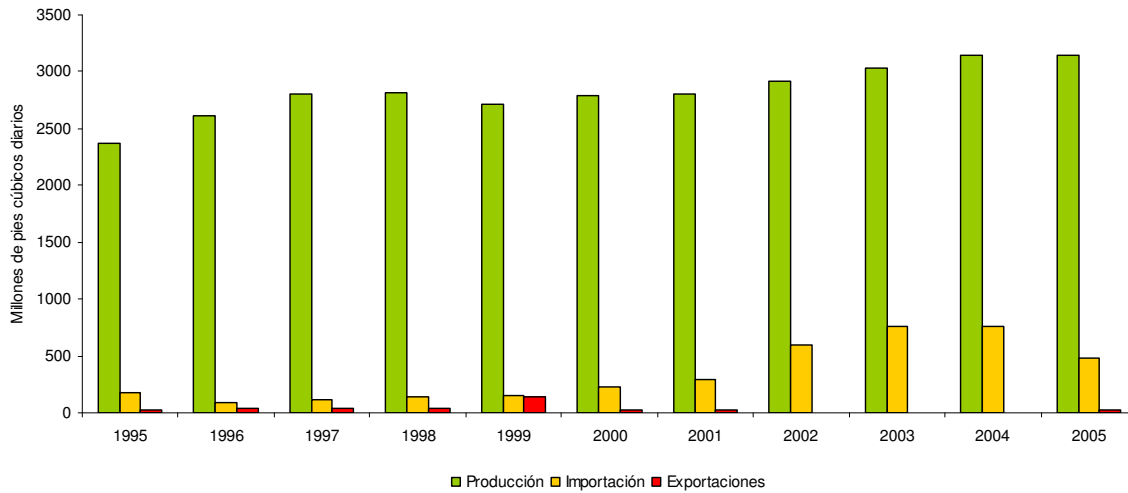
Fuente: Prospectiva del Gas Natural 2006-2015



Gráfica 9. ap. I. Consumo de gas natural por sector

Fuente: Prospectiva del Gas Natural 2006-2015

La Gráfica 9. ap. I muestra, de acuerdo a PEMEX, que las importaciones de gas seco aumentan en los periodos de 2002 a 2004 y en 2005 disminuyen, mientras que las exportaciones prácticamente son nulas en comparación a la producción del insumo.



Gráfica 10. ap. I. Balance de Gas Natural Seco

Fuente: Anuario Estadístico de PEMEX 2006

La Tabla 5. ap. I se verifica la información de la Gráfica 9. ap. I, a pesar de que se cuantifican dos rubros diferentes, la producción de petrolíferos junto con el gas seco, se observa el mismo comportamiento de la gráfica anterior, las importaciones son mayores que las exportaciones de los rubros considerados, por lo que el concepto de exportaciones netas es negativo para todo el periodo reportado. Por el contrario, se observa que las importaciones de gasolina siempre tienden a aumentar. Las importaciones de gas seco siguen la misma tendencia de aumento que las gasolinas a excepción del año 2005 en dónde se observa una baja un poco mayor de la mitad del valor reportado en el 2004. No obstante, esto no garantiza que la producción de petrolíferos presente el mismo comportamiento, como se ha demostrado en los párrafos anteriores.

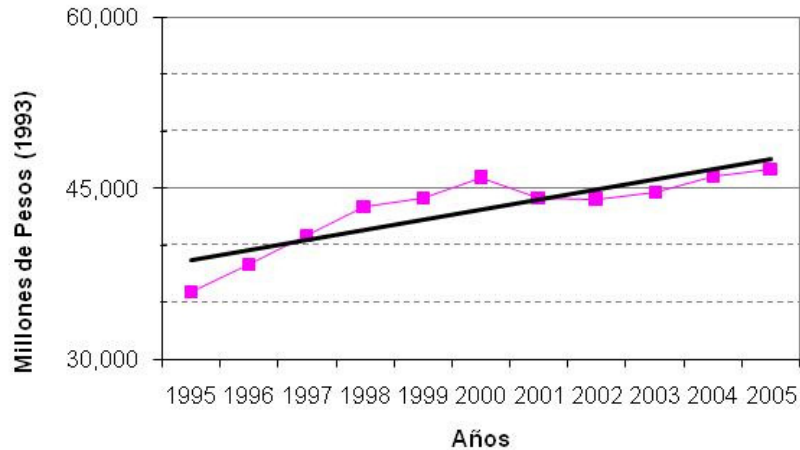
Tabla 5. ap. I. Comercio Exterior de productos petrolíferos y gas seco [Miles de barriles por día]

Fuente: Anuario Estadístico de PEMEX 2006

	1993	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Exportaciones netas	-43.2	-282.3	-271	-174.5	-134.2	-194.2	-213.9
Exportaciones	121.8	115	107.4	156.5	177.2	152.9	190.6
Importaciones	165	397.3	378.4	331	311.4	347.1	404.5
Gasolinas	70.6	90.6	139.3	95.6	69.1	112.5	190.4
Gas seco [MM p c /d]	25.5	34.1	43.1	87.3	111.6	112.9	70.8

3.4 Indicadores macroeconómicos

Para comparar los valores agregados de la Industria Manufacturera (IM) y de la rama V "Sustancias químicas, derivados del petróleo, productos de caucho y plástico" perteneciente a la primera, presentamos la gráfica del valor de la rama V de la IM, [5].



Gráfica 11. ap. I. Valor Agregado de la rama V de la Industria Manufacturera (Millones de pesos constantes de 1993)

Fuente: INEGI, SCNM,

En la Gráfica 11. ap. I puede observarse las fluctuaciones del valor agregado de la rama V donde se encuentra ubicada la Industria Química. En esta gráfica se puede observar un crecimiento a partir de 1995 hasta el año 2000, en donde encuentra su máximo; para el año 2001 se presenta una disminución y posteriormente presenta un ligero aumento. Hemos coincidido que las estadísticas no muestran una caída abrupta de los productos petroquímicos por que éstos se contabilizan junto con los otros productos que conforman la rama V de la Industria Manufacturera.

El valor agregado de la IM representó 17.70% del Producto Interno Bruto (PIB) de nuestro país, en 1995, mientras que en 2005, representó el 17.93%.

La Tasa Media Anual de Crecimiento (TMAC) del PIB fue de 3.6% entre 1995 y 2005, mientras que la de la IM fue de casi 3.8%. Si se observa la del valor agregado de la rama V en el mismo periodo fue de 2.4%, inferior a las tasas de crecimiento del PIB y del valor agregado de la IM en 1.2% y 1.4%, respectivamente. Entonces, se puede inferir que la rama V no tuvo el mismo dinamismo que el crecimiento del PIB ni del de la IM. Si se divide el período en dos partes como se observa de la gráfica anterior de 1995 a 2000 la TMAC fue del 5%, mientras que para el periodo de 2000 a 2005 fue de 3.63%, lo cual significa que disminuyó 1.37% en 5 años.

Por otro lado, el valor agregado de la rama V con respecto al valor agregado de la Industria Manufacturera, fue de 16.52% en 1995, y de 14.83% en 2005. Estas cifras

muestran una disminución en su participación de 1.69% en 5 años, revelando que la rama V, perdió su participación dentro de su propio ámbito.

4 Pronósticos y Prospectiva de la Demanda de los Productos Petroquímicos Seleccionados

La estructura de la industria petroquímica tiene como base unos pocos productos fundamentales, que inician las cadenas productivas de esa industria y dan origen a un gran número de productos intermedios y finales. Sin embargo, la demanda de dichos productos fundamentales se mide a su vez por la demanda de sus derivados, hasta llegar así a los llamados productos finales, de tal forma que se termina estableciendo para ellos una demanda inducida, cuya satisfacción dependerá del nivel de integración productiva a lo largo de cada una de las cadenas de transformación, la capacidad instalada existente, la disponibilidad y precio tanto nacional como internacional de las materias primas, entre otros factores.

De entre los productos fundamentales de las cadenas C₁, C₂, C₃, C₄ y aromáticos, se ha querido abordar en este estudio la demanda de los productos finales derivados del benceno, del tolueno y de los xilenos pertenecientes a los aromáticos, así como la demanda de los polietilenos por el lado de las olefinas.

Como primera parte del estudio, se definirán mediante las estadísticas disponibles origen-destino cuáles son los productos de la demanda final que marcan la demanda inducida de los aromáticos, para así establecer el conjunto de productos finales de los cuales es necesario recuperar sus datos históricos, que será la materia correspondiente a la segunda parte del estudio, en donde se ampliará su alcance al incluir a las resinas de polietileno de alta y de baja densidad.

En la tercera parte, se presentarán los resultados del estudio estadístico mediante el cual se establecen los modelos de demanda del conjunto de productos obtenidos en la primera parte, relacionando en dichos modelos a la demanda con las variables macroeconómicas nacionales. Se extenderá el conjunto de modelos para incluir la demanda de los polietilenos.

En la cuarta parte, se presentará el pronóstico para un horizonte a 5 años de los modelos desarrollados en la tercera parte, para obtener así una proyección de la demanda de aquellos productos finales que controlan la demanda inducida de los aromáticos.

Como se mencionó anteriormente, la demanda de un producto final puede dirigir la demanda inducida de los aromáticos fundamentales, lo cual dependerá de diversos factores, encontrándose en los extremos primero un esquema de autosuficiencia, en el cual se posee suficiente capacidad instalada en todos los productos que forman las cadenas productivas y no se lleva a cabo importación alguna; el segundo, en el otro extremo, donde podemos encontrar que la capacidad instalada es insuficiente o a veces inexistente y que la demanda será satisfecha fundamentalmente por la vía de las importaciones en varios de los eslabones de la cadena. Entre ambos extremos se puede encontrar una gama infinita de posibilidades para la satisfacción de la demanda de los

productos finales, pero obviamente cada opción poseerá diferentes ventajas comparativas con respecto a las demás y habrá diferentes formas de medir las bondades que cada opción posee, la cuantificación de dichas ventajas y bondades es materia de el estudio que utilizará como insumo la información aquí generada.

4.1 Principales destinos finales de los aromáticos

4.1.1 Benceno

El destino inmediato de la producción nacional de benceno que se utiliza como insumo para la producción de petroquímicos intermedios queda comprendido fundamentalmente por siete productos, cuyos destinos finales se muestran en la Tabla 6. ap. I, [2].

Tabla 6. ap. I. Principales destinos inmediatos y finales del benceno

Destino inmediato	Destino final
Clorobencenos	Especialidades y plaguicidas
Ciclohexano	Fibras poliamídicas
Alquilbenceno lineal	Agentes tensoactivos
Etilbenceno	Elastómeros y resinas sintéticas
Nitrobenceno	Poliuretanos
Anhídrido maléico	Resinas fumáricas, fenólicas y poliésteres
Cumeno	Resinas epóxicas, fenólicas y poliésteres

Fuente: Anuario Petroquímico publicado por la SENER

Considerando el volumen de los destinos inmediatos del benceno, más del 90% del mismo se consume anualmente para la producción de etilbenceno, que a su vez es utilizado para la producción de estireno y cuyo destino final son los elastómeros y las resinas, como se muestra en la Tabla 7. ap. I.

Tabla 7. ap. I. Principales destinos finales del estireno

Destino final
Poliestirenos
Resinas ABS/SAN ⁸
Resinas poliésteres
SBR ⁹
Látex SBR

Fuente: Anuario Petroquímico publicado por la SENER

⁸ Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno / Estireno Acrilonitrilo

⁹ Hule Estireno-Butadieno

De los dos principales destinos finales del estireno, aproximadamente el 90% se consume para la producción de resinas sintéticas y alrededor del 10% para elastómeros.

En cuanto al volumen de estireno consumido para la producción de resinas sintéticas, alrededor del 90% del mismo se destina a los poliestirenos, en orden de importancia, el poliestireno cristal, el poliestireno expandible, el poliestireno de alto impacto y finalmente las dispersiones acuosas de estireno acrílicas o con butadieno.

Resulta claro que el consumo del benceno en la industria petroquímica nacional es impulsado principalmente por la producción de resinas sintéticas y dentro de ellas, las resinas de poliestireno abarcan en un muy alto porcentaje el liderazgo de su destino final. Por lo anterior, es de esperarse que en el futuro inmediato la demanda de benceno nacional tenga una alta correlación con la demanda de las resinas de poliestireno.

4.1.2 Tolueno

El destino inmediato de la producción nacional de tolueno que se utiliza como insumo para la producción de petroquímicos intermedios queda comprendido fundamentalmente por cinco usos, cuyos destinos finales se muestran en la Tabla 8. ap. I.

Tabla 8. ap. I. Principales destinos inmediatos y finales del tolueno

Destino inmediato	Destino final
Cloruro de benzal	Químicos aromáticos
Como solvente	Pinturas, adhesivos, farmoquímicos
Toluén diisocianato (TDI)	Resinas de poliuretano
Cloruro de bencilo	Químicos aromáticos, agentes tensoactivos
Ácido benzóico	Resinas alquidálicas, aditivos para alimentos, químicos aromáticos

Fuente: Anuario Petroquímico publicado por la SENER

Considerando el volumen de los destinos inmediatos del tolueno, encontramos que la mayor parte se destina a su utilización como disolvente en varias de las subramas de la petroquímica y para la producción de TDI.

En este punto cabe hacer mención de que para los fines del presente estudio es necesario tomar en cuenta los siguientes factores:

- ↪ El uso del tolueno como disolvente se encuentra disperso entre muchos productos y generalmente en cantidades reducidas.
- ↪ El destino final del TDI son las resinas de poliuretano.

- ↪ La cadena productiva de los poliuretanos en México posee un bajo grado de integración productiva, dando pie a que la demanda de dichas resinas pudiera hacer atractiva su integración productiva.
- ↪ Un aumento en la integración productiva de la cadena de los poliuretanos incrementaría la demanda de TDI.
- ↪ Si se incrementa la demanda de TDI, podría llegarse a integrar la cadena productiva hasta el tolueno.

Considerando las premisas anteriores y los objetivos del estudio que dará continuación al presente, entre otros el de promover la competitividad de las cadenas de los productos aromáticos, se considera adecuado para esos fines abordar la demanda de los poliuretanos como destino final del tolueno.

4.1.3 Xilenos

De los tres isómeros existentes, solo el orto y el para-xileno poseen demanda dentro de la industria petroquímica nacional y de entre ambos, el para-xileno tiene una importancia en volumen consumido que rebasa en más de diez veces la del orto-xileno, además de que dentro de sus destinos finales destaca principalmente la producción de plastificantes y en menor grado la de resinas. Por las razones anteriores y manteniendo en mente el objetivo de promover la competitividad de las cadenas de los aromáticos, éste apartado se enfocará a la información relativa al para-xileno.

El destino inmediato de la producción nacional de para-xileno que se utiliza como insumo para la producción de petroquímicos intermedios queda comprendido fundamentalmente para la producción de dimetil tereftalato (DMT) y ácido tereftálico (TPA), cuyos destinos finales se muestran en la Tabla 9. ap. I.

Tabla 9. ap. I. Principales destinos inmediatos y finales del para-xileno

Destino inmediato	Destino final
DMT	Fibras poliéster
TPA	Fibras poliéster y poli(tereftalato de etileno) grado botella

Fuente: Anuario Petroquímico publicado por la SENER

El volumen de para-xileno consumido para la producción de DMT y TPA en México se distribuye en alrededor de 20% para el DMT y 80% para el TPA, siendo la ruta tecnológica del TPA la más reciente y con amplia utilización a nivel mundial.

Para el caso del consumo del para-xileno en la industria petroquímica nacional se concluye que es impulsado por la producción de DMT y de TPA, demanda de los cuales, a su vez, es de esperarse que en el futuro inmediato tenga una alta correlación con la demanda de resinas de poli(tereftalato de etileno) grado botella y de fibras poliéster.

4.2 Producción, importación y exportación de los productos seleccionados

Desafortunadamente en el Anuario Petroquímico del 2006 publicado por la SENER (Secretaría de Energía) se reporta sólo el periodo del 2003 al 2005. No obstante, y debido a variación de cifras que presenta este anuario con el editado por PEMEX, la consulta de los valores históricos de al menos 10 años atrás del 2005 se podrá encontrar en la obra publicada por Escobar [6].

En la Tabla 10. ap. I se muestran las cifras históricas de mercado correspondientes a las resinas de poliestireno.

**Tabla 10. ap. I. Producción, importación y exportación del poliestireno
(Toneladas/año)**

Año	Producción	Importación	Exportación
2003	327,978	174,145	96,192
2004	362,555	220,572	95,875
2005	413,860	222,866	117,991

Fuente: Anuario Petroquímico publicado por la SENER

A pesar de que la producción de poliestireno presenta un crecimiento en su producción para los años de 2003 a 2005, sus importaciones en 2005 crecieron más del 50%, con respecto al valor reportado en 2003. En cuanto a las exportaciones, a pesar de que se han incrementado, su valor no puede compararse al de las importaciones ya que casi representan la mitad de éstas últimas.

Si quisiéramos hablar en términos del consumo aparente, de acuerdo a las cifras reportadas, este concepto iría en aumento ya que el valor de la producción y las importaciones son más grandes que la exportación.

Reportar el consumo aparente no representa una cifra confiable para asegurar que la producción de petroquímicos finales ha aumentado, ya que la mayor parte de su producción es casi la mitad de lo que se importa, por tal motivo, en este apéndice sólo mostraremos las cifras de producción, importación y exportación.

La balanza comercial también resulta ser negativa.

4.2.1 Resinas de Poliuretano

En la Tabla 11. ap. I se muestran las cifras históricas de mercado correspondientes a las resinas de poliuretano.

La producción de resinas de poliuretano presenta un aumento en los años de 2003 a 2005, no obstante las importaciones también han ido creciendo a la par de las exportaciones. No obstante a que el consumo aparente aumenta, la balanza comercial para este insumo es negativa.

Tabla 11. ap. I. Producción, importación y exportación del poliuretano (Toneladas/año)

Año	Producción	Importación	Exportación
2003	110,943	29,236	4,407
2004	116,941	44,399	17,012
2005	122,315	44,861	20,936

Fuente: Anuario Petroquímico publicado por la SENER

4.2.2 Fibras poliéster

En la Tabla 12. ap. I se muestran las cifras históricas de mercado correspondientes a las fibras poliéster

Tabla 12. ap. I. Producción, importación y exportación de fibras poliéster (Toneladas/año)

Año	Producción	Importación	Exportación
2003	65,698	49,378	18,225
2004	64,178	64,949	17,659
2005	67,058	65,625	21,733

Fuente: Anuario Petroquímico publicado por la SENER

Las fibras poliéster presentan la misma tendencia en el aumento de su producción, importación y exportación que el poliuretano; sin embargo se puede observar que el año 2005 el valor de las importaciones es prácticamente igual a su producción.

El consumo aparente aumenta, mientras que la balanza comercial disminuye.

4.2.3 Resinas de poli(tereftalato de etileno) (PET)

En la Tabla 13. ap. I se muestran las cifras históricas de mercado correspondientes a las resinas de poli(tereftalato de etileno) grado botella (PET).

En el caso del poli(tereftalato de etileno) se presenta un aumento en su producción y en su exportación, no así en las importaciones. En este caso el consumo aparente disminuye del año 2003 al 2005 mientras que la balanza comercial es positiva y va en aumento en el mismo periodo de tiempo analizado.

**Tabla 13. ap. I. Producción, importación y exportación de resinas PET
 (Toneladas/año)**

Año	Producción	Importación(a)	Exportación(a)
2003	632,206	140,360	224,535
2004	776,260	71,320	366,030
2005	843,437	72,062	450,464

(a) PET grado botella

Fuente: Anuario Petroquímico publicado por la SENER

El uso de estas resinas para la producción de envases en industrias como la de los refrescos y aguas envasadas reemplazando al vidrio continúa teniendo gran potencial tanto en el mercado nacional como en el internacional.

4.2.4 Resinas de polietileno de alta densidad

En la Tabla 14. ap. I se muestran las cifras históricas de mercado correspondientes a las resinas de polietileno de alta densidad

**Tabla 14. ap. I. Producción, importación y exportación de polietileno de alta
 densidad
 (Toneladas/año)**

Año	Producción	Importación	Exportación
2003	158,488	521,665	19,274
2004	181,271	549,341	26,111
2005	169,012	555,055	32,134

Fuente: Anuario Petroquímico publicado por la SENER

Es de llamar la atención que las importaciones de polietileno de alta densidad son casi 3 veces mayor al de su producción. Este comportamiento se ve reflejado en su exportación, ya que a pesar de que presenta un aumento desde el 2003 al 2005 las cifras representan aproximadamente el 15% de la producción nacional.

El consumo aparente aumenta del año 2003 al 2004, lo cual se ve claramente en el aumento de producción junto al aumento de las importaciones; sin embargo, en el año 2005 la producción disminuye mientras que la importación sigue aumentando. En general, la balanza comercial para este producto es negativa.

Con la aparición de nuevas aplicaciones, así como nuevas tecnologías para el uso y producción de estas resinas, existe un gran potencial de mercado que requiere de un estudio y análisis de las posibilidades de satisfacer su demanda con producción nacional y al mismo tiempo revertir la balanza de divisas que presentan hasta la actualidad.

4.2.5 Resinas de polietileno de baja densidad

En la Tabla 15. ap. I se muestran las cifras históricas de mercado correspondientes a las resinas de polietileno de baja densidad (PEBD).

Tabla 15. ap. I. Producción, importación y exportación de polietileno de baja densidad (Toneladas/año)

Año	Producción	Importación	Exportación
2003	271,173	435,600	25,383
2004	251,103	459,632	14,037
2005	296,091	464,413	17,275

Fuente: Anuario Petroquímico publicado por la SENER

Al igual que con las resinas de PEAD la producción nacional de polietileno de baja densidad sufrió una disminución en el año 2004 con respecto al 2003, mientras que en 2005 presenta un aumento, también es de llamar la atención que las importaciones de este producto son aproximadamente 1.6 veces mayor a su producción, con una tendencia de aumento en el periodo de tiempo analizado. Debido a la contribución de las importaciones, el consumo aparente aumenta desde el 2003 al 2005, mientras que la balanza comercial es negativa y va disminuyendo en el mismo periodo de tiempo.

Con la aparición de nuevas aplicaciones, así como nuevas tecnologías para el uso y producción de estas resinas, existe un gran potencial de mercado que requiere de un estudio y análisis de las posibilidades de satisfacer su demanda con producción nacional y al mismo tiempo revertir la balanza de divisas que presentan hasta la actualidad.

4.3 Algunas propiedades y aplicaciones de los productos seleccionados

Después de desarrollar el modelo econométrico para predecir la demanda de los productos petroquímicos mencionados, es necesario saber la importancia de los petroquímicos finales elegidos para restituir el valor agregado de nuestra IPQ. Cada petroquímico evaluado en la metodología, ha cubierto necesidades específicas de sectores industriales de gran importancia como la electrónica, los textiles, alimentos y empaques, etc.; así mismo, el panorama de aplicabilidad es cada vez más amplio. En función de lo anterior, se presenta un resumen de las aplicaciones más importantes de algunos de estos materiales, desde el punto de vista comercial y tecnológico.

4.3.1 Polietilenos

Los polietilenos (PE) son termoplásticos que se encuentran englobados dentro del grupo de las poliolefinas, y se obtienen a partir de la reacción química de etileno (monómero), que se unen entre sí formando cadenas que tienen la estructura (CH₂) como unidad repetitiva. El mecanismo de reacción es por radicales libres. Su simplicidad estructural, así como la ausencia de impedimentos estéricos y la flexibilidad de las cadenas, permite la cristalización del material (entre un 20% y un 80%).

4.3.2 Polietileno de alta densidad

Producidos a bajas presiones con catalizadores de complejos metálicos. Estos productos constan principalmente de cadenas lineales, con algunas ramificaciones (vía co polimerización con alguna α -olefina) que ayudan al procesado del material, por lo que tienen mayor capacidad de cristalización (entre el 50% y el 80%). Su densidad se encuentra entre 0.950 y 0.965 g/cm³.

Las resinas de polietileno de alta densidad han llegado a ser uno de los termoplásticos de mayor importancia en los últimos tiempos. Productos elaborados por moldeo con aire, son los de mayor mercado para estas resinas, principalmente en botellas de productos de limpieza. El segundo más grande mercado lo ocupan los productos elaborados por extrusión. Todos estos productos son empleados en la manufactura de tuberías, especialmente para drenaje corrugado, alambres y cables, como películas para la fabricación de bolsas plásticas. Otros productos fabricados por moldeo de inyección, son utilizados para elaborar contenedores para comidas, cubetas plásticas, artículos domésticos, juguetes y gorras. Su densidad se encuentra alrededor de los 0.950 g/cm³, su índice de fusión es de 6.5 g/10 min., posee una excelente resistencia química, excelente comportamiento a bajas temperaturas, buena adhesión y una baja transmisión de gases.

La polimerización del etileno para obtener polietileno de alta densidad se realiza por sistemas catalíticos de dos principales tipos:

Una combinación de compuestos órgano metálicos y metales de transición tales como el catalizador Alquil haluro aluminio-titánico de Ziegler.

Un soporte de óxido metálico de transición, tales como el catalizador de óxido de molibdeno soportado en alúmina del Standard Oil Company de Indiana, y el catalizador de óxido de cromo soportado en sílica - alúmina de Phillips Petroleum Company.

4.3.3 Polietileno de baja densidad

Sintetizado a altas presiones, se lleva a cabo vía radicales libres sin ningún control sobre las imperfecciones generadas. El resultado es un polímero muy ramificado con cadenas de longitudes muy variables. Consecuencia de esto es su capacidad de cristalización, que se encuentra muy restringida dando porcentajes de cristalinidad entre el 30% y el 45%.

La densidad de este tipo de resinas oscila entre 0.910 y 0.925 g/cm³ y son líderes en volumen de ventas. Ellas se convierten en productos finales principalmente mediante procesos de extrusión y moldeo por inyección. La mayor utilización del polietileno de baja densidad es en el sector de envases y empaques, destacando su utilización en bolsas, envases industriales, laminaciones, película para forro, película encogible y estirable, tapas para botellas, coextrusiones y otros. En la industria eléctrico-electrónica se utiliza como aislante para cables y conductores, cables de alta frecuencia y material dieléctrico. En la construcción, se puede encontrar en tuberías 'conduit', en agricultura como película para invernaderos, tubería de riego y sistemas de irrigación. Su densidad varía en un rango entre 0.918 y 0.920 g/cm³, su índice de fusión es de 6.5 g/10 min.,

presenta una excelente resistencia química, excelente tenacidad a bajas temperaturas, muy buena adhesión y alta permeabilidad de gases.

4.3.4 Polietileno lineal de baja densidad

Este tipo de polietilenos representan un estado intermedio entre el de baja densidad y el de alta densidad, presentando pocas ramificaciones de longitud muy corta. Su síntesis se lleva a cabo copolimerizando una cantidad importante de α -olefina y utilizando un catalizador que controla el nivel de incorporación de ésta a la cadena polimérica principal. Este catalizador puede ser de tipo Ziegler-Natta (presenta múltiples puntos reactivos), Metalocénico (con un único punto reactivo), o a base de óxidos de cromo. Los porcentajes de cristalinidad alcanzados son próximos al 50% y su densidad se encuentra alrededor de los 0.915 y 0.930 g/cm³. En este tipo de polietileno es de gran importancia el tipo de catalizador utilizado, ya que éste determina la distribución de las ramificaciones cortas de cadena, e incide indirectamente en las propiedades mecánicas.

4.3.5 Polipropileno

El polipropileno se puede obtener a partir del monómero propileno, por polimerización Ziegler-Natta y por polimerización catalizada por metalocenos. El polipropileno que se utiliza es en su mayor parte isotáctico (todos los grupos metilos de la cadena están del mismo lado), aunque también suele utilizarse el polipropileno atáctico (grupos metilos están distribuidos al azar a ambos lados de la cadena). La polimerización del propileno puede hacerse por fase líquida (tecnología DART), por fase vapor (tecnología BASF), por "slurry", o en solución.

El polipropileno es un polímero versátil. Cumple una doble tarea, como plástico y como fibra. Como plástico se utiliza para fabricar piezas para el sector automotriz y del embalaje (permite fabricar envases para alimentos capaces de soportar temperatura, pues no funde por debajo de 160 °C). Como fibra se utiliza para hacer alfombras de interior y exterior, como por ejemplo alrededor de las piscinas y las canchas de mini-golf. A diferencia del nylon, no absorbe el agua.

Es el material plástico de mayor crecimiento. Su densidad es de aproximadamente 0.905 g/cm³, su índice de fusión es de 20 g/10 min., posee excelente resistencia química, excelente tenacidad a bajas temperaturas, suficiente adhesión y muy baja permeabilidad de gases.

4.3.6 Poliéstireno

El poliéstireno es considerado un polímero termoplástico y esta formado por la unión de unidades repetitivas que constan de un anillo bencénico y una estructura del tipo (CHCH₂)_n. La situación del anillo bencénico es lo suficientemente aleatoria como para inhibir la cristalización, por lo que aporta una rigidez que hace que la temperatura de transición vítrea alcance valores de 90 a 100°C, y por lo tanto, el material resultante es duro y transparente a temperatura ambiente.

El poliestireno tiene una densidad de 1.05 g/cm^3 y un alto peso molecular. Su estructura amorfa le confiere buenas propiedades ópticas, de las cuales destaca su transparencia y un excelente brillo. Su comportamiento mecánico es, en términos generales, de baja resistencia al impacto y gran rigidez, por lo que se destina a aplicaciones en las cuales no sea sometido a condiciones severas en cuanto a cargas estáticas ni dinámicas. Cabe destacar su buena propiedad como aislante eléctrico y su baja absorción de humedad, así como su bajo coste y la facilidad de moldeo.

En el mercado de consumo para este polímero, encontramos cubiertos y vasos desechables, juguetes, cuerpos de bolígrafos, reglas, escuadras, porta retratos, vasos y jarras en imitación de cristal cortado. Las aplicaciones más sobresalientes en envases y empaques derivan de lámina termoformada para envasar alimentos, así como frascos, botellas, estuches para discos compactos y audio casetes.

Generalmente se producen tres diferentes grados de poliestireno, que son: (1) El poliestireno para propósitos generales, el cual posee alto peso molecular, es vidrioso y forma cristales claros. El moldeo por inyección es el proceso más importante para el tratamiento de estas resinas, y sus aplicaciones más importantes son la fabricación de empaques, artículos domésticos, y una gran variedad de artículos comerciales. (2) Poliestirenos de alto impacto, los cuales constan de hule disperso (5% o menos de polibutadieno) en una matriz de poliestireno. Este compuesto se transforma principalmente a productos finales mediante el moldeo por inyección y extrusión, y es usado en productos para el hogar, juguetes y empaques contenedores. (3) Poliestireno expandible, que es usado para la producción de espumas.

4.3.7 Poliuretano

Polímero formado por la poliadición de isocianatos polifuncionales, caracterizado por la presencia del grupo -NCO- . Se considera como una mezcla éster-amida del ácido carbónico.

Aún cuando los poliuretanos son clasificados como polímeros condensados, las rutas de síntesis se pueden agrupar en dos tipos principales: reacciones de adición y de condensación. Entre las reacciones de adición, la más importante es la reacción de un disocianato con un diol para obtener poliuretano, seguida por la reacción del anillo abierto de los uretanos cíclicos (oxazolones). En cuanto a las rutas de condensación, se encuentran la reacción de biscloroformato con diamina, la de la diamina con éster biscarbámico (preparado a partir de fenol y biscloroformato), la reacción de bisuretano con diamina, entre otras.

Los poliuretanos son algunos de los polímeros más versátiles que existen actualmente. Existen en numerosas formas variando desde espumas rígidas ligeras hasta composiciones densas y sólidas y desde espumas suaves y flexibles hasta moldes elastoméricos de uso rudo. Su principal uso es en espuma rígida como aislante para la construcción y refrigeración industrial. También es usado en la producción de espuma de alta resistencia, semi-rígida y empaques de espuma y en otras aplicaciones diferentes a la espuma como alfombras, refuerzos, adhesivos, sustitutos de madera, componentes de revestimientos y moldes.

Los poliuretanos se caracterizan por su extrema dureza y resistencia a la abrasión. Pueden resistir el ataque de muchos químicos y disolventes, y pueden ser producidos en todas las formas comercialmente posibles. Algunos mercados importantes han rechazado a los poliuretanos por las deficiencias en algunas de sus propiedades, por ejemplo, muchas composiciones tienen una limitada estabilidad térmica, en especial bajo ambientes húmedos. Son susceptibles a la degradación térmica, esto es por lo cual la industria de llantas y neumáticos se abstiene de usarlos. En muchas otras aplicaciones también son evitados cuando, a pesar de sus ventajas, su precio no es comparable con el de los materiales competidores.

4.3.8 Poli(tereftalato de butileno) (PBT)

Generalmente el poli(tereftalato de butileno) se obtiene a partir del dimetil tereftalato y 1,4-butanodiol por el proceso de transesterificación continua, aunque también existen los procesos de transesterificación directa y batch.

Es un polímero termoplástico cristalino de alto peso molecular, ampliamente usado para la fabricación de partes automotrices, componentes eléctricos y electrónicos. Se caracteriza por su alta dureza a la tensión (79 MPa, aproximadamente), por ser altamente moldeable y por su baja absorción de agua. Su gravedad específica es de 1.38 y la temperatura de fusión oscila entre 238 y 271 °C.

Por ser un material que cristaliza rápidamente, sus ciclos de moldeo son cortos y se realizan a menor temperatura que la requerida para muchos otros plásticos de ingeniería.

4.3.9 Poli(tereftalato de etileno) (PET)

Las resinas de PET se obtienen principalmente de la reacción entre etilen glicol y dimetil tereftalato o, en su defecto, ácido tereftálico, por medio de una reacción de policondensación. Esta resina es esencialmente la misma que se emplea para la producción de fibra poliéster.

Es una resina de poliéster termoplástica que posee alta resistencia, excelentes propiedades eléctricas y muy buenas características de flujo al ser fundida, aunque presenta algunas limitaciones, como por ejemplo el inherente secado previo al proceso de moldeo. Sin embargo, cuando se refuerza con otros materiales, sus propiedades de dureza, rigidez y resistencia al calor se mejoran considerablemente.

Sus principales aplicaciones comprende la manufactura de películas fotográficas, películas magnéticas, de video, de rayos x, casetes de audio y discos para computadora. Sin embargo, también es utilizado en la industria de empaques, artículos eléctricos, etc. Su uso más comercial es la fabricación de envases y botellas en tamaños de 32 y 64 onzas.

4.3.10 Fibras poliéster

Este tipo de fibras se forma con cualquier tipo de polímero de cadena larga, compuesta de por lo menos 85% en peso de un éster, de un ácido carboxílico aromático sustituido, incluyendo, pero no de forma restrictiva, unidades tereftálicas sustituidas $p(-R-O-CO-C_6H_4-CO-O-)_x$ y unidades de hidroxibenzoato para-sustituidos $p(-R-O-CO-C_6H_4-O-)_x$.

La fibra poliéster se caracteriza por ser resistente a: la tensión, la mayoría de los productos químicos, las arrugas y la abrasión. También es de rápido secado, y no generan moho.

Las fibras poliéster se utilizan para la fabricación de telas, alfombras, cortinas, recubrimientos de paredes, tapicería, mangueras, cuerdas y redes, entre otros.

4.3.11 Resina de Acrilo-Nitrilo-Butadieno-Estireno (ABS)

Son polímeros, usualmente con un 50% de estireno y diferentes cantidades de otros compuestos, formando un sistema de dos fases. Se dispersa polibutadieno en un copolímero rígido de estireno-acrilonitrilo. Estas resinas se caracterizan porque poseen excelente resistencia mecánica y rigidez, excelente resistencia a la fatiga y estabilidad dimensional, alta resistencia al impacto, bajo coeficiente de fricción, excelente resistencia a la humedad y solventes, buenas características de aislamiento eléctrico, buena apariencia y lubricación.

Las materias primas para la obtención de las resinas ABS son el acrilonitrilo, el butadieno y el estireno, los cuales se hacen reaccionar por diferentes mecanismos como: emulsión-polimerización, por suspensión y por suspensión a granel.

Las resinas ABS tienen sus principales usos en los mercados; automotriz, de bienes de consumo final, componentes para maquinaria industrial, fabricación de tuberías, partes eléctricas y electrónicas, e instrumentos.

4.3.12 Resina de Estireno-Acrilonitrilo (SAN)

Son copolímeros claros y transparentes, que generalmente contienen entre un 24 – 26% de acrilonitrilo. Estos compuestos se pueden obtener a partir de acrilonitrilo y estireno mediante polimerización a granel, por polimerización en emulsión continua, o por polimerización batch.

Básicamente todos los SAN se procesan mediante el moldeo por inyección, para ser transformados en vasos, contenedores para licuadoras, platos y otros artículos domésticos. Estos copolímeros también son usados para fabricar paneles para ventanas, soportes para estructuras en vidrio, partes de automóviles, lentes e instrumentos médicos, entre otras aplicaciones.

4.3.13 Hule Estireno Butadieno (SBR)

Esta familia de compuestos incluye varios copolímeros de butadieno y estireno producidos por polimerización en emulsión, aunque también han sido producidos por polimerización en solución. Su principal empleo es en la fabricación de llantas, en donde cobra gran importancia, ya que posee características superiores a las del hule natural. Sin embargo, también es utilizado en la fabricación de accesorios para automóviles y en la elaboración del látex, entre otras aplicaciones.

Los principales métodos de manufactura de los SBR son:

- ↪ Polimerización en emulsión en frío: Este método consiste en hacer reaccionar butadieno, cloruro de sodio, estireno y ácido sulfúrico, logrando una conversión de butadieno del 60-65%. El butadieno en exceso es recuperado por vacío, mientras que el estireno se recupera por agotamiento con vapor.
- ↪ Polimerización en solución: Consiste en hacer reaccionar butadieno y estireno, utilizando hexano como solvente. La reacción produce conversión del 98% y tarda aproximadamente 4 horas.
- ↪ Polimerización en emulsión en caliente.

4.3.14 Anhídrido Ftálico

Casi la mitad de la producción total de anhídrido ftálico es utilizada en la manufactura de plastificantes, aunque otro de los mayores mercados de este producto lo ocupa la producción de poliésteres y resinas alquídicas. El anhídrido ftálico es producido comercialmente por oxidación de naftaleno o de o-xileno, utilizando un catalizador de pentóxido de titanio y vanadio.

5 Bibliografía

- [1] C. Escobar Toledo, "Industrial Petrochemical Production Planning and Expansion: A Multi-Objective Linear Programming Approach," in *Revista Sociedad de Estadística e Investigación Operativa, TOP*. vol. 9, 2001, pp. 77-89.
- [2] Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico. Dirección General de Información y Estudios Energéticos, *Anuario estadístico de la industria petroquímica*. D.F., México: Secretaría de Energía (SENER), 2006.
- [3] PEMEX, *Anuario Estadístico 2006*. D.F., México, 2006.
- [4] Secretaría de Energía. Dirección General de Planeación Estratégica, *Prospectiva del mercado de gas natural 2006-2015*. México, D.F: SENER, 2006.
- [5] INEGI, *SCNM, Cuentas de Bienes y Servicios* vol. Tomo 1 y 2. Aguascalientes, México, 2006.
- [6] C. Escobar Toledo, (Ed.), "Restitución del valor agregado y de la productividad de algunas cadenas improductivas de la industria petroquímica en México a través de la reestructuración, simulación y jerarquización tecnológica y de inversiones," Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, México, D.F.: DGAPA, Facultad de Química, UNAM, 2006.

Apéndice II.

**Estudio de Inteligencia Tecnológica
para procesos petroquímicos y
análisis de esquemas de refinación
con alto rendimiento en la producción
de petroquímicos primarios.**

1 Introducción

Este estudio propone que la producción de petroquímicos básicos (olefinas y aromáticos) se realice a partir de petróleo crudo utilizando un conjunto de procesos.

En nuestro país existen refinerías y complejos petroquímicos de forma independiente. Por lo tanto, la primera inquietud que se planteó fue cómo se podían conectar los procesos de las primeras con los procesos de los segundos.

El principal objetivo de las refinerías en México es producir combustibles, a través de petróleo crudo. Estas plantas de proceso se encuentran integradas por una serie de procesos, siendo los primeros la destilación atmosférica y al vacío, para realizar la primera separación del crudo. De éstos procesos se obtienen corrientes que, dependiendo de la calidad del crudo utilizado, necesitan pasar por tratamientos y transformaciones posteriores para lograr que los combustibles resultantes mejoren su calidad.

El proceso de reformación, tiene como función principal modificar la cadena de hidrocarburos obtenidos de la destilación, de forma tal que se pueden formar olefinas. La descomposición térmica o catalítica de los hidrocarburos de corte intermedio o pesado, producen corrientes ricas en aromáticos. Ambos procesos representan un potencial para generar o aumentar la producción de carga a las petroquímicas.

Una de las principales materias primas utilizadas en los procesos de petroquímica es el gas natural; no obstante, económicamente dentro de la política energética de nuestro país su utilización primordial es energética, principalmente para la generación de electricidad.

Esta política deja muy poco margen de maniobra para seguir basando la IPQ mexicana en el gas natural, quedando relegada en importancia su participación en la producción de olefinas, aromáticos y en su utilización para obtener gas de síntesis que permitiría una autosuficiencia estratégica en amoníaco y por lo tanto en fertilizantes [1].

La propuesta de procesar el crudo como alternativa no sólo para su exportación sino como insumo transformable a petroquímicos básicos podría representar el camino que permitiría la reactivación y fortalecimiento de nuestra industria petroquímica.

Por otro lado, a nivel internacional se han desarrollado tecnologías que maximizan la transformación del crudo, logrando aprovechar algunas de las corrientes intermedias del proceso de refinación como alimentaciones alternas para producir la materia prima necesaria para fabricar plásticos, fibras sintéticas, hules, cosméticos y un sin fin de productos terminados además de producir combustibles para sustentar la autosuficiencia energética.

Resulta entonces prioritario recordar que los productos terminados son resultado de una cadena de producción, que puede romperse o dejar de existir si alguna de sus materias primas o insumo intermedio faltase.

Tomando en cuenta que uno de los objetivos de este trabajo de tesis es la elaboración de productos petroquímicos utilizando como materia prima petróleo crudo, se puede definir a una refinería petroquímica como el conjunto de procesos necesarios para transformar el crudo en petroquímicos con un alto rendimiento, rentable, de alto valor agregado y de manera sustentable. No olvidamos de ninguna manera, que el crudo es utilizado en nuestras refinerías para la producción de combustibles, principalmente gas licuado y gasolinas pero también es exportado a precios actualmente muy altos, lo que lo hace muy rentable y conveniente para el país.

Es decir, si consideráramos la utilización de alguna de las refinerías existentes, se necesitaría reconfigurar los procesos posteriores a la destilación para maximizar la producción de olefinas y aromáticos; o en su defecto construir nuevas plantas dedicadas a cumplir con este objetivo, sin olvidar la posible integración de alguna de las tecnologías desarrolladas por compañías internacionales para producir olefinas y aromáticos.

Debido a que como alternativa se tiene la utilización y/o integración de los procesos licenciados por otras compañías; y de acuerdo a lo analizado en el capítulo 2, se presentará la tecnología de los procesos que actualmente se encuentran en operación, tanto en las refinerías como en los complejos petroquímicos en nuestro país, contra la que se ofrece en el mercado internacional sólo para evidenciar de forma comparativa el retraso tecnológico de nuestras instalaciones.

Este capítulo comienza con un estudio del desarrollo tecnológico que se ha generado a nivel internacional, sobre la producción de olefinas obtenidas de los procesos de reformación y a la de los aromáticos a partir de los procesos de descomposición de hidrocarburos, sin la utilización directa del gas natural como materia prima. Los resultados obtenidos de éste servirán para que de forma comparativa se ponga de manifiesto el retraso tecnológico que se tiene en nuestro país.

Al evaluar la posibilidad de implementar estas tecnologías, existe la posibilidad de aprovechar nuestros recursos naturales más eficientemente, generar valor agregado y fortalecer la integración industrial del país.

También, se reportan algunas características y el tipo de proceso desarrollados, incluyendo los llamados complejos petroquímicos.

Sin pretender ser exhaustivos en la descripción de los procesos de reformación y descomposición actualmente en operación en nuestras refinerías, se presenta una breve descripción de ellos, además de algunas consideraciones que se encontraron reportadas en la literatura para modificar las condiciones de operación de los procesos para producir una mayor cantidad de olefinas en la refinería.

Finalmente, se hace una recopilación de configuraciones propuestas en la bibliografía de las llamadas refinerías petroquímicas, junto con datos de inversión, capacidad, volúmenes de producción así como los datos utilizados para el cálculo del valor agregado del proceso. Esto con el fin, de desarrollar nuestro caso de estudio, Capítulo V.

2 Estudio de Inteligencia Tecnológica (IT) para los procesos de Reformación y Descomposición Catalítica

Este estudio se fundamenta sobre el concepto de Innovación Tecnológica, el cual se puede definir como un “cambio” en el método o insumo para producir un bien o servicio nuevo para la empresa que la desarrolla y llega al mercado, favoreciendo un entorno competitivo que asegure una mayor eficiencia en el uso de los recursos. Una parte de la IT, se enfoca en la estructuración de paquetes tecnológicos, conjugando las oportunidades científicas-tecnológicas con las necesidades, para introducir o modificar los procesos productivos.

Existen tres tipos de innovación: 1) Innovación incremental, que se refiere a la explotación de pequeñas mejoras en un proceso existente, con bajos riesgos de desarrollo y una recompensa modesta; 2) Innovación radical, que se refiere a un cambio con un objetivo específico para la industria, presentando altos riesgos y recompensas económicas elevadas; y 3) Innovación fundamental, que se refiere principalmente a la creación completa de una forma nueva de hacer las cosas, teniendo uso de los conocimientos desarrollados por la investigación básica.

De está forma, las actividades de Investigación, Desarrollo e Ingeniería (IDI) se realizan en las empresas involucradas de acuerdo a una estrategia tecnológica, que surge de una planeación tecnológica, gobernada por distintos factores¹. Las estrategias pueden ser identificadas como:

1. Estrategia Ofensiva: Seguida por las empresas que son o quieren ser líderes tecnológicos y de mercado, se basa en un fuerte enfoque hacia IDI interna, interrelaciones con universidades y centros de desarrollo tecnológico, buen flujo de información, capacidad económica sobresaliente y marketing, para capitalizar sus gastos de innovación.
2. Estrategia Defensiva: Es seguida por empresas, que aún manteniendo una actividad innovadora, ésta se mantiene a distancia respecto a los innovadores radicales, para minimizar riesgos y capitalizar su know-how propio con pequeñas innovaciones (incrementales).
3. Estrategia Imitativa: Seguida por empresas situadas a bastante distancia de los líderes, pero que para reducirla, aprovechan las ventajas específicas de algún factor de producción y la compra de la tecnología desarrollada (patentes, licencias, reingeniería, copia, etc.). Son empresas de un alto poder económico y de reciente ingreso en un mercado.
4. Estrategia Dependiente: Seguida principalmente por empresas que no intentan ni siquiera imitar una innovación; suele ser empresas que subcontratan su desarrollo y dependen de las especificaciones de los contratistas.
5. Estrategia Tradicional: Seguida por empresas que no aceptan la innovación y se mantienen en los mercados tradicionales, que no aceptan muy fácilmente los cambios de especificación.

¹ *Estos aspectos de Planeación tecnológica pueden ser revisados en obras específicas de Inteligencia Tecnológica, como [Bradford, 1998].*

6. Estrategia Oportunista: Seguida por empresas que adoptan estrategias distintas según las circunstancias; son empresas que buscan el desarrollo de “nichos de mercado”.

Por otro lado, las diversas fuentes de información disponibles para determinar el estado del arte tecnológico de un proceso son muy variadas, pero una de las más importantes, debido a sus características son las patentes².

Para este estudio, se aplicó el análisis de citas en las patentes, mediante el cual diversos investigadores [2] han demostrado que es una herramienta muy productiva para las actividades de licenciamiento tecnológico.

La búsqueda se realizó en el sitio web de la base de datos de Estados Unidos USPTO (por sus siglas en inglés).

La primera búsqueda que se realizó fue utilizando las palabras clave “petrochemical” and “refinery” de la cual se obtuvo 1392 patentes.

Sin embargo, como forma implícita para el desarrollo de este trabajo, es necesario acotar más la búsqueda considerando sólo aquellos desarrollos tecnológicos encaminados a producir olefinas y/o aromáticos. Aunado a las nuevas propuestas de proceso de los nuevos catalizadores que mejoren la operación de la planta FCC.

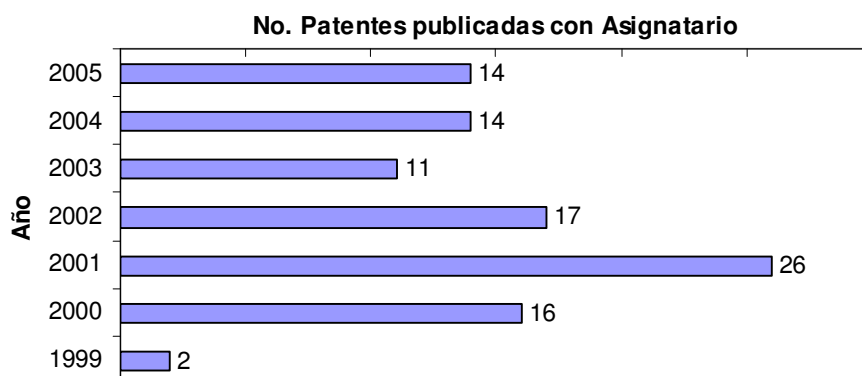
Por tal motivo, se realizaron tres búsquedas adicionales utilizando las siguientes palabras clave:

- | | |
|---|--------------|
| a) “olefins production” and “petroleum” | 94 patentes |
| b) “olefins production” and “FCC” | 41 patentes |
| c) “aromatics production” and “petroleum” | 162 patentes |

Como se encontraron algunas patentes que se repetían en cada una de las búsquedas realizadas, se procedió a depurar la base de datos para que los tres grupos de búsqueda quedaran unidos.

Es de especial atención que la búsqueda se realizó a partir del año de 1976 a la fecha; sin embargo, como se puede observar en la Gráfica 1. ap. II, el otorgamiento de la patente a una entidad empresarial (asignatario) se presenta a partir de 1999.

² Una patente es un contrato entre un inventor y un gobierno. El inventor divulga el contenido de una invención para favorecer el progreso tecnológico, mientras que el estado le confiere un monopolio temporal de explotación de su invención temporal, cumpliendo dos fines en sí, por un lado la retribución hacia el inventor por su trabajo desarrollado, y por el otro, fomentar el desarrollo tecnológico a través de la divulgación.



Gráfica 1. ap. II. Análisis de patentes encontradas en la producción de olefinas y aromáticos. Análisis por año.

Se registraron 302 patentes, de las cuales 204 no presentan Asignatario (dueño comercial), por lo que sólo 98 patentes conformaron la base de datos que a continuación se analiza.

Tabla 1. ap. II. Cantidad de patentes otorgadas por Compañía (Asignatario comercial)

No.	Compañía	No. Patentes registradas disponibles
1	ABB Lummus Global Inc.	3
2	Bechtel BWXT Idaho, LLC	1
3	BP Corporation North America Inc.	3
4	Casale Chemicals SA	1
5	Chart Industries, Inc.	1
6	Chevron Phillips ³	11
7	China Petro-Chemical Corp.	3
8	ConocoPhillips Company	2
9	Consejo Superior de Investigaciones Científicas.	1
10	Ellycrack AS	1
11	Equistar Chemicals, LP	3
12	ExxonMobil ⁴	24

³ Los nombres comerciales de Chevron Chemical Co. LLC, Chevron Chemical Company, Chevron Corporation, Chevron Phillips Chemical Company LP, Chevron U.S.A. Inc. y Phillips Petroleum Company, se agrupan con el nombre de Chevron Phillips para este estudio.

⁴ Los nombres comerciales de Exxon Chemical Patents Inc, Exxon Mobil Chemical Patents Inc., Exxon Research and Engineering Co., ExxonMobil Chemical Patents Inc., ExxonMobil Oil Corporation, ExxonMobile Chemical Patents, Inc. y Mobil Oil Corporation, se agrupan con el nombre de ExxonMobil.

No.	Compañía	No. Patentes registradas disponibles
13	Fina Research S.A.	4
14	Institut Francais du Petrole	2
15	Japan Energy Corporation	2
16	Membrane Technology and Research, Inc.	1
17	Nanomaterials Research Corporation	2
18	NanoProducts Corporation	1
19	UOP LLC	32
	TOTAL	98

De la Tabla 1. ap. II, se observa que el grupo Exxon-Mobil se le han otorgado el 24% de patentes y a la compañía UOP el 33%; por lo que se podría decir que tienen una participación importante dentro de este campo de investigación.

No obstante, este análisis se puede facilitar con el uso de una representación gráfica (Mapa tecnológico), desarrollada en los últimos años, para identificar la estrategia y posición tecnológica seguida por los involucrados en cierto campo tecnológico.

Un Mapa Tecnológico (MT) se puede definir [3] como: “Una visión extendida al futuro de un campo de investigación elegido, compuesta del conocimiento colectivo e imaginación de los principales controladores de la tecnología o impulsores del cambio en este campo”.

Existen muchos tipos de MT, y en este caso se utilizó la representación basada en las citas de patentes. Las citas se dividen en dos tipos principales: las autocitas y las citas recibidas por otros. Una vez que se han determinado el número de citas se pueden crear índices para determinar el grado de autocopia y el grado de copia por otros de los desarrollos tecnológicos y graficarlos para ubicar un conjunto de empresas de acuerdo a su estrategia, como pionero, protector, maestro e imitador.

De acuerdo a la Figura 1. ap. II, la representación se divide en diversas áreas de acuerdo a la distribución de autocitas y las citas recibidas por otros, utilizando el valor de la mediana para determinar los ejes de separación [4].

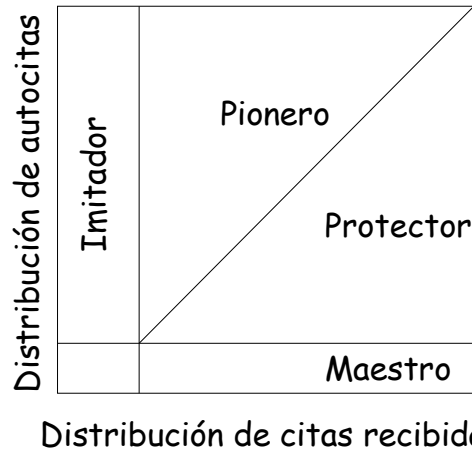


Figura 1. ap. II. Esquema de clasificación de los diferentes tecnólogos con base al número de citas propias y externas.

Fuente: [Mogee, 2001]

Lo anterior serviría para determinar quiénes son los líderes tecnológicos y que tipo de estrategia han utilizado, pero para determinar propiamente cual ha sido su principal área de trabajo, su principal fortaleza se puede incluir en forma de una burbuja correspondiente al tamaño de su parte proporcional de patentes que se le han otorgado, como se representa en la Figura 2. ap. II.

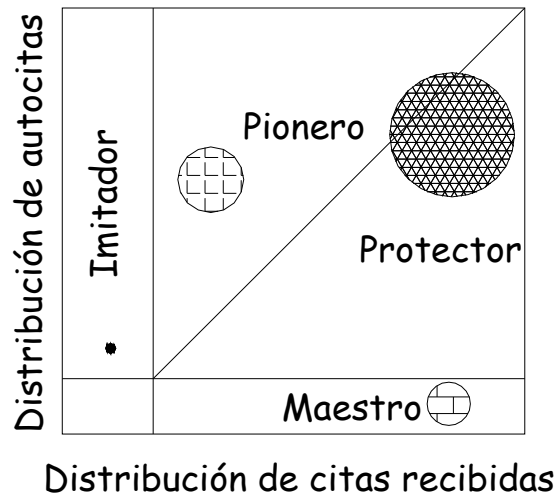
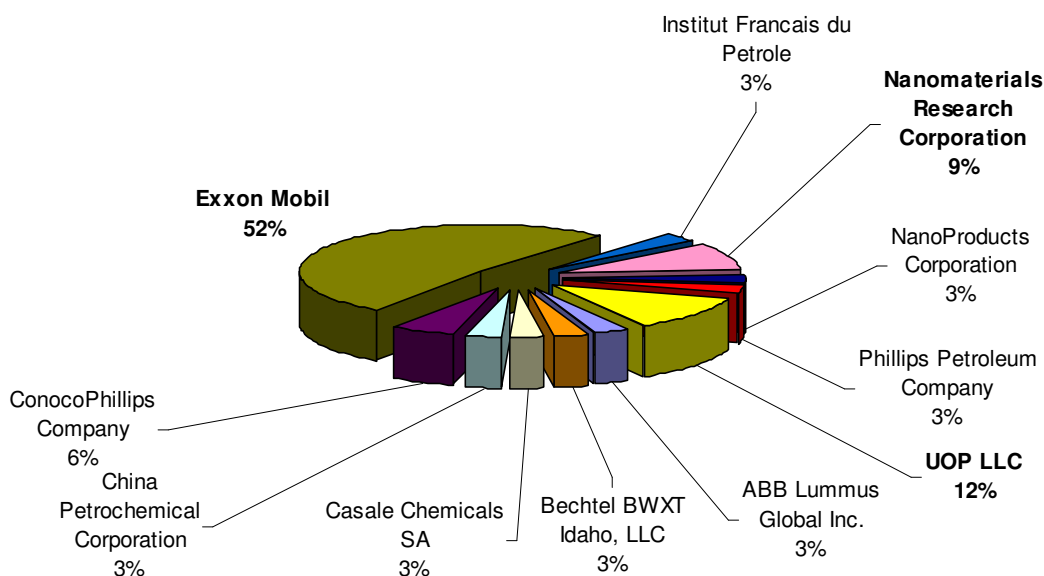


Figura 2. ap. II. Esquema de Mapa Tecnológico para determinar la estrategia seguida por los involucrados en un campo específico en base a las citas en patentes y su participación del portafolio global de patentes.

Para realizar este seguimiento y subdividir aún más el análisis, se decidió separar las áreas tecnológicas por “producción de olefinas” y “producción de aromáticos”.

2.1 Análisis de Patentes en la Producción de Olefinas

El grupo de tecnologías en la producción de olefinas está formado por 104 patentes, durante el periodo de 2000 a 2005, de las cuales sólo 33 de ellas se encuentran otorgadas a compañías para su explotación industrial. Tomando como base la actividad industrial, la Gráfica 2. ap. II esquematiza el porcentaje de las patentes asignadas. Se puede observar que las participaciones sobresalientes las presentan el grupo Exxon Mobil con un 52% de patentes otorgadas, seguido de la compañía UOP con un 12%.



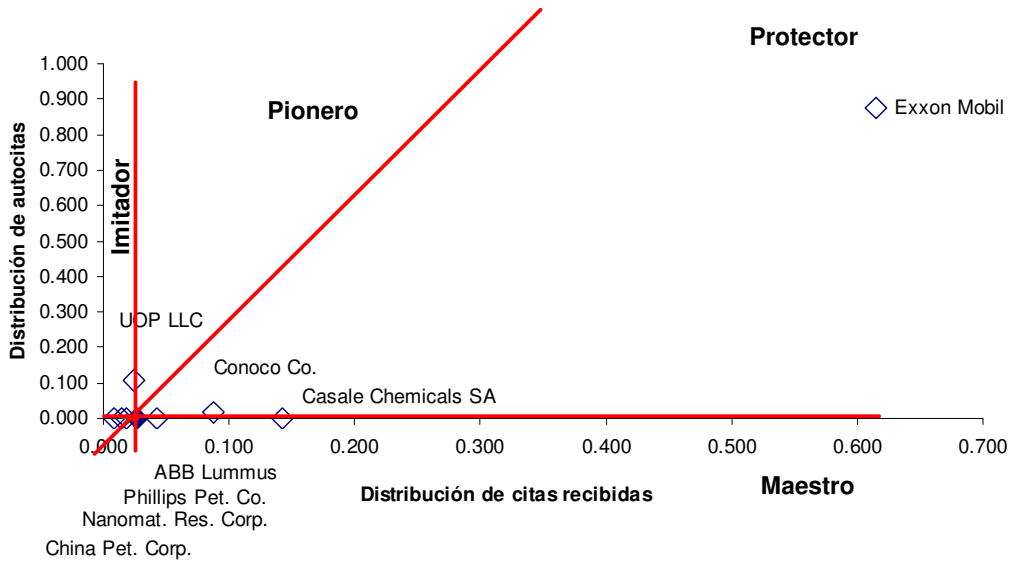
Gráfica 2. ap. II. Porcentaje de patentes otorgadas en la producción de olefinas.
Fuente: Elaboración propia con datos de la USPTO

Analizando la Gráfica 3. ap. II, se encuentra que el grupo Exxon Mobil cuenta con el mayor valor de citas tanto recibidas (cuando es citado en otros desarrollos) como de autocitas, por lo que se caracteriza como un protector de su tecnología; es decir, él mismo sigue trabajando sobre su desarrollo así como otros toman como base su creación.

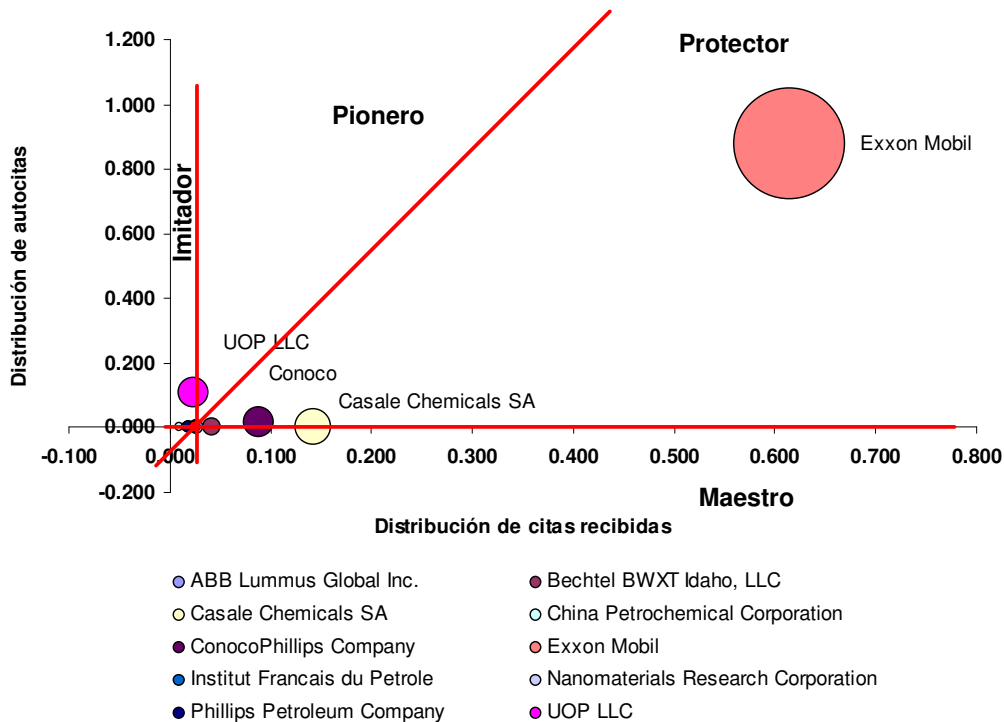
Con este mismo criterio, la compañía UOP se posiciona entre pionero e imitador (seguidor de desarrollos que no son propios). Es decir, ha creado algunas tecnologías innovadoras pero a su vez, parte de su trabajo se ha enfocado a desarrollar sobre otras invenciones.

Las compañías ABB Lummus, Conoco y Casale resultan ser maestros de las tecnologías que producen olefinas; es decir crean una tecnología única pero ya no han seguido trabajando sobre ella, tienen valores de citas recibidas y autocitas bajos.

Las compañías que se posicionan en el segundo cuadrante de los ejes trazados sobre la mediana de las distribuciones se clasifican como imitadores de la tecnología desarrollada para este tipo de procesos.



Gráfica 3. ap. II. Posición Tecnológica en la Producción de Olefinas. Fuente: Elaboración propia con datos de la USPTO



Gráfica 4. ap. II. Análisis de la participación de las diferentes compañías en el desarrollo de tecnologías para producir olefinas. Fuente: Elaboración propia con datos de la USPTO

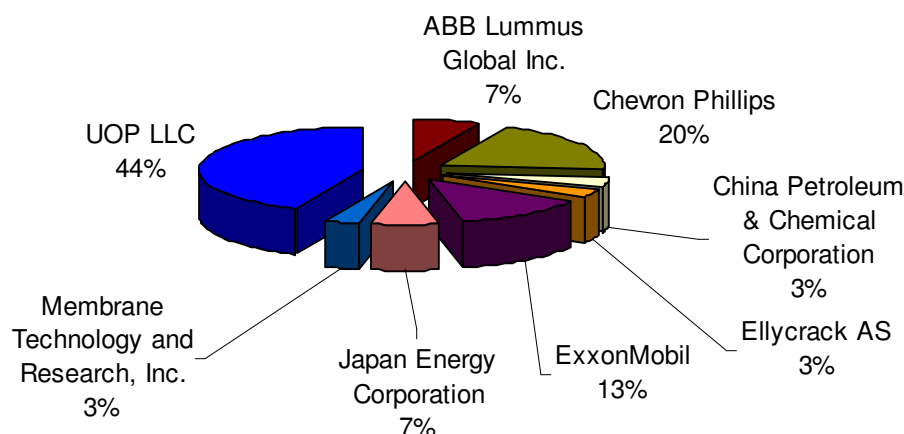
Utilizando un gráfico de burbujas para referir la dimensión de participación del portafolio integral de patentes en función del tamaño de éstas, se puede determinar el grado de interés por área específica dentro del sistema global. De esta forma se construyó el mapa de posición tecnológica para la producción de olefinas y aromáticos.

La Gráfica 4. ap. II, pone de manifiesto que el Grupo Exxon-Mobil participa activamente en el desarrollo de este tipo de tecnología, siendo acorde a los resultados mostrados en la Gráfica 2. ap. II.

2.2 Análisis de Patentes en la Producción de Aromáticos

En cuanto a la producción de tecnología para producir aromáticos, se encontraron registros a partir de 1999. Realizando la búsqueda por palabras clave, como se explicó en párrafos anteriores, se encontraron 160 patentes, sólo 30 de ellas se han asignado a compañías para su explotación industrial.

La Gráfica 5. ap. II muestra el porcentaje de asignación de patentes para la producción de aromáticos entre las diferentes compañías. Se muestra que UOP es la compañía que mayor número de patentes licenciadas en cuanto a este proceso se refiere, lo que le otorga fuerza y liderazgo dentro del ramo industrial. Posteriormente, el grupo Chevron Phillips se encuentra en segundo lugar, con un 20% de patentes licenciadas.

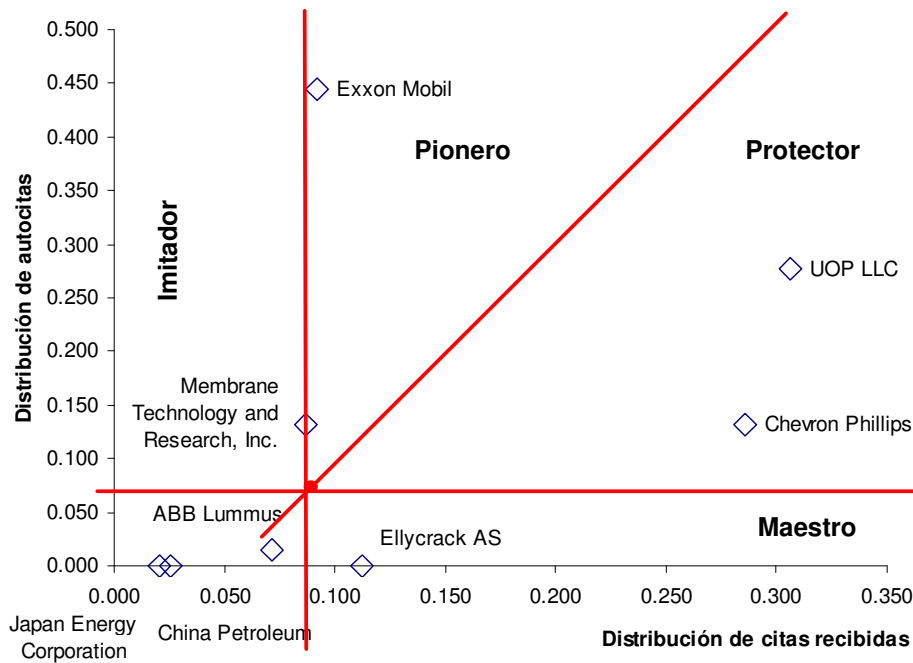


Gráfica 5. ap. II. Porcentaje de patentes otorgadas en la producción de aromáticos.
Fuente: Elaboración propia con datos de la USPTO

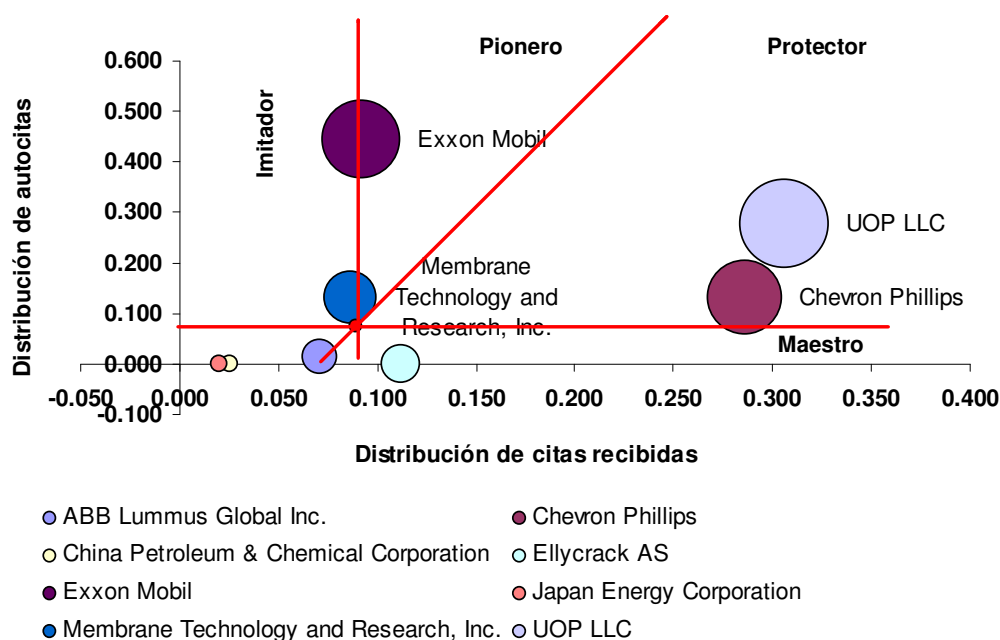
En la Gráfica 6. ap. II de acuerdo a la distribución de citas recibidas y autocitas, como se realizó en el caso de las olefinas, se encontró que los grupos protectores del desarrollo de la tecnología para producir aromáticos concuerdan con las compañías que cuentan con el mayor número de patentes otorgadas; es decir, la compañía UOP y el grupo Chevron Phillips, participan activamente en este campo. También se observó que el grupo Exxon Mobil, a diferencia de su participación en la producción de olefinas, en el área de producción de aromáticos se encuentra como parte imitador y pionero al igual que la compañía Membrane Technology and Research, Inc. Sin embargo, el tamaño de la

burbuja que representa al grupo Exxon Mobil es mayor al de la compañía Membrane Technology and Research, Inc; esto indica que la primera tiene mayor participación en seguir los desarrollos tecnológicos en la elaboración de aromáticos.

La participación de las demás compañías es escasa tanto en el otorgamiento industrial y de acuerdo a las gráficas de las Gráficas 7 y 8 ap. II sólo son imitadores de la tecnología.



Gráfica 6. ap. II. Posición tecnológica en la Producción de Aromáticos. Fuente: Elaboración propia con datos de la USPTO



Gráfica 7. ap. II. Análisis de la participación de las diferentes compañías en el desarrollo de tecnologías para producir aromáticos. Fuente: Elaboración propia con datos de la USPTO

3 Desarrollos tecnológicos comercializados para la producción de olefinas y aromáticos

De acuerdo a los resultados de las dos secciones anteriores se presentarán, de forma informativa, los procesos que han desarrollado UOP y Exxon para la producción tanto de olefinas como de aromáticos. Si el lector se encuentra interesado en profundizar en las condiciones de proceso puede consultar las referencias bibliográficas [5], www.uop.com, www.exxonmobil.com, en dónde se encuentra la descripción detallada de cada uno de ellos.

Durante la búsqueda de las tecnologías, se encontró que la compañía UOP ofrece al mercado, alternativas del proceso de descomposición de hidrocarburos utilizando un catalizador (cracking catalítico) y debido a que la producción de olefinas depende directamente de la corriente de salida de la unidad FCC, se consideró conveniente mostrar estas alternativas del proceso.

Las Tablas 2 y 3. ap. II tienen por objeto mostrar el nombre del proceso de FCC y de producción de olefinas patentados por UOP, así como una descripción muy breve. Cabe aclarar que la terminología utilizada es la que se reporta en la fuente consultada, y básicamente se refiere a las modificaciones mecánicas del diseño; es decir, que al reactor en donde se lleva a cabo la reacción de rompimiento de las moléculas de hidrocarburos se le adicionan partes mecánicas que facilitan la operación de los equipos.

Tabla 2. ap. II. Procesos de descomposición catalítica licenciados por UOP.

Fuente: [Meyers, 1997]

Proceso	Descripción
Fluid Catalytic Cracking (FCC)	Esta tecnología cuenta con distribuidores de alimentación Optimix, un dispositivo elevador de terminación Vortex Separation System (VSS) y un regenerador tipo “combustor”. A esta tecnología se le pueden adicionar enfriadores de catalizador, diseño RxCat y un reciclo selectivo. Ambos incrementan la flexibilidad de la alimentación y la demanda de producto.
Resid FCC (RFCC)	Utiliza una tecnología similar al FCC. Esta diseñada para procesar una alimentación cuyo contenido sea mayor de 4% en peso de carbón Conradson. Esta tecnología cuenta con un regenerador de dos etapas. El enfriamiento del catalizador es utilizado para controlar la producción de coque y el calor liberado.
PetroFCC	Mecánicamente similar a la FCC. Esta diseñada específicamente para producir olefinas ligeras y aromáticos. Dependiendo de las características de la carga, se puede producir propileno hasta en un 20 y 25% en peso.
MSCC	Tecnología diseñada por Barco y licenciada exclusivamente por UOP. El reactor se caracteriza por un tiempo de contacto corto dentro de una zona de contacto diseñada especialmente (sin la utilización de elevadores de reactor). Cuenta con la flexibilidad de procesar todo tipo de carga, especialmente los residuos

Tabla 3. ap. II. Tecnologías desarrolladas por UOP para la fabricación de olefinas.

Fuente: www.uop.com

Nombre comercial del proceso	Características
MaxEne	Incrementa 30% la producción de etileno de la unidad de descomposición de naftas incrementado la concentración de parafinas normales en la corriente de naftas reformadas.
KLP	Tecnología de hidrogenación selectiva para uso en la purificación de butadieno.
UOP / HYDRO MTO	Convierte metanol a olefinas, etileno primario y propileno.
UOP / BASF Butadieno	Alta recuperación de butadieno grado polímero.
Oleflex	Tecnología de dehidrogenación catalítica para la producción de olefinas ligeras a partir de sus parafinas correspondiente; por ejemplo, propileno a partir de propano.

Nombre comercial del proceso	Características
Condensación Catalítica	Produce olefinas con mayor número de átomos de carbono a partir del propileno y butileno.
Alfa – Olefinas Lineales (Linear-1)	Proceso de oligomerización de etileno para obtener copolímero y poli alfa olefinas así como para obtener olefinas alfa lineales para detergentes y plastificantes.

UOP también ha diseñado los procesos Huels SHP-CB, para producir 1-buteno y 2-buteno; Separación de 1-buteno Huels y el KLP para la producción de butadieno.

En cuanto a la producción de aromáticos por UOP se tienen los siguientes procesos resumidos en la Tabla 4. ap. II.

Tabla 4. ap. II. Tecnologías desarrolladas por UOP para producir aromáticos.

Fuente: www.uop.com

Nombre comercial del proceso	Características
Sorbex	Realiza separaciones simulando el flujo a contracorriente de una alimentación líquida sobre una cama sólida de adsorbente. En cada proceso de separación se utiliza una combinación específica de absorbente-desorbente.
Sulfolane	Combina la extracción líquido-líquido con destilación extractiva para recobrar aromáticos de alta pureza a partir de mezclas de hidrocarburos (HC), tales como naftas de petróleo reformadas (reformado), gasolina de pirólisis (pygas), ó gasóleo ligero del horno de coque.
Isomar	Maximiza la recuperación de un isómero de xileno particular (la mayoría de las veces para <i>o</i> -xileno, pero también <i>o</i> -xileno o <i>m</i> -xileno) a partir de una mezcla de xilenos ⁵ .
Carom	Recupera aromáticos BTX grado petroquímico de una amplia variedad de alimentaciones utilizando una combinación de la extracción líquido-líquido y una destilación extractiva.
Platforming	Produce aromáticos a partir de naftenos y parafinas, tanto para uso en combustibles automotrices (debido a su requerimiento de alto octanaje) como una fuente de compuestos aromáticos específicos.
Cyclar	Convierte gas de petróleo licuado (LPG) directamente en un producto aromático líquido en una sola operación.
Parex	Método de separación por adsorción para la recuperación de <i>para</i> -xileno a partir de una mezcla de xilenos.
Tatoray	Convierte selectivamente aromáticos de C ₉ a benceno y xilenos.
Q-Max	Produce cumeno de alta calidad (isopropil benceno) para la alquilación de benceno con propileno utilizando un catalizador de zeolita regenerable completamente.
EB Fase Líquida Lumus/UOP	Alquilados de benceno con etileno a partir de etil-benceno (EB).

⁵ El término de mezcla de xilenos es utilizado para describir una mezcla de isómeros aromáticos que contienen una proporción equilibrada de *p*,*o*,*m*-xileno y etilbenceno (EB).

Nombre comercial del proceso	Características
Estireno SM clásico Lumus/UOP	Dehidrogena etil-benceno (EB) a partir de estireno.
MX Sorbex	Recupera meta-xileno a partir de una alimentación de mezcla de xilenos.
TAC9	Convierte selectivamente aromáticos de C ₉ -C ₁₀ en mezcla de xilenos.
Remoción de Contaminantes JGC/UOP	Remueve mercurio y arsénico de una variedad de alimentaciones de petróleo.
Fenol Sun/UOP	Produce fenol y acetona a partir de cumeno vía peroxidación de cumeno.
PX-Plus	Desproporciona selectivamente tolueno a benceno y xilenos.
Cristalización de para-Xileno Badger/Niro	Recupera para-xileno de alta pureza de corrientes de aromáticos.
Polimerización en estado sólido (SSP por sus siglas en inglés UOP Sinco	Convierte el etileno a resinas de botella convencional y fibra de alta tenacidad.

La Tabla 5. ap. II muestra las tecnologías licenciadas por Exxon-Mobil para la producción de aromáticos. Introduce a la producción de olefinas los procesos de transalquilación⁶ y desproporciónación del tolueno para la producción de xilenos utilizando catalizadores de zeolita.

⁶ Las reacciones de transalquilación y la de desproporciónación utilizadas para producir xilenos a partir de tolueno, se presentan a continuación:

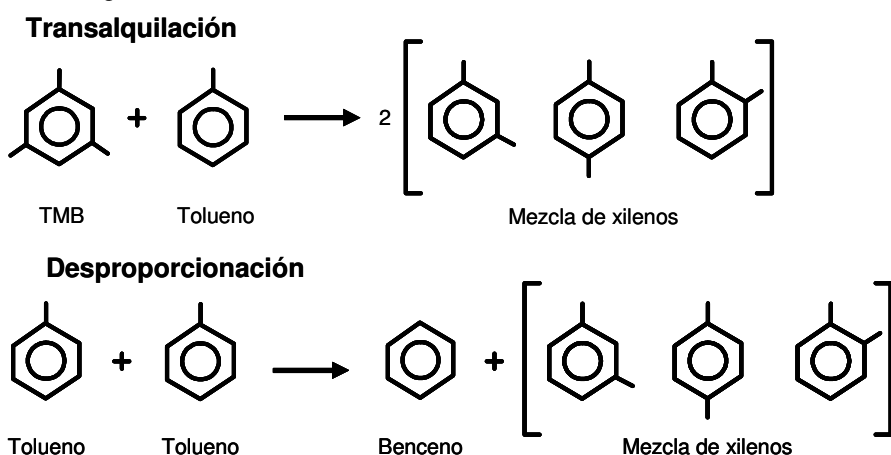


Tabla 5. ap. II. Tecnologías para producir aromáticos licenciadas por Exxon-Mobil.

Fuente: www.exxonmobil.com

Proceso	Aplicación
EBMax (Etil-Benceno)	Alquilación de etileno con benceno para producir etil-benceno (EB).
TransPlus (Transalquilación de aromáticos pesados)	Este proceso puede co-procesar efectivamente un alto nivel de aromáticos C ₉ ⁺ con tolueno o benceno. Permite optimizar la composición de aromáticos C ₉ ⁺ en las corrientes, permitiendo la producción incremental de mezcla de xilenos mientras se reduce el contenido de aromáticos en gasolina para llegar a los requerimientos o especificaciones de la destilación.
PxMax SM (Desproporción Selectiva de Tolueno, STDP por sus siglas en inglés)	Produce una mezcla de xileno con un alto contenido de para-xileno con un co-producto de benceno.
MTDP-3 (Desproporción de Tolueno)	Un catalizador ZSM-5 es el corazón de este proceso. Fue diseñado para procesar tolueno y cantidades limitadas de aromáticos C ₉ . También permite la producción de más benceno y de xilenos mezclados de alto valor.
XyMaxSM (Isomerización de xileno) Procesos MHA17 Avanzado y XyMaxsm ExxonMobil	Ambos procesos realizan isomerización de xilenos altamente selectiva. Para producir para-xileno y orto-xileno a partir de alimentaciones ricas en aromáticos C ₈ .
ExxonMobil Chemical Cía. y Kellogg Brown & Root (KBR)	Tecnologías utilizadas para producir etileno.

4 Complejos aromáticos

Un complejo de aromáticos es una combinación de unidades de proceso que pueden ser utilizadas para convertir nafta de petróleo y gasolina de pirólisis (pygas) en petroquímicos intermedios básicos: benceno, tolueno y xilenos.

Este tipo de complejos pueden tener diferentes configuraciones. El complejo más simple (Figura 3. ap. II) sólo produce benceno, tolueno y mezcla de xilenos, y consiste de las siguientes unidades de proceso principales:

- ↪ Hidrotratamiento de naftas, para la remoción de azufre y contaminantes de nitrógeno.
- ↪ Reformación catalítica, para la producción de aromáticos a partir de nafta.
- ↪ Extracción de aromáticos, para la extracción de benceno, tolueno y xilenos (BTX).

⁷ El proceso de isomerización de alta actividad Mobil (MHA1, por sus siglas en inglés) utiliza un catalizador de zeolita activamente alto. Presenta una conversión de 60 a 75% de etilbenceno. Se recomienda utilizar en corrientes con un alto contenido de paraxileno. Por otro lado, el catalizador del proceso XyMax fue específicamente formulado para alimentaciones con bajo contenido de para-xileno.

En esta configuración la nafta es alimentada al reformador, dentro del cual contiene un catalizador de platino en presencia de una atmósfera de gas (generalmente hidrógeno para suprimir la formación de coque). El producto reformado es entonces enviado a un procesamiento posterior para su separación; que puede ser por extracción a través de solventes, por destilación ó hidrodealquilación del tolueno. En este caso se utiliza una columna de destilación, donde primero se separa el benceno, después el tolueno y por último los xilenos.

La mayoría de los complejos aromáticos están diseñados para maximizar la producción de benceno y para-xileno y algunas veces orto-xileno.

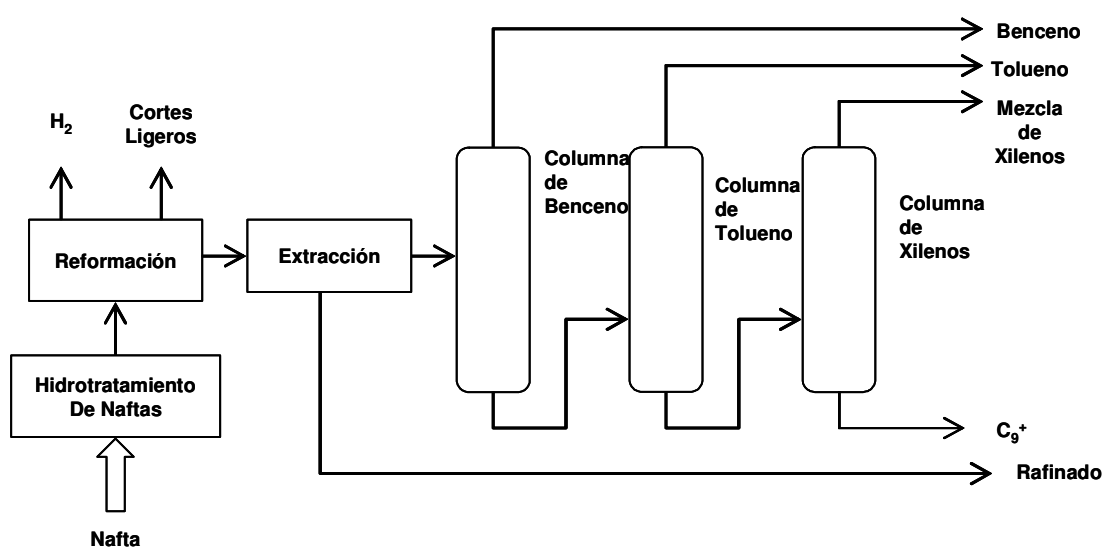


Figura 3. ap. II. Complejo de aromáticos simple

Fuente: [Meyers, 1997]

Otro tipo de configuración es como la que esquematiza la Figura 4. ap. II, la cual fue diseñada para recuperar una pequeña cantidad de tolueno, utilizado como disolventes y derivados. La mayoría de tolueno es utilizado para la producción de xilenos a través de la desproporción y transalquilación de tolueno con aromáticos C_9 .

Los xilenos mezclados contienen compuestos de etilbenceno y pueden ser enviados a diferentes unidades de proceso, dependiendo de los productos deseados. Los fondos de la columna de xilenos contienen C_9 o aromáticos mayores y pueden ser mezclados en los destilados o vendidos posteriormente.

Procesos adicionales pueden optimizar la producción de benceno ó para-xileno; y pueden ser resultado de la combinación de unidades especiales para producir para-xileno de alta pureza con las unidades de dealquilación de tolueno, las cuales producen benceno a

partir del tolueno. Los cortes de tolueno y mezcla de xilenos del reformado de naftas son generalmente carga de alimentación a estas unidades.

Como se presentó en la sección anterior, a la fecha existe una variedad de tecnologías disponibles para la producción de p-xileno de alta pureza a partir de las corrientes de isómeros C₈. Algunas están basadas sobre la adsorción a contracorriente simulada, ó una combinación de ésta con destilación (divisor de xilenos). La corriente de alimentación de C₈ puede contener hasta el 40% de etilbenceno, el cual es convertido a xilenos o benceno durante el proceso.

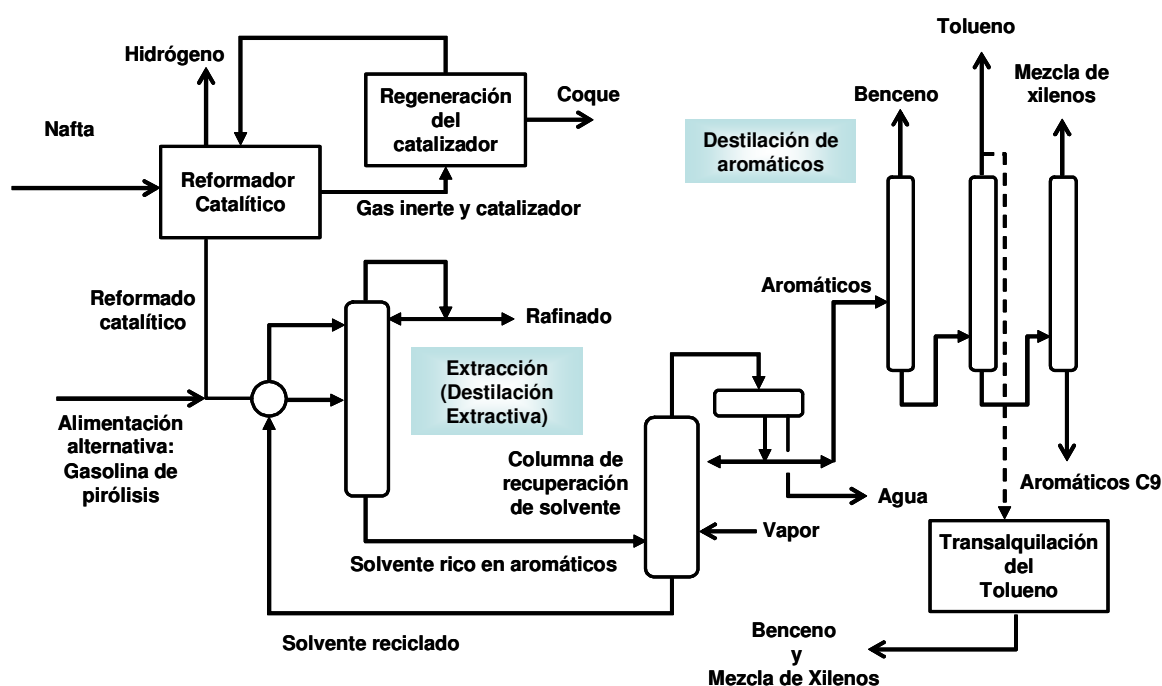


Figura 4. ap. II. Configuración propuesta de reformación de nafta para producir benceno, tolueno y xileno.

Fuente: [Meyers, 1997]

Retomando las tecnologías presentadas en los apartados anteriores, se encontró que principalmente las compañías que se clasifican como protectoras en nuestro estudio de inteligencia tecnológica, se han dado a la tarea de integrar los procesos que han desarrollado para formar plantas de petroquímicos a las cuales se les ha llamado complejos petroquímicos.

La Figura 5. ap. II esquematiza la configuración propuesta por UOP para la elaboración de olefinas y aromáticos.

El complejo de aromáticos UOP ha sido configurado para maximizar la producción de benceno y para-xileno e incluye las siguientes unidades de proceso:

- ↪ CCR Platforming, para la producción de aromáticos a partir de nafta a alta severidad
- ↪ Sulfolane, para la extracción de benceno y tolueno
- ↪ Parex, para la recuperación de para-xileno por separación con adsorción continua
- ↪ Isomar, para la isomerización de xilenos y la conversión de etilbenceno
- ↪ Tatoray, para la conversión de tolueno y aromáticos pesados a xilenos y bencenos.

El proceso Tatoray es utilizado para la producción adicional de xilenos y benceno vía desproporción y transalquilación de tolueno más aromáticos C₉. La incorporación de una unidad Tatoray en un complejo de aromáticos puede más que duplicar la producción de para-xileno a partir de una cantidad de alimentación dada. Así el proceso Tatoray puede ser utilizado para cuando el para-xileno es el principal producto.

Si el benceno es el principal producto, una unidad de hidroalquilación térmica (THDA, por sus siglas en inglés, thermal hydrodealkylation) puede ser substituida por la unidad Tatoray en el esquema de flujo. El proceso THDA es utilizado para dealquilar tolueno y aromáticos más pesados a benceno.

Pocos complejos aromáticos incorporan el proceso THDA y Tatoray que permiten cambiar de la producción de benceno a la producción de para-xileno.

Cerca de la mitad de los complejos aromáticos UOP existentes están configurados para la producción de para-xileno y orto-xileno. La Figura 5. ap. II muestra una columna de orto-xileno para la recuperación de éste por fraccionamiento. Si la producción de orto-xileno no es requerida, esta columna es eliminada de la configuración, y todos los isómeros aromáticos C₈ son reciclados a través de la unidad Isomar hasta que son convertidos en para-xileno.

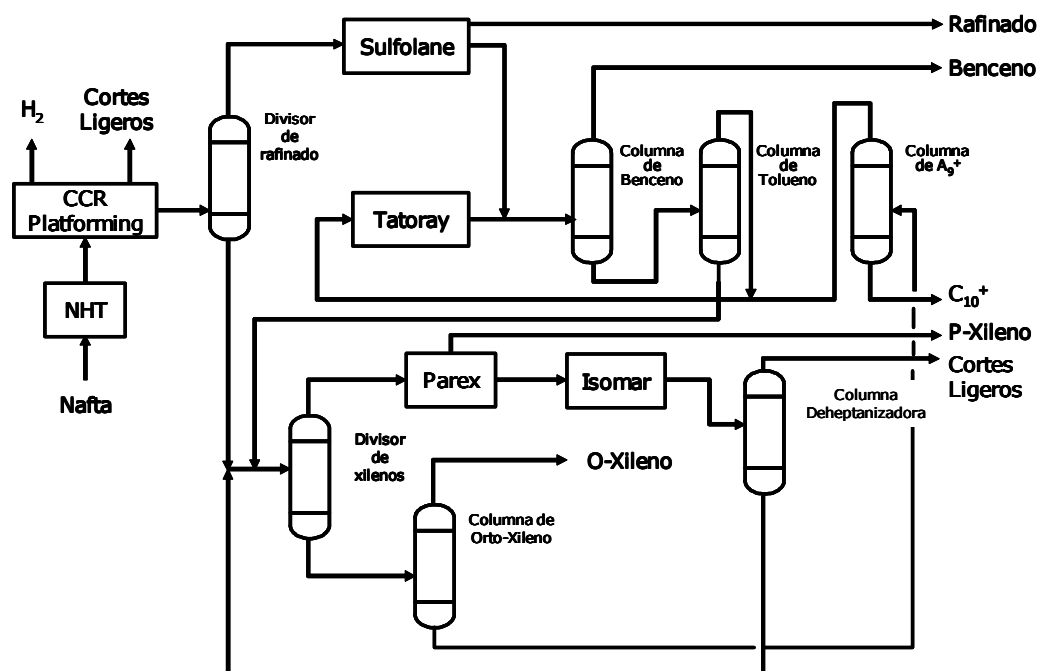


Figura 5. ap. II. Complejo de aromáticos UOP

Un complejo de aromáticos puede ser configurado de diferentes formas, dependiendo de la disponibilidad de la carga, los productos deseados, y la inversión de capital disponible.

Por ejemplo, el complejo petroquímico UOP citado puede operar con nafta, nafta hidrocraqueada, mezcla de xilenos, gasolina de pirólisis (pygas), aceite ligero del horno de coque, hidrocarburos condensados, y gas de petróleo líquido como alimentación al proceso.

En comparación con UOP, el grupo Exxon-Mobil también es protector (de acuerdo a nuestro estudio realizado), principalmente en la producción de aromáticos, por lo que se encontró que los complejos petroquímicos que ofrece al mercado internacional, se encuentran estructurados con un mayor número de unidades de proceso. Sin embargo, se enfatiza la utilización de naftas como alimentación.

La Figura 6. ap. II representa el esquema propuesto por Exxon-Mobil para producir petroquímicos básicos.

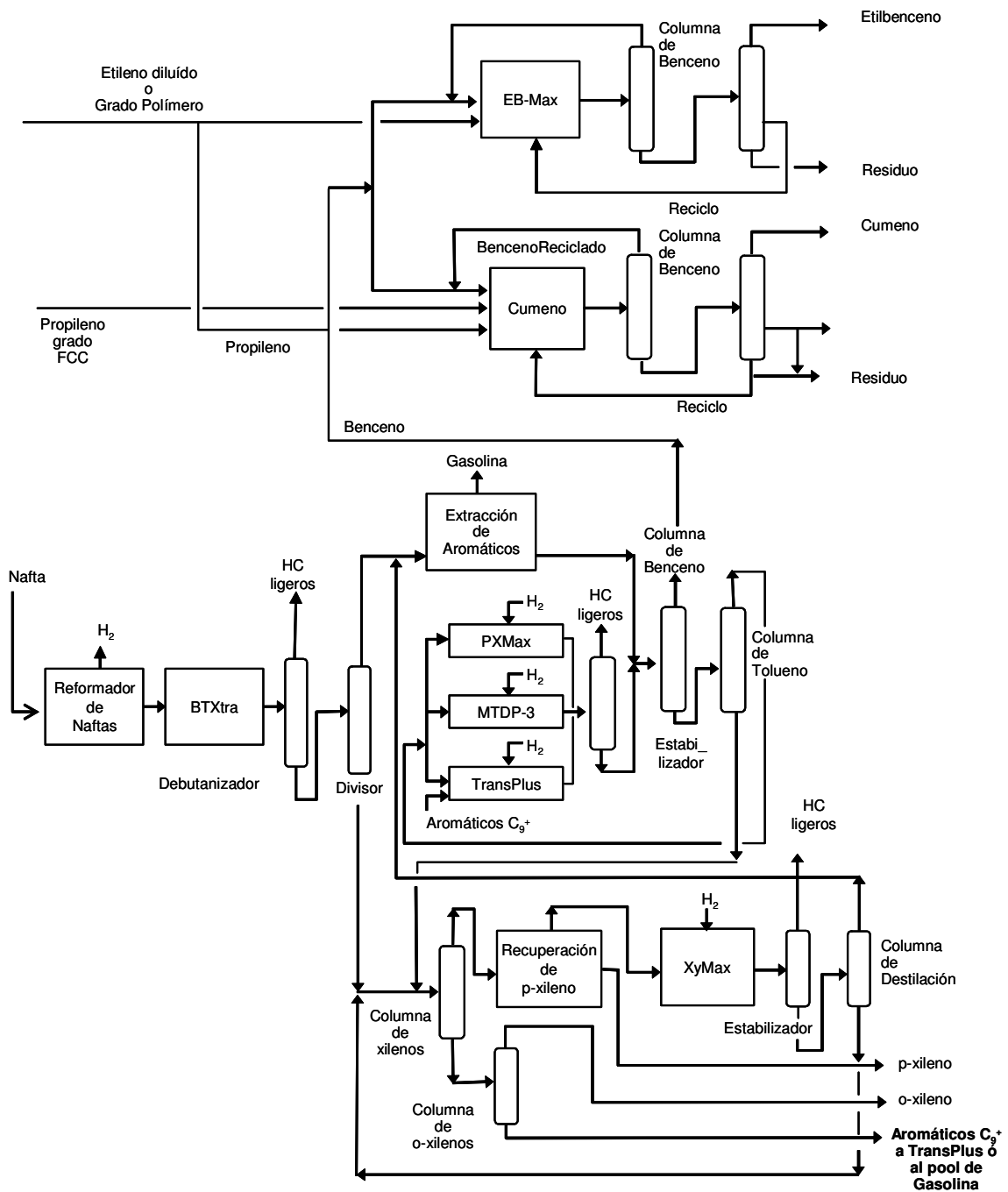


Figura 6. ap. II. Esquema de procesamiento de aromáticos propuesto por el grupo Exxon-Mobil.

Fuente: www.exxonmobil.com

Para no ser reiterativos en la descripción de los esquemas de proceso, sólo se comenta que la configuración propuesta por el grupo Exxon-Mobil es un esquema modular en donde las corrientes intermedias de proceso se utilizan como alimentación intermedia. Los

productos principales son etilbenceno, cumeno, para-xileno, orto-xileno de alta pureza, así como una corriente rica en aromáticos C₉ que pueden ser utilizados para enviarlos al proceso de transalquilación.

La decisión de utilizar el esquema en su totalidad o sólo parcialmente depende de los productos que se necesiten obtener.

5 Procesos y corrientes de la refinación del petróleo integrables a los procesos de producción de olefinas y aromáticos

No se pretende describir a detalle cada uno de los procesos involucrados en la refinación del petróleo crudo; por el contrario se comentará brevemente este esquema únicamente para establecer un marco de referencia para identificar aquellas corrientes y procesos que permitirían realizar la integración de los procesos de producción de olefinas y aromáticos para la producción de petroquímicos.

Es importante aclarar que el enfoque que presenta esta sección es totalmente cualitativo, ya que se requiere realizar una simulación del proceso integrado, objeto de nuestro estudio para verificar la factibilidad técnica que se tendría para poder implementar el concepto integral que estamos analizando desde un punto de vista matemático, enfocado a la toma de decisiones.

En la Figura 7. ap. II se encuentra representada la estructura típica de una refinería, en donde el proceso comienza con la destilación del crudo para separarlo en hidrocarburos (destilados). Si la composición de los destilados está constituida por un alto contenido de contaminantes, principalmente azufre, los destilados se envían a las unidades de tratamiento para remover los constituyentes indeseables y maximizar la operación de los procesos de transformación posteriores, utilizados para mejorar la calidad de las gasolinas (reformación) y/o para incrementar el volumen de su producción (reformación térmica y/o catalítica). Finalmente, los productos que se obtienen de estas transformaciones se someten a procesos de separación y tratamiento, todos ellos diseñados para aumentar su calidad.

La destilación del petróleo es la separación del crudo mediante torres de destilación atmosférica y de vacío, en grupos de hidrocarburos de diferentes intervalos de temperatura de ebullición, conocidas como “fracciones” o “cortes”.

Los procesos de conversión que cambian el tamaño y/o la estructura de las moléculas de los hidrocarburos obtenidos de la destilación se pueden subdividir en:

- ↪ Descomposición (división) por rompimiento (cracking) térmico o catalítico
- ↪ Unificación (combinación) a través de la alquilación y polimerización; y
- ↪ Alteración (rearrreglo) con la isomerización y reformación catalítica

Las dos últimas subdivisiones tienen como objetivo principal, mejorar el número de octanos de la gasolina.

Algunos procesos de separación, purificación y tratamiento son la extracción de hidrocarburos, el hidrotratamiento y el endulzamiento de los productos obtenidos.

Se puede comprender entonces que una refinería incorpora las operaciones de destilación, conversión, tratamiento y mezclado, pero también pueden incluir procesos para obtener petroquímicos aprovechando las corrientes de salida de las unidades de reformación y descomposición; esto debido a la caracterización que se ha establecido en la composición de los productos generados en estos procesos.

El esquema descrito anteriormente es semejante al que se encuentra instalado en nuestras refinerías, obedeciendo a la actual política que tiene Petróleos Mexicanos al continuar realizando diversas acciones para incrementar la oferta de combustibles automotrices e industriales y mejorar la calidad de sus productos, en función de las necesidades del mercado, cumpliendo con la normatividad ambiental y suministrando la demanda de petrolíferos a mínimo costo.

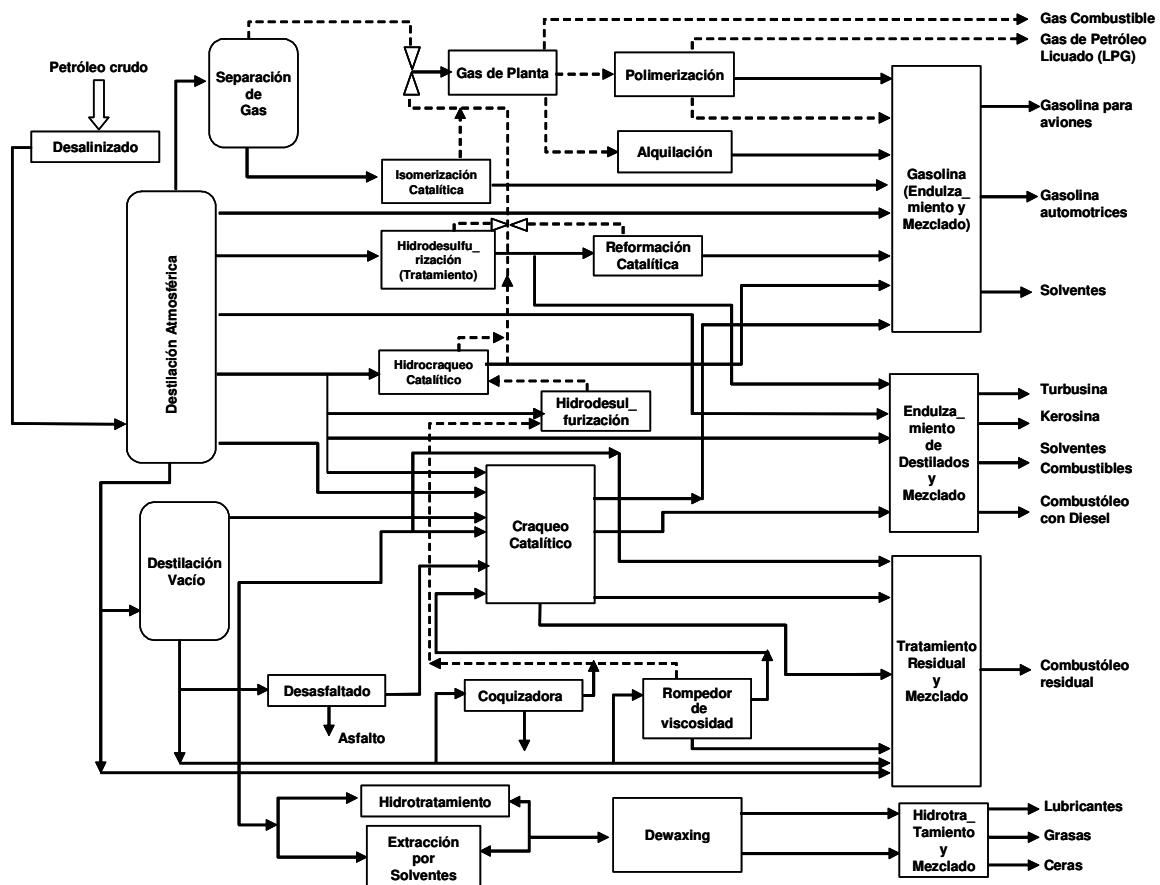


Figura 7. ap. II. Esquema general de refinación

Fuente: www.osha.gov

A continuación se describe muy brevemente el proceso de descomposición de hidrocarburos, así como el de reformación junto con algunas de las consideraciones reportadas en la bibliografía para modificar y/o reconfigurar las unidades de proceso.

5.1 Descomposición (cracking) catalítica de lecho fluidizado (FCC) y producción de olefinas y aromáticos

La descomposición catalítica de lecho fluidizado es un proceso utilizado para convertir hidrocarburos de alto peso molecular a productos de menor peso molecular y de mayor valor, a través del contacto con un catalizador pulverizado a condiciones de proceso apropiadas.

Típicamente, el proceso FCC es utilizado para convertir excesos de gasóleos de refinería y corrientes de refinería más pesados en gasolinas, olefinas C₃ y C₄, y aceite cíclico ligero.

La carga de alimentación a esta unidad pueden ser gasóleos atmosféricos, de vacío, de coquizado, descompuestos térmicamente, aceites desfaltados por solventes, extractos de lubricantes así como los fondos de la hidrodeshcomposición.

De acuerdo a la sección 3, existen unidades de descomposición catalítica de lecho fluidizado de aceites residuales (RFCC) que cargan alimentaciones con residuos de carbón Conradson y contaminadas de metales, tales como residuos atmosféricos o mezclas de residuos de vacío y gasóleos. Dependiendo del nivel de residuo de carbón, azufre y contaminantes metálicos (níquel, vanadio y sodio) estas alimentaciones pueden ser hidrotratadas o desfaltadas antes de ser alimentadas a la unidad RFCC. El hidrotratamiento o desfaltado reduce el residuo de carbón y metales de la alimentación, reduciéndose en ambos la tendencia de formación de coque de la alimentación y la desactivación del catalizador.

Aunque la gasolina es el producto más deseado de un proceso FCC o RFCC, las variables de operación y diseño pueden ser ajustadas para maximizar otros productos.

Los tres principales modos de operación de FCC son la producción máxima de gasolina, de aceite cíclico ligero y la producción de olefinas ligeras, frecuentemente referida a operación LPG máxima [5].

Por otro lado, para ejemplificar la producción de olefinas utilizando la operación de descomposición catalítica se cita el siguiente ejemplo junto con las consideraciones realizadas para lograr tal fin.

En Estados Unidos se pronosticó que la producción de propileno aumentaría en comparación con la de etileno, lo cual dio lugar a que en la NPRA⁸ (Annual Meeting), se presentaron las siguientes consideraciones para modificar y mejorar el proceso de FCC:

⁸ *National Petrochemical and Refiners Association*

- ↪ Toda la producción de etileno proviene del craqueo térmico de hidrocarburos (etano, propano, naftas y gasóleos) y es el producto de mayor volumen producido, utilizado como materia prima para otros productos. De este proceso se obtiene propileno como co-producto.
- ↪ Se puede maximizar la producción de propileno desde la carga de alimentación a FCC [6].
- ↪ La operación típica de la FCC es menor al 6% en peso de propileno, los procesos con catalizadores fluidizados pueden alcanzar hasta un 20% en peso o más a partir de la carga de alimentación a la unidad.
- ↪ Una refinería puede incrementar la producción de olefinas ligeras mejorando la unidad de FCC (reactor, generador, fraccionador principal y la unidad de recuperación de vapor).
- ↪ Como la unidad de FCC opera a temperaturas altas de reacción para alcanzar la producción de propileno, la producción de etileno también incrementará.
- ↪ Mientras que la operación tradicional de una unidad de FCC produce menos del 2% en peso de etileno, las nuevas tecnologías pueden producir mucho más del 8% en peso, y los sistemas de reacción catalítica fluidizada pueden producir hasta el 20% en peso de etileno, a partir de una carga de hidrocarburos de C₄ hasta C₈.

Por otro lado se encuentra la producción de aromáticos, insumos que se comenzaron a producir por una vía alterna a la destilación del crudo, debido a lo cual se consideró adecuado mencionar brevemente su historia.

Se conoce como fracción BTX al conjunto de moléculas que se consideraran como derivados básicos de benceno, y formado por benceno, tolueno, orto-xileno, para-xileno, meta-xileno y etil-benceno.

Desde un punto de vista histórico, este conjunto de moléculas formaron parte fundamental de la fracción ligera del alquitrán producido por la destilación seca de la hulla y recibieron la denominación genérica de aromáticos.

Hacia finales de los años 40, tiene lugar en EE.UU. la primera obtención de hidrocarburos aromáticos procedentes del petróleo al inventarse el reformado catalítico de naftas.

El proceso de reformación catalítica se utiliza para convertir hidrocarburos alifáticos del petróleo en hidrocarburos aromáticos. Este proceso fue originalmente desarrollado para mejorar el número de octanos de la gasolina; no obstante, se ha aplicado para producir gas LPG y aromáticos de alta pureza.

Actualmente, los principales procesos para la producción de BTX son:

- ↪ 'Crackers' de etileno/propileno alimentados por nafta o gases del petróleo-nafta pirolítica.
- ↪ El reformado catalítico de naftas en refinерías.
- ↪ La desproporción y dealquilación del tolueno

De acuerdo a los especialistas en materia, la petroquímica basada en naftas aporta más del 96% de la producción mundial de BTX. En la Figura 8. ap. II se muestran los porcentajes promedio de obtención de aromáticos BTX a partir de una nafta baja en azufre.

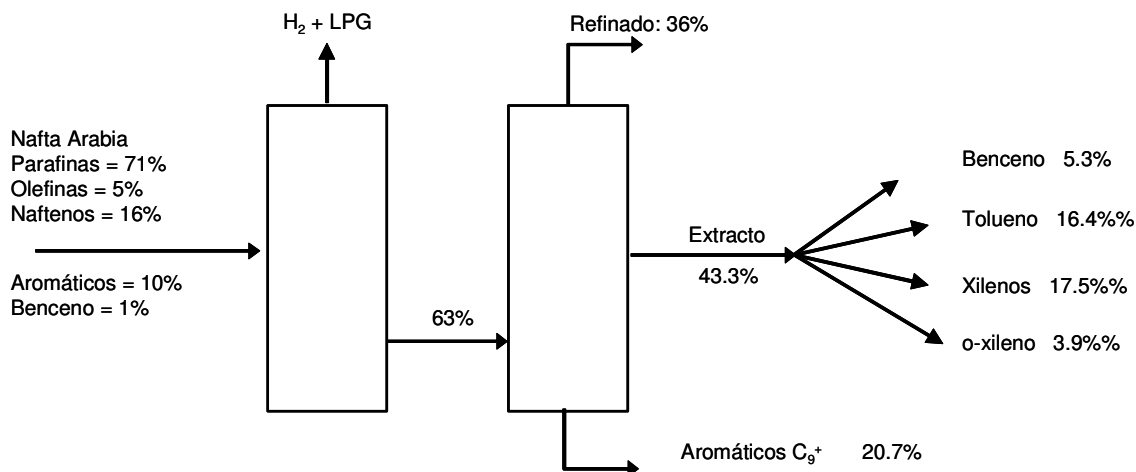


Figura 8. ap. II. Reformado catalítico de naftas para producción de aromáticos

La calidad de la carga en los reformados y en las unidades de descomposición (crackers) de etileno determina la producción y concentración del BTX en el reformado y la nafta pirolítica.

5.2 Algunas consideraciones acerca de los procesos de producción de poli-olefinas

Desde la década de los 80, casi todos los grandes productores de poli-olefinas han incursionado en el desarrollo de nuevos catalizadores órgano metálicos (metalocenos) para aplicaciones de alto valor agregado. De acuerdo a publicaciones recientes, la tecnología de metalocenos ya se aplica a los productos de grandes volúmenes y bajos márgenes (commodities).

Compañías como Basell y Univation se han dedicado a la producción de polipropileno y polietileno lineal de baja densidad utilizando metalocenos.

La estrategia de ambas empresas es formar alianzas para suministrar tecnología y catalizadores. Las dos muestran estar preocupadas en bajos costos, alto desempeño y conservación del medio ambiente. www.basell.com, www.univation.com.

Durante la revisión bibliográfica que se realizó para este trabajo, se encontraron reportes que indican que Basell es el mayor productor de polipropileno en el mundo. Cuenta con tres regiones de operación, Europa, Norte América e Internacional, y de acuerdo a su página web, esta compañía cuenta con una línea de productos que se muestran en la Tablas 6 y 7. ap. II.

Tabla 6. ap. II. Línea de productos de Basell

Nombre del Producto	Descripción del producto
Moplen y Pro-fax	Polipropileno (homopolímero) y productos copolimerizados al azar, resistentes al impacto, obtenidos por un catalizador Ziegler-Natta.
Metocene	Polipropileno (homopolímero) y productos copolimerizados al azar, resistentes al impacto, obtenidos por un catalizador metaloceno simple.
Adstif	Polipropileno con altamente cristalino muy alta elasticidad.
Clyrell	Resina de poli olefina con una combinación de transparencia y fuerza al impacto.
Pro-fax	Resinas de polipropileno de alta desempeño.

Tabla 7. ap. II. Líneas de polietilenos producidas por Basell

Línea	Descripción y/o Aplicaciones
Lupolen	Polietilenos de alta, media y baja densidad para aplicaciones de película, moldeado por soplado, recubrimientos de tubería de acero y moldeado por inyección y tubería.
Lupolex	Polietileno lineal de baja densidad para aplicaciones de película.
Luflexen	Polietileno lineal de baja densidad obtenido por metalocenos para aplicaciones de película.
Lucalen	Copolímero etileno/ácido acrílico/ acrilato para aplicaciones de películas y recubrimientos de tubería de acero.
Hostalen	Polietileno de alta densidad para aplicaciones de película, moldeado por soplado, tubería, moldeado por inyección, cintas, monofilamentos y fibras.

Basell también produce compuestos de polipropileno, hechos con aditivos elaborados a base de hule, el cual provee suavidad y elasticidad a los productos, además de talco, fibras de vidrio y minerales, para dar estabilidad y rigidez a los polímeros. También se produce de polibuteno-1(PB-1) y resinas para sellos de piel, modificación de películas, etc.

Las características de cada poliolefina producida se encuentran en función del catalizador utilizado durante el proceso de polimerización. Es por ello que se ha considerado realizar una revisión de los tipos de catalizadores que se utilizan en este tipo de procesos. Además se considera que con cada tipo de catalizador, las unidades de proceso pueden aumentar o disminuir. La tecnología de los equipos evoluciona en función de las condiciones a las cuales se lleva a cabo la reacción de polimerización, e inevitablemente los costos de operación también varían.

5.3 Importancia de los catalizadores en la producción de poliolefinas

El descubrimiento de nuevos catalizadores ha sido una oportunidad de desarrollo para la Industria Petroquímica.

En el mercado existen dos tipos principales de catalizadores para producir poliolefinas: los llamados Ziegler-Natta y los metallocenos.

La industria de los catalizadores Ziegler-Natta comenzó en los 1950's, y hasta la fecha aún son utilizados para la producción de polietileno y polipropileno.

Los metallocenos fueron desarrollados a principios de los 1990's, como resultado de la evolución de los Ziegler-Natta, y fueron diseñados para cambiar la estructura molecular de las poliolefinas, abriéndose así nuevos mercados.

Su diseño es una metodología de selección de propiedades, como lo son: superficies químicas, estructura de poros, forma y tamaño, métodos de impregnación, resistencia mecánica. Todo ello en función de mejorar la operación del proceso.

En un estudio realizado por Escobar y López-Serrano [7], se reportan las siguientes características para los metallocenos:

- ↗ Habilidad para polimerizar casi cualquier monómero de vinilo insaturado.
- ↗ Habilidad inherente para producir homopolímeros uniformes y copolímeros de estrecha distribución de pesos moleculares y composiciones.
- ↗ Capacidad para controlar la estereo selectividad del catalizador y producir nuevas estructuras moleculares tales como polímeros altamente sindiotácticos.
- ↗ Precisión en el ensamble de polímeros de estructura predecible y propiedades, como si los metallocenos soportaran el código genético de cada familia de polímeros.

En la misma referencia, se encontraron que algunas ventajas y desventajas de los catalizadores Ziegler-Natta y los metallocenos son:

Ventajas:

- ↗ Versatilidad de metallocenos para el rango mayor de producción de poliolefinas.
- ↗ Polímeros con calidad mejorada. Puntos de fusión más bajos, mejores características ópticas, mejor estabilidad.
- ↗ Aumento en el control de las ramificaciones en el polietileno.
- ↗ La producción está en la escala de uno a diez veces que la de los catalizadores tradicionales. Es decir, 100 g de catalizadores de zirconoceno producido por Hoeschst produjo 100,000 kg de plástico.

Desventajas:

- ↻ Se necesita alta concentración de Al como co-catalizador.
- ↻ Proporción metal a Al en los catalizadores Ziegler-Natta: 1:150-200.
- ↻ Proporción de Metal a Al en los catalizadores de metalloceno 1:1000-15000.
- ↻ Costos altos en comparación con los catalizadores Ziegler-Natta.
- ↻ Comparación de Metallocenos y catalizadores Ziegler-Natta.

6 Situación Tecnológica existente en el Sistema Nacional de Refinación

El Sistema Nacional de Refinación (SNR) cuenta con seis refinerías distribuidas por toda la República Mexicana.

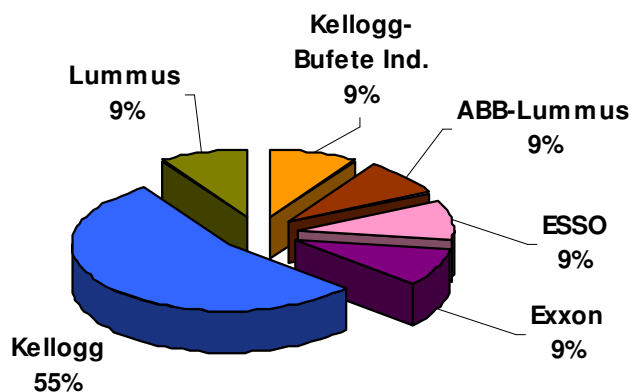
Se cuenta con una capacidad instalada de 357,000 barriles/día para las unidades de desintegración catalítica (FCC) y de 244,000 barriles/día en las de reformación. Ambos procesos se caracterizan por tener condiciones de operación fijadas para incrementar la oferta de combustibles automotrices e industriales para consumo nacional y exportación.

Las unidades de descomposición catalítica están diseñadas con cinco secciones: a) Desintegración catalítica, b) Fraccionamiento, c) Compresión de gas y estabilización de gasolina, d) Tratamientos y, e) Fraccionamiento de gas licuado. La sección más importante es la desintegración catalítica y la constituye el reactor, que es donde se desintegra la mezcla de gasóleos al ponerse en contacto con el catalizador caliente que fluye en forma de polvo.

La carga que se alimenta a las unidades de FCC son gasóleos atmosféricos, de vacío, e hidrotratados; y los productos que se obtienen son gas ácido, gas seco, propano, propileno, butano-butileno, gasolina catalítica (con alto contenido de octano), aceite cíclico ligero y aceite decantado.

La tecnología de estas unidades es propiedad de las siguientes compañías: M.W. Kellog, Kellog-Bufete Industrial, Exxon, ESSO, y ABB-Lumus.

La Gráfica 8. ap. II muestra el porcentaje de participación que tiene cada uno de los licenciadores en estos procesos de transformación.



Gráfica 8. ap. II. Porcentaje de participación de los diferentes licenciadores del proceso de FCC en el SNR.

Fuente: Información proporcionada por el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP)

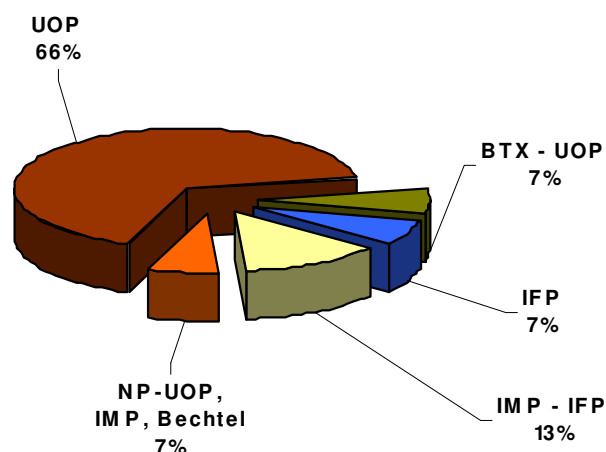
La tecnología de M.W. Kellogg se utiliza en más del 50% de los procesos de descomposición catalítica; la cual se comenzó a adquirir aproximadamente hace poco más de 30 años. Este hecho, hace que los procesos citados sufran un retraso tecnológico en comparación con las tecnologías recientes de UOP, por citar a alguna de estas grandes compañías.

En cuanto a las unidades de reformación de naftas reciben como carga gasolina primaria desulfurada (hidrotratada) que, a presión y temperatura adecuadas, y en presencia de un catalizador a base de platino, se realiza la reacción de reformación, que consiste en transformar los hidrocarburos lineales y nafténicos a hidrocarburos aromáticos del tipo benceno, tolueno y xilenos, que son de mayor octanaje. La reacción se efectúa en cuatro reactores colocados en serie.

La reacción de reformación es endotérmica, por ello entre los reactores se intercalan calentadores para controlar la temperatura del fluido antes de entrar a cada uno de ellos, proporcionando así la energía necesaria para realizar la reformación.

Los productos que se obtienen de este proceso son hidrógeno, gas seco, gas licuado, y gasolina reformada (de alto octanaje). El hidrógeno producido en la reacción es alimentado a las plantas hidrosulfuradoras de naftas y destilados intermedios.

Estas unidades están licenciadas por BTX-UOP, IFP, IMP/IFP, NP-UOP/IMP/Bechtel y UOP; la Gráfica 9. ap. II muestra que la tecnología de UOP se encuentra instalada en más del 60% del total de las unidades de reformación existentes en todo el SNR. De acuerdo con nuestro estudio de inteligencia tecnológica ninguno de estos licenciadores se encuentra ni como pionero, ni como protector de la tecnología.



Gráfica 9. ap. II. Porcentaje de participación de los diferentes licenciadores del proceso de reformación en el SNR.

Fuente: Información proporcionada por el IMP

PEMEX-Refinación se preocupa por modificar y mejorar sus procesos de refinación. A principios del 2003 había terminado las reconfiguraciones de cuatro de las refinerías que conforman el SNR. Sin embargo, de acuerdo con las fuentes consultadas, www.pemex.com/index, su objetivo es producir una alta proporción de petrolíferos ligeros con base en el procesamiento de un mayor volumen de crudo pesado, elaborando cantidades adicionales de gasolinas de alto octano y diesel con bajo contenido de azufre, que cumplen con las normas ambientales.

Debido a lo anterior es fácil entender que hasta ahora no se ha considerado modificar las condiciones de proceso y operación para la producción de olefinas como materia prima de petroquímicos.

7 Situación tecnológica de la Industria Petroquímica Nacional

La Petroquímica Nacional tiene una baja rentabilidad en cuanto al suministro de gas natural⁹ (altos costos de materia prima), así como una obsolescencia de tecnología para su transformación.

La Industria Petroquímica Nacional cuenta con una capacidad actual instalada de 13.2 millones de toneladas de petroquímicos al año. www.ptq.pemex.com/portal

Existen 7 complejos petroquímicos que procesan naftas reformadas y etano para producir acetaldehído, amoníaco, benceno, etileno, óxido de etileno, glicoles, orto-xileno, para-xileno, propileno, tolueno, xilenos, acetonitrilo, ácido cianhídrico, acrilonitrilo, polietileno de baja densidad, polietileno de alta densidad, metanol y cloruro de vinilo, entre otros.

⁹ Ver Apéndice I.

Las notas informativas públicas emitidas por los analistas en la materia, mencionan que nuestra industria petroquímica presenta los siguientes problemas:

- ↻ La producción de propileno (acrilonitrilo y polipropileno) presenta baja productividad ocasionada por la baja capacidad de sus instalaciones, falta de abasto de propileno e incipiente factibilidad de actualización.
- ↻ En cuanto a los aromáticos, se tiene una obsolescencia media, las reformadoras operan con baja conversión de aromáticos y existe una indudable falta de abasto de carga de naftas.
- ↻ En cuanto a los polietilenos, sólo existe tecnología para producir polietileno de alta y baja densidad.
- ↻ Para el cloruro de vinilo, se detecta también, una obsolescencia tecnológica, una baja rentabilidad por baja capacidad de la planta, alto consumo en cloro y un considerable impacto ambiental.

Reportes generados por PEMEX-Petroquímica, reafirman la poca operatividad que se tiene actualmente. En la Tabla 8. ap. II se resume el tipo de planta existente, el licenciador (tecnólogo), capacidad de planta y la fecha de puesta en operación.

Tabla 8. ap. II. Tecnologías para producir olefinas.

Fuente: PEMEX-Petroquímica

Planta	Tecnólogo	Capacidad	Inicio operación
Reformadora BTX	Exxon	45,000 Barriles/d	Junio 1982
Fraccionadora y extractora de aromáticos	ARCO	50,000 Ton/año hexano 11,000 Ton/año heptano 271,000 Ton/año benceno 354,000 Ton/año tolueno 55,000 Ton/año orto-xileno 93,000 Ton/año de aromáticos C ₉	Nov 1982
Para xileno	Chevron	240,000 Ton/año para-xileno	Nov 1982
Transformadora de aromáticos	La Pace Arco HRI HRI	42,350 Barriles/día de licor madre 13,200 Barriles/día de tolueno y aromáticos C ₉ 2,910 Barriles/día de tolueno 416.45 Ton de Hidrógeno impuro	Nov 1982

De la Tabla 8. ap. II se observa que la producción de para-xileno se realiza utilizando una tecnología de Chevron, compañía que de acuerdo a las Gráficas 6 y 7 ap. II, ha tenido un desarrollo significativo en cuanto a la producción de aromáticos, en comparación con las demás compañías.

8 El petróleo como materia prima de petroquímicos

El petróleo es una mezcla de compuestos que contienen en su estructura molecular átomos de carbono e hidrógeno que se conocen como hidrocarburos. Su composición varía dependiendo del tipo de yacimiento de donde provenga. Se puede clasificar como parafínico, nafténico ó aromático, tomando como base la proporción predominante de hidrocarburos que contiene. Los crudos mixtos tienen cantidades variantes de cada tipo de hidrocarburo.

Una propiedad que caracteriza los diferentes tipos de crudo es su densidad específica medida en grados API (American Petroleum Institute). El valor de la densidad específica API más alta es la que corresponde a un crudo ligero. Los crudos con bajo contenido de carbón, alto contenido de hidrógeno y alta densidad específica API son ricos en parafinas¹⁰ y tienden a producir grandes porcentajes de gasolina y cortes ligeros. Aquellos con alto contenido de carbono, bajo contenido de hidrógeno y con densidades específicas API bajas se conocen como crudos pesados, generalmente ricos en aromáticos¹¹.

Los crudos que contienen apreciables cantidades de sulfuro de hidrógeno, u otro compuesto de azufre se denominan “amargos”; aquellos con menor cantidad de azufre se consideran como “dulces”.

Por lo anterior, no todos los tipos de crudo son igualmente adecuados para la producción de petroquímicos. En general, los crudos ligeros parafínicos son los más deseables para la producción de olefinas, mientras que los crudos nafténicos¹² son generalmente más ventajosos para las refinerías típicas.

En México existen diversos tipos de crudo, algunos para su exportación y algunos otros para su procesamiento en productos de refinación. Aunque México cuenta con un alto porcentaje de crudo Maya (22 °API y 3.3% en peso de S), las plantas que integran el Sistema Nacional de Refinación están diseñadas para operar con crudos ligeros. Es por ello que cuando se realiza el análisis de alguna reconfiguración se debe considerar modificar la capacidad de proceso para manejar mayor cantidad de crudo pesado. Recordemos que el petróleo es un recurso no renovable, por lo que hay que adecuar nuestra tecnología para maximizar su aprovechamiento.

9 Estructuración de una Refinería Petroquímica

Modificar alguna de las refinerías existentes para aumentar la producción de olefinas y aromáticos destinados para la producción de petroquímicos a partir de una corriente de crudo ó instalar módulos que integren las operaciones básicas necesarias para dicha transformación, diseñados en función al tipo de crudo a procesar así como al tipo de petroquímicos requeridos; resulta una alternativa que en el mediano plazo, puede tener

¹⁰ Parafinas: Hidrocarburos cuya fórmula es C_nH_{2n+2} , y pueden ser de cadena recta ó ramificada

¹¹ Aromáticos: Compuestos cíclicos insaturados. Todos los aromáticos tienen al menos un anillo bencénico como parte de su estructura molecular.

¹² Naftenos: Hidrocarburos saturados cuya fórmula es C_nH_{2n}

perspectivas económicas más interesantes que la exportación de crudo *per se*, programada para el futuro mediano.

Teniendo en cuenta lo anterior, se presenta la oportunidad de definir un nuevo concepto en esquemas de producción, integrando desde las operaciones de destilación, reformación y descomposición de los hidrocarburos destilados, y hasta algunos de los desarrollos tecnológicos ofrecidos en el mercado para no solo obtener petroquímicos, sino también contar con la flexibilidad de operación para maximizar la conversión de crudo así como la calidad de los productos petroquímicos obtenidos.

Si se parte de la posibilidad de reconfigurar una refinería para generar olefinas y aromáticos, se deben de tener en cuenta aspectos como:

- ↪ La gama de productos petroquímicos y combustibles deseados.
- ↪ Las características del crudo.
- ↪ El grado óptimo de conversión del crudo a petroquímicos.
- ↪ La configuración tecnológica óptima y las capacidades de cada una de las configuraciones utilizadas y/o diseñadas.

Estos puntos no pueden tratarse en términos generales, puesto que cada uno estará gobernado por un conjunto diferente de factores económicos. Sin embargo, es posible ilustrar con situaciones típicas, el efecto que tienen las diferentes configuraciones de proceso, los diferentes tipos de crudo y las diferentes capacidades de las plantas en la porción de los productos petroquímicos obtenidos y en los costos asociados de operación e inversión.

Tomando como base esquemas de procesamiento de crudo, reportados en la literatura [8], realizando una actualización de datos económicos, en el capítulo siguiente de este trabajo se propone una nueva metodología para evaluar la alternativa de producir petroquímicos a partir de crudo.

Para finalizar esta sección, se describirán los esquemas de procesamiento de crudo que maximizan la producción de petroquímicos, a partir de los cuales se analizarán el beneficio que puede obtenerse si se integran, posteriormente, cadenas de producción de petroquímicos secundarios. También se presentan las bases del análisis económico.

Se estudia una combinación de procesos en los que considera una alimentación de 2.5×10^6 Ton/Año (50,000 barriles por día), de la que se obtendrán diferentes porcentajes de productos y combustibles con bajo contenido de azufre.

Para cada caso se muestra el costo del proceso en dólares por tonelada (o barril) de crudo. Este costo cubre todos los cargos de operación, incluyendo una ganancia típica sobre la inversión, pero no incluye el costo del crudo. La diferencia entre los beneficios totales de todos los productos, menos el costo del petróleo crudo, tendrá que ser igual o

más grande que el costo del proceso que se presenta, para justificar una operación dada. En Tabla 9. ap. II, se dan las bases para el análisis económico.

Tabla 9. ap. II. Bases para los costos de proceso (precios de 1995)

Servicios	USD
Combustible (USD/MMkcal)	2.41
Energía eléctrica (USD/kWh)	0.015
Vapor de alta presión (USD/Ton)	1.74
Agua de enfriamiento (USD/m ³)	0.005
Mano de obra (USD/Hombre-año)	32,600
Mantenimiento	
Proceso (% de la Inversión)	3%
Servicios Auxiliares (% de la Inversión)	1%
Seguros y licenciamiento	
(% de la inversión)	2%
Depreciación (15 años)	
Proceso (% de la Inversión)	6.67%
Servicios Auxiliares (% de la Inversión)	6.67%
Ganancia	
(% de la Inversión)	20%

9.1 Configuración No. 1: Destilación atmosférica y pirólisis de naftas para combustibles y petroquímicos

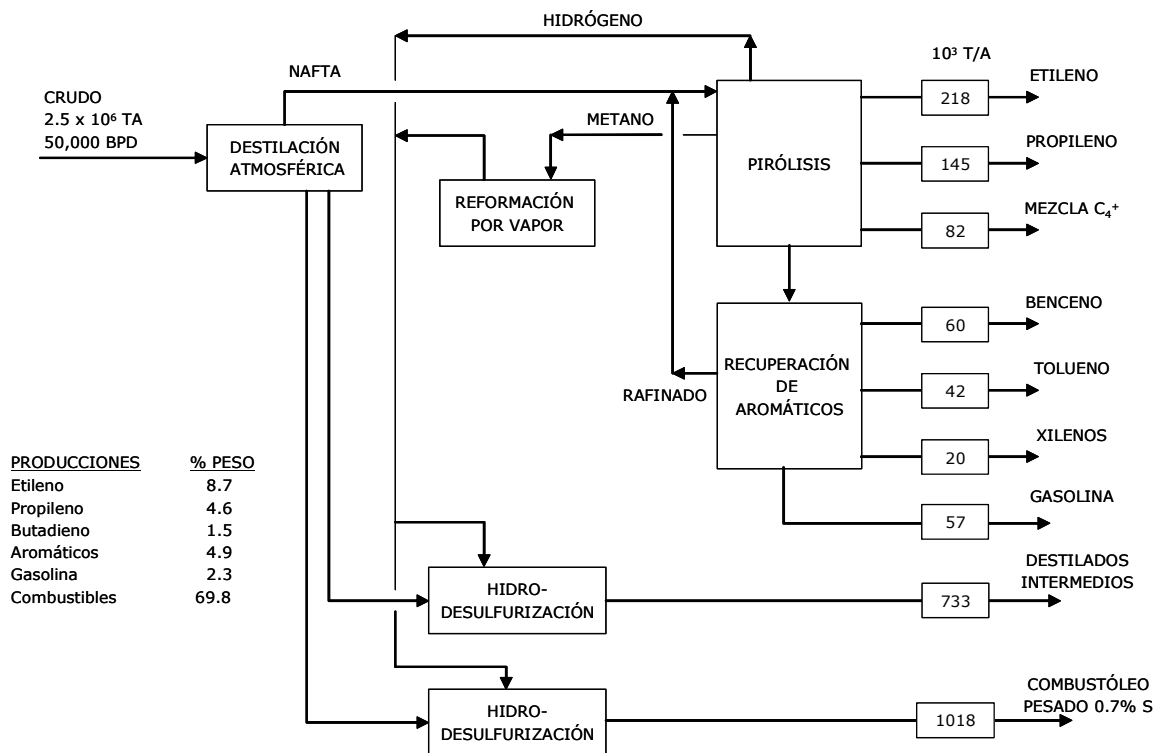


Figura 9. ap. II. Esquema de Configuración 1.

Los aromáticos contenidos en la gasolina de pirólisis son extraídos y separados; el refinado es reciclado a la unidad de pirólisis. También se produce una pequeña cantidad de gasolina rica en octanos que puede ser vendida o quemada internamente y se produce algo de hidrógeno en el proceso de reformación por vapor, para hacer los servicios autosuficientes. La configuración 1 requiere el costo de inversión más bajo¹³, pero produce un 20 por ciento de la producción más baja de petroquímicos. La unidad de olefinas tiene una capacidad mayor de 200,000 Ton/año de etileno. Figura 9. ap. II.

¹³ Los datos de inversión para cada configuración se encuentran al final de esta sección

9.2 Configuración No. 2: Destilación atmosférica y pirólisis de todos los destilados atmosféricos para combustibles y petroquímicos

La Figura 10. ap. II muestra esencialmente el mismo arreglo que el anterior. Solo difiere en que los destilados intermedios desulfurados son enviados a la unidad de pirólisis.

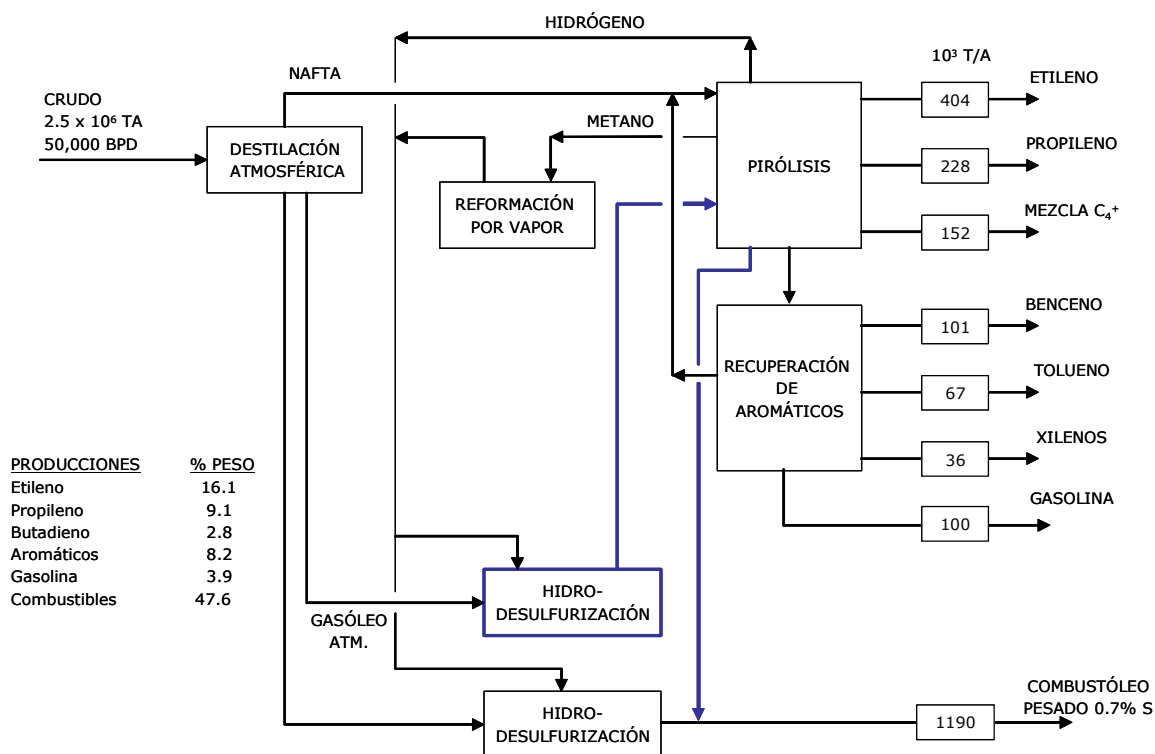


Figura 10. ap. II. Esquema de Configuración 2.

La producción total de petroquímicos incrementa a 36%, o expresado de diferente forma, un total de 900,000 Ton/año de petroquímicos pueden ser producidos a partir de 2.5 millones de toneladas por año de crudo. En este caso, el hidrógeno adicional derivado de la pirólisis de destilados intermedios casi balancea los requerimientos de hidrógeno de las unidades de hidrodesulfuración. Esta configuración puede ser de interés para las compañías que no desean vender combustibles para aviones, diesel ni combustóleo o que no pueden negociar los destilados intermedios para obtener nafta adicional.

Las plantas de olefinas modernas, con frecuencia se diseñan para obtener una flexibilidad total en lo que se refiere a los insumos, y así poder hacer frente a las tasas de producción nominales a partir de nafta y gasóleo en cualquier proporción. Esta flexibilidad se puede obtener con un aumento mínimo del costo de inversión.

9.3 Configuración 3: Destilación atmosférica, de vacío y pirólisis para combustibles y petroquímicos

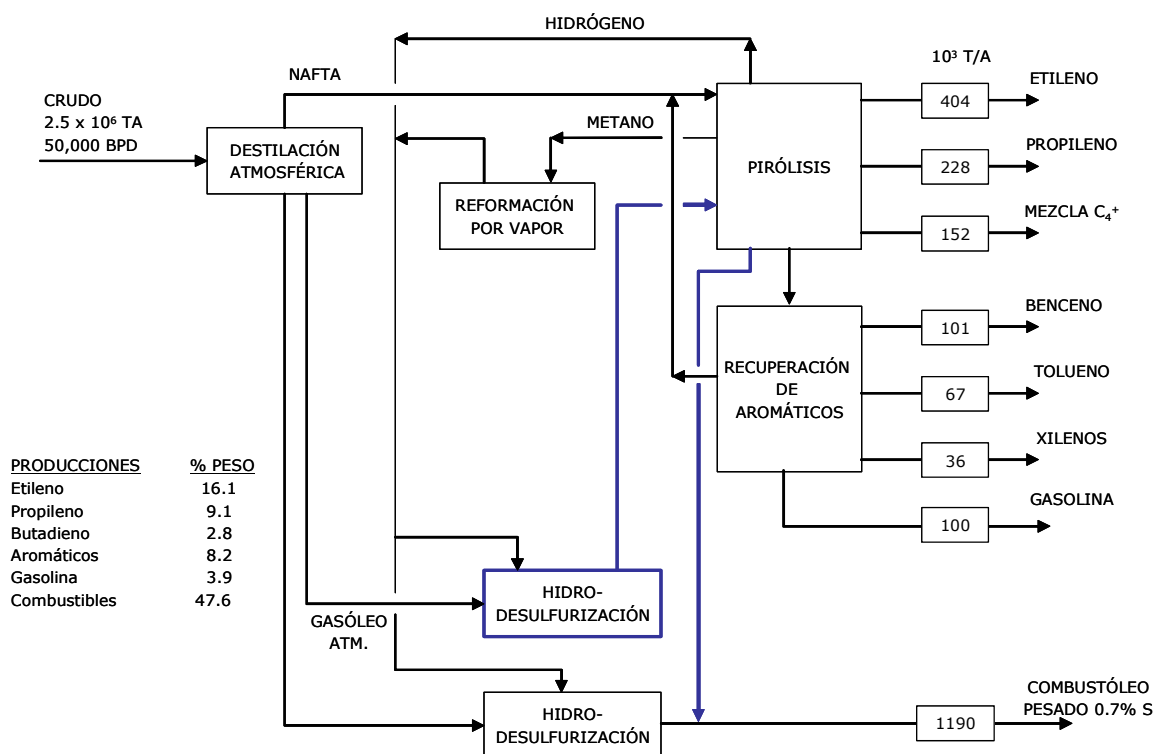


Figura 11. ap. II. Esquema de configuración 3

En el esquema de la Figura 11. ap. II, se adiciona una unidad de destilación al vacío para producir gasóleo de vacío como una alimentación adicional para la unidad de olefinas, resultando un moderado incremento posterior en la producción de petroquímicos, aproximadamente un 42%. La producción de petroquímicos de gasóleo de vacío es baja, el cual es principalmente una consecuencia del bajo contenido de hidrógeno de la corriente alimentada.

Entre el 25 y 40% de la alimentación a la unidad de pirólisis es degradada a gasóleo y combustóleo pesado, mientras que el gasóleo (10 y 15% de alimentación) puede ser procesado para obtener un producto más fácil de vender.

El combustóleo pesado de la unidad de pirólisis constituye aproximadamente el 5-10% de la producción total de combustible del complejo y puede ser una fuente económicamente atractiva para la producción de naftaleno, negro de humo y otros.

El gasóleo de pirólisis contiene alrededor del 70% de naftalenos alquilados. Para la obtención de naftaleno de alta pureza se utilizan procesos similares.

Las configuraciones discutidas más adelante para la separación del crudo en fracciones deseables, con la excepción de las unidades de desulfurización, contienen algunas unidades de conversión real, las cuales cambiarían la producción de las fracciones de crudo.

9.4 Configuración 4: Destilación atmosférica, de vacío, craqueo catalítico y pirólisis para combustibles y petroquímicos

La configuración de la Figura 12. ap. II muestra un complejo formado por una unidad de desintegración catalítica para el gasóleo de vacío. Se debe adicionar una unidad de hidrotratamiento para saturar la gasolina con un alto contenido de olefinas. Como ésta es rica en aromáticos, es enviada a la unidad de recuperación de aromáticos, donde los componentes alifáticos son separados y regresados a la unidad de pirólisis. Comparado con la pirólisis directa del gasóleo de vacío, la producción de etileno no cambia significativamente, mientras que la producción de propileno y aromáticos incrementa bruscamente. El rendimiento total de petroquímicos asciende aproximadamente a 50%.

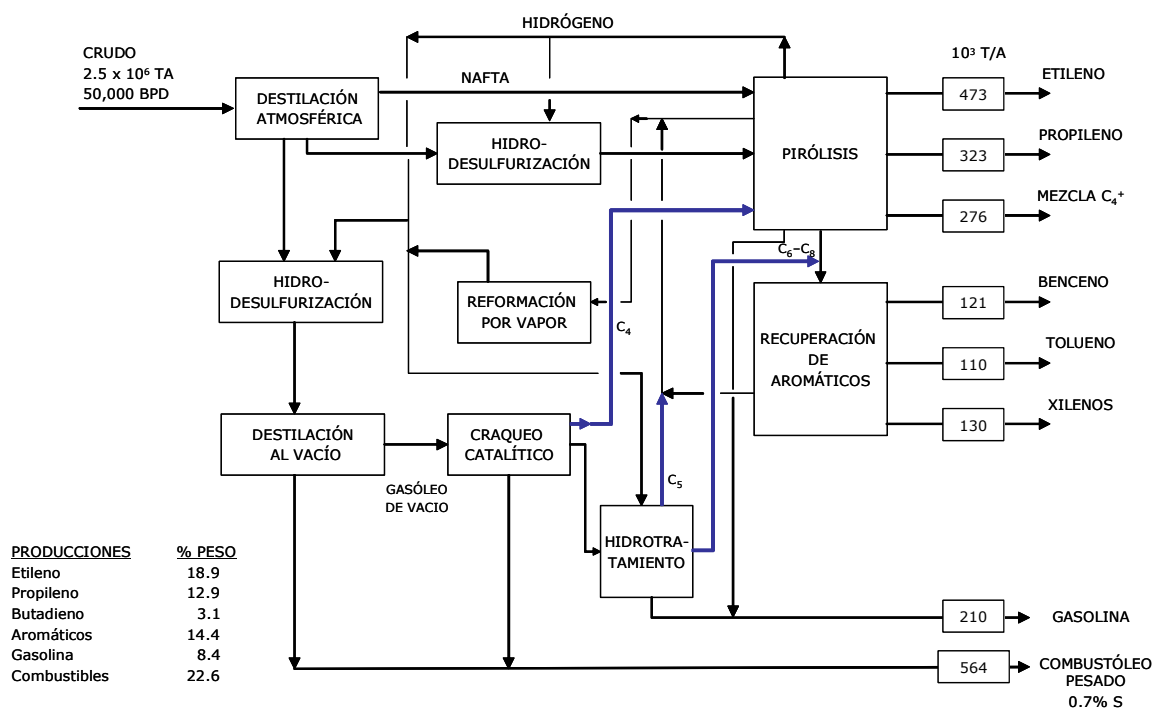


Figura 12. ap. II. Esquema de configuración 4

Con esta configuración, se pueden lograr ahorros en la inversión y en el costo de operación, si la regulación ambiental no establece la desulfurización de la carga de alimentación a la unidad de desintegración catalítica.

9.5 Configuración 5: Destilación atmosférica, de vacío, hidrodesintegración y pirólisis para combustibles y petroquímicos.

El esquema de la Figura 13. ap. II presenta una unidad de hidrodesintegración ha remplazado a la unidad de descomposición catalítica. De la utilización de una unidad de hidrodesintegración, se pueden obtener productos muy deseables, pero se requiere una inversión mayor que para la desintegración catalítica; en particular por la planta de hidrógeno asociada.

Un complejo de esta configuración daría la mayor producción de etileno (22%) pero el aumento en el rendimiento total de petroquímicos es del 51%.

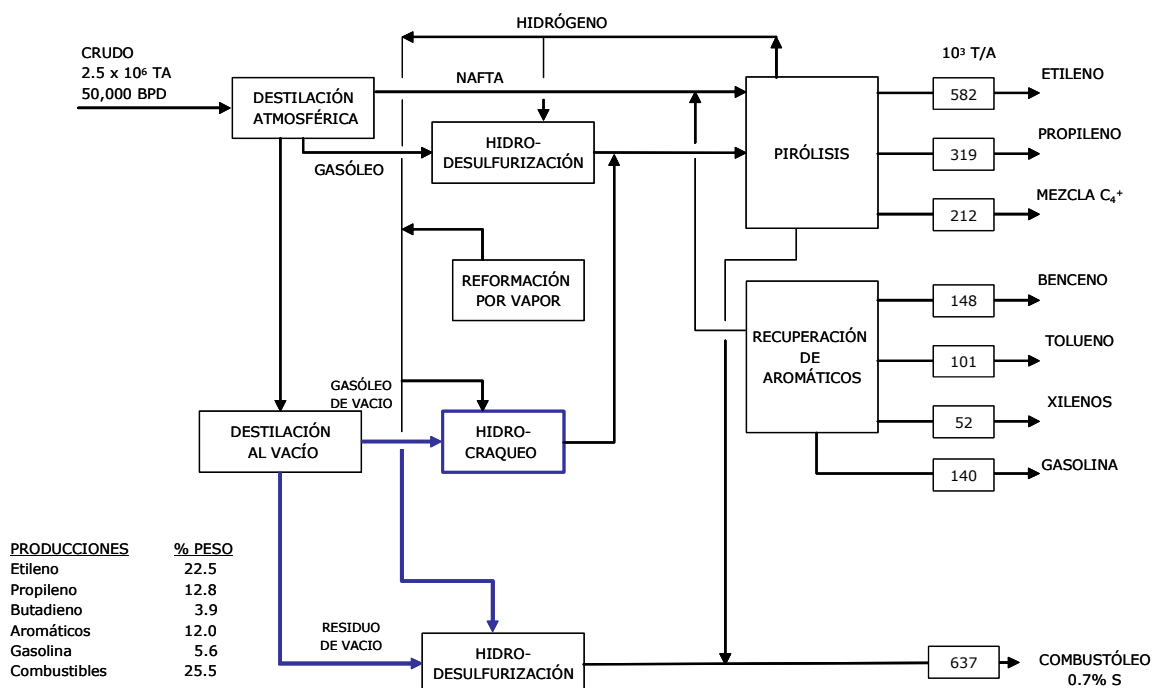


Figura 13. ap. II. Esquema de configuración 5

Se asume que la unidad de hidrodesulfurización de gasóleo de vacío opera bajo severidad moderada y bajo consumo de hidrógeno. Sin embargo se podría diseñar una unidad de hidrodesintegración que procesara tanto los gasóleos atmosféricos como los de vacío para convertirlos en naftas; en tal caso, el incremento en la producción de petroquímicos sería substancial.

El esquema de hidrodescomposición representa la única ruta de procesamiento viable para crudos pesados con alto contenido de azufre, los cuales en cualquier caso requerirán la desulfurización del gasóleo, y sin posterior conversión daría una producción baja de destilados.

9.6 Configuración 6: Destilación atmosférica y vacío, conversión de residuo, hidrodesintegración y pirólisis para combustibles y petroquímicos

La Figura 14. ap. II muestra un complejo diseñado para obtener un máximo de petroquímicos y un mínimo de productos combustibles.

Los fondos de la torre de vacío son hidrotratados severamente para lograr una máxima conversión de destilados. Se han alcanzado conversiones hasta un 70% de fondos de vacío o destilados por medio de unidades de conversión de residuo.

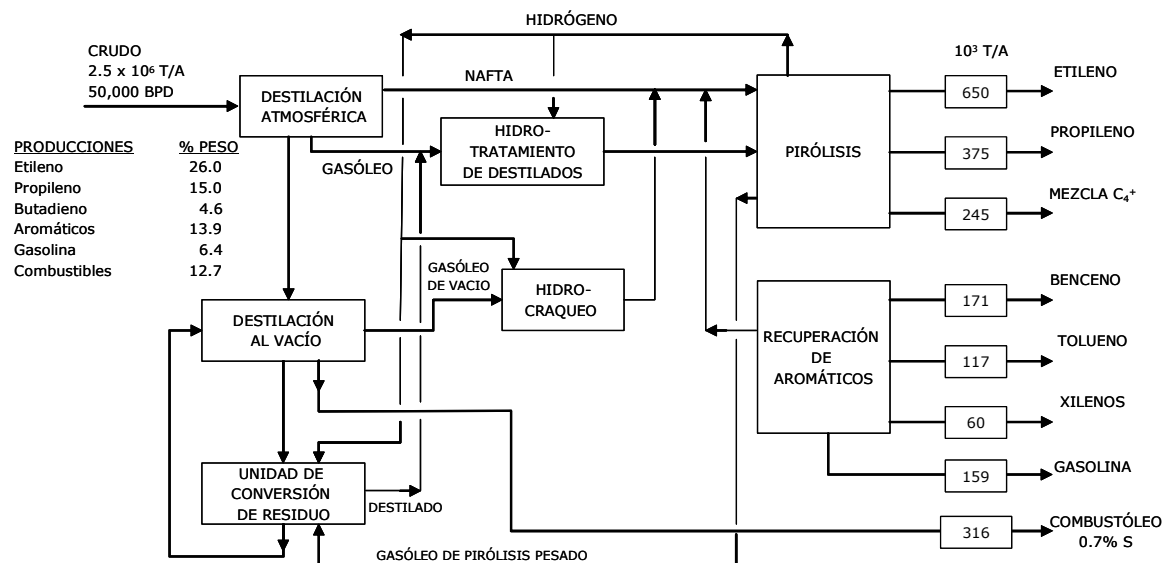


Figura 14. ap. II. Esquema de configuración 6

Los gasóleos, virgen y de vacío se desintegran en una unidad de hidrodesintegración convencional para saturar con hidrógeno el insumo de la planta de pirólisis. La mezcla resultante contiene nafta virgen e hidrodesintegrada, gasóleo virgen e hidrodesintegrado y algunos otros materiales ligeros. Con estos insumos la operación de pirólisis se lleva a cabo con máxima eficiencia.

Debido a su alto contenido de hidrógeno, los materiales hidrotratados en particular, representan una materia prima adecuada para la unidad de pirólisis.

El combustóleo pesado proveniente de la planta de pirólisis, que es una materia deseable para la producción de carbón de alta pureza y una materia prima aceptable para la fabricación de negro de humo, puede ser recirculado a la unidad de desintegración de residuo para estabilización y preparación como combustóleo, que puede destinarse a la venta.

La configuración 6 produce el mayor rendimiento de productos petroquímicos con 59%. El rendimiento de 26% de etileno, por si solo, es comparable con los rendimientos para otros

procesos modernos de desintegración de crudo. El rendimiento de subproductos también es superior al obtenido con las otras configuraciones.

9.7 Consideraciones generales relacionadas a los procesos de desintegración

La severidad del proceso es un parámetro importante en la operación de hidrodesintegración. Una severidad elevada puede llevar a una conversión total de los gasóleos tanto de vacío como atmosférico a gasolinas con alto contenido de parafínicos.

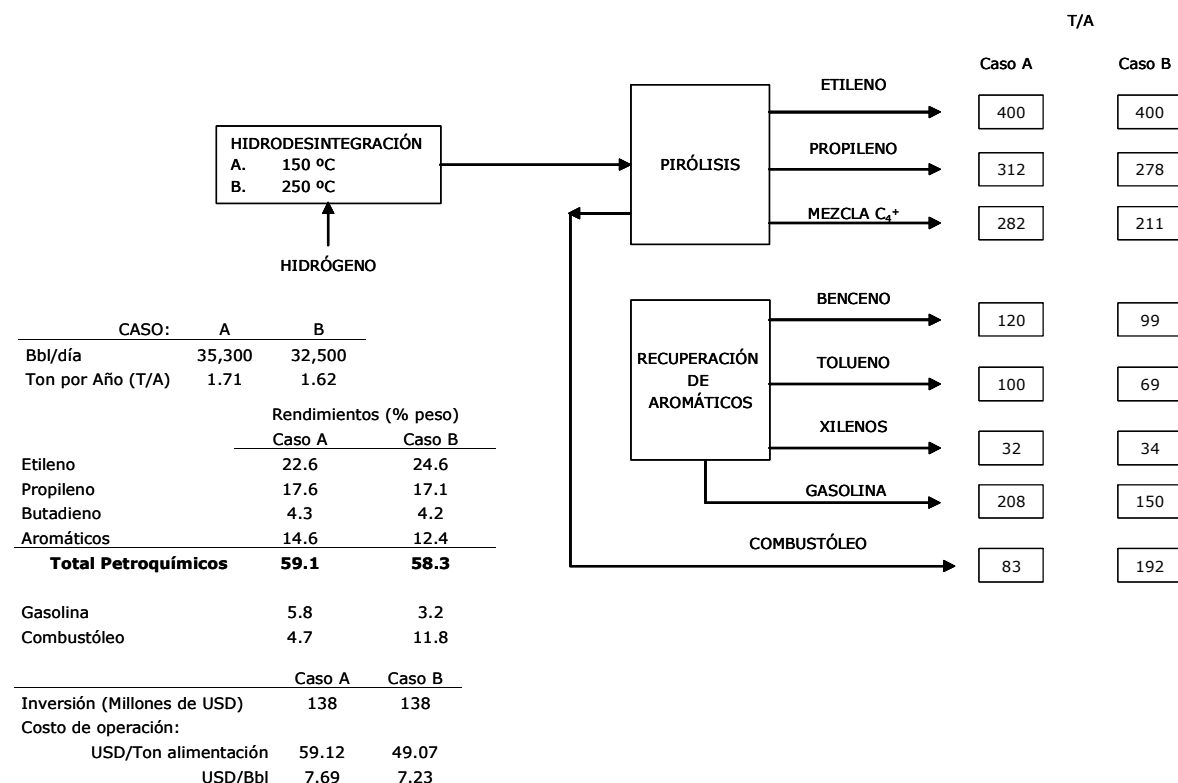


Figura 15. ap. II. Efecto de los cambios de severidad en la hidrodesintegración

La Figura 15. ap. II muestra una configuración muy simple de una unidad de hidrodesintegración para gasóleos de vacío, seguida por una unidad de pirólisis. En la misma figura, también se muestra el rendimiento de petroquímicos para dos grados de severidad diferentes.

En el primer caso, el gasóleo de vacío es desintegrado a gasóleo atmosférico y componentes ligeros; en el segundo caso a gasolina y materiales ligeros. Los resultados obtenidos muestran que los materiales hidrodesintegrados ligeros tienen un rendimiento menor de etileno y solamente el rendimiento global de petroquímicos es levemente superior al obtenido cuando se utiliza la materia prima más pesada.

Este fenómeno se explica fácilmente debido al hecho de que el material ligero tiene un alto contenido de isoparafinas, que no son una materia prima muy adecuada para la pirólisis, debido a su bajo contenido de aromáticos.

Dadas las desventajas relativas al rendimiento, y los altos costos de inversión, las altas severidades en la hidrodesintegración no son una alternativa económicamente atractiva en la producción de olefinas de crudo o gasóleo de vacío.

9.8 Rendimientos de productos petroquímicos a partir del tipo de crudo

No todos los tipos de crudo son igualmente adecuados para la producción de petroquímicos. En general, los crudos ligeros parafínicos son los más deseables para la producción de olefinas, mientras que los crudos nafténicos son más aprovechables en un esquema de refinación típico.

En la Tabla 10. ap. II se presentan los rendimientos de productos petroquímicos obtenidos con la configuración más simple aquí descrita, que consiste en una destilación atmosférica y en la pirólisis de gasóleo, cuando se utilizan dos tipos diferentes de crudo. El crudo ligero produce con esta configuración, 13% más de petroquímicos que el crudo pesado, como consecuencia de los diferentes contenidos de hidrógeno. Al mismo tiempo, la inversión requerida para procesar el crudo pesado es superior que para el ligero.

**Tabla 10. ap. II. Petroquímicos obtenidos a partir del crudo
(Pirólisis de nafta y gasóleo atmosférico)**

CRUDO	LIGERO (Tipo Istmo)	PESADO (Tipo Maya)
Rendimiento (% Peso)		
Etileno	15.3	14.2
Propileno	9.4	8.0
Butadieno	2.4	2.2
Aromáticos	7.5	6.2
Total Petroquímicos	34.6	30.6
Gasolina	3.8	2.8
Combustóleo	49.8	53.8
Inversión total y con Capacidad de 2.5 x 10 ⁶ Ton/año.	203x10 ⁶ U.S.D.	232x10 ⁶ USD

9.9 Productos deseables

Un factor importante en la selección de la secuencia adecuada del proceso, es conocer la gama de productos petroquímicos deseados. Mientras que las olefinas, en particular el etileno son producidas por pirólisis, el proceso de reformado catalítico es el indicado cuando se requiere una cantidad sustancial de aromáticos.

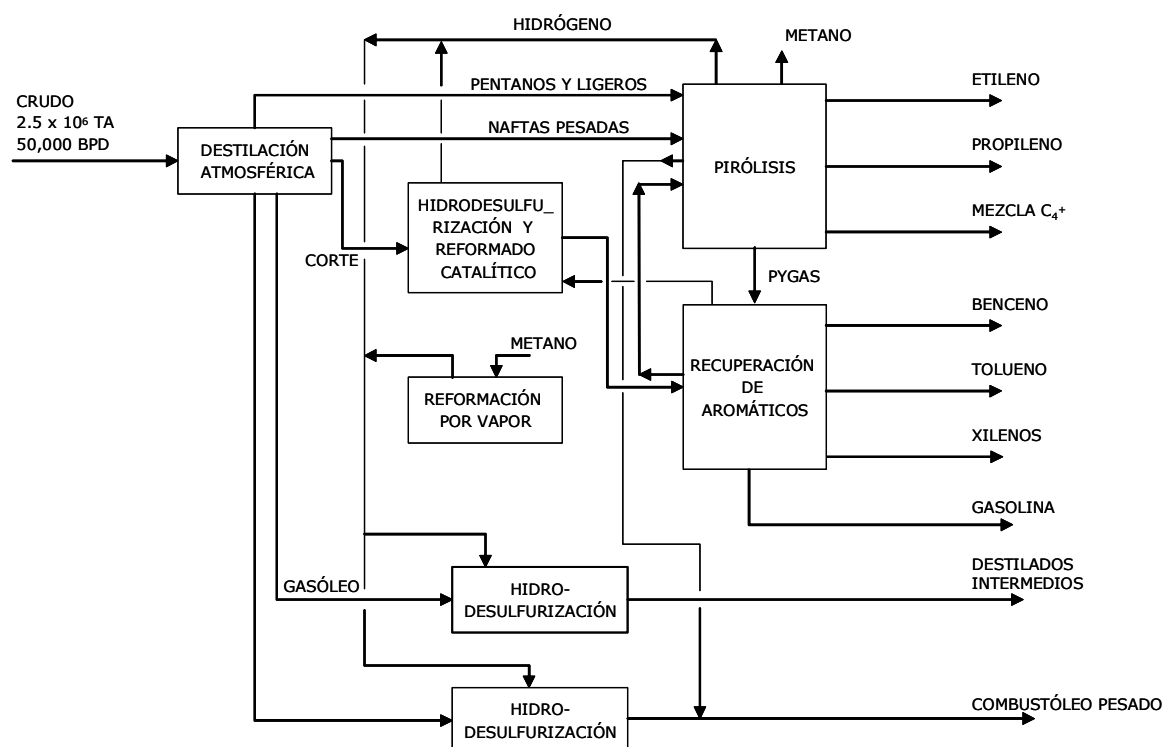


Figura 16. ap. II. Destilación atmosférica, reformado catalítico y pirólisis de nafta para combustibles y petroquímicos

La Figura 16. ap. II presenta una configuración similar a la Figura 9. ap. II (Configuración 1); no obstante a la primera en ésta se envía un corte de naftas C₆ – C₈ o C₆ - C₇ a una unidad de reformación catalítica.

Dependiendo de las condiciones de fraccionamiento y de reformado, es posible maximizar ya sea el rendimiento de olefinas, hasta 15% en peso (en el caso base), o el rendimiento total de aromáticos, a 10% en peso (con el corte de C₆ – C₈); finalmente el rendimiento global de olefinas y aromáticos (con el corte C₆ – C₇) hasta casi el 22% en peso.

9.10 Inversiones

La Tabla 11. ap. II presenta el rendimiento de petroquímicos y productos combustibles que se obtienen por medio de las configuraciones 1 a 6. Este cuadro contiene también la inversión total para las diferentes configuraciones.

En la Tabla 12. ap. II se encuentran la inversión total requerida para las diferentes configuraciones (de la 1 a la 6).

La inversión estimada incluye la ingeniería básica, excluyéndose los derechos por regalías. Se incluyen igualmente los costos referentes a calderas para la generación de vapor y torres de enfriamiento.

Tabla 11. ap. II. Producción de petroquímicos a través de pirólisis y reformado catalítico

	Total de Nafta a Pirólisis.	Corte de C ₆ – C ₈ a reformado catalítico.	Corte de C ₆ – C ₇ a Desintegración catalítica.
Rendimiento % en Peso.			
Etileno	6.8	6.6	7.2
Propileno	4.6	3.8	4.3
Butadieno	1.5	0.8	1.0
Benceno	2.4	2.5	3.0
Tolueno	1.7	3.4	4.5
Xilenos	1.8	4.2	1.8
Total de olefinas	14.8	11.2	12.5
Total de aromáticos	4.9	10.1	9.3
Total de petroquímicos	19.7	21.3	21.8

Tabla 12. ap. II. Productos petroquímicos obtenidos del crudo

Configuración	1	2	3	4	5	6
Pirólisis	Nafta	Nafta y GOLA ¹⁴	Nafta, GOLA y GOLV ¹⁵	Nafta y GOLA	Nafta y GOLA	Nafta y GOLA
Unidad de conversión				FCC	HDS ¹⁶ de GOLV	Conversión de residuo y HDS de GOLV
Producción (%peso)						
Etileno	8.7	16.1	18.3	18.9	22.5	26.0
Propileno	4.6	9.1	11.0	12.9	12.8	15.0
Butadieno	1.5	2.8	3.4	3.1	3.9	4.6
Aromáticos	4.9	8.2	9.7	14.4	12.0	13.9
Total de Petroquímicos	19.7	36.2	42.4	49.3	51.2	59.5
Gasolina	2.3	3.9	4.7	8.4	5.6	6.4
Producción de combustibles	69.8	47.6	38.3	22.6	25.5	12.6
Inversión total, Millones de USD	346.5	450.4	517.4	570.6	595.9	686.1

¹⁴ GOLA = Gasóleo atmosférico.

¹⁵ GOLV = Gasóleo de vacío.

¹⁶ HDS = Hidrodesintegradora.

10 Bibliografía

- [1] C. García Aranda, "Análisis de exergía y desarrollo sustentable: Ejercicio de evaluación para una planta de amoníaco," in *Departamento de Ingeniería Química*. vol. Maestría en Ingeniería (Procesos) D.F., México: Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Química., 2003.
- [2] M. E. Mogee, "Patent analysis methods in support of licensing," in *the Annual Meeting of the Technology Transfer Society*, Denver, CO, 1997.
- [3] R. Galvin, "Science roadmaps," *Science*, vol. 280, p. 803, 1998.
- [4] M. E. Mogee, "The Art and Science of Patent Analysis: 4 Reasons to Hire a Patent Consultant," in *the National Meeting of the American Chemical Society San Diego*, California, U.S.A., 2001.
- [5] R. A. Meyers, Ed., *Handbook of petroleum refining processes*, 2nd. ed. USA: McGraw-Hill, 1997.
- [6] P. K. Niccum, R. B. Miller, A. M. Claude, M. A. Silverman, N. A. Bhore, K. Liu, G. K. Chitnis, and S. J. McCarthy, "MAXOFIN: A novel FCC process for maximizing light olefins using a new generation os ZSM-5 additive," in *NPRA Annual Meeting*, San Francisco, 1998.
- [7] C. Escobar Toledo and R. F. López Serrano, "Polietileno de alta densidad. Basell y Univation como licenciadores," Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Química., D.F., México 5 de Septiembre 2002.
- [8] M. Kart Store, A. Abrahams, and A. Rhoe, "More petrochemicals from crude," *Hydrocarbon Processing*, vol. Noviembre, pp. 157-166, 1974.
- [9] C. Escobar Toledo, "Restitución del valor agregado de la Industria Petroquímica en México: Relaciones entre la política energética y el desarrollo industrial," in *Energía, Reformas, Instituciones y Desarrollo en América Latina*, Universidad Nacional Autónoma de México, D.F., 2003.
- [10] H. Rodríguez, "Trayectoria Innovativa y Estrategias Tecnológicas en los Procesos FCC: un Análisis de Patentes Otorgadas en Estados Unidos 1976-2000." vol. Maestría en Gestión y Usos de la Información D.F., México: Universidad Autónoma Metropolitana – Xochimilco y Facultad de Economía de la Universidad de la Habana, 2001.
- [11] "Consider improving refining and petrochemical integration as a revenue-generating option. FCC operations may be an increasing propylene source due to new processing methods," in *the NPRA Annual Meeting*, New Orleans, 2001.
- [12] M. E. Mogee, "Patent and Technology Intellegence," in *Keeping Abreast of Science and Technology*, A. Bradford and R. A. Klavans, Eds. U.S.A.: Battelle Press, 1998.
- [13] A. Bradford and R. A. Klavans, "An Introduction to Technical Intelligence," in *Keeping Abreast of Science and Technology*, A. Bradford and R. A. Klavans, Eds. U.S.A.: Battelle Press, 1998.
- [14] M. F. Gonzalo, I. G. Balseyro, J. Bonnardot, F. Morel, and P. Sarrazin, "Consider integrating refining and petrochemical operations," www.hydrocarbonprocessing.com.
- [15] www.osha.gov
- [16] www.uspto.gov.com

Apéndice III.

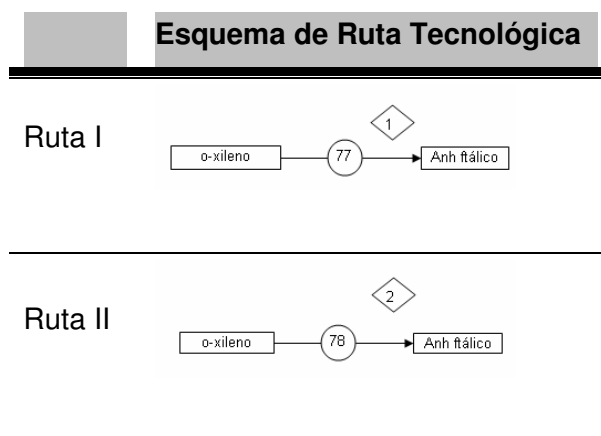
Información complementaria del Capítulo V.

1 Representación Gráfica de los petroquímicos seleccionados: De los petroquímicos finales a los básicos.

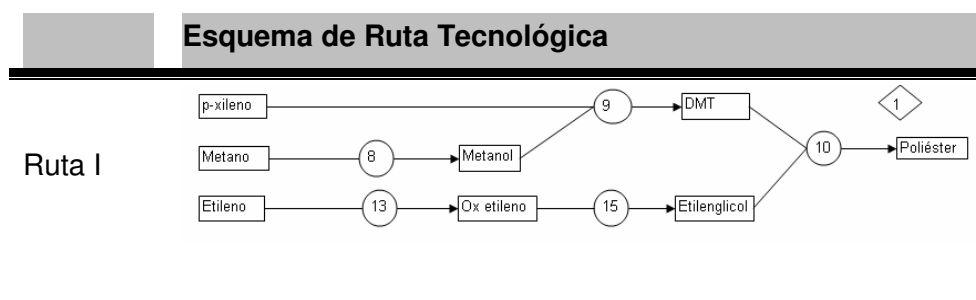
A continuación se presentan las diferentes rutas de proceso reportadas en la literatura para la elaboración de cada petroquímico final a evaluar en el caso de estudio (Capítulo V).

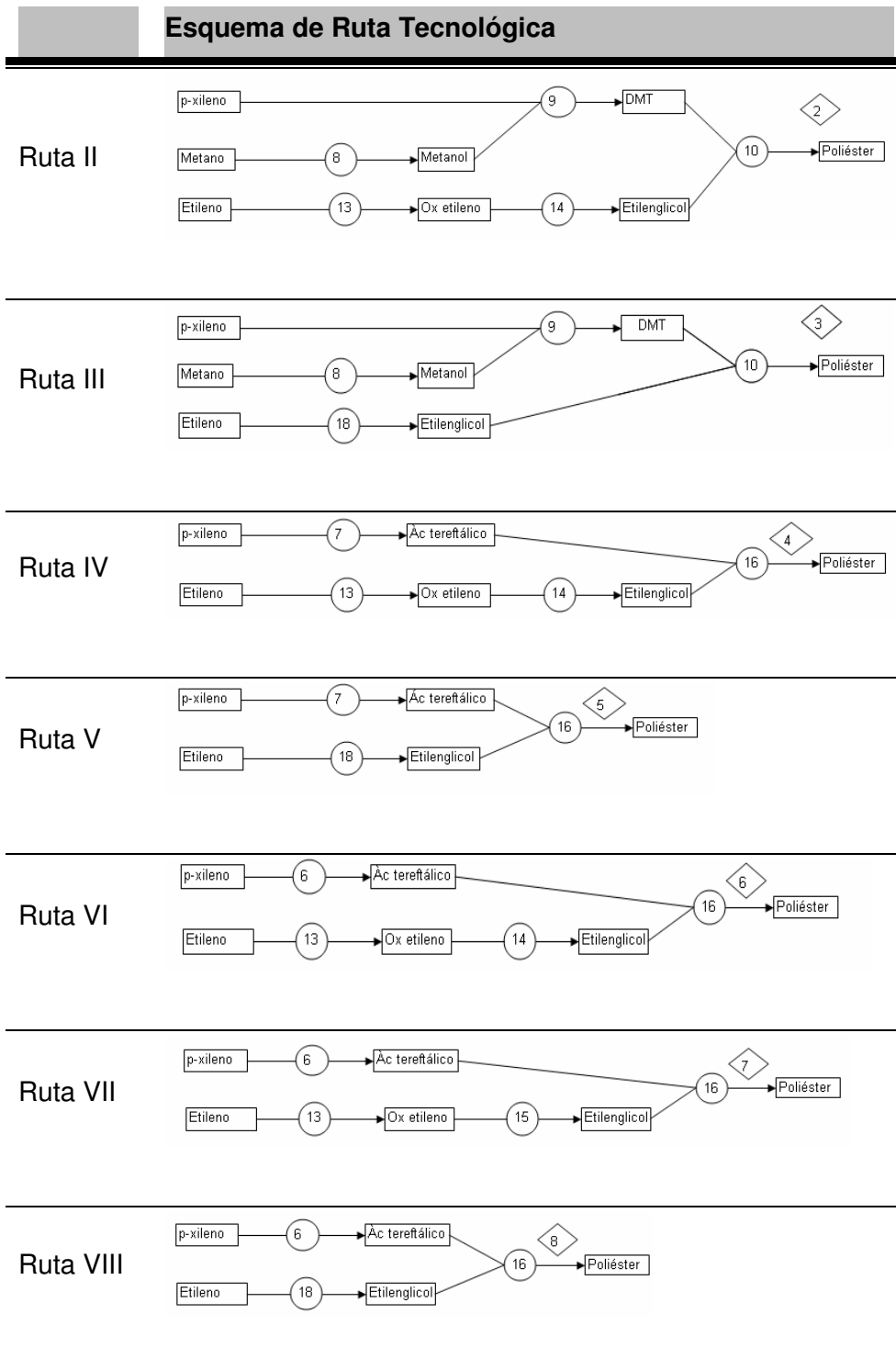
Interpretación de los diagramas. En los diagramas que se presentan a continuación, los rectángulos representan el nombre del compuesto químico, mientras que los círculos que contienen un número de ellos, representan el proceso de producción. El número dentro del rombo, indica el número del proceso que se encuentra en el PEP (*op.cit*) y que sirvió para construir el algoritmo de recorrido.

1.1 Anhídrido Ftálico

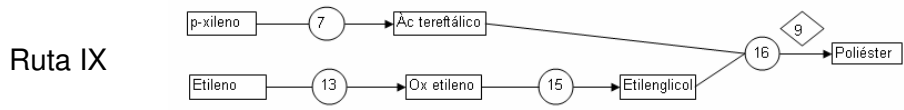


1.2 Fibras Poliéster



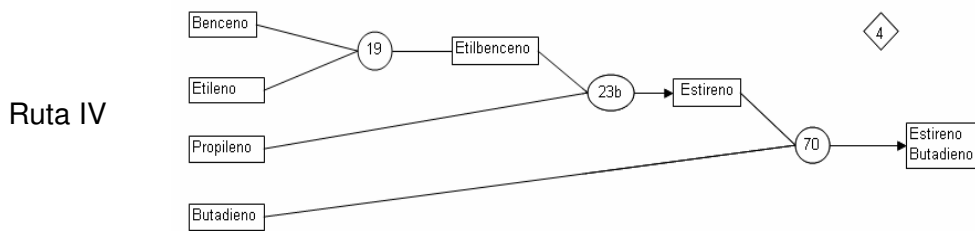
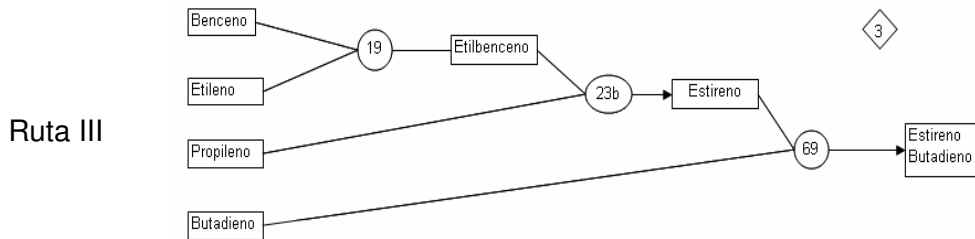
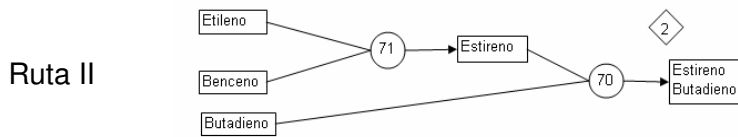
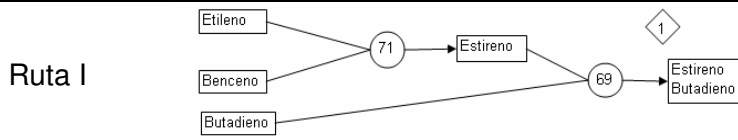


Esquema de Ruta Tecnológica

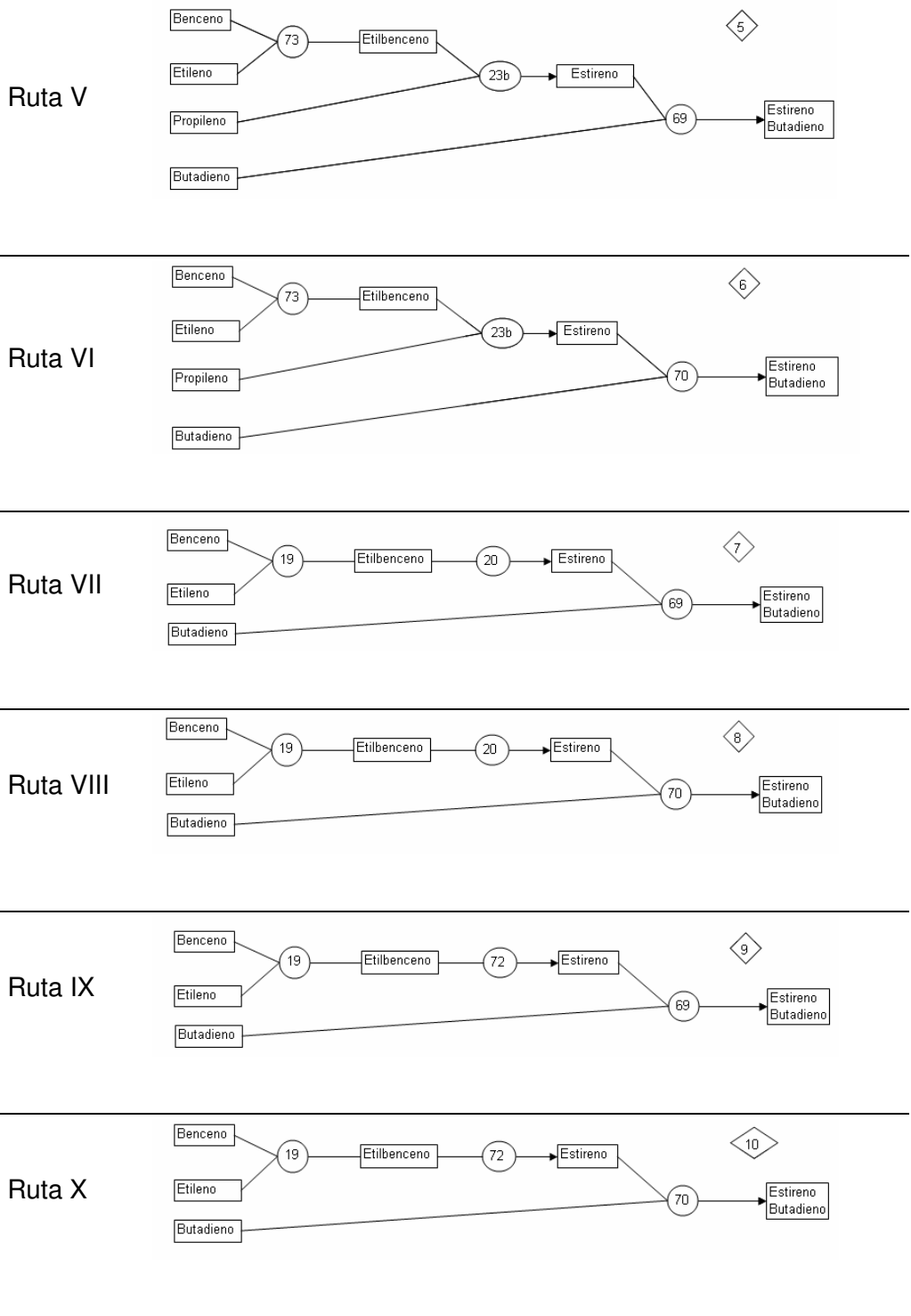


1.3 Hule Estireno Butadieno

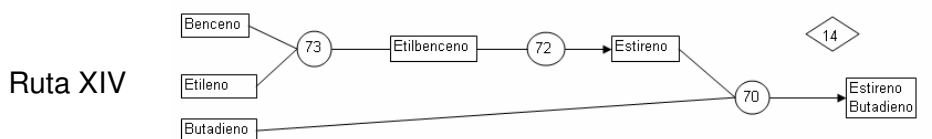
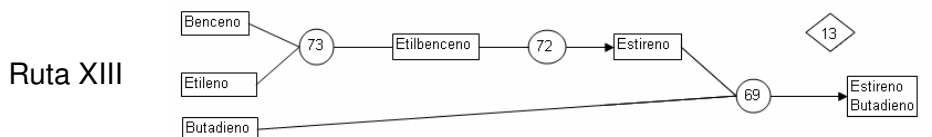
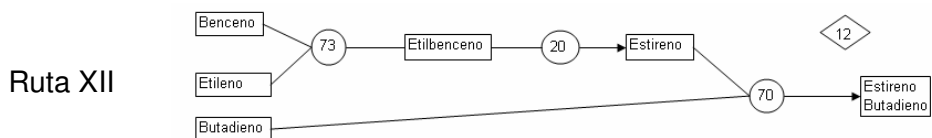
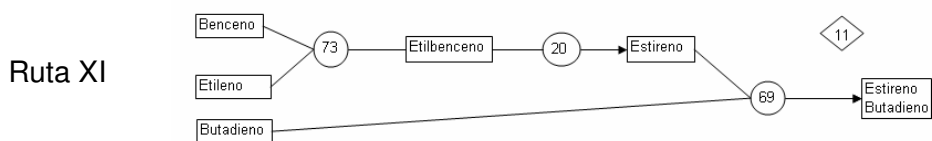
Esquema de Ruta Tecnológica



Esquema de Ruta Tecnológica

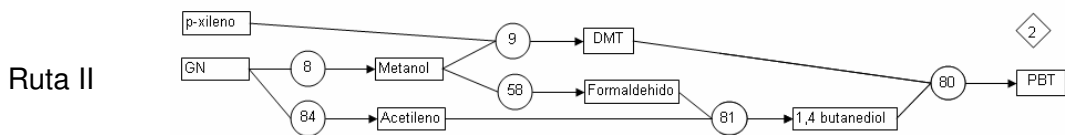
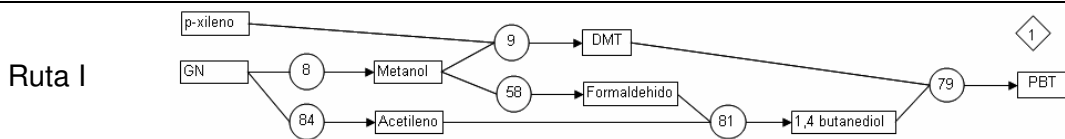


Esquema de Ruta Tecnológica

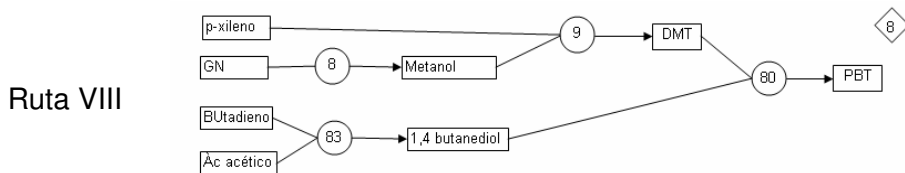
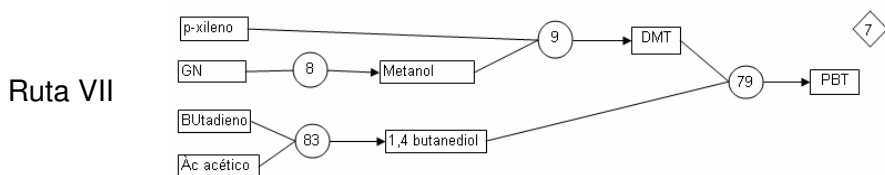
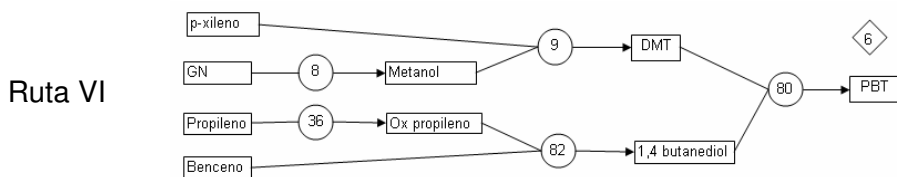
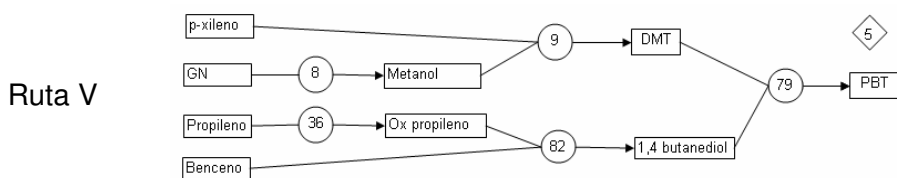
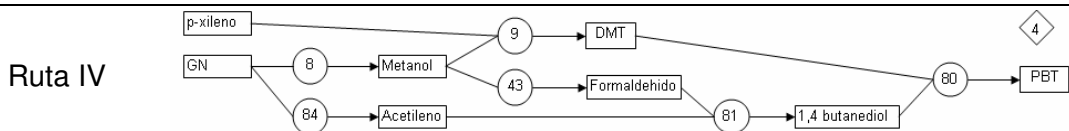
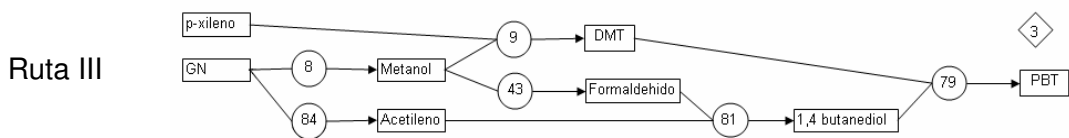


1.4 Poli(tereftalato de butileno)

Esquema de Ruta Tecnológica

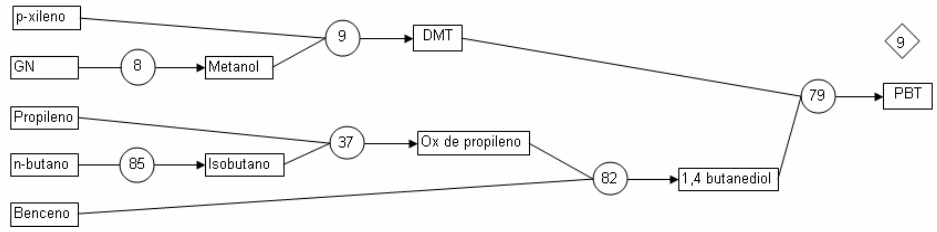


Esquema de Ruta Tecnológica

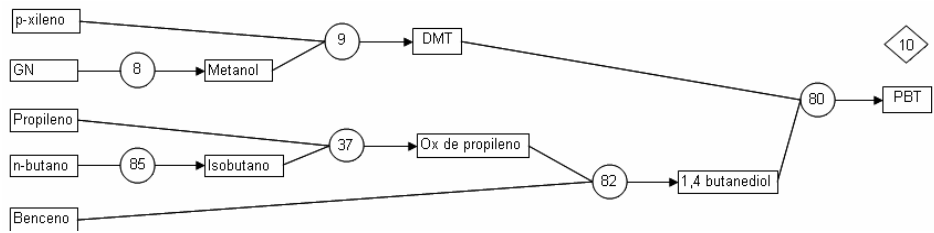


Esquema de Ruta Tecnológica

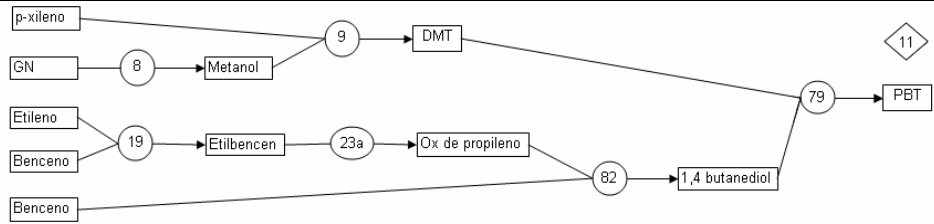
Ruta IX



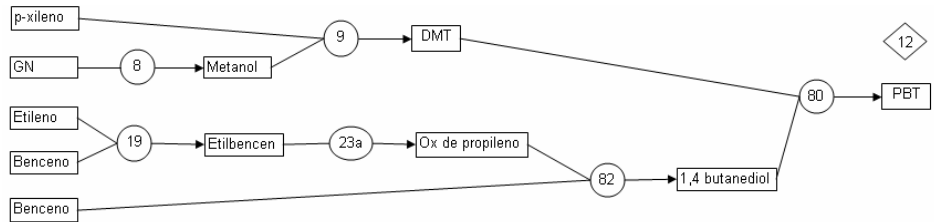
Ruta X



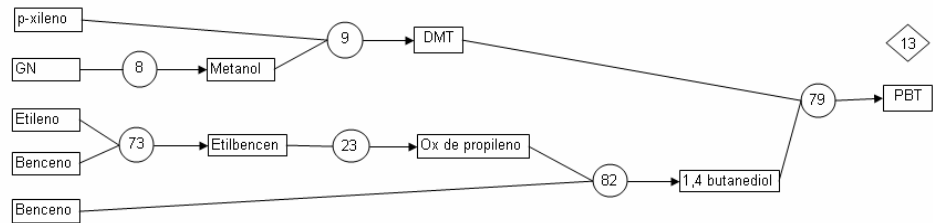
Ruta XI



Ruta XII

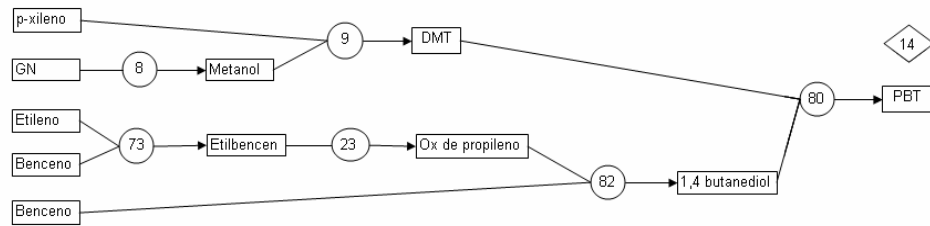


Ruta XIII



Esquema de Ruta Tecnológica

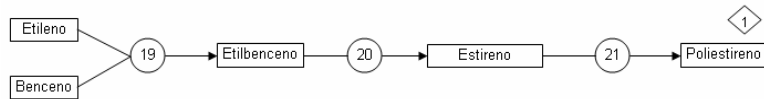
Ruta XIV



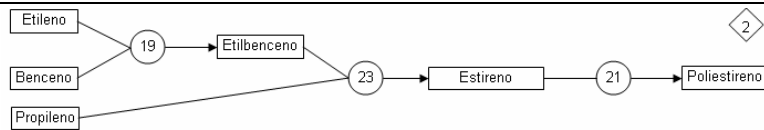
1.5 Poliestireno normal y expandido

Esquema de Ruta Tecnológica

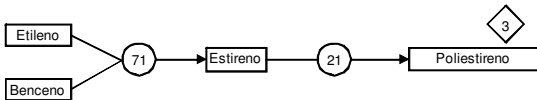
Ruta I



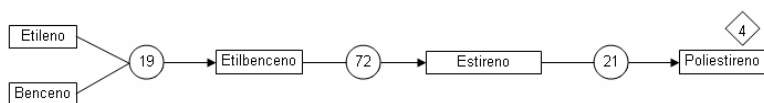
Ruta II



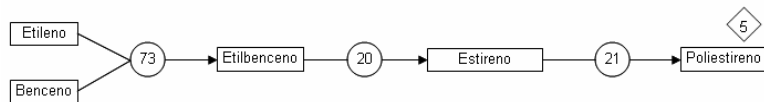
Ruta III



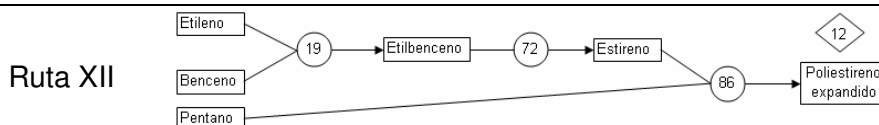
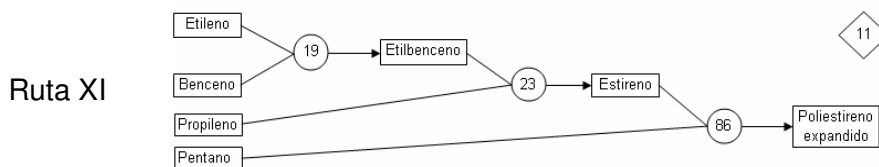
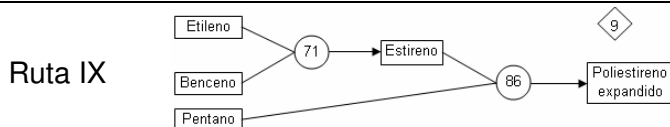
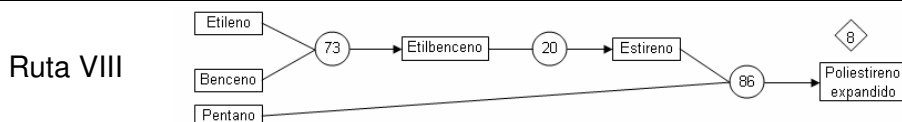
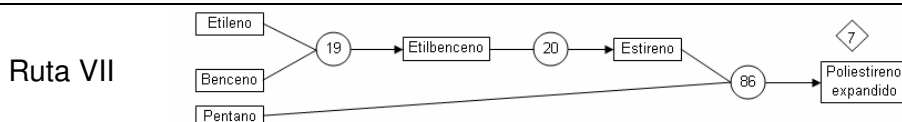
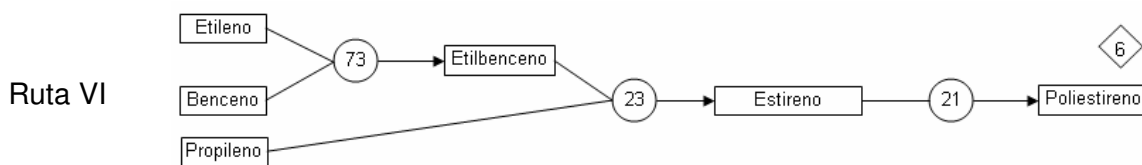
Ruta IV



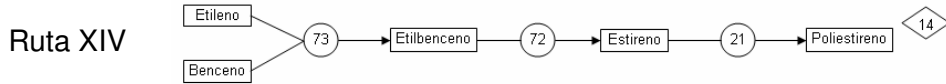
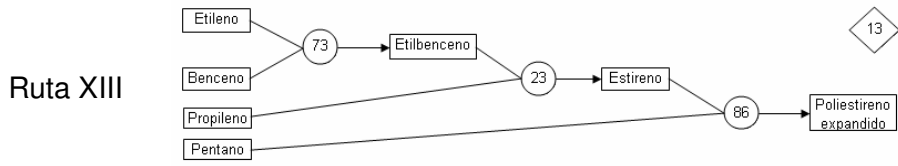
Ruta V



Esquema de Ruta Tecnológica

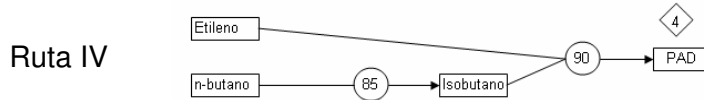
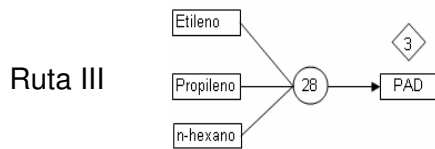
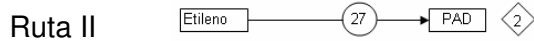


Esquema de Ruta Tecnológica

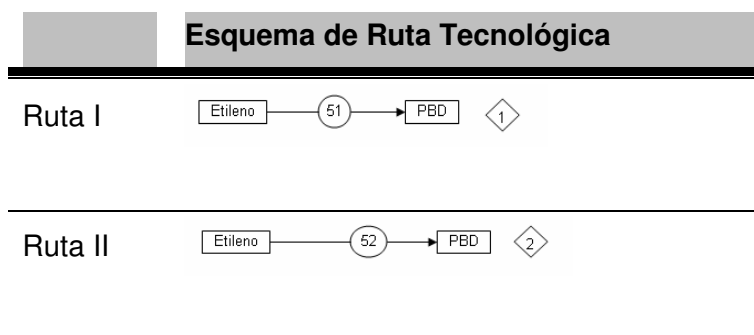


1.6 Polietileno de alta densidad

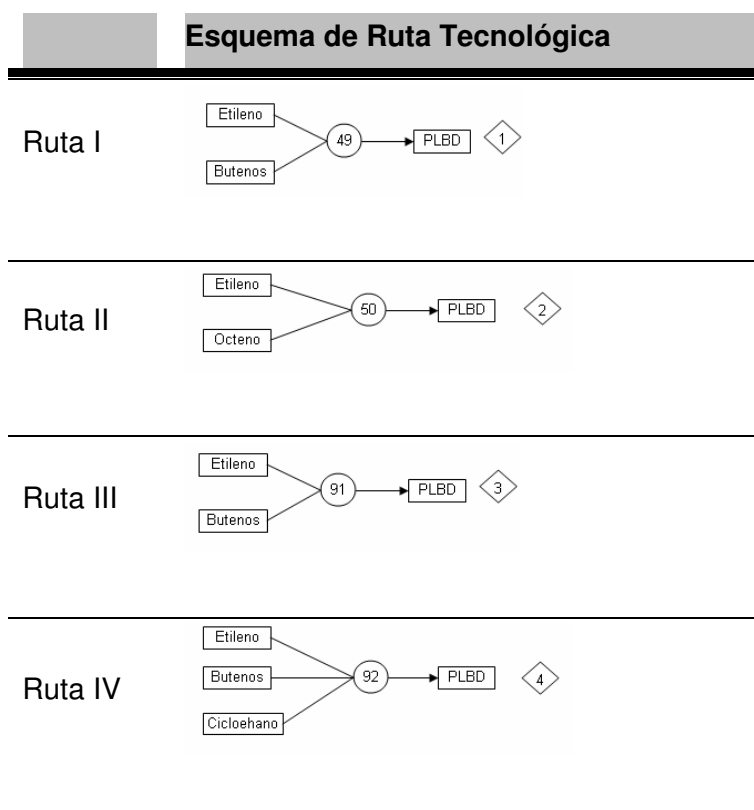
Esquema de Ruta Tecnológica



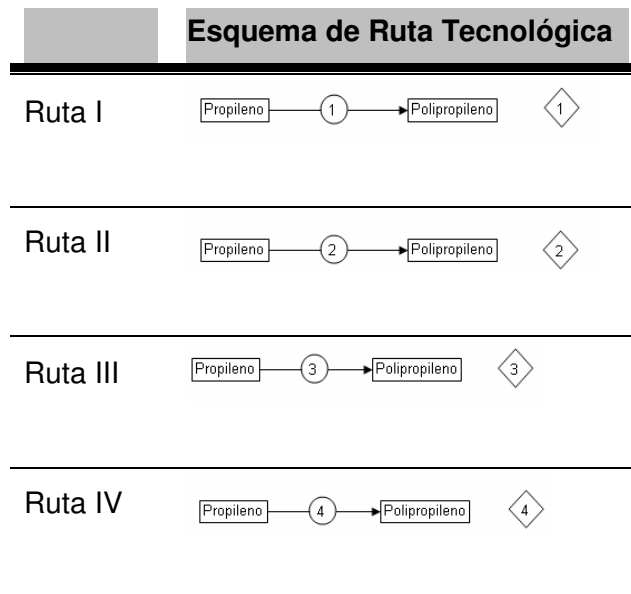
1.7 Polietileno de baja densidad



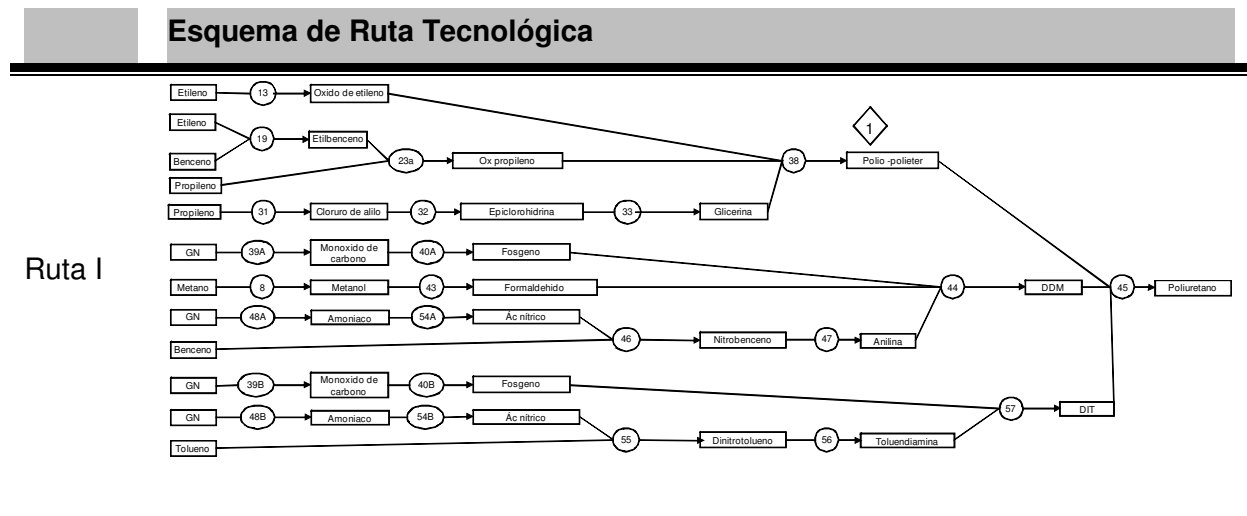
1.8 Polietileno lineal de baja densidad



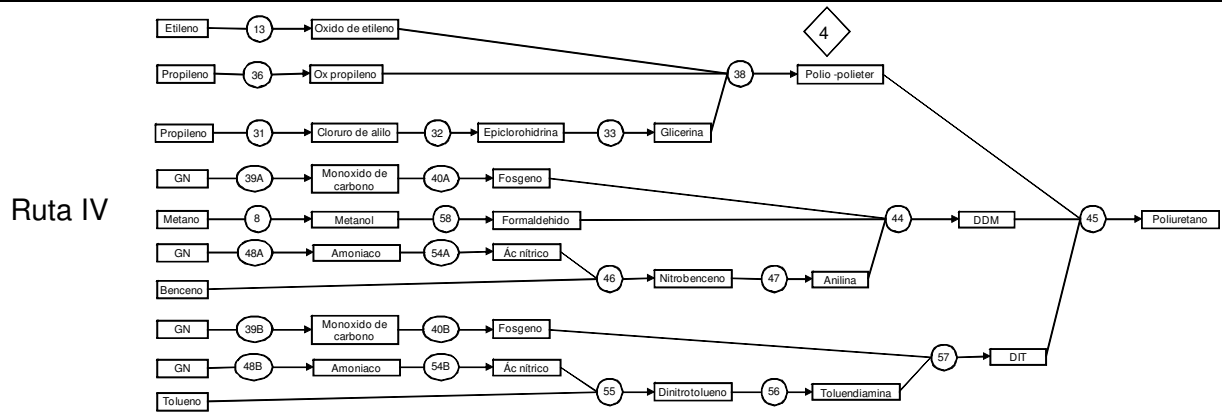
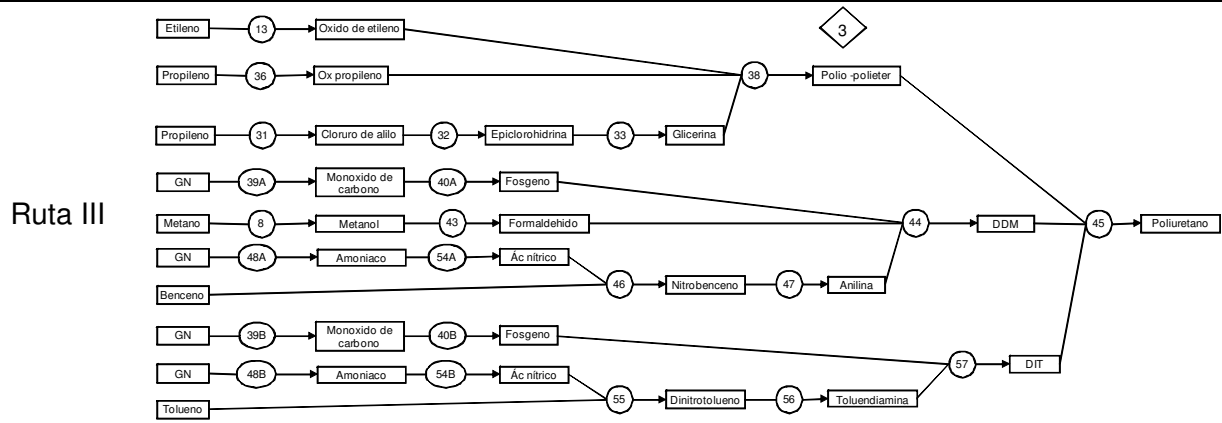
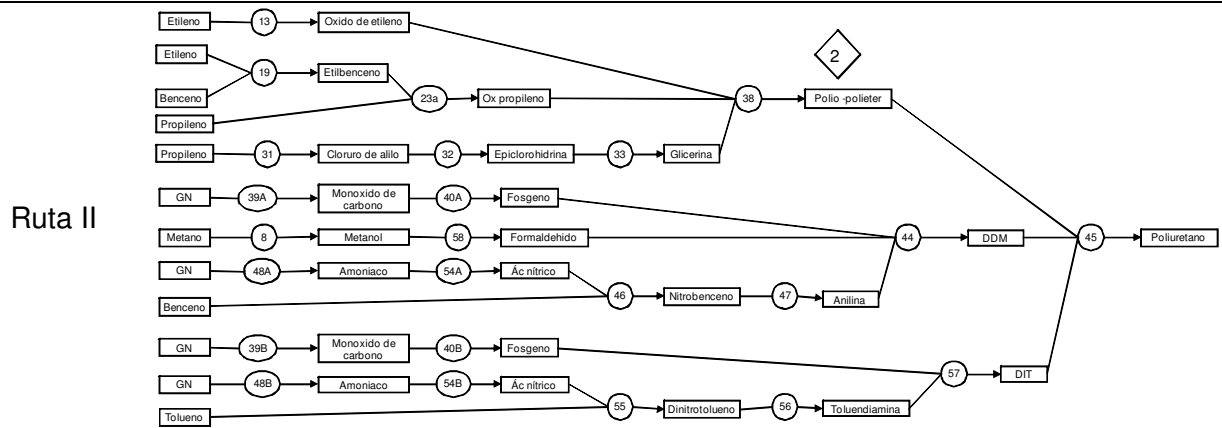
1.9 Polipropileno



1.10 Poliuretano

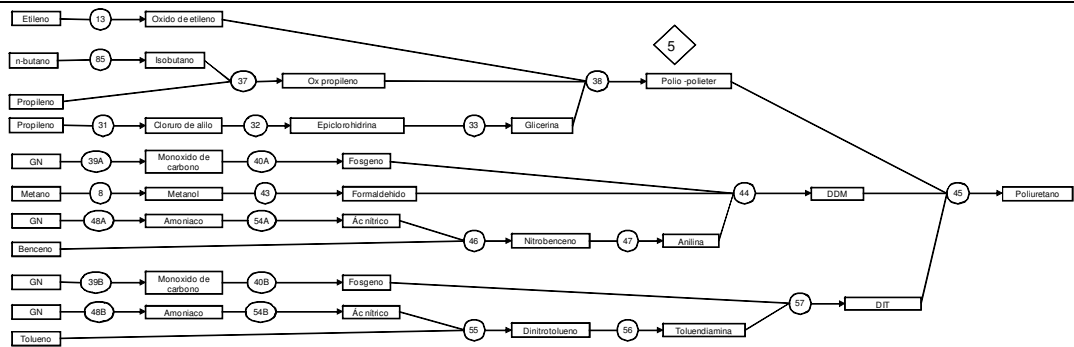


Esquema de Ruta Tecnológica

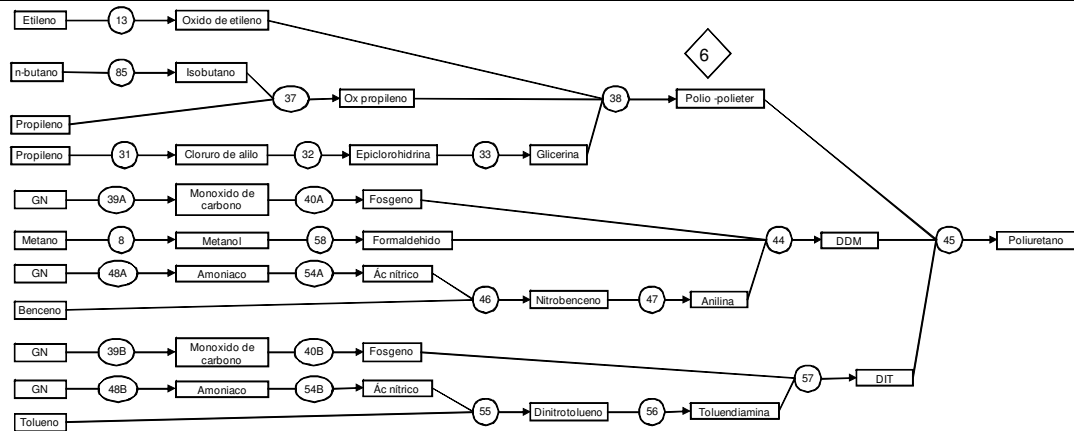


Esquema de Ruta Tecnológica

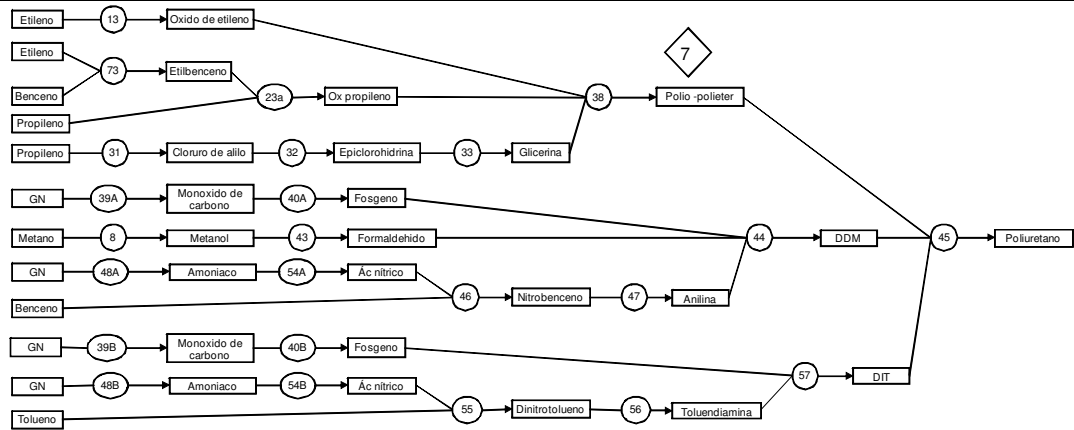
Ruta V



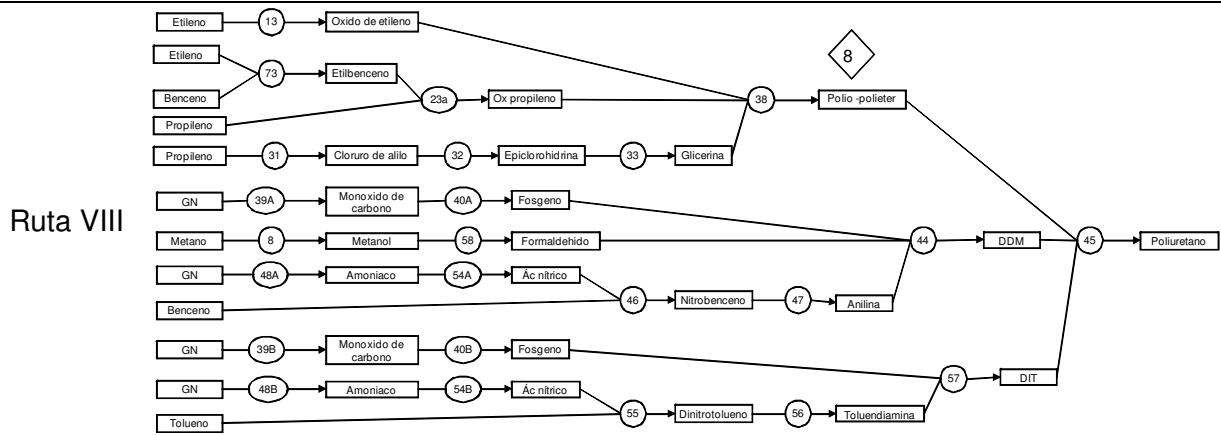
Ruta VI



Ruta VII

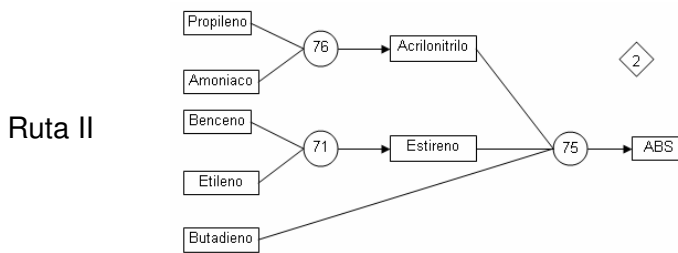
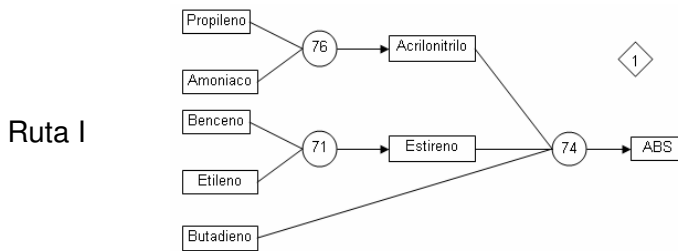


Esquema de Ruta Tecnológica

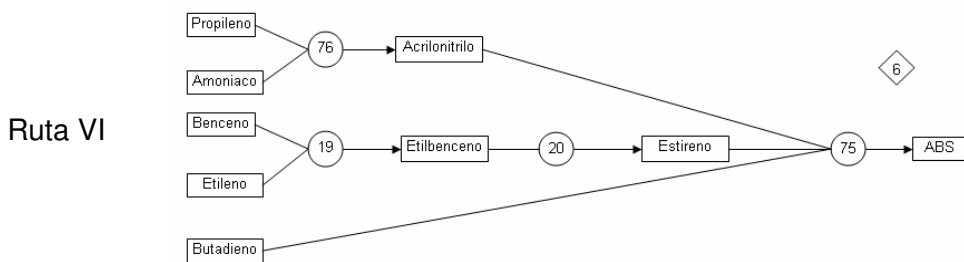
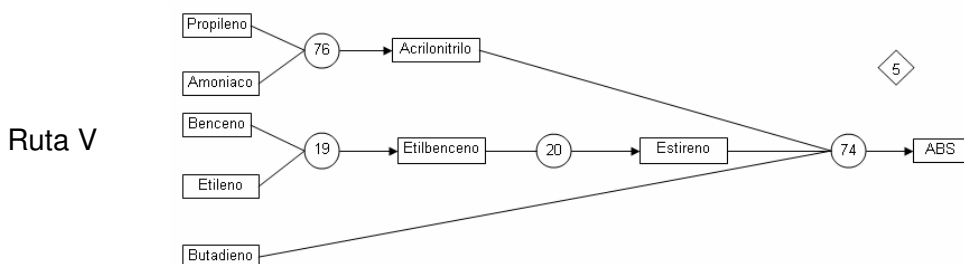
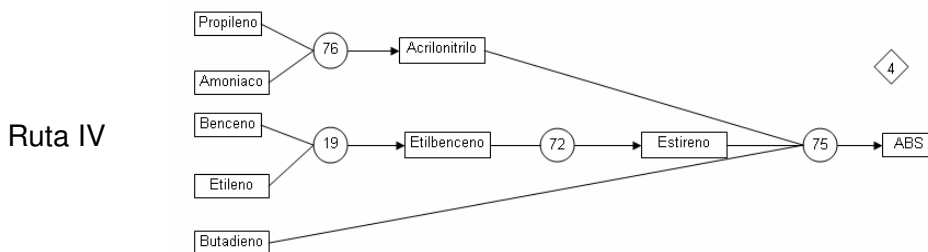
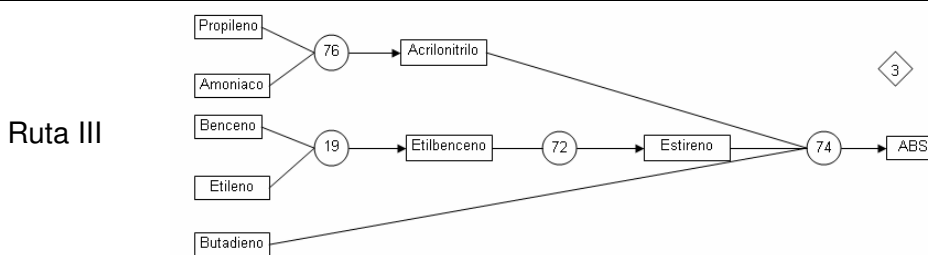


1.11 Resinas ABS-SAN

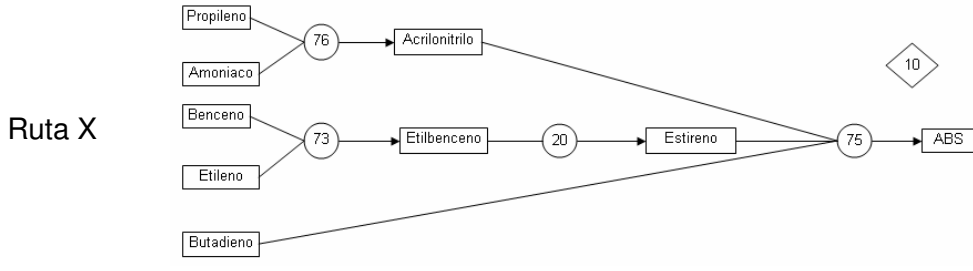
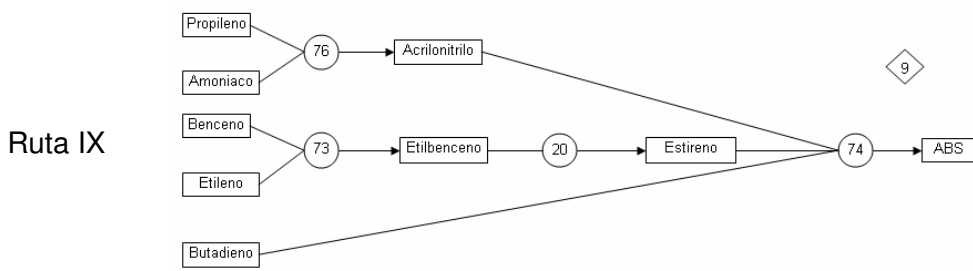
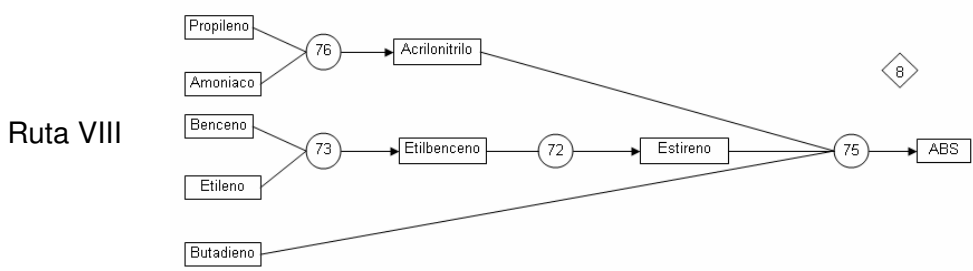
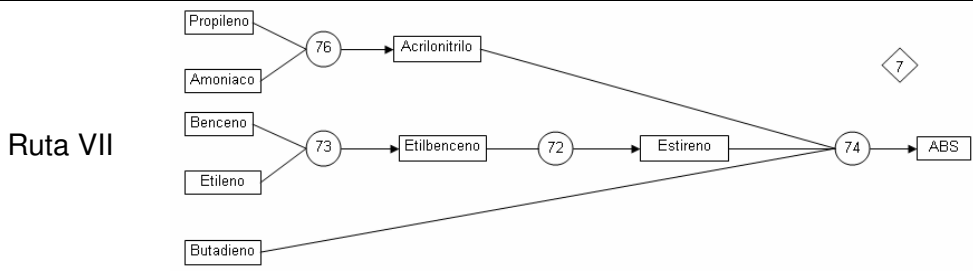
Esquema de Ruta Tecnológica



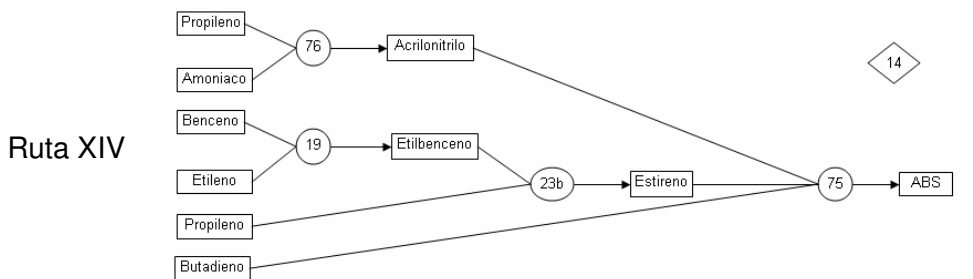
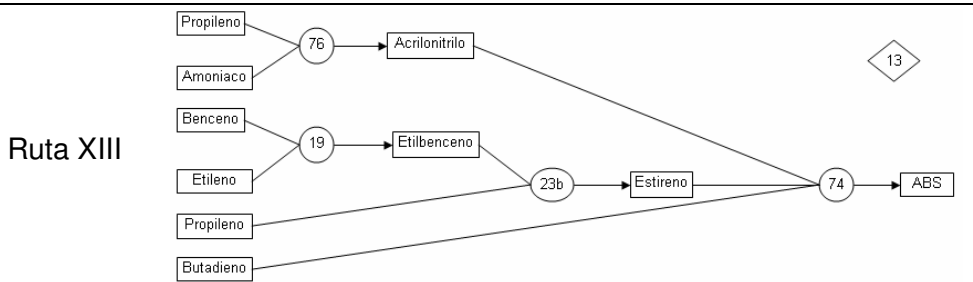
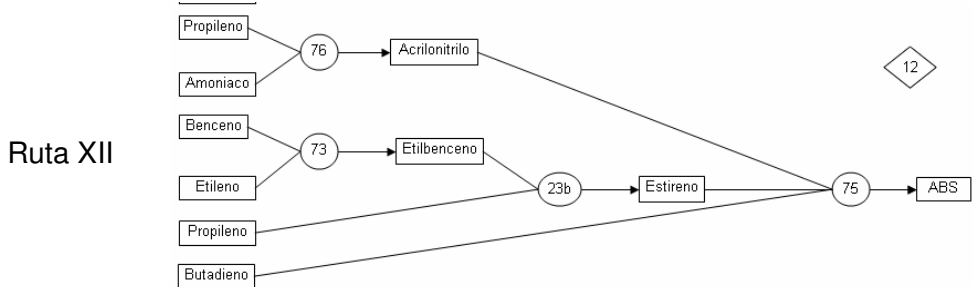
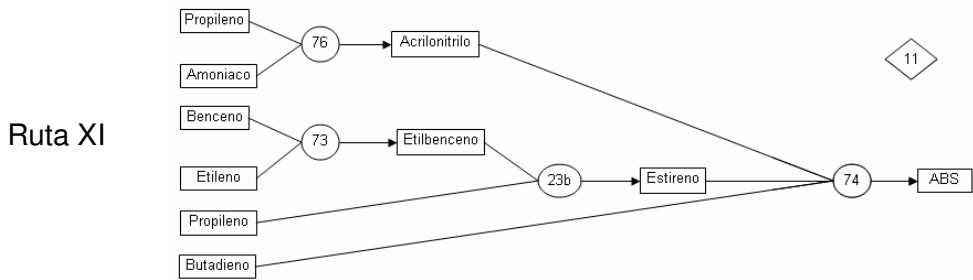
Esquema de Ruta Tecnológica



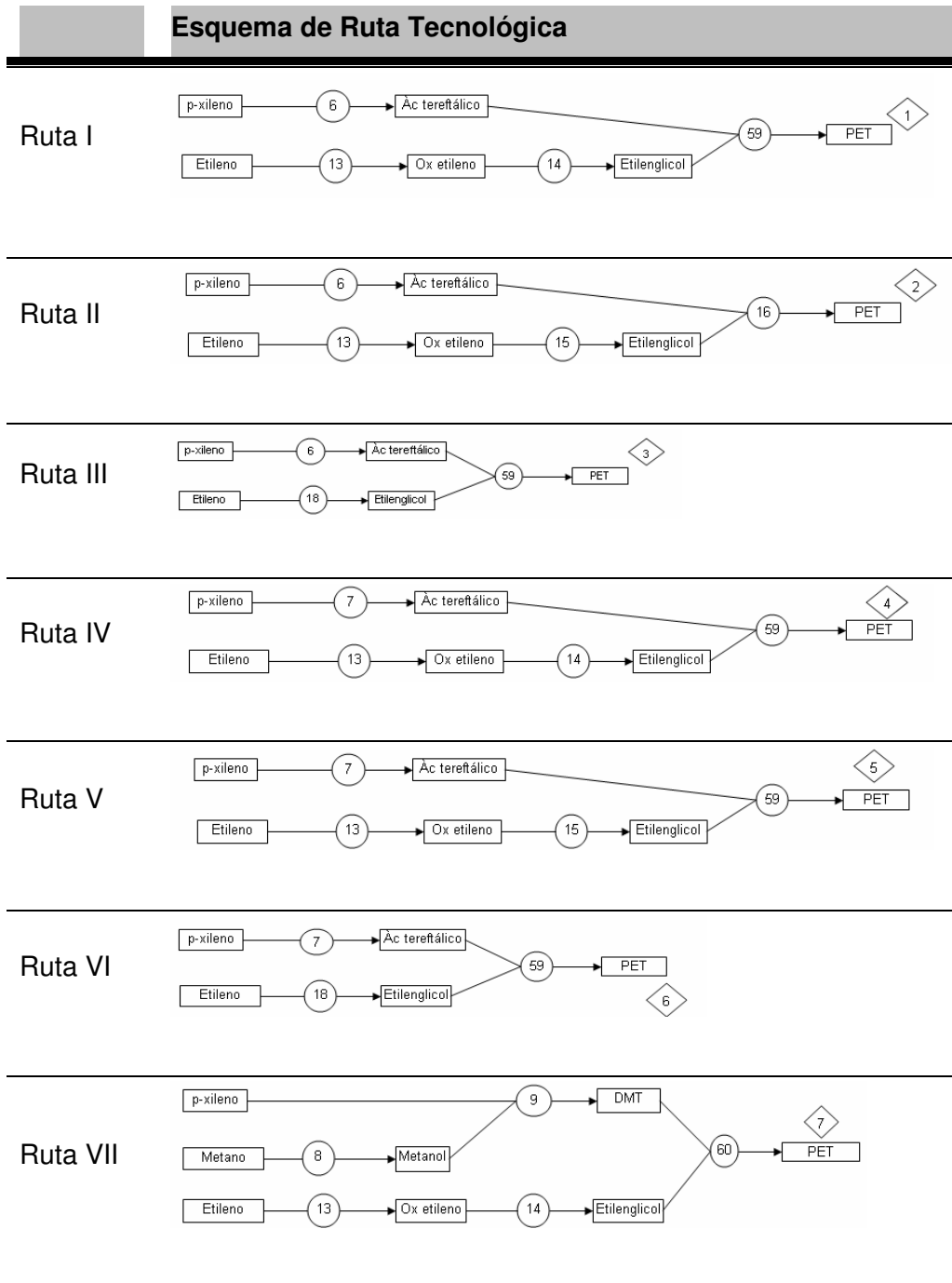
Esquema de Ruta Tecnológica

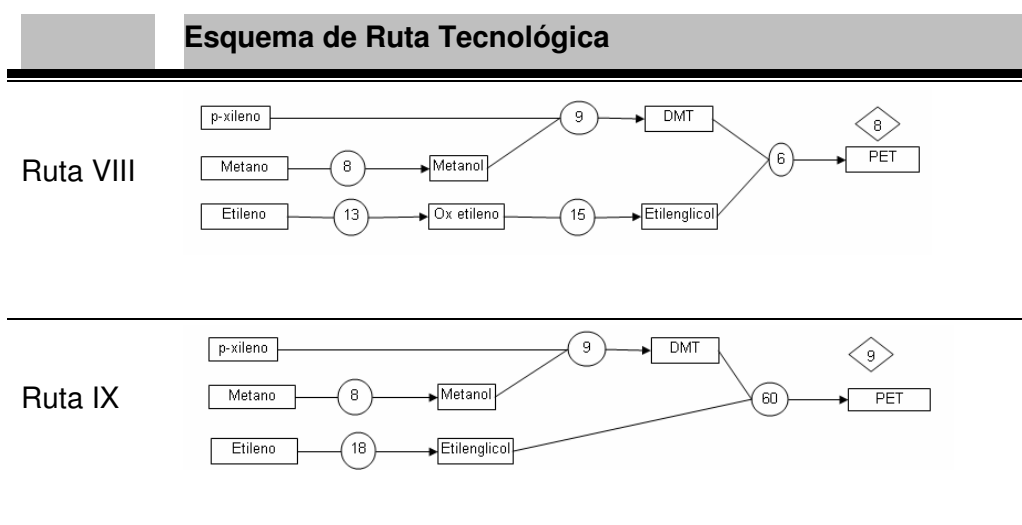


Esquema de Ruta Tecnológica



1.12 Resinas de Poli(tereftalato de etileno) (PET)





2 Resultados de la evaluación de la mejor ruta de proceso para cada petroquímico final para cada periodo del Horizonte de Planeación, mediante la aplicación de PROMETHEE II

A continuación se presentan los resultados obtenidos para las variables de coordinación utilizadas en el caso de estudio. Los valores para cada periodo del horizonte de planeación se obtuvieron a través del algoritmo de teoría de redes “cruzando los arcos” aplicado al caso de la industria petroquímica, y utilizando las rutas de proceso mostradas en el apartado 1 de este Apéndice. Recuérdese asimismo que los valores indicados en las Tablas 1, 2, 3 y 4. ap. III dependen de la demanda incremental entre periodos, por lo que obviamente los valores presentados, pueden ser diferentes de un periodo a otro.

Tabla 1. ap. III. Valor Agregado (USD/kg)

PQ Final	2009	2015	2021	2027
Anhídrido Ftálico	0.243	0.439	0.407	0.377
Fibras poliéster	0.938	0.941	0.794	0.670
Hule Estireno Butadieno	0.649	0.745	0.675	0.614
Poli(tereftalato de butileno)	1.487	1.788	1.524	1.302
Poliestireno	0.383	0.406	0.355	0.312
Polietileno de alta densidad	0.117	0.134	0.116	0.100
Polietileno de baja densidad	0.168	0.222	0.200	0.181
Polietileno lineal de baja densidad	0.156	0.140	0.106	0.080
Polipropileno	0.224	0.172	0.120	0.083
Poliuretano	1.802	2.609	2.247	1.941
Resinas ABS-SAN	0.422	0.473	0.406	0.346
Resinas de Poli(tereftalato de etileno)	0.579	0.870	0.820	0.773

Tabla 2. ap. III. Energía real por servicio (kcal/kg)

PQ Final	2009	2015	2021	2027
Anhídrido Ftálico	167.214	167.214	167.214	167.214
Fibras poliéster	2,255.389	2,255.389	2,255.389	2,255.389
Hule Estireno Butadieno	2,002.784	2,002.784	2,002.784	2,002.784
Poli(tereftalato de butileno)	2,569.233	2,569.233	2,569.233	2,569.233
Poliestireno	1,927.236	1,927.236	1,927.236	1,927.236
Polietileno de alta densidad	294.394	294.394	294.394	294.394
Polietileno de baja densidad	771.097	771.097	771.097	771.097
Polietileno lineal de baja densidad	213.598	213.598	213.598	213.598
Polipropileno	573.408	573.408	573.408	573.408
Poliuretano	4,774.572	4,774.572	4,774.572	4,774.572
Resinas ABS-SAN	1,158.152	1,051.391	1,158.152	1,051.391
Resinas de Poli(tereftalato de etileno)	1,932.450	1,932.450	1,932.450	1,932.450

Tabla 3. ap. III. Inversión (USD/kg)

PQ Final	2009	2015	2021	2027
Anhídrido Ftálico	0.700	1.139	1.070	1.005
Fibras poliéster	2.501	2.508	2.150	1.844
Hule Estireno Butadieno	1.388	1.593	1.444	1.310
Poli(tereftalato de butileno)	3.690	4.370	3.774	3.266
Poliestireno	1.139	1.203	1.058	0.933
Polietileno de alta densidad	0.252	0.281	0.249	0.220
Polietileno de baja densidad	0.413	0.527	0.482	0.441
Polietileno lineal de baja densidad	0.311	0.286	0.228	0.182
Polipropileno	0.430	0.341	0.249	0.182
Poliuretano	3.862	5.058	4.540	4.079
Resinas ABS-SAN	0.975	1.085	0.942	0.809
Resinas de Poli(tereftalato de etileno)	1.740	2.493	2.368	2.249

Tabla 4. ap. III. Valor del Producto (USD/kg)

PQ Final	2009	2015	2021	2027
Anhídrido Ftálico	0.346	0.593	0.552	0.515
Fibras poliéster	2.219	2.223	2.034	1.874
Hule Estireno Butadieno	1.451	1.571	1.483	1.405
Poli(tereftalato de butileno)	2.401	2.752	2.444	2.184
Poliestireno	1.095	1.123	1.062	1.010
Polietileno de alta densidad	0.185	0.205	0.183	0.164
Polietileno de baja densidad	0.251	0.318	0.291	0.267
Polietileno lineal de baja densidad	0.252	0.233	0.192	0.161
Polipropileno	0.349	0.286	0.223	0.179
Poliuretano	6.518	7.483	7.051	6.685
Resinas ABS-SAN	1.390	1.451	1.370	1.291
Resinas de Poli(tereftalato de etileno)	1.743	2.125	2.060	1.999

Los índices de peligro a la salud y ambiente se obtuvieron a través de una búsqueda de las hojas de seguridad para cada sustancia (petroquímicos básicos, intermedios y finales que construyen una red de proceso a la cual hemos llamado ruta de producción) que interviene en cada una de las rutas de proceso, de tal forma que al recopilar todos los peligros de cada una de las sustancias de cada ruta de producción se estableció una escala para cuantificar estos peligros; éstos valores se presentan en la Tabla 5. ap. III.

Tabla 5. ap. III. Índice de Peligro a la salud y ambiente

PQ Final	2009-20021
Anhídrido Ftálico	10
Fibras poliéster	19
Hule Estireno Butadieno	19
Poli(tereftalato de butileno)	17
Poliestireno	17
Polietileno de alta densidad	13
Polietileno de baja densidad	10
Polietileno lineal de baja densidad	13
Polipropileno	11
Poliuretano	50
Resinas ABS-SAN	24
Resinas de Poli(tereftalato de etileno)	18

En las Figuras 1. ap. III a la 12. ap. III se presentan los resultados obtenidos por los métodos multicriterio, específicamente utilizando el método PROMETHEE II, para evaluar

la mejor ruta de proceso de cada uno de los petroquímicos finales a estudiar. Para no extender innecesariamente el tamaño de este apéndice, solamente se muestran los diagramas provenientes de “Decision Lab” (software que resuelve los casos de estudio con PROMETHEE II) para el primer periodo (2009), considerando, además que los resultados de los flujos netos Φ_i para cada cadena y cada periodo del HP, se han analizado ya en el Capítulo V.

2.1 Evaluación de las rutas de producción para Anhídrido Ftálico

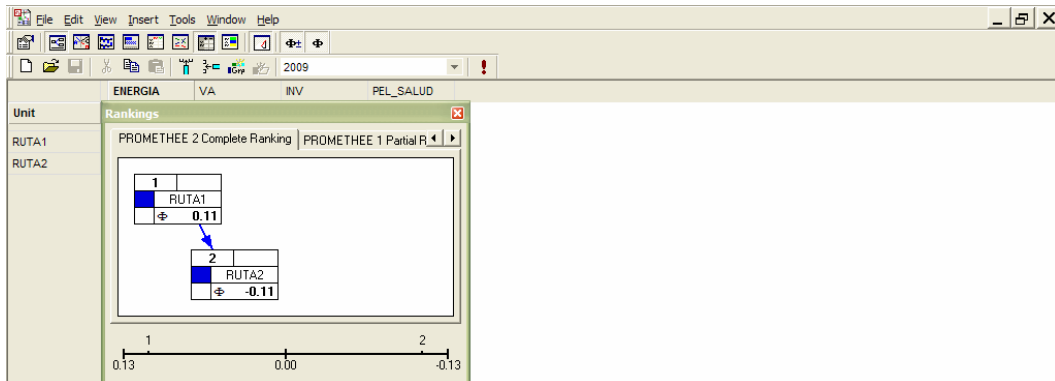


Figura 1. ap. III. Anhídrido Ftálico. Primer periodo (2009)

2.2 Fibras Poliéster

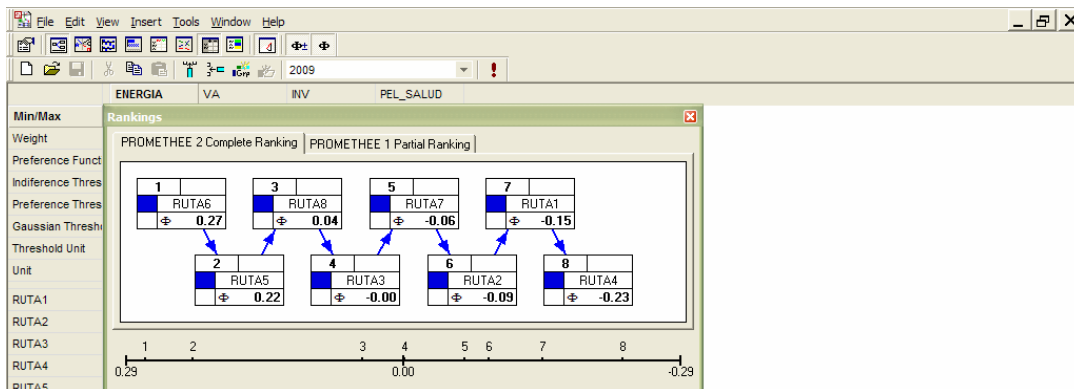


Figura 2. ap. III. Fibras Poliéster. Primer periodo (2009)

2.3 Hule Estireno Butadieno

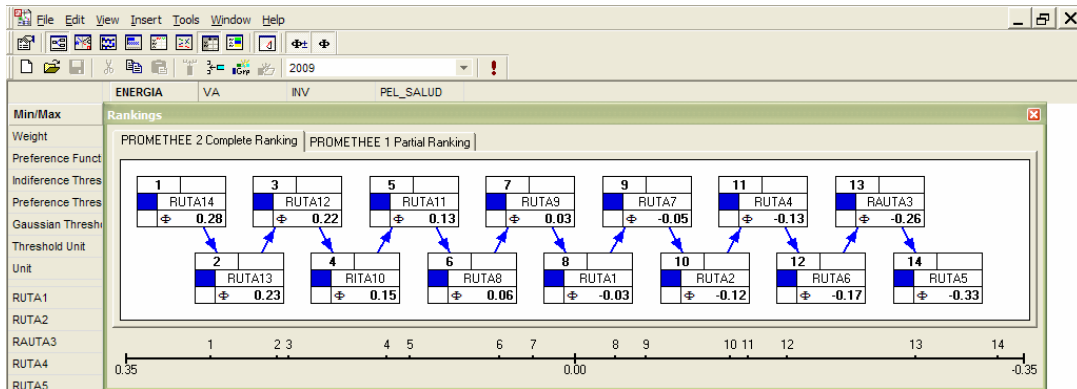


Figura 3. ap. III. Hule Estireno Butadieno. Primer periodo (2009)

2.4 Poli(tereftalato de butileno) (PBT)

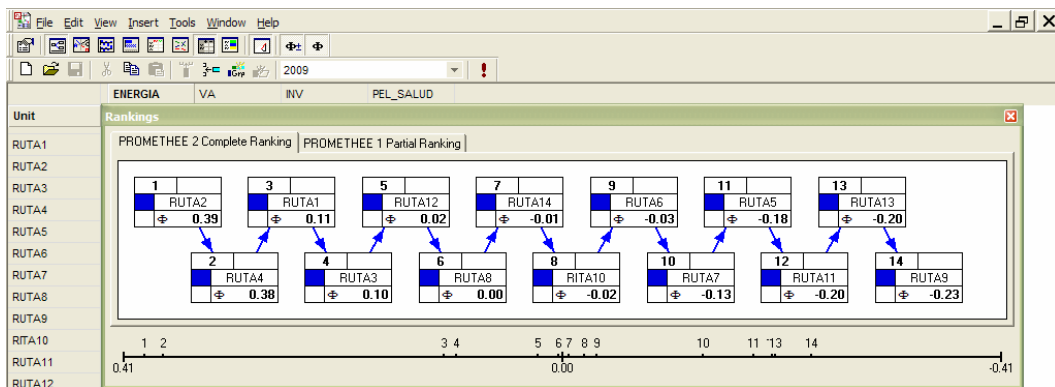


Figura 4. ap. III. Poli(tereftalato de butileno). Primer periodo (2009)

2.5 Poliestireno normal y expandido

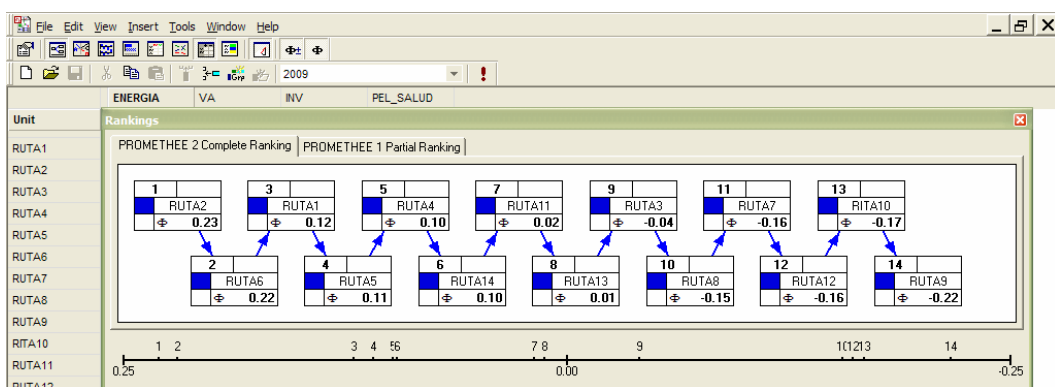


Figura 5. ap. III. Poliestireno. Primer periodo (2009)

2.6 Polietileno de alta densidad

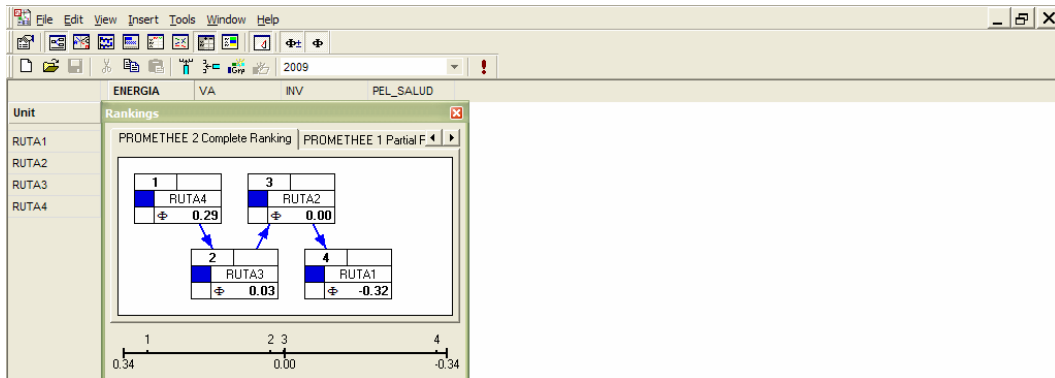


Figura 6. ap. III. Polietileno de Alta Densidad. Primer periodo (2009)

2.7 Polietileno de baja densidad

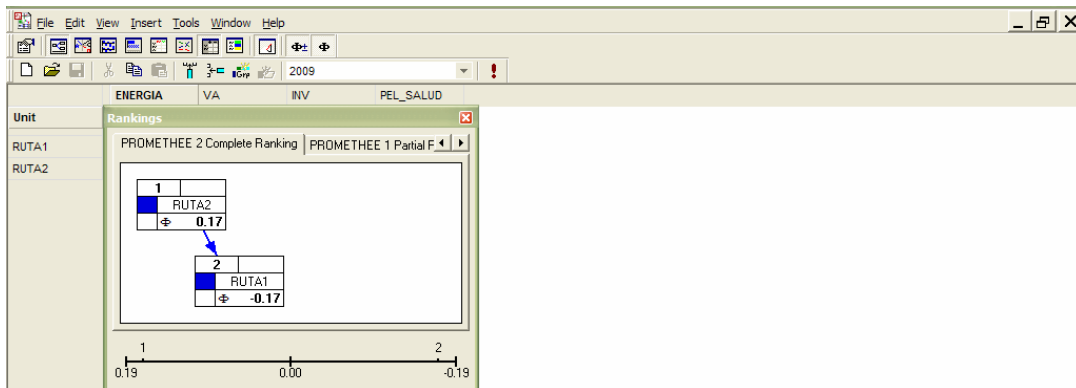


Figura 7. ap. III. Polietileno de Baja Densidad. Primer periodo (2009)

2.8 Polietileno lineal de baja densidad

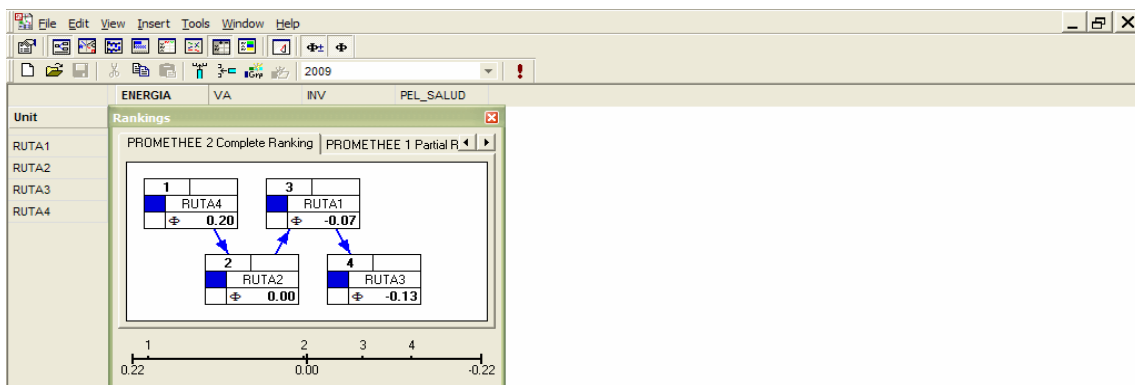


Figura 8. ap. III. Polietileno Lineal de Baja Densidad. Primer periodo (2009)

2.9 Polipropileno

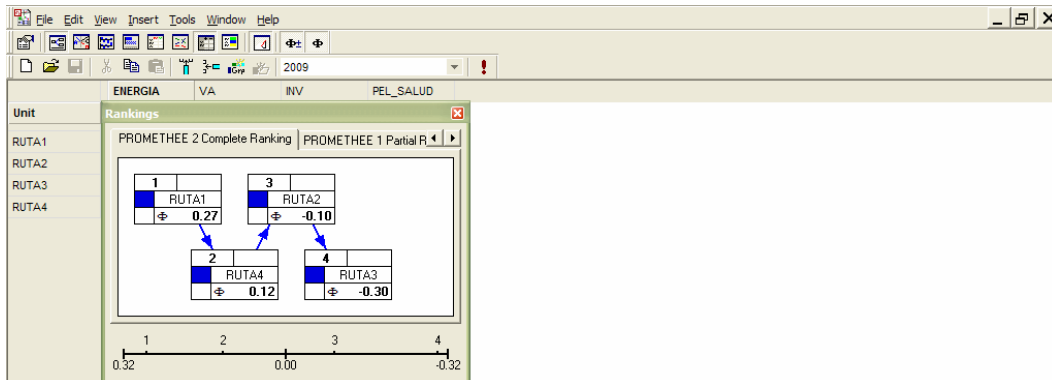


Figura 9. ap. III. Polipropileno. Primer periodo (2009)

2.10 Poliuretano

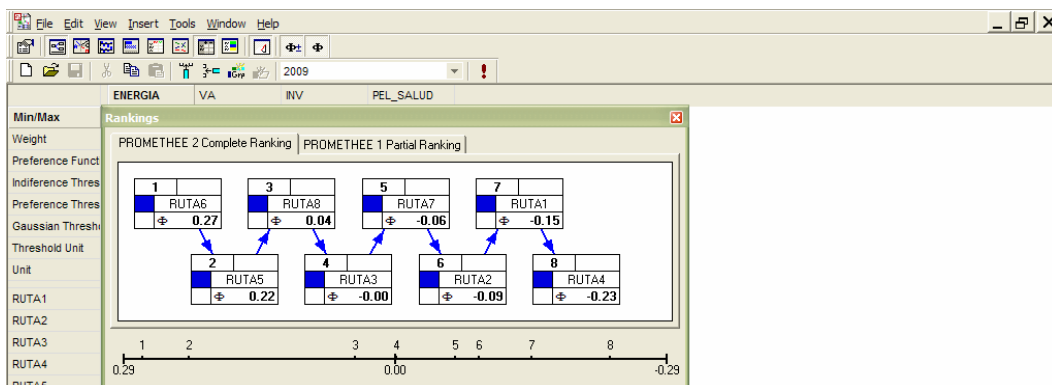


Figura 10. ap. III. Poliuretano. Primer periodo (2009)

2.11 Resinas ABS-SAN

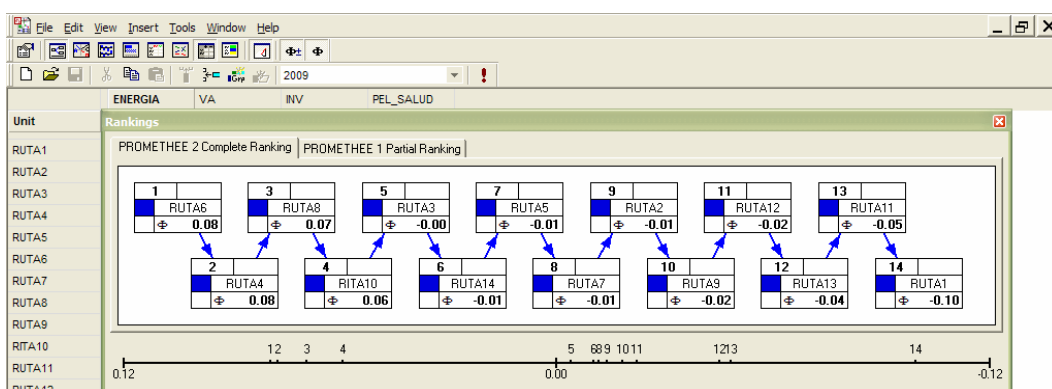


Figura 11. ap. III. Resinas ABS-SAN. Primer periodo (2009)

2.12 Resinas de Poli(tereftalato de etileno) (PET)

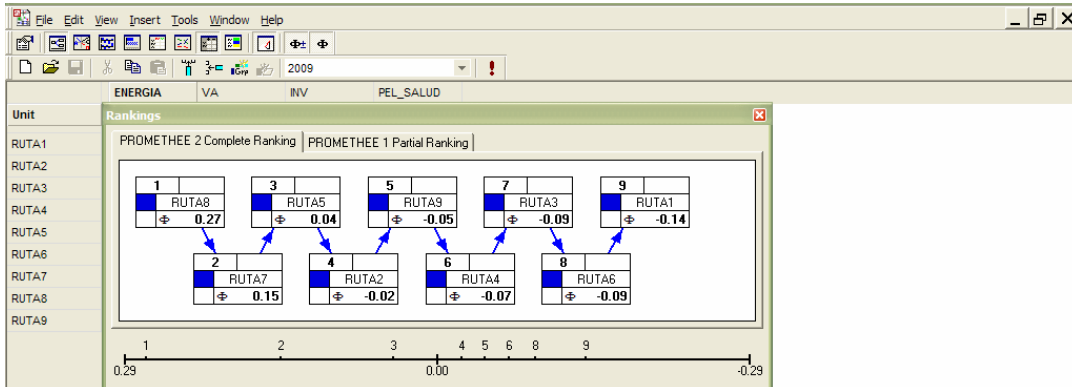


Figura 12. ap. III. Resinas PET. Primer periodo (2009)

3 Evaluación de Petroquímicos Finales

3.1 Evaluación de petroquímicos finales utilizando PROMETHEE II para los periodos 2, 3 y 4 del HP.

Se recuerda que la evaluación del primer periodo se presenta en el Capítulo V.

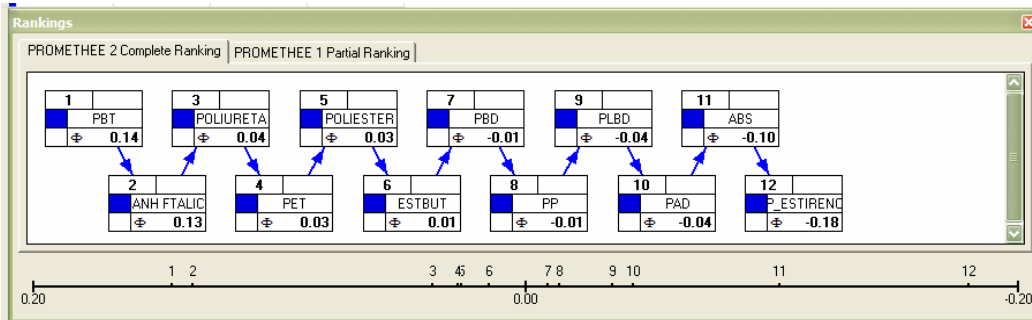


Figura 13. ap. III. Selección de petroquímicos finales periodo 2 del HP

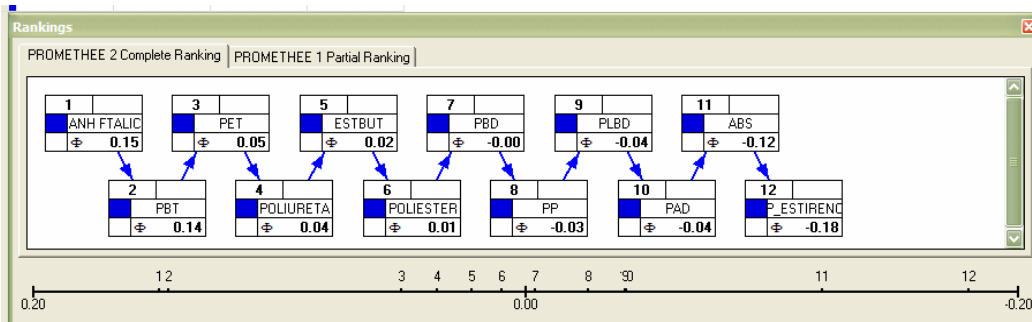


Figura 14. ap. III. Selección de petroquímicos finales periodo 3 del HP

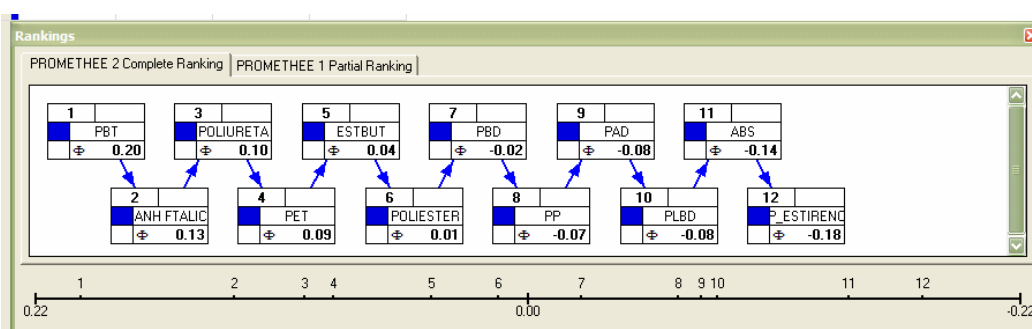


Figura 15. ap. III. Selección de petroquímicos finales periodo 4 del HP

3.2 Valor Agregado, Energía consumida, Inversión e Índices de Peligros a la salud y medio ambiente de petroquímicos finales evaluados cuyos valores de Φ_i son mayores que cero

Los valores de las Tablas 6, 7, 8 y 9 ap. III se utilizaron para realizar las gráficas V.7, V.8, V.9 y V.10 del Capítulo V.

Tabla 6. ap. III. Valor Agregado (Millones USD/año en el periodo)

Periodo	PhA	SBR	PBT	PEF	PP	PET	PU
1	6.33	181.04	326.78	343.26	25.99		396.96
2	14.54	293.94	557.22	683.14	25.99	343.91	636.5
3	23.77	451.83	869.06	1,049.73	25.99	743.19	928.56
4	33.59	673.21	1,291.90	1,231.09	25.99	1,206.94	1,285.84

Tabla 7. ap. III. Energía consumida (GJ/año en el periodo)

Periodo	PhA	SBR	PBT	PEF	PP	PET	PU
1	18251	2,336,246	2,361,703	3,451,890	277,820		4,400,892
2	31334	3,605,763	3,747,336	6,858,484	277,820	3,194,530	6,234,763
3	47215	5,564,925	5,946,719	11,215,993	277,820	7,129,679	8,831,748
4	65466	8,588,303	9,437,138	13,770,507	277,820	11,977,667	12,509,479

Tabla 8. ap. III. Inversión (Millones USD/año en el periodo)

Periodo	PhA	SBR	PBT	PEF	PP	PET	PU
1	18	387	811	915	50		851
2	40	628	1,374	1,820	50	985	1,315
3	64	966	2,146	2,813	50	2,137	1,905
4	90	1,439	3,207	3,312	50	3,486	2,656

Tabla 9. ap. III. Índices de Peligros a la salud y el medio ambiente

Periodo	PhA	SBR	PBT	PEF	PP	PET	PU
1	10	19	17	19	11		50
2	10	19	17	19		18	50
3	10	19	17	19		18	50
4	10	19	17	19		18	50

3.3 Demanda para satisfacer la producción de petroquímicos finales seleccionados

Esta demanda es la que fue calculada utilizando la metodología del Capítulo V, donde ha quedado explicado el procedimiento de cálculo.

Tabla 10. ap. III. Demanda de petroquímicos (Ton/año)

Petroquímico Básico	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4
Etileno	133,877	215,243	3,295,412	582,802
Propileno	210,953	37,714	1,370,868	75,675
Benceno	65,007	34,222	707,218	80,158
Tolueno	54,687	22,778	282,595	45,706
p-xilenos	388,024	582,929	1,577,184	1,592,500
o-xilenos	79,124	17,163	20,886	25,417

3.4 Balances de materia de petroquímicos básicos para satisfacer la demanda de petroquímicos finales en cada periodo del HP

Estas tablas, complementan la información con la que se obtuvieron los resultados indicados en el Capítulo V respecto de la selección de la mejor configuración tecnológica de las Refinerías que procesarán crudo para obtener el mejor rendimiento de petroquímicos básicos.

Tabla 11. ap. III. Capacidad de producción de petroquímicos básicos de cada configuración de refinería seleccionada vs los requerimientos de demanda por intervalo de periodo (Ton/año)

PQ Básico	Conf 1	Conf 2	Conf 3	Conf 4	Conf 5	Conf 6	Demanda
Etileno	218,000	404,000	470,000	473,000	582,000	650,000	4,227,334
Propileno	145,000	228,000	275,000	323,000	319,000	375,000	1,695,209
Benceno	60,000	101,000	120,000	121,000	148,000	171,000	886,605
Tolueno	42,000	67,000	79,000	110,000	101,000	117,000	405,766
o-xileno	600	1,080	1,320	3,900	1,560	1,800	142,590
p-xileno	19,400	34,920	42,680	126,100	50,440	58,200	4,140,638