



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE QUIMICA

REESTRUCTURACION DE ALGUNAS RUTAS TECNOLOGICAS
DE LA INDUSTRIA PETROQUIMICA EN MEXICO,
UTILIZANDO EL CRITERIO DE DISPONIBILIDAD
TERMODINAMICA.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

INGENIERO QUIMICO

P R E S E N T A :

EDGAR SEVILLA JUAREZ



EXAMENES PROFESIONALES
FACULTAD DE QUIMICA

MEXICO, D.F.

2005



m. 339978



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

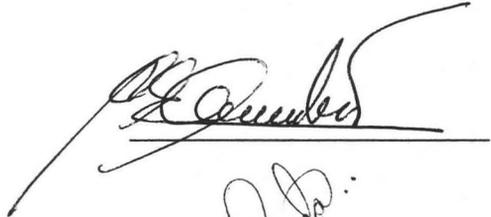
Jurado asignado:

Presidente	Dr. Carlos Escobar Toledo
Vocal	Prof. Alejandro Villalobos Hiriart
Secretario	Prof. José Fernando Barragán Aroche
1er. Suplente	Prof. Graciela Guadalupe Díaz Argomedo
2º. Suplente	Prof. Gabriel Pérez Baldomero

Sitio donde se desarrollo el tema

Facultad de Química

Asesor: Dr. Carlos Escobar Toledo



Supervisor técnico: M. en I. Claudia García Aranda



Sustentante: Edgar Sevilla Juárez



Agradezco muy cumplidamente a la Dirección General de Asuntos del Personal Académico que a través de los Proyectos de Apoyo para la Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) me concedió una beca para realizar la presente tesis.

Mi participación en el proyecto PAPIIT No. INI-106203 "Restitución del valor agregado y de la productividad de algunas cadenas improductivas de la industria petroquímica en México a través de la restitución, simulación y jerarquización Tecnológica y de Inversiones", fue muy enriquecedora para mi formación, independientemente del apoyo financiero que recibí.

A mis padres

A mis hermanos

A mis amigos

Índice general	Pág
Introducción	1
i. Objetivos	2
Capítulo 1. Principios termodinámicos y disponibilidad termodinámica	4
1.1 Principios termodinámicos utilizados	5
1.1.1 Primera ley de la termodinámica	6
1.1.2 Segunda ley de la termodinámica	9
1.1.3 Energía libre de Gibbs	11
1.2 Disponibilidad termodinámica	12
1.3 Conclusiones del capítulo	18
Capítulo 2. Estado actual de oferta y demanda de la IPQ de México	19
2.1 Estructura de la IPQ Mexicana	20
2.1.1 Petroquímicos básicos	20
2.1.2 Petroquímicos no básicos	25
2.1.3 PEMEX Petroquímica	33
2.1.4 PEMEX Internacional (PMI)	39
2.4 Conclusiones del capítulo	43
Capítulo 3. Selección de cadenas de producción petroquímicas para su reestructuración.	44
3.1 Comportamiento de las subramas de los petroquímicos no básicos	45
3.2 Análisis de las resinas sintéticas y de las fibras químicas	47
3.4 Cadena petroquímica construida.	52
3.5 Conclusiones del capítulo	63
Capítulo 4. Metodología de análisis	64
4.1 Estado del arte para el análisis tecnológico y económico de cadenas petroquímicas.	65
4.1.1 La industria petroquímica (IPQ).	65
4.1.2 El modelo petroquímico.	65
4.1.3 Evaluación tecnológica de la IPQ.	66
4.2. Tecnología, cadena de producción y ruta tecnológica	67
4.3 Análisis de tecnologías mediante la disponibilidad termodinámica.	69

4.4 Disponibilidad de una mezcla.	71
4.5 Calculo de disponibilidad debido a cambios de temperatura y presión.	72
4.6 Aplicación del análisis de disponibilidad en una reacción de combustión.	73
4.7 Evaluación del cambio de disponibilidad de una tecnología	76
4.8 Metodología empleada para el análisis de disponibilidad termodinámica de una cadena de producción	78
4.9 Metodología empleada para el análisis del valor agregado de una cadena de producción.	89
4.10 Metodología empleada para el análisis de la energía real por servicios (ENSER).	105
4.11 Conclusiones del capítulo	115
Capítulo 5. Selección de las rutas tecnológicas mediante el empleo de los métodos multicriterio.	116
5.1 Los métodos multicriterio	117
5.2. Modelo de la información con PROMETHEE.	121
5.2.1 Información entre los criterios.	121
5.2.2 Información dentro de cada criterio.	122
5.3 Clasificación I y II de PROMETHEE	125
5.3.1 Índices de preferencia agregados.	126
5.3.2 Flujos de categoría superior	127
5.3.3 La clasificación parcial. PROMETHEE I	128
5.3.4 La clasificación completa. PROMETHEE II	129
5.4 Selección de las rutas tecnológicas	129
5.4.1 Empleo del paquete de cómputo <i>Decision Lab</i>	130
5.5 Resultados	132
5.6 Conclusiones del capítulo	146
Capítulo 6. Conclusiones generales	147
Referencias bibliográficas	152

Índice de Tablas		Pág
Capítulo 2. Estado actual de oferta y demanda de la IPQ de México.		
Tabla 2.1.	Proceso de gas, PEMEX Gas y Petroquímica Básica	21
Tabla 2.2.	Elaboración de productos, PEMEX Gas y Petroquímica Básica	22
Tabla 2.3.	Valor de las ventas internas de gas seco, gas licuado y productos petroquímicos PEMEX Gas y Petroquímica Básica.	22
Tabla 2.4.	Volumen de las ventas internas de gas seco, gas licuado y productos petroquímicos PEMEX Gas y Petroquímica Básica	23
Tabla 2.5	Valor de la producción de la IPQ Mexicana (petroquímicos no básicos)	26
Tabla 2.6.	Volumen de la producción de la IPQ Mexicana (petroquímicos no básicos)	27
Tabla 2.7	Balanza comercial de la IPQ Mexicana	28
Tabla 2.8	Valor del consumo aparente de la IPQ Mexicana	29
Tabla 2.9	Volumen del consumo aparente de la IPQ Mexicana	30
Tabla 2.10	Valor de las ventas internas de petroquímicos, PEMEX Petroquímica	35
Tabla 2.11	Volumen de las ventas internas de petroquímicos, PEMEX Petroquímica	36
Tabla 2.12	Valor del comercio exterior de productos petroquímicos, PEMEX Internacional	41
Capítulo 3. Selección de cadenas de producción petroquímicas para su reestructuración.		
Tabla 3.1	Valor del consumo aparente de las resinas sintéticas	48
Tabla 3.2	Volumen del consumo aparente de las resinas sintéticas	49
Tabla 3.3	Valor del consumo aparente de las fibras químicas	50
Tabla 3.4	Volumen del consumo aparente de las fibras químicas	51
Tabla 3.5	Tecnologías e insumos de la cadena formada por los productos terminales seleccionados	54
Tabla 3.6	Rutas tecnológicas de la cadena construida	58
Capítulo 4. Metodología de análisis.		
Tabla 4.1	Constantes usadas para el cálculo del Cp del ejemplo de cálculo	74
Tabla 4.2	Cambio en la disponibilidad de los componentes de los gases de emisión	75
Tabla 4.3	Cantidad de metanol y servicios por tonelada métrica de solución de formaldehído al 37%	76

Tabla 4.4	Resultados para la tecnología 19, alquilación de benceno.	81
Tabla 4.5	Resultados para la tecnología 20, deshidrogenación de etilbenceno.	81
Tabla 4.6	CIP para la producción de poliestireno	82
Tabla 4.7	Cambio de disponibilidad de cada tecnología de la Ruta I de la producción de poliestireno	82
Tabla 4.8	ΔB_{EQUIV} para la cadena del poliestireno	84
Tabla 4.9	ΔB_{EQUIV} para la cadena del PVC	84
Tabla 4.10	ΔB_{EQUIV} para la cadena del Poliéster	85
Tabla 4.11	ΔB_{EQUIV} para la cadena del PET	85
Tabla 4.12	ΔB_{EQUIV} para la cadena del Poliuretano	86
Tabla 4.13	ΔB_{EQUIV} para la cadena del Polipropileno	88
Tabla 4.14	ΔB_{EQUIV} para la cadena del PAD	88
Tabla 4.15	ΔB_{EQUIV} para la cadena del PBD	88
Tabla 4.16	Demanda de los productos de la demanda final	90
Tabla 4.17	Demanda inducida para la cadena del poliestireno	91
Tabla 4.18	Demanda inducida para la cadena del PVC	91
Tabla 4.19	Demanda inducida para la cadena del Poliéster grado fibra	91
Tabla 4.20	Demanda inducida para la cadena del PET	92
Tabla 4.21	Demanda inducida para la cadena del Poliuretano	93
Tabla 4.22	Demanda inducida para la cadena del Polipropileno	94
Tabla 4.23	Demanda inducida para la cadena del PAD	95
Tabla 4.24	Demanda inducida para la cadena del PBD	95
Tabla 4.25	Datos "benchmarking" para la tecnología 19, producción de etilbenceno	95
Tabla 4.26	Datos "benchmarking" para la tecnología 20, producción de estireno	96
Tabla 4.27	Datos "benchmarking" para la tecnología 21, producción de poliestireno	96
Tabla 4.28	Capacidades instaladas elegidas	97
Tabla 4.29	Costos totales de la Ruta I de producción de poliestireno	97

Tabla 4.30	Ganancia, Costo del producto, Valor del producto y Valor agregado	98
Tabla 4.31	Valor agregado equivalente para la cadena del poliestireno	100
Tabla 4.32	Valor agregado equivalente para la cadena del PVC	100
Tabla 4.33	Valor agregado equivalente para la cadena del poliéster	101
Tabla 4.34	Valor agregado equivalente para la cadena del PET	101
Tabla 4.35	Valor agregado equivalente para la cadena del Poliuretano	102
Tabla 4.36	Valor agregado equivalente para la cadena del Polipropileno	104
Tabla 4.37	Valor agregado equivalente para la cadena del PAD	104
Tabla 4.38	Valor agregado equivalente para la cadena del PBD	104
Tabla 4.39	Datos de servicios "benchmarking" para la Ruta I de la producción de poliestireno	105
Tabla 4.40	ENSER para la ruta I de poliestireno	109
Tabla 4.41	Energía real por servicios equivalente para la cadena del poliestireno	110
Tabla 4.42	Energía real por servicios equivalente para la cadena del PVC	110
Tabla 4.43	Energía real por servicios equivalente para la cadena del Poliéster	111
Tabla 4.44	Energía real por servicios equivalente para la cadena del PET	112
Tabla 4.45	Energía real por servicios equivalente para la cadena del Poliuretano	112
Tabla 4.46	Energía real por servicios equivalente para la cadena del Polipropileno	114
Tabla 4.47	Energía real por servicios equivalente para la cadena del PAD	114
Tabla 4.48	Energía real por servicios equivalente para la cadena del PBD	114
Capítulo 5. Selección de las rutas tecnológicas mediante el empleo de los métodos multicriterio.		
Tabla 5.1	Tabla de evaluación	118
Tabla 5.2	Pesos de relativa importancia	121
Tabla 5.3	Funciones de preferencia	124
Tabla 5.4	Pesos empleados para los tres enfoques planteados	130
Tabla 5.5	Criterios evaluados en las distintas alternativas	131
Tabla 5.6	Resultados de la selección de las mejores rutas tecnológicas	144

Índice de Figuras		Pág
Capítulo 1. Principios termodinámicos y disponibilidad termodinámica.		
Figura 1.1.	Aplicación de ΔS en la dirección de los procesos	10
Figura 1.2.	Aplicación de ΔG en la dirección de las reacciones químicas	12
Figura 1.3.	Cambio de estado desde P_1 y T_1 hasta P_0 y T_0	13
Figura 1.4	Nuevo sistema termodinámico de análisis	14
Capítulo 2. Estado actual de oferta y demanda de la IPQ de México.		
Figura 2.1.	Proceso de gas, PEMEX Gas y Petroquímica Básica	21
Figura 2.2.	Valor de las ventas internas de productos petroquímicos básicos, PEMEX Gas y Petroquímica Básica	24
Figura 2.3.	Volumen de las ventas internas de productos petroquímicos básicos, PEMEX Gas y Petroquímica Básica	24
Figura 2.4.	Valor de la producción de la IPQ Mexicana	31
Figura 2.5	Volumen de la producción de la IPQ Mexicana	31
Figura 2.6	Balanza comercial de la IPQ mexicana	32
Figura 2.7	Valor del consumo aparente de la IPQ Mexicana	32
Figura 2.8	Volumen del consumo aparente de la IPQ Mexicana	33
Figura 2.9	Valor de las ventas internas de productos petroquímicos, PEMEX Petroquímica	34
Figura 2.10	Volumen de las ventas internas de productos petroquímicos, PEMEX Petroquímica	34
Figura 2.11	Valor de las ventas internas totales de PEMEX Petroquímica	38
Figura 2.12	Volumen de las ventas internas totales de PEMEX Petroquímica	39
Figura 2.13	Comercio exterior de productos petroquímicos, PEMEX Internacional	40
Capítulo 3. Selección de cadenas de producción petroquímicas para su reestructuración.		
Figura 3.1	Valor del consumo aparente de las subramas de la IPQ	45
Figura 3.2	Volumen del consumo aparente de las subramas de la IPQ	46
Figura 3.3	Cadena petroquímica construida	53
Capítulo 4. Metodología de análisis.		
Figura 4.1	Representación gráfica de los productos y procesos de la Industria Petroquímica.	68
Figura 4.2	Representación de un proceso real con materiales y servicios.	70
Figura 4.3	Proceso de mezclado	71

Figura 4.4	Reacción de combustión.	73
Figura 4.5	Producción de formaldehído vía oxidación de metanol.	76
Figura 4.6	Cadena productiva del poliestireno.	78
Figura 4.7	CIP para la Alquilación de benceno.	79
Capítulo 5. Selección de las rutas tecnológicas mediante el empleo de los métodos multicriterio.		
Figura 5.1	Relaciones de dominancia	118
Figura 5.2	Función de preferencia.	123
Figura 5.3	Grafico de índices de preferencias agregadas.	126
Figura 5.4	Flujos de categorías de PROMETHEE	127
Figura 5.5	Relaciones de PROMETHEE I	128
Figura 5.6	Resultados para la cadena del poliestireno dándole mayor importancia a la disponibilidad termodinámica	132
Figura 5.7	Resultados para la cadena del poliestireno dándole mayor importancia a la energía real por servicios	133
Figura 5.8	Resultados para la cadena del poliestireno dándole mayor importancia al valor agregado	133
Figura 5.9	Resultados para la cadena del poliéster dándole mayor importancia a la disponibilidad termodinámica	134
Figura 5.10	Resultados para la cadena del poliéster dándole mayor importancia a la energía real por servicios	134
Figura 5.11	Resultados para la cadena del poliéster dándole mayor importancia al valor agregado	135
Figura 5.12	Resultados para la cadena del poliuretano dándole mayor importancia a la disponibilidad termodinámica	135
Figura 5.13	Resultados para la cadena del poliuretano dándole mayor importancia a la energía real por servicios	136
Figura 5.14	Resultados para la cadena del poliuretano dándole mayor importancia al valor agregado	136
Figura 5.15	Resultados para la cadena del PET dándole mayor importancia a la disponibilidad termodinámica	137
Figura 5.16	Resultados para la cadena del PET dándole mayor importancia a la energía real por servicios	137
Figura 5.17	Resultados para la cadena del PET dándole mayor importancia al valor agregado	138
Figura 5.18	Resultados para la cadena del PVC dándole mayor importancia a la disponibilidad termodinámica	138

Figura 5.19	Resultados para la cadena del PVC dándole mayor importancia a la energía real por servicios	139
Figura 5.20	Resultados para la cadena del PVC dándole mayor importancia al valor agregado	139
Figura 5.21	Resultados para la cadena del Polipropileno dándole mayor importancia a la disponibilidad termodinámica	140
Figura 5.22	Resultados para la cadena del Polipropileno dándole mayor importancia a la energía real por servicios	140
Figura 5.23	Resultados para la cadena del Polipropileno dándole mayor importancia al valor agregado	141
Figura 5.24	Resultados para la cadena del PAD dándole mayor importancia a la disponibilidad termodinámica	141
Figura 5.25	Resultados para la cadena del PAD dándole mayor importancia a la energía real por servicios	142
Figura 5.26	Resultados para la cadena del PAD dándole mayor importancia al valor agregado	142
Figura 5.27	Resultados para la cadena del PBD dándole mayor importancia a la disponibilidad termodinámica	143
Figura 5.28	Resultados para la cadena del PAD dándole mayor importancia a la energía real por servicios	143
Figura 5.29	Resultados para la cadena del PBD dándole mayor importancia al valor agregado	144

.Introducción.

i. Objetivos.

Para objeto de la presente tesis, toda tecnología petroquímica contiene dos elementos inseparables: un proceso y un producto (o productos). Así el objetivo general es analizar y evaluar algunas tecnologías petroquímicas con la finalidad de aprovechar de manera más eficiente la energía y restituir el valor agregado de productos petroquímicos en cadenas de producción en México.

Para ello, se utilizará el concepto de cadena productiva, que consiste en una red de procesos/productos que parten de los productos primarios o piedras angulares de la Industria Petroquímica (IPQ) hasta llegar a los productos de la demanda final: plásticos, elastómeros, fibras sintéticas, fertilizantes, pinturas, etc., que son la materia prima para la manufactura de productos que se consumen para el bienestar del ser humano.

Para evaluar las tecnologías desde el punto de vista del uso eficiente de la energía se ha elegido como criterios a evaluar a lo largo de la cadena:

- La disponibilidad termodinámica,
- La energía real que debe proporcionarse a los procesos como servicios, y
- El valor agregado del producto final.

Las piedras angulares a las que se hace referencia son: metano (CH_4), etileno (C_2H_4), propileno (C_3H_6) y butanos ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{CH}_3$), así como los productos aromáticos: benceno (C_6H_6), tolueno ($\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$) y xilenos ($\text{C}_6\text{H}_4(\text{CH}_3)_2$).

Más adelante en el primer capítulo se define lo que significa para ésta tesis utilizar el concepto de disponibilidad termodinámica, recordando previamente los principios termodinámicos que conllevan a la utilización de dicha propiedad para referirse al empleo eficiente de la energía. [Sophos, 1981], [Escobar, 1991], [Smith, 1995].

Por lo que se refiere a la energía real que debe proporcionársele a un proceso a través de los servicios auxiliares, se obtendrá de tecnologías “benchmarking” ó de referencia^(*).

En el segundo capítulo se mostrará el comportamiento de la IPQ Mexicana en el periodo comprendido entre los años 1996 y 2002; y el comportamiento de PEMEX en el periodo comprendido entre los años 1993 y 2003, esto con la finalidad de demostrar la problemática en la que se encuentra dicha industria.

En el tercer capítulo se definirá la red de procesos que conforman la estructura de la industria formada por una red de productos y procesos que se denomina para esta tesis “cadena de producción”.

En el cuarto capítulo se desarrollará un caso de estudio para la cadena de los aromáticos y olefinas que conducen a los productos terminales:

- Polietileno de alta densidad (PAD)
- Polietileno de baja densidad (PBD)
- Polipropileno
- Poliéster grado fibra
- Poliuretano
- Poliestireno cristal
- Polietilen Tereftalato grado botella
- Cloruro de polivinilo

En el quinto capítulo utilizando los llamados métodos multicriterio se seleccionarán las mejores rutas tecnológicas de acuerdo a los criterios antes mencionados.

En el sexto capítulo se proporcionarán las conclusiones de la presente tesis.

^(*) Obtenidos del “Process Economic Program” de Stanford Research Institute

.Capítulo 1.

Principios termodinámicos y
Disponibilidad termodinámica

1.1 Principios termodinámicos utilizados.

Debido a que se utiliza a la disponibilidad termodinámica como uno de los criterios para seleccionar la mejor ruta tecnológica, se considera necesario realizar una revisión de los principios termodinámicos que conducen a la disponibilidad termodinámica.

Antes de enunciar los principios termodinámicos empleados para alcanzar los objetivos del presente trabajo, es necesario precisar la esfera de influencia que tienen estos principios dentro de esta tesis. Esta esfera de influencia se divide en dos partes, el sistema y sus alrededores.

Así pues, un sistema es una porción delimitada del mundo físico (y especificado) en la que se tiene interés. Por otra parte, el entorno es la zona del universo que interactúa con el sistema. *[Atkins, 1986]*

Un sistema es abierto cuando es posible la transferencia de materia entre éste y sus alrededores. *[Atkins, 1986]*

Un sistema es cerrado cuando solo se permite la transferencia de calor y trabajo entre éste y sus alrededores, es decir, no hay transferencia de materia entre el sistema y los alrededores. *[Sato, 2004]*

Y cuando en un sistema cerrado no existe contacto mecánico o térmico con sus alrededores, se le llama sistema aislado. *[Sato, 2004]*

Con el conocimiento de estos conceptos es posible enunciar los principios básicos utilizados en esta tesis.

1.1.1 Primera ley de la termodinámica.

La primera ley de la termodinámica provee el concepto de energía, el cual es definido como la capacidad que tiene un sistema para desarrollar un trabajo.

La energía se puede presentar de distintas formas, algunas de ellas son: energía térmica, mecánica, química, eléctrica, magnética, nuclear, etc. Estos tipos de energía pueden ser convertidos en otros, con algunas restricciones para la energía térmica, que serán examinadas más adelante.

Esta ley establece que la cantidad de energía existente en el universo es constante, sin importar las transformaciones que está sufra, es decir, **“La energía no se crea ni destruye, solo se transforma”**.

Cuando se trabaja con un sistema cerrado, considerando que los cambios de energía potencial y energía cinética cuando ocurre un cambio de estado son despreciables, la energía que se transfiere es de dos tipos, calor (Q) y trabajo (W).

Bajo la notación donde el calor que entra al sistema es positivo y el trabajo que entra al sistema es negativo la primera ley se escribe como lo muestra la Ec. 1.1

$$\Delta U = Q - W \quad (1.1)$$

donde U, es la energía interna, ésta representa los diferentes tipos de energía, que a nivel intermolecular e intramolecular contiene el sistema; como la energía asociada al espín molecular, enlace molecular, momento bipolar magnético, translación molecular, rotación molecular, vibración molecular, entre otras. [Smith, 1995].

El calor y el trabajo se refieren a los cambios (incrementos o decrementos) de energía que fluye a través de la frontera del sistema. Estas formas de energía no se almacenan, por lo tanto no son características propias del sistema, es decir, no se puede describir a un sistema en función de un "contenido de trabajo" o de un "contenido calórico".

Hay que recordar que el trabajo, que fluye desde o hacia el sistema, puede ser de compresión-expansión, eléctrico, magnético, químico, de superficie, o de otro tipo dependiendo de cual es la variable del sistema que se modifica. [Levenspiel, 1997]

Ahora bien, cuando se quiere evaluar la energía contenida en un cuerpo de volumen V , por ejemplo un gas contenido en un recipiente, tiene que considerarse que el gas tiene que empujar los alrededores para tener él mismo un lugar. Con la presión P sobre el gas, el trabajo requerido para hacerse un lugar es PV , el término PV también es conocido como trabajo de flujo. Por ello, la energía total de un cuerpo es su energía interna más la energía adicional atribuida por tener un volumen V a la presión P . Esta energía total es llamada Entalpía (H). [Levenspiel, 1997]

$$H = U + PV \quad (1.2)$$

En el análisis de los sistemas abiertos, es conveniente emplear el cambio en la entalpía en lugar del cambio en la energía interna, [Levenspiel, 1997], debido a que la entalpía considera el trabajo de flujo (PV).

Considerando que el sistema opera a condiciones de flujo continuo en estado estable, es decir que las condiciones y rapidez de flujo en todos los puntos a lo largo de la trayectoria de flujo son constantes respecto al tiempo, la primera ley se escribe como lo muestra la Ec. 1.3

$$\Delta H = Q - W_U \quad (1.3)$$

W_U es toda la transferencia de trabajo entre el sistema y los alrededores excepto el trabajo expansión-compresión; ΔH es el cambio de entalpía (energía total) que ocurre debido a un proceso que opera a las condiciones antes mencionadas.

Considerando el caso más general, un sistema abierto que opera a condiciones de flujo en donde las propiedades del mismo son función del tiempo, para un cambio diferencial de estado, la variación de la entalpía con respecto al tiempo se escribe de la siguiente manera: [Sophos, 1981]

$$\frac{dH}{dt} = \dot{Q} - \left\{ \sum_k^n \sum_i^m x_{ik} H_{ik} \right\} - \dot{W}_U \quad \forall i = 1, 2, \dots, m \quad (1.4)$$
$$\forall k = 1, 2, \dots, n$$

La suma es sobre todas las corrientes de entrada y las de salida

$$\sum_k^n = \sum_{salidas} - \sum_{entradas} \quad (1.5)$$

donde la suma sobre k hasta n representa las corrientes, mientras que la suma sobre i hasta m representa las especies de cada corriente, x es la fracción masa o fracción mol según convenga de acuerdo a las unidades de la entalpía. Por lo tanto x_{ik} es la fracción mol de la especie i en la corriente k , mientras que H_{ik} es la entalpía de la especie i en la corriente k .

1.1.2 Segunda ley de la termodinámica.

Se pueden encontrar diferentes formas de enunciar la segunda ley de la termodinámica.

Uno de estos enunciados parte de la observación general de los procesos que ocurren naturalmente y establece que: **“Todos los procesos naturales o espontáneos son de carácter irreversible ocurriendo siempre con un aumento de desorden”**. [García, 1989]

En la definición de arriba, un proceso reversible es aquel que se lleva a cabo en equilibrio, en todo momento, con sus alrededores, por lo cual su dirección puede invertirse en cualquier punto por un cambio infinitesimal en las variables externas; y un proceso irreversible, es aquel que se efectúa sin cumplir esta condición. [Smith, 1995]

“En un proceso espontáneo disminuye la capacidad de realizar trabajo del universo”; esto es por que para “desordenar” algo siempre se necesita energía, por lo tanto, la energía utilizada para el desorden ya no estará disponible para realizar trabajo. [García, 1989]

La propiedad de estado que se definió para estudiar el comportamiento que anteriormente se ha descrito fue la entropía (S). [Levenspiel, 1997]

Si un sistema va del estado 1 al estado 2, ΔU se encuentra al medir Q y W hacia ó desde el sistema y después se utiliza la expresión de la primera ley, $\Delta U=Q-W$. De manera similar, el cambio de entropía al ir del estado 1 al estado 2 se encuentra como sigue:

$$\Delta S_{\text{sistema}, 1 \rightarrow 2} = \int_{\text{estado 1}}^{\text{estado 2}} \frac{dQ_{\text{rev}}}{T_{\text{sistema}}} \quad (1.6)$$

donde el calor Q_{rev} es el calor que se transfiere cuando los cambios de energía mecánica ocurren de forma reversible, sin fricción y donde el sistema es uniforme en T en cualquier instante, no caliente en un lado y frío en el otro.

En la Figura 1.1 se establecen los criterios para determinar la dirección en la cual el proceso se efectúa de forma espontánea, tendiendo siempre al equilibrio.

$\Delta S_{\text{SISTEMA}} \geq 0 \quad \text{Para un sistema aislado}$ $\underbrace{\Delta S_{\text{SISTEMA}} + \Delta S_{\text{ALREDEDORES}}}_{\Delta S_{\text{UNIVERSO}}} \geq 0 \quad \text{Para cualquier sistema}$ $\Delta S_{\text{UNIVERSO}} \geq 0$
--

Figura. 1.1 Aplicación de ΔS en la dirección de los procesos

Gracias al trabajo de Sadi Carnot (1854), [García, 1989], sobre las máquinas térmicas, también se puede enunciar la segunda ley de la termodinámica como: **“ningún equipo puede funcionar de tal modo que su único efecto (en el sistema y sus alrededores) sea convertir completamente todo el calor absorbido por el sistema en trabajo hecho por el sistema”**. [Smith, 1995]

Considerando, como en el caso de la entropía, el caso más general, un sistema abierto que opera a condiciones de flujo inestables, para un cambio diferencial la segunda ley de la termodinámica se escribe de la siguiente manera: [Sophos, 1981]

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\dot{Q}}{T} - \left\{ \sum_k^n \sum_i^m x_{ik} S_{ik} \right\} + \dot{S}_{GEN} \quad \forall i = 1, 2, \dots, m \quad (1.7)$$
$$\forall k = 1, 2, \dots, n$$

donde S_{GEN} es la entropía generada debido a las irreversibilidades del proceso, y S_{ik} es la entropía de la especie i en la corriente k .

Las irreversibilidades de un proceso se presentan debido a transferencias de calor por diferencias de temperatura finitas, mezcla de sustancias, resistencias eléctricas, transporte de masa por diferencia de concentraciones finitas, expansión libre, fricción en tuberías; es decir, los procesos irreversibles no pueden invertirse con un cambio infinitesimal de una variable externa como en el caso de los procesos reversibles. [Smith, 1995]

1.1.3 Energía libre de Gibbs.

Hasta ahora, con la energía interna, la entalpía y la entropía, se han considerado sólo los componentes térmicos de la energía (cinética, rotación, vibración); sin embargo existe una energía asociada a la estructura química de la materia, que se presenta cuando el sistema efectúa reacciones químicas. Por lo tanto, la energía de un sistema tiene un componente térmico y otro componente químico o estructural.

La capacidad de una reacción espontánea para liberar trabajo útil puede interpretarse desde el punto de vista de una propiedad fundamental que se llama Energía Libre de Gibbs (G). [Atkins, 1986]

$$G = H - TS \quad (1.8)$$

La variación de la energía libre de Gibbs entre productos y reactivos se puede escribir como:

$$\Delta G_r = \Delta H_r - T\Delta S_r \quad (1.9)$$

donde el subíndice r indica reacción química.

Los criterios de espontaneidad para una reacción química se establecen a través de los cambios de energía libre, lo cual se resume en la Fig. 1.2

ΔG mayor que cero	Reacción no espontánea
ΔG menor que cero	Reacción espontánea
En otras palabras:	
$\Delta G < 0$	Los reactivos se convertirán en productos
$\Delta G > 0$	Los reactivos no se convertirán en productos

Figura. 1.2 Aplicación de ΔG en la dirección de las reacciones químicas.

1.2 Disponibilidad termodinámica.

Gracias a la termodinámica es posible conocer el máximo trabajo útil que se puede obtener cuando ocurre un cambio de estado en un sistema considerado.

La propiedad termodinámica que permite conocer este máximo trabajo útil es la disponibilidad termodinámica (B) que se define mediante la Ec. 1.10. [Sophos, 1981]

$$B = T_0 S - H \quad (1.10)$$

Cuando el sistema pasa de un estado 1 al estado 2:

$$B_2 - B_1 = T_0(S_2 - S_1) - (H_2 - H_1) \quad (1.11)$$

El análisis de la Fig. 1.3 permitirá comprender porque la disponibilidad termodinámica permite conocer el máximo trabajo útil que se puede obtener cuando un sistema sufre un cambio de estado.

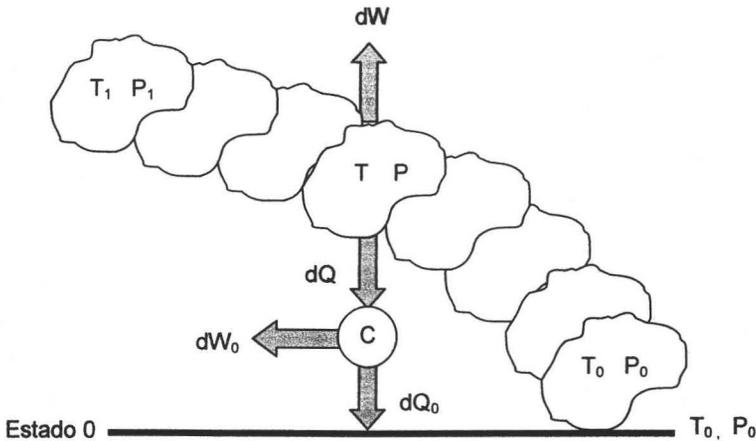


Figura 1.3. Cambio de estado desde P_1 y T_1 hasta P_0 y T_0 . [Levenspiel, 1997]

Cabe señalar que el proceso debe considerarse reversible para que no exista generación de entropía (S_{GEN}), y de esta manera pueda obtenerse el **máximo** trabajo disponible.

La Fig. 1.3 muestra un sistema a T_1 y P_1 al que se le extrae la máxima cantidad de trabajo que éste puede ceder. Esto se logra extrayendo trabajo (dW) y calor (dQ) del sistema durante el proceso.

Sin embargo, dQ se está eliminado del sistema a una temperatura superior a la ambiente (T_0), por lo cual se puede obtener trabajo adicional (dW_0) conforme el calor fluye "cuesta abajo" hasta T_0 . Para obtener este trabajo adicional se acopla una máquina de Carnot (C), que además de permitir obtener dW_0 , permite desechar el calor (dQ_0) a la temperatura del ambiente.

De manera similar, si el sistema y los alrededores se encuentran a presiones diferentes y si el sistema se expande, entonces para minimizar el trabajo PV que no se utiliza, la expansión debe hacerse siempre hasta la presión de los alrededores, es decir cualquier presión diferente debe reducirse a P_0 mediante la producción de trabajo útil. [Levenspiel, 1997]

Si ahora se considera como nuevo sistema de análisis al conjunto formado por la máquina de Carnot y el anterior sistema a P y T, como lo muestra la Fig. 1.4:

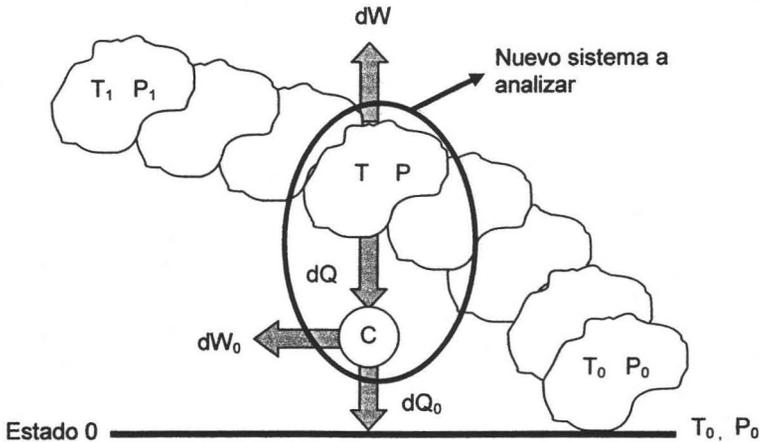


Figura 1.4. Nuevo sistema termodinámico de análisis.

y si además se aplica la primera ley de la termodinámica para un sistema abierto que opera a condiciones de flujo continuo en estado estable, se llega a la siguiente ecuación: [Levenspiel, 1997]

$$dH = dQ_0 - (dW + dW_0) \tag{1.12}$$

donde:

$$dW_{TOTAL} = dW + dW_0 \tag{1.13}$$

por lo tanto:

$$dH = dQ_0 - dW_{TOTAL} \quad (1.14)$$

y despejando el trabajo total (dW_{TOTAL}):

$$dW_{TOTAL} = dQ_0 - dH \quad (1.15)$$

Dado que dQ_0 se está eliminando al ambiente a una temperatura T_0 , con ayuda de la segunda ley de la termodinámica se llega a la Ec. 1.16. [Levenspiel, 1997]

$$dW_{UTILMAX} = T_0 dS - dH \quad (1.16)$$

Si se integra la Ec. 1.13 se llega a la ecuación del cambio de disponibilidad termodinámica, Ec. 1.11, por lo cual se concluye que la disponibilidad termodinámica es el máximo trabajo útil que se puede obtener debido a un cambio de estado del sistema.

Con la finalidad de obtener resultados congruentes de disponibilidad termodinámica, es necesario que tanto la entalpía como la entropía tengan el mismo estado de referencia. [Sophos, 1981]

Durante el desarrollo de esta tesis, se trabajará con sistemas reaccionantes. Se considerará que el sistema se encuentra a T_0 y P_0 ; es decir que el potencial del sistema de ceder trabajo útil debido al alejamiento de T y P respecto al medio ambiente (T_0, P_0) es nulo.

Por lo cual los cambios de entalpía y de entropía, y por lo tanto de disponibilidad, serán causa únicamente de la reacción a T_0 y P_0 .

$$\Delta B_r^0 = T_0 \Delta S_r^0 - \Delta H_r^0 \quad (1.17)$$

donde ΔS_r^0 y ΔH_r^0 son los cambios de entropía y de entalpía, respectivamente, debidos, ambos, a la reacción que ocurre a condiciones estándar de temperatura ($T_0=25^\circ\text{C}$) y presión ($P_0=1\text{atm}$).

En esta tesis se considerará la reacción o transformación química tomando en cuenta el concepto de cadena de producción, en donde un producto es materia prima de otro proceso tecnológico hasta llegar a los llamados petroquímicos de la demanda final (resinas sintéticas, plásticos, elastómeros, fibras, fertilizantes, pinturas). En cada caso se tomará en cuenta el efecto de mezclado, cuando sea necesario, y los coproductos se considerarán en función del producto objetivo.

La definición de "cadena de producción" y "tecnología" o proceso tecnológico se encuentran completamente descritas en el capítulo 4 apartado 2, (4.2).

Si ahora se escribe el cambio en la energía libre de Gibbs debido a una reacción a condiciones estándar:

$$\Delta G_r^0 = \Delta H_r^0 - T\Delta S_r^0 \quad (1.18)$$

Comparando ΔG_r^0 con ΔB_r^0 se llega a la conclusión de que cuando el sistema se encuentra a 25°C y 1 atm la disponibilidad estándar de reacción es numéricamente igual al negativo de la energía libre de reacción estándar.

Por lo tanto a $T=T_0$ se tiene que

$$\Delta B_r^0 = -\Delta G_r^0 \quad (1.19)$$

Y cuando se esta hablando de una reacción, pero de formación de un compuesto a $T=T_0$ se tiene que:

$$\Delta B_f^0 = -\Delta G_f^0 \quad (1.20)$$

La energía libre de reacción estándar se obtiene mediante la diferencia entre la energía libre de formación estándar (ΔG_f^0) de productos y reactivos, como lo muestra la siguiente ecuación:

$$\Delta G_r^0 = \sum \Delta G_f^0(\text{productos}) - \sum \Delta G_f^0(\text{reactivos}) \quad (1.21)$$

La energía libre de formación estándar se define como el cambio en la energía libre de Gibbs que ocurre cuando un mol de sustancia pura es formado a partir de sus elementos a las condiciones estándar. Se establece una convención arbitraria donde: la energía libre (G) de una sustancia química elemental en su estado estándar (25°C y 1atm) vale cero. Esto es cierto para los elementos puros en sus estados más estables. [Ebbing, 1997], [Moore, 1986], [Moran, 1994]

1.3 Conclusiones del capítulo

La disponibilidad termodinámica es una herramienta muy útil para el análisis de procesos (tecnologías), ya que permite conocer el trabajo útil máximo teórico que se obtiene al llevar a cabo el proceso, o por el contrario, el trabajo que debe ser suministrado para que pueda ocurrir el proceso.

La similitud existente entre las definiciones matemáticas de la disponibilidad termodinámica y la energía libre de Gibbs, hace que el cálculo de la primera sea sencillo debido a los datos termodinámicos existentes para el cálculo de la segunda.

La definición de disponibilidad termodinámica se puede encontrar como parte del concepto y cálculo de la exergía, es decir, es incluyente, y los cálculos de disponibilidad podrían por lo tanto ser utilizados por los estudios de exergía.

Con ello, implícita aunque teóricamente, se está utilizando el concepto de uso eficiente de energía.

.Capítulo 2.

Estado actual de oferta y demanda
de la IPQ en México

2.1 Estructura de la IPQ Mexicana.

La 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. [Escobar, 2001]

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.). [Escobar, 2001]

Para hacer un análisis global del estado de la Industria Petroquímica Mexicana (IPQ) se dividirá a la misma en dos ramas: petroquímicos básicos y petroquímicos no básicos.

2.1.1 Petroquímicos básicos.

Los petroquímicos básicos son: etano, metano, pentano, propano, butanos, naftas y materia prima para negro de humo y otros (incluye hexano y heptano). [http://www.pemex.gob.mx]

Dado que la producción de petroquímicos básicos es exclusiva del Estado; es responsabilidad de PEMEX Gas y Petroquímica Básica la producción de estos. Las Tablas 2.1, 2.2 y 2.3 muestran el proceso de gas, la elaboración de productos y las ventas internas de gas seco, gas licuado y productos petroquímicos, respectivamente; todo de PEMEX Gas y Petroquímica Básica.

Las ventas internas son aquellas que PEMEX factura a sus distribuidores en el territorio nacional o que efectúa directamente a clientes nacionales para uso final o intermedio. El valor de las ventas excluye impuestos (IEPS e IVA) y comisiones a distribuidores.

**Tabla 2.1 Proceso de Gas, PEMEX Gas y Petroquímica Básica
[millones de pies cúbicos diarios]**

	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Gas húmedo total	3132	3189	3130	3227	3338	3568	3527	3691	3677	3758	3837
Gas húmedo amargo	2788	2837	2849	3034	3088	3177	3071	3220	3227	3260	3360
Gas húmedo dulce ^a	344	352	281	192	250	391	456	471	450	498	477
Gas a extracción de licuables	3380	3381	3270	3350	3389	3716	3612	3710	3693	3746	3830
Gas húmedo	3000	3053	2990	3078	3191	3416	3378	3536	3526	3600	3689
Reproceso ^b	380	328	280	272	198	300	234	174	166	146	141

Fuente: PEMEX, Anuario estadístico 2004



**Figura 2.1 Proceso de gas, PEMEX Gas y Petroquímica Básica
[PEMEX, Anuario estadístico 2004]**

^a Incluye vapores dulces de condensados

^b Gas de ductos reprocesado en las plantas recuperadoras de licuables de Pajaritos, Poza Rica, Reynosa y de procesos internos de La Cangrejera.

Tabla 2.2 Elaboración de productos, PEMEX Gas y Petroquímica Básica
[miles de barriles diarios]

	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Gas seco ^c [MMpcd]	2396	2458	2376	2615	2799	2816	2709	2791	2804	2916	3029
Líquidos del gas ^d	471	471	460	433	400	439	447	445	443	418	428
Gas licuado	195	201	195	187	177	196	201	204	206	205	212
Etano	170	172	162	146	125	145	160	156	147	127	125
Gasolinas naturales	77	77	80	79	84	88	84	85	88	84	86
Otros ^e	20	21	15	16	1	2	1	1	2	2	4
Azufre [Mt]	664	704	719	761	750	739	687	661	684	703	757

Fuente: PEMEX, Anuario estadístico 2004

Mt= Miles de toneladas; MMpcd= Millones de pies cúbicos diarios.

Tabla 2.3 Valor de las ventas internas de gas seco, gas licuado y productos
petroquímicos, PEMEX Gas y Petroquímica Básica^f.

	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Total	6783.7	8347.8	12103.6	19630.0	27058.9	30051.2	33688.7	57028.5	59207.3	57281.1	88917.1
Gas seco	3426.2	3478.4	5191.1	9999.3	12553.6	13203.9	15557.5	27594.9	28914.1	30313.0	51189.2
Gas licuado	3255.2	4728.9	6599.6	9187.2	14004.1	16389.9	17597.6	28469.2	29327.2	26137.4	36855.6
Petroquímicos	102.3	140.5	312.9	437.4	491.4	447.8	502.1	836.3	808.7	719.1	864.5
Hexano	41.6	46.3	75.9	119.4	135.7	143.5	121.2	115.1	142.6	134.0	217.6
Azufre	26.0	53.7	147.2	162.9	171.1	142.9	148.1	130.6	72.8	110.5	194.2
Materia prima negro de humo	17.4	21.2	56.1	98.7	108.8	90.5	117.5	210.3	120.1	135.7	274.4
Pentanos	6.6	7.8	13.9	23.3	26.8	22.0	31.6	29.4	2.7	47.4	23.1
Heptano	5.6	6.0	9.0	14.8	22.9	24.1	23.1	22.3	24.7	20.3	30.1
Butano	1.8	0.7	1.6	6.7	9.9	11.9	20.7	35.3	39.2	36.5	54.7
Propano	1.8	1.8	3.8	6.8	10.0	9.2	16.0	25.3	23.3	18.8	27.9
Isobutano	1.5	3.0	5.4	4.8	6.2	3.7	4.4	7.5	6.3	2.5	0.4
Solventes	-	-	-	-	-	-	19.5	260.5	377.0	213.4	42.1
Otros ^g	-	-	-	6.1	9.8	9.6	31.5	128.1	157.3	111.6	7.8

Fuente: PEMEX, Anuario estadístico 2004 Precios corrientes.

^c No incluye etano a ductos de gas seco.

^d Incluye condensados estabilizados, reprocesos en La Cangrejera y otras corrientes a fraccionamiento.

^e Productos pesados de Reynosa y líquidos transferidos a la refinería Madero.

^f No incluye IVA

^g Incluye aceite lámparas, alico No. 4 y petróleo incoloro

Tabla 2.4 Volumen de las ventas internas de gas seco, gas licuado y productos petroquímicos
[miles de toneladas]
PEMEX Gas y Petroquímica Básica

	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Gas seco	1 280.1	1 368.4	1 463.9	1 540.8	1 619.8	1 788.8	1 899.1	2 060.8	1 993.3	2 425.1	2 621.4
Gas licuado	248.7	255.3	255.3	265.3	278.3	287.3	311.5	329.7	324.7	331.9	326.9
Petroquímicos	407.4	610.4	662.8	670	690.1	632.2	637.3	750.7	821.1	823.3	792.2
Hexano	50.6	49.9	44.8	48.4	50.4	48.7	38.9	34	41.3	39.7	52.5
Azufre	204.4	389.3	415.8	399.9	407.3	354.5	347.1	347.6	394.5	448.9	470
Materia prima negro de humo	122.2	138.4	172.7	189.1	195.8	191.6	189.8	197.4	154.4	149.8	208.1
Pentanos	15.5	17.9	15.8	17	15.7	15.7	18.4	10.9	1.4	20.5	6.9
Heptano	6.8	6.5	5.3	6	8.3	8	7.2	6.4	7	5.8	7.1
Butano	3	1.2	1.2	3.5	5	6.7	8.7	9.9	11.4	12.8	13.3
Propano	3	2.9	3.1	3.6	4.8	5.1	6.7	7	6.6	6.8	6.7
Isobutano	1.9	4.3	4.1	2.4	2.9	1.9	1.8	2	1.7	0.8	0.1
Solventes	0	0	0	0	0	0	18.6	135.5	202.7	138.1	27.5
Otros ^h	0	0	0	3.2	4.8	4.8	11.6	34.3	48.7	38.2	1.5

Fuente: PEMEX, Anuario estadístico 2004

^h Incluye aceite lámparas, alíco No. 4 y petróleo incoloro

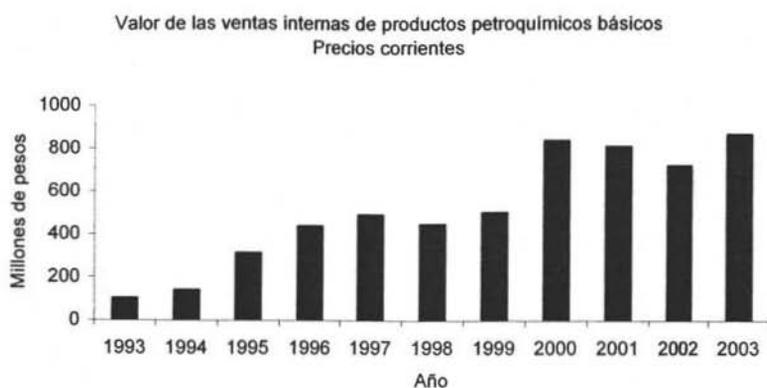


Figura 2.2. Valor de las ventas internas de productos petroquímicos básicos, PEMEX Gas y Petroquímica Básica [PEMEX, Anuario estadístico 2004]

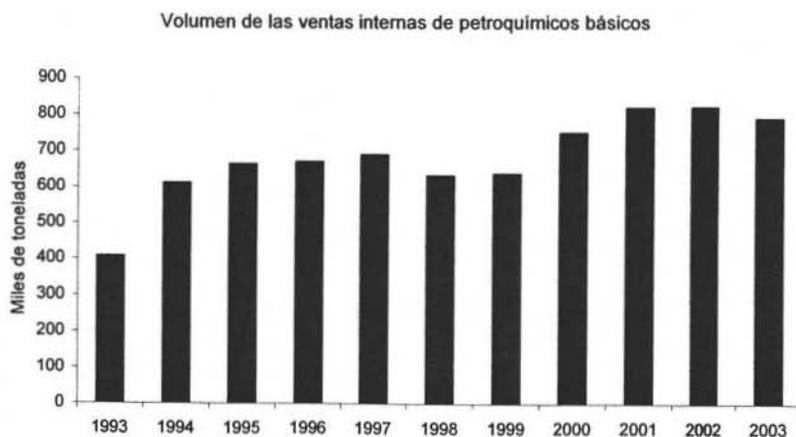


Figura 2.3. Volumen de las ventas internas de productos petroquímicos básicos, PEMEX Gas y Petroquímica Básica [PEMEX, Anuario estadístico 2004]

2.1.2 Petroquímicos no básicos.

Los petroquímicos no básicos son simplemente los que no son básicos. Estos se dividen a su vez en subramas.

Las subramas de los petroquímicos no básicos de la IPQ nacional son los siguientes: intermedios, fertilizantes nitrogenados, resinas sintéticas, fibras químicas, elastómeros y negro de humo y especialidades. En las especialidades se incluyen a los adhesivos, aditivos para alimentos, agentes tensoactivos, colorantes, explosivos, farmoquímicos, hulequímicos, iniciadores y catalizadores, materias primas de aditivos para lubricantes y combustibles, plaguicidas, plastificantes, propelentes y refrigerantes, químicos aromáticos y otras especialidades.

Las Tablas 2.5, 2.7 y 2.8 muestran la producción, la balanza comercial y el consumo aparente en miles de pesos de los petroquímicos no básicos de la IPQ mexicana en el periodo que abarca desde el año 1996 hasta el año 2002. Mientras que las Tablas 2.6 y 2.9 muestran la producción y el consumo aparente en toneladas de los mismos petroquímicos.

Tabla 2.5. Valor de la producción de la IPQ mexicana (petroquímicos no básicos)
[Miles de pesos]

	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Adhesivos	452,332	666,894	865,348	891,518	930,559	1,083,648	901,345
Aditivos para alimentos	101,053	139,873	141,470	121,809	94,802	193,826	187,161
Agentes tensoactivos	3,272,301	4,006,076	3,348,773	4,457,953	4,879,640	4,848,914	4,164,352
Colorantes	268,598	241,108	280,172	281,435	245,397	299,465	323,022
Elastómeros y negro de humo	1,911,874	1,924,287	1,766,428	1,320,971	2,035,059	1,981,738	1,784,915
Explosivos	177,610	184,490	289,500	314,501	395,097	385,031	242,796
Farmoquímicos	1,215,492	1,761,038	1,488,303	867,171	522,574	538,724	511,430
Fertilizantes nitrogenados	4,540,385	3,868,672	3,170,182	2,698,762	1,845,890	1,523,643	923,757
Fibras químicas	13,135,232	14,555,428	13,271,048	15,417,124	18,501,005	13,984,304	12,174,497
Hulequímicos	256,381	196,525	187,671	152,832	150,554	92,471	106,190
Iniciadores y catalizadores	112,830	127,973	160,132	198,983	213,100	184,184	205,477
Intermedios	37,971,418	36,818,651	33,471,948	32,158,309	42,451,863	34,554,506	31,206,517
Materias primas de aditivos para lubricantes y combustibles	909,522	1,088,795	1,241,644	913,217	1,378,950	1,504,509	1,395,629
Plaguicidas	423,764	461,853	486,152	592,820	674,218	804,249	743,653
Plastificantes	568,026	580,752	483,779	529,196	725,452	606,127	573,040
Propelentes y refrigerantes	118,477	131,669	113,750	142,364	158,224	125,386	135,283
Químicos aromáticos	152,864	170,802	183,178	123,121	129,875	134,456	131,366
Resinas sintéticas	13,851,874	14,420,816	16,521,039	19,009,727	22,878,845	23,015,609	23,536,366
Otras especialidades	6,014	6,695	8,845	44,350	53,558	65,136	29,758
Total	79,446,047	81,352,397	77,479,362	80,236,163	98,264,662	85,925,926	79,276,554
Fuente: Anuario estadístico petroquímica 1998, 2000 y 2002, Secretaría de energía							Precios corrientes

Tabla 2.6. Volumen de la producción de la IPQ mexicana (petroquímicos no básicos)
[Toneladas]

	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Adhesivos	48,851	72,575	74,770	71,843	66,102	66,009	62,168
Aditivos para alimentos	20,905	27,612	26,028	26,733	18,397	21,552	21,594
Agentes tensoactivos	431,753	460,634	462,971	484,704	532,044	545,982	469,083
Colorantes	7,961	7,938	8,776	8,156	6,622	12,197	11,664
Elastómeros y negro de humo	266,163	286,510	297,084	297,713	315,098	266,622	277,778
Explosivos	111,214	104,788	184,571	194,742	189,921	177,228	90,312
Farmoquímicos	3,082	3,548	2,817	3,349	3,030	2,912	3,134
Fertilizantes nitrogenados	4,634,470	3,718,589	3,133,820	2,670,248	1,696,633	1,603,633	1,249,154
Fibras químicas	1,184,312	1,266,752	1,114,544	1,077,291	1,128,814	956,412	866,933
Hulequímicos	10,719	10,940	11,340	6,316	6,592	4,512	4,703
Iniciadores y catalizadores	4,943	5,409	6,872	7,361	7,064	5,954	6,619
Intermedios	15,875,773	13,891,433	13,519,006	11,886,995	11,573,217	10,131,960	9,846,244
Materias primas de aditivos para lubricantes y combustibles	328,977	333,439	346,508	311,366	348,296	393,841	387,253
Plaguicidas	14,187	17,132	17,271	22,948	20,374	23,836	23,521
Plastificantes	63,937	68,716	81,001	82,837	79,548	71,797	67,334
Propelentes y refrigerantes	24,435	24,503	22,515	25,289	26,887	24,503	26,262
Químicos aromáticos	3,836	4,200	4,026	5,513	5,945	7,124	7,139
Resinas sintéticas	1,990,841	2,063,459	2,382,727	2,072,645	2,681,421	2,729,193	2,806,460
Otras especialidades	742	490	583	2,230	2,799	2,233	1,583
Total	25,027,101	22,368,667	21,697,230	19,258,279	18,708,804	17,047,500	16,228,938

Fuente: Anuario estadístico petroquímica 1998, 2000 y 2002, Secretaría de energía

Tabla 2.7. Balanza comercial de la IPQ mexicana (petroquímicos no básicos)

	[Miles de pesos]						
	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Adhesivos	-546,342	-631,643	-809,832	-977,167	-1,194,084	-1,246,914	-1,508,139
Aditivos para alimentos	-259,792	-361,929	-397,172	-471,872	-459,448	-416,315	-401,704
Agentes tensoactivos	-472,693	-592,938	-826,617	-819,554	-854,534	-1,173,327	538,739
Colorantes	-553,748	-744,721	-926,294	-984,963	-933,533	-766,414	-839,121
Elastómeros y negro de humo	-92,325	-221,913	-167,146	-281,835	-46,995	240,396	239,008
Explosivos	-115,018	-124,268	-142,375	-109,541	-128,397	-195,611	-379,468
Farmoquímicos	-997,936	-1,525,147	-1,555,703	-1,743,132	-1,961,818	-2,014,675	-2,275,208
Fertilizantes nitrogenados	727,316	-232,123	-676,640	-1,076,734	-2,263,779	-2,426,093	-3,314,798
Fibras químicas	2,686,947	2,321,325	1,320,874	1,036,302	207,177	349,244	430,099
Hulequímicos	-176,812	-237,438	-324,131	-381,155	-428,294	-327,411	-357,917
Iniciadores y catalizadores	98,168	154,130	425,232	550,233	183,477	-48,569	-162,215
Intermedios	-3,867,504	-8,590,038	-9,903,661	-12,455,456	-15,793,953	-15,743,177	-19,509,046
Materias primas de aditivos para lubricantes y combustibles	-311,154	-789,679	-1,062,112	-1,040,140	-1,200,168	-807,401	-460,671
Plaguicidas	-1,685,474	-1,629,314	-2,099,878	-2,216,579	-1,909,012	-2,147,640	-2,461,682
Plastificantes	-68,031	-89,846	-61,621	-55,743	-61,267	-92,719	-111,045
Propelentes y refrigerantes	29,050	30,093	2,556	7,418	-24,453	327,774	46,311
Químicos aromáticos	-8,257,860	-11,361,355	222,459	85,608	145,976	176,650	178,247
Resinas sintéticas	92,418	165,897	-15,296,284	-19,024,175	-23,388,411	-22,097,823	-23,746,839
Otras especialidades	-66,405	-77,739	-107,848	-110,872	-107,651	-97,098	-77,123
Total	-13,837,195	-24,518,646	-32,386,193	-40,069,357	-49,219,167	-48,507,123	-54,172,572
Fuente: Anuario estadístico petroquímica 1998, 2000 y 2002, Secretaría de energía							Precios corrientes

Tabla 2.8. Valor del consumo aparente de la IPQ mexicana (petroquímicos no básicos)

	[Miles de pesos]									
	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002			
Adhesivos	998,674	1,298,537	1,675,180	1,868,685	2,124,643	2,330,562	2,409,484			
Aditivos para alimentos	360,845	501,802	538,642	593,681	554,250	610,141	588,865			
Agentes tensoactivos	3,744,994	4,599,014	4,175,390	5,277,507	5,734,174	6,022,241	3,625,613			
Colorantes	822,346	985,829	1,206,466	1,266,398	1,178,930	1,065,879	1,162,143			
Elastómeros y negro de humo	2,004,199	2,146,200	1,933,574	1,602,806	2,082,054	1,741,342	1,545,907			
Explosivos	292,628	308,758	431,875	424,042	523,494	580,642	622,264			
Farmoquímicos	2,213,428	3,286,185	3,044,006	2,610,303	2,484,392	2,553,399	2,786,638			
Fertilizantes nitrogenados	3,813,069	4,100,795	3,846,822	3,775,496	4,109,669	3,949,736	4,238,555			
Fibras químicas	10,448,285	12,234,103	11,950,174	14,380,822	18,293,828	13,635,060	11,744,398			
Hulequímicos	433,193	433,963	511,802	533,987	578,848	419,882	464,107			
Iniciadores y catalizadores	14,662	-26,157	-265,100	-351,250	29,623	232,753	367,692			
Intermedios	41,838,922	45,408,689	43,375,609	44,613,765	58,245,816	50,297,683	50,715,563			
Materias primas de aditivos para lubricantes y combustibles	1,220,676	1,878,474	2,303,756	1,953,357	2,579,118	2,311,910	1,856,300			
Plaguicidas	2,109,238	2,091,167	2,586,030	2,809,399	2,583,230	2,951,889	3,205,335			
Plastificantes	636,057	670,598	545,400	584,939	786,719	698,846	684,085			
Propelentes y refrigerantes	89,427	101,576	111,194	134,946	182,677	-202,388	88,972			
Químicos aromáticos	8,410,724	11,532,157	-39,281	37,513	-16,101	-42,194	-46,881			
Resinas sintéticas	13,759,456	14,234,919	31,817,323	38,033,902	45,267,256	45,113,432	47,283,205			
Otras especialidades	72,419	84,434	116,693	155,222	161,209	162,234	106,881			
Total	93,283,242	105,871,043	109,865,555	120,305,520	147,483,829	134,433,049	133,449,128			
Fuente: Anuario estadístico petroquímica 1998, 2000 y 2002, Secretaría de energía										Precios corrientes

Tabla 2.9. Volumen del consumo aparente de la IPQ mexicana (petroquímicos no básicos)
[Toneladas]

	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Adhesivos	67,136	94,397	98,623	99,278	108,630	122,034	104,346
Aditivos para alimentos	28,882	36,842	36,226	43,201	38,793	42,102	39,430
Agentes tensoactivos	443,019	479,804	478,906	503,335	546,730	644,757	424,885
Colorantes	16,315	18,333	22,792	24,281	21,578	21,897	24,389
Elastómeros y negro de humo	257,001	269,935	272,796	282,882	266,029	212,511	216,112
Explosivos	115,504	109,488	189,323	197,995	190,395	174,327	90,163
Farmoquímicos	6,175	7,106	6,691	7,299	6,838	6,657	7,106
Fertilizantes nitrogenados	3,911,914	3,734,334	3,685,212	3,698,612	3,631,032	3,503,603	3,703,176
Fibras químicas	977,014	1,098,740	998,153	986,972	1,067,493	884,760	796,567
Hulequímicos	17,226	19,506	21,655	20,269	20,966	16,847	16,539
Iniciadores y catalizadores	9,111	14,516	12,648	10,744	14,503	11,736	12,599
Intermedios	15,965,753	14,941,299	14,801,837	13,940,872	13,857,759	12,726,673	12,644,642
Materias primas de aditivos para lubricantes y combustibles	460,999	691,288	885,482	803,435	688,025	676,602	761,187
Plaguicidas	44,056	50,359	52,270	58,816	52,032	78,915	60,334
Plastificantes	68,318	74,628	83,096	104,696	83,189	79,822	79,201
Propelentes y refrigerantes	21,650	19,206	19,836	20,875	21,602	18,390	11,812
Químicos aromáticos	477,541	793,835	3,423	5,377	4,650	5,886	6,397
Resinas sintéticas	1,991,198	2,062,932	3,440,477	3,611,284	4,429,519	4,453,905	4,765,453
Otras especialidades	6,843	7,748	10,639	11,350	12,810	10,562	7,872
Total	24,885,655	24,524,296	25,120,085	24,431,573	25,082,573	23,691,986	23,772,210

Fuente: Anuario estadístico petroquímica 1998, 2000 y 2002, Secretaría de energía

A partir de las Tablas 2.5, 2.6, 2.7, 2.8 y 2.9 se construyen las Figuras 2.4, 2.5, 2.6 y 2.7, que muestran con mayor claridad la evolución de la IPQ nacional en el periodo de tiempo antes mencionado.

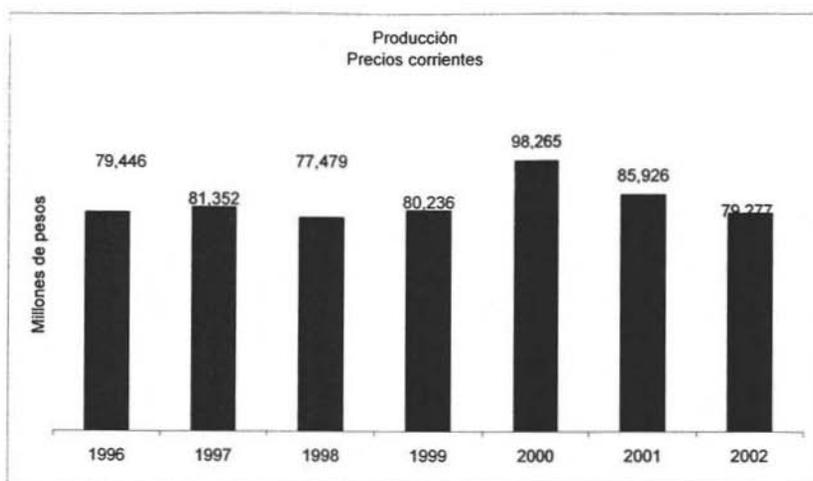


Figura 2.4 Valor de la producción de la IPQ mexicana (petroquímicos no básicos)
[Anuario estadístico petroquímica 1998, 2000 y 2002, Secretaría de energía]

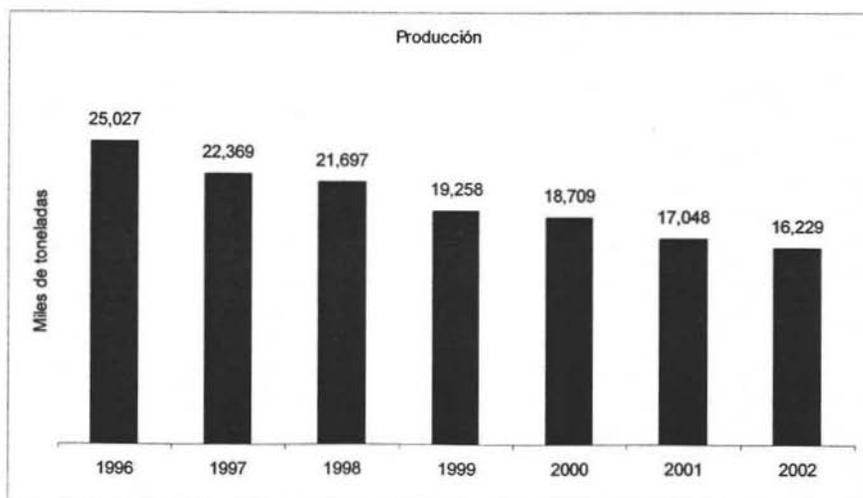


Figura 2.5 Volumen de la producción de la IPQ mexicana (petroquímicos no básicos)
[Anuario estadístico petroquímica 1998, 2000 y 2002, Secretaría de energía]

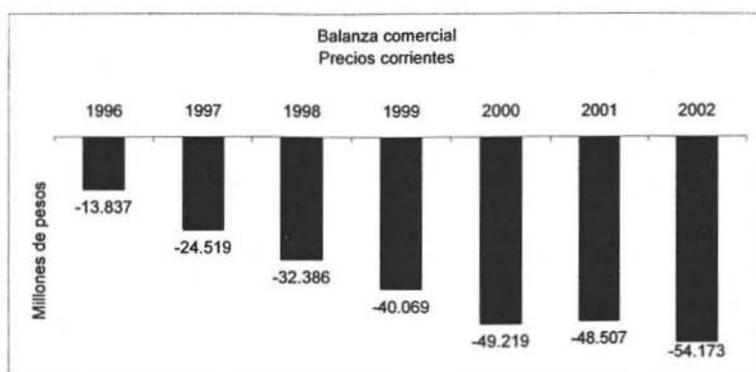


Figura 2.6 Balanza comercial de la IPQ mexicana (petroquímicos no básicos)
[Anuario estadístico petroquímica 1998, 2000 y 2002, Secretaría de energía]

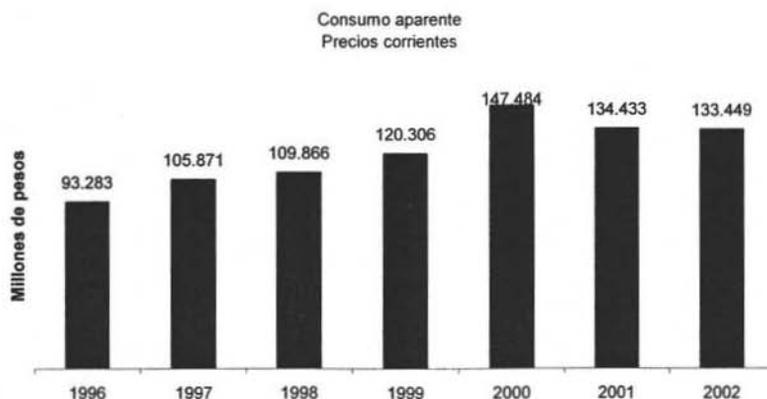


Figura 2.7 Valor del consumo aparente de la IPQ mexicana (petroquímicos no básicos)
[Anuario estadístico petroquímica 1998, 2000 y 2002, Secretaría de energía]

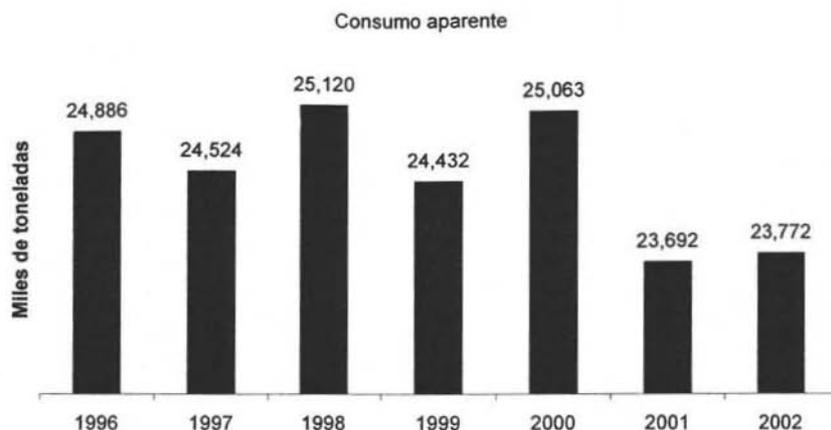


Figura 2.8 Volumen del consumo aparente de la IPQ mexicana (petroquímicos no básicos) [Anuario estadístico petroquímica 1998, 2000 y 2002, Secretaría de energía]

2.1.3 PEMEX Petroquímica

La actividad fundamental de PEMEX petroquímica son los procesos petroquímicos no básicos derivados de la primera transformación del gas natural, metano, etano, propano y naftas de Petróleos Mexicanos. PEMEX Petroquímica guarda una estrecha relación comercial con empresas privadas nacionales dedicadas a la elaboración de fertilizantes, plásticos, fibras y hules sintéticos, fármacos, refrigerantes, aditivos, etc. [<http://www.ptq.pemex.com>].

La Tabla 2.10 muestra el valor de las ventas internas de productos petroquímicos desde el año 1993 hasta el año 2003 en miles de pesos, mientras que la Tabla 2.11 lo hace en miles de toneladas. Los productos de PEMEX petroquímica se dividen en: derivados del metano, derivados etano, aromáticos y derivados, propileno y derivados, y otros. A partir de las Tablas 2.10 y 2.11 se construyen las Figuras 2.7 y 2.8.

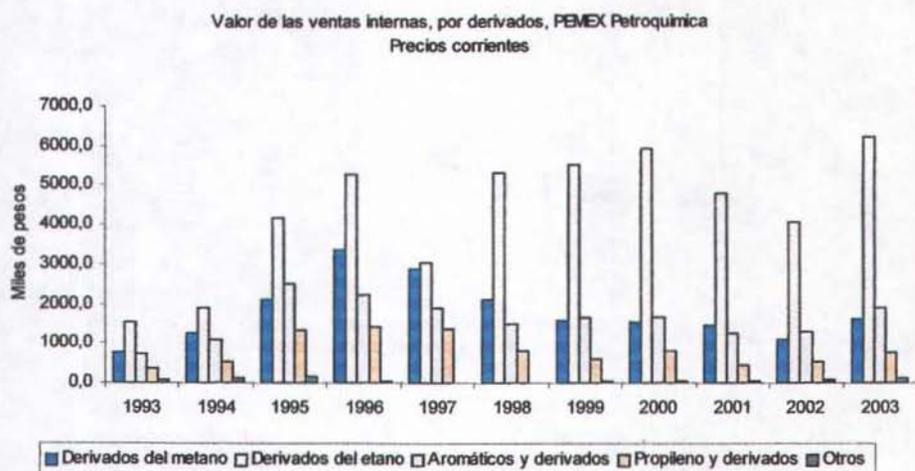


Figura 2.9 Valor de las ventas internas de productos petroquímicos, PEMEX Petroquímica [PEMEX, Anuario estadístico 2004]

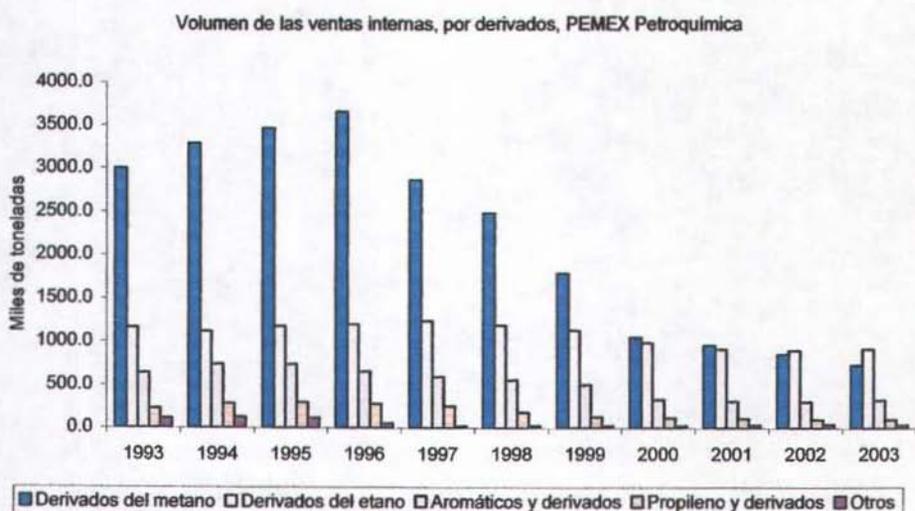


Figura 2.10 Volumen de las ventas internas de productos petroquímicos, PEMEX Petroquímica [PEMEX, Anuario estadístico 2004]

Tabla 2.10. Valor de las ventas internas de productos petroquímicos. PEMEX Petroquímica
[Miles de pesos]

	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Total	3481.5	4834.5	10309.0	12267.5	9192.7	9744.2	9330.4	9954.7	7947.1	7074.2	10634.5
Derivados del metano	761.3	1234.7	2115.4	3353.9	2874.6	2093.0	1559.4	1549.2	1437.7	1094.9	1637.4
Amoniaco	678.1	1054.1	1942.5	3303.8	2691.7	1948.3	1411.9	1352.1	1262.6	947.1	1431.7
Anhidrido carbónico	21.6	16.5	23.5	31.0	32.3	35.4	31.6	23.0	18.8	18.0	32.6
Metanol	61.6	164.1	149.4	19.1	150.6	109.3	115.9	174.1	156.3	129.8	173.1
Derivados del etano	1543.0	1883.6	4172.2	5265.2	3035.3	5308.9	5494.7	5906.0	4774.6	4054.2	6193.9
Acetaldehído	179.9	136.6	269.5	387.8	403.8	475.2	387.2	195.3	75.5	66.6	86.3
Cloruro de vinilo	223.8	286.3	507.1	521.4	725.3	424.9	503.8	821.5	513.5	519.6	616.0
Dicloroetano	0.5	0.7	0.4	0.5	0.3	0.6	0.4	0.4	0.2	0.0	0.2
Etileno	45.5	54.1	122.4	115.0	177.9	137.1	139.1	211.5	121.6	131.4	205.3
Glicoles etilénicos	15.8	35.7	279.2	344.1	420.9	356.1	382.1	405.6	381.8	379.3	632.7
Oxido de etileno	182.0	226.9	661.1	780.6	899.2	939.0	892.4	1114.3	976.4	882.1	1397.4
Percloroetileno	9.1	8.8	19.2	34.9	3.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Polietileno A.D.	257.0	386.4	705.8	989.8	236.7	1002.7	1102.8	1048.3	884.3	557.3	1114.1
Polietileno B.D.	629.4	748.1	1607.5	2091.1	168.0	1973.3	2086.9	2109.1	1821.3	1517.9	2141.9
Aromáticos y derivados	728.0	1078.2	2528.0	2209.7	1893.8	1513.4	1654.4	1661.2	1237.8	1312.0	1910.6
Aromáticos pesados	0.0	0.0	1.1	2.5	5.0	4.7	16.9	5.5	0.0	0.0	0.0
Aromina 100	5.4	6.9	11.4	17.3	21.6	18.8	23.6	29.4	24.5	16.2	30.9
Benceno	7.3	8.0	15.7	19.9	23.3	23.2	22.9	29.6	29.1	24.1	2.1
Ciclohexano	76.3	93.4	142.1	14.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cumeno	35.0	45.3	89.8	88.4	137.9	52.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Estireno	231.7	328.5	769.3	586.2	523.5	480.1	561.1	983.3	625.3	717.5	853.0
Etilbenceno	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Fluoxil	0.3	0.8	1.2	2.9	2.9	2.3	3.5	4.5	3.9	4.3	4.4
Ortoxileno	42.5	61.7	171.0	124.8	91.7	75.5	67.7	5.2	0.0	0.0	0.0
Paraxileno	224.2	403.3	1130.0	1062.5	730.2	517.3	555.6	1.1	0.0	0.0	306.1
Tolueno	83.1	99.4	150.3	225.3	284.5	283.7	314.0	372.3	240.7	367.9	494.0
Xileno	22.2	30.9	46.1	65.3	72.9	54.7	89.0	183.8	173.1	166.0	215.5
Solcan	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	46.5	141.2	16.0	4.6

	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Propileno y derivados	352.4	521.0	1317.8	1410.2	1385.4	810.1	598.6	806.1	457.6	526.4	761.1
Ácido cianhídrico	3.0	1.4	3.6	4.6	5.0	4.2	2.8	9.3	5.6	2.6	0.0
Acrolonitrilo	211.1	276.6	724.1	790.4	862.2	533.4	312.1	616.7	196.8	368.6	619.1
Dodecibenceno	8.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Isopropanol	18.2	24.9	61.0	57.2	69.2	46.7	35.7	0.0	0.0	0.0	0.0
Polímero ligero	0.1	0.1	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Polipropileno	94.5	173.9	452.7	510.1	413.0	225.8	214.8	116.8	40.7	31.7	3.8
Propileno	13.5	39.1	62.2	47.3	36.0	0.0	33.2	63.3	214.5	123.5	138.2
Tetrámero de propileno	3.7	5.0	13.9	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Otros	96.8	117.0	175.6	28.5	3.6	18.8	23.3	32.2	39.4	86.7	131.5
PEMEX, Anuario estadístico 2004	Precios corrientes										

Tabla 2.11. Volumen de las ventas internas de productos petroquímicos. PEMEX Petroquímica
(Miles de toneladas)

	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Total	5154.0	5555.0	5794.0	5851.0	4979.0	4451.0	3585.0	2520.0	2325.0	2199.0	2114.0
Derivados del metano	3001.0	3287.0	3464.0	3658.0	2864.0	2488.0	1788.0	1054.0	958.0	856.0	732.0
Amoniaco	1666.0	1848.0	2014.0	2203.0	1752.0	1546.0	1231.0	815.0	752.0	644.0	541.0
Anhídrido carbónico	1193.0	1292.0	1323.0	1439.0	1033.0	863.0	472.0	152.0	126.0	147.0	132.0
Metanol	142.0	147.0	127.0	16.0	79.0	79.0	85.0	87.0	80.0	65.0	59.0
Derivados del etano	1165.0	1121.0	1178.0	1202.0	1242.0	1193.0	1135.0	991.0	915.0	901.0	917.0
Acetaldehído	249.0	171.0	205.0	225.0	195.0	199.0	163.0	77.0	22.0	23.0	21.0
Cloruro de vinilo	215.0	206.0	187.0	178.0	209.0	172.0	158.0	173.0	148.0	150.0	125.0
Dicloroetano	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Etileno	35.0	35.0	39.0	34.0	40.0	37.0	32.0	34.0	23.0	35.0	37.0
Glicoles etilénicos	17.0	29.0	90.0	103.0	110.0	103.0	116.0	93.0	103.0	112.0	111.0
Óxido de etileno	203.0	196.0	202.0	195.0	226.0	234.0	224.0	223.0	214.0	219.0	220.0
Percloroetileno	7.0	8.0	10.0	10.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Polietileno A.D.	147.0	166.0	146.0	162.0	172.0	166.0	168.0	138.0	139.0	103.0	149.0
Polietileno B.D.	291.0	309.0	299.0	295.0	289.0	282.0	274.0	253.0	286.0	259.0	254.0
Aromáticos y derivados	641.0	738.0	740.0	656.0	598.0	560.0	505.0	331.0	310.0	305.0	329.0

Aromáticos pesados	0.0	0.0	1.0	2.0	5.0	4.0	13.0	3.0			
Aromatina 100	5.0	6.0	6.0	7.0	8.0	8.0	8.0	8.0	7.0	5.0	6.0
Benceno	8.0	8.0	10.0	9.0	10.0	11.0	9.0	7.0	9.0	7.0	7.0
Ciclohexano	68.0	73.0	65.0	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Curmeno	36.0	42.0	41.0	31.0	42.0	18.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Estireno	161.0	156.0	171.0	149.0	126.0	128.0	117.0	143.0	125.0	126.0	114.0
Etilbenceno	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Fluxoil	5.0	4.0	6.0	6.0	5.0	5.0	5.0	4.0	4.0	4.0	3.0
Ortoxileno	41.0	48.0	49.0	51.0	30.0	29.0	23.0	1.0	0.0	0.0	0.0
Paraxileno	198.0	264.0	265.0	253.0	221.0	196.0	178.0	0.0	0.0	0.0	51.0
Tolueno	95.0	108.0	100.0	110.0	120.0	134.0	120.0	101.0	75.0	109.0	107.0
Xilenos	24.0	29.0	26.0	31.0	31.0	27.0	32.0	51.0	50.0	49.0	47.0
Solcan	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.0	40.0	5.0	1.0
Propileno y derivados	230.0	282.0	293.0	280.0	253.0	183.0	132.0	117.0	108.0	96.0	99.0
Acido cianhídrico	5.0	5.0	5.0	6.0	6.0	5.0	3.0	5.0	3.0	2.0	0.0
Acrlonitrilo	130.0	151.0	163.0	167.0	159.0	129.0	71.0	84.0	37.0	57.0	72.0
Dodecibenceno	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Isopropanol	16.0	17.0	16.0	15.0	15.0	8.0	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Polímero ligero	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Polipropileno	58.0	73.0	83.0	76.0	64.0	41.0	39.0	16.0	7.0	5.0	0.0
Propileno	14.0	32.0	22.0	16.0	9.0	0.0	12.0	12.0	61.0	32.0	27.0
Tetramero de propileno	3.0	4.0	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Otros	117.0	127.0	119.0	55.0	22.0	27.0	25.0	27.0	34.0	41.0	37.0

Fuente: PEMEX, Anuario estadístico 2004

El grupo que registró un mayor valor de ventas es el grupo de los derivados del etano, y dentro de éste destacan los polietilenos de alta y baja densidad.

En cambio, en general, el grupo que registró un mayor volumen de ventas fue el grupo de los derivados del metano, aunque en los dos últimos años (2002 y 2003) la situación cambió, y el grupo que registró mayor volumen de ventas fue el grupo de los derivados del etano.

La Figura 2.11 muestra el valor de las ventas internas totales anuales, en miles de pesos, de PEMEX petroquímica.

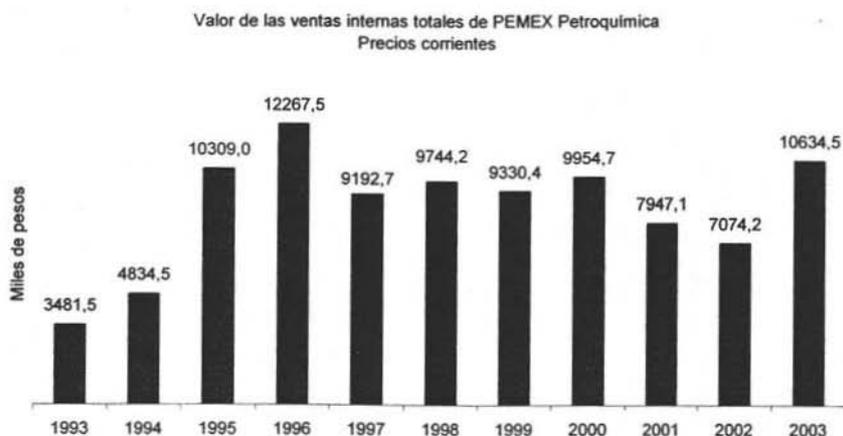


Figura 2.11. Valor de las ventas internas totales de PEMEX Petroquímica

[PEMEX, Anuario estadístico 2004]

En la Figura 2.12 se presenta el volumen total anual, en miles de toneladas, de las ventas internas de petroquímicos de PEMEX Petroquímica. En esta última gráfica se ve la disminución del volumen de ventas internas en PEMEX Petroquímica a partir del año 1996 hasta el año 2003.

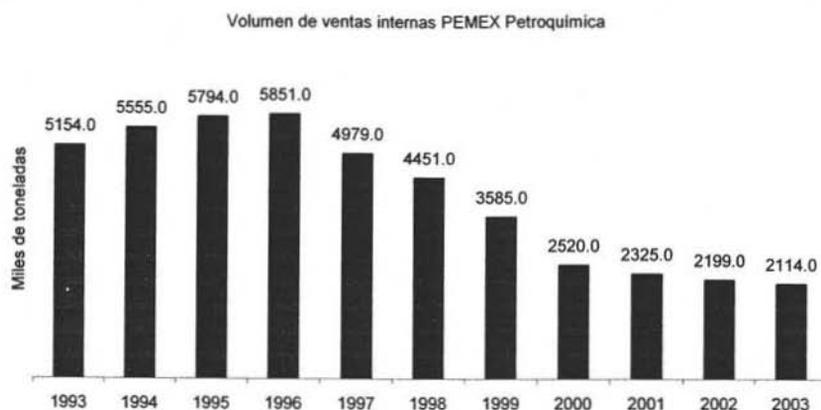


Figura 2.12. Volumen de ventas internas totales de PEMEX Petroquímica

[PEMEX, Anuario estadístico 2004]

2.1.4 PEMEX Internacional (PMI)

PMI Comercio Internacional, S.A. de C.V. surgió en el año de 1989, producto de la estrategia comercial de Petróleos Mexicanos (PEMEX) para competir en el mercado internacional de petróleo y productos derivados.

Estableciendo dentro de sus objetivos y metas, el asegurar la colocación en el mercado exterior de las exportaciones de petróleo crudo de PEMEX; así como, proporcionar servicios comerciales y administrativos a empresas del Grupo PEMEX que realizan actividades relacionadas al comercio de hidrocarburos.
[<http://www.pmi.com.mx>]

La Figura 2.13 se construye a partir de los datos que aparecen en la Tabla 2.12, en dicha tabla aparecen los datos de exportaciones e importaciones que PEMEX comercia. En dicha Figura se ve claramente que las importaciones, en el periodo de tiempo considerado (1993-2003), jamás son mayores que las exportaciones, por lo cual, obviamente, la balanza comercial siempre es positiva.

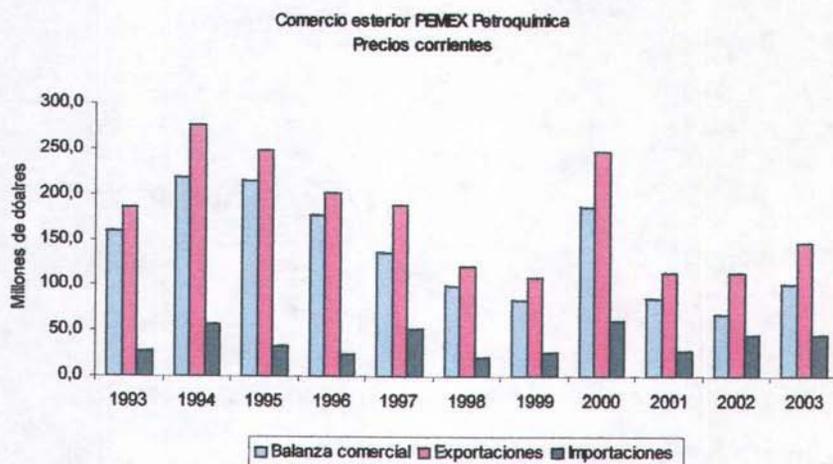


Figura 2.13. Comercio exterior de productos petroquímicos, PEMEX Internacional
[PEMEX, Anuario estadístico 2004]

Tabla 2.12 Valor del comercio exterior de productos petroquímicos. PEMEX Internacional

[Millones de dólares]

	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Exportaciones	186.3	276.5	247.7	201.1	187.1	118.9	108.3	245.7	112.9	112.9	145.5
Acetaldehído	0.0	15.1	18.0	11.7	13.3	11.7	11.6	12.0	15.2	10.5	12.5
Acronitrilo	7.4	7.2	0.0	1.5	1.3	0.0	0.0	24.6	1.3	2.6	1.8
Amoniaco	42.0	75.4	49.0	36.0	54.3	24.5	4.0	35.7	2.4	12.9	0.0
Azufre	22.8	24.0	33.5	24.7	24.2	26.7	26.4	19.8	6.4	12.9	25.3
Benceno	18.9	18.4	9.6	11.3	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	10.1
Butanos/butenos	5.2	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cera polietilénica	0.1	0.1	0.2	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2
Estireno	1.0	2.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	3.3
Etileno	23.0	53.5	54.5	46.0	36.1	23.0	35.8	95.5	46.9	28.0	39.8
Glicoles etilénicos	28.3	31.7	28.2	19.7	15.9	7.4	0.8	16.3	7.6	3.9	18.4
Poliétilenos	26.3	32.5	44.7	34.2	31.4	15.8	13.8	22.7	22.7	22.4	15.4
Polipropileno	3.4	5.9	8.0	8.4	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Otros	7.9	9.6	1.9	7.3	6.4	9.6	15.0	19.0	10.2	17.6	18.7
Importaciones	26.9	57.2	33.2	25.0	51.8	20.7	25.9	60.9	28.6	45.8	44.3
Acetonitrilo	0.4	0.2	1.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Amoniaco	0.0	7.7	0.0	8.7	2.3	0.0	6.0	42.7	19.6	12.8	8.8
8enceno	0.0	0.0	0.0	0.0	15.4	12.0	14.0	0.8	6.1	1.8	0.0
Poliétilenos	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	1.2	1.9	0.0	1.2	1.8
Propileno	22.8	21.8	0.0	2.1	9.5	4.6	0.0	1.7	0.0	2.0	0.0

Xilenos	0.0	19.9	32.2	12.9	20.5	0.0	0.6	0.0	0.0	1.0	1.0
Otros	3.7	7.6	0.0	1.2	4.1	2.8	4.1	13.8	2.9	27.0	32.7
Balanza comercial	159.4	219.3	214.5	176.1	135.3	98.2	82.4	184.8	84.3	67.1	101.2
PEMEX, Anuario estadístico 2004											
	Precios corrientes										

2.2. Conclusiones del capítulo.

Las ventas de los petroquímicos básicos muestran que en el periodo que va desde el año 1993 hasta el año 2003 han ido en aumento, con pequeñas disminuciones en los años 1998, 1999 y 2003.

El volumen de producción de los petroquímicos no básicos (Figura 2.5) ha ido en declive desde el año 1996 hasta el año 2002. La balanza comercial de este grupo de petroquímicos, en el mismo periodo de tiempo, se ha ido haciendo constantemente más negativa, a excepción del año 2004, donde tuvo una pequeña recuperación respecto al año 2003, (Figura 2.6).

El volumen del consumo aparente de la IPQ mexicana muestra una tendencia de disminución con el paso del tiempo, a excepción de los años 1998 y 2000, en donde dicha industria presenta el máximo volumen del consumo aparente del periodo de tiempo analizado (1996-2002), (Figura 2.8)

En PEMEX Petroquímica el volumen de ventas internas presenta un claro declive en cada una de sus ramas (derivados del metano, derivados del etano, aromáticos y derivados, y otros). La rama que registró un mayor volumen de ventas internas del año 1993 al año 2001 fueron los derivados del metano, y del año 2002 al año 2003 fueron los derivados del etano. (Figura 2.10)

Además, el volumen de ventas internas totales anuales de PEMEX Petroquímica tiende a disminuir, siendo su peor año el 2003. (Figura 2.12)

.Capítulo 3.

Selección de cadenas de producción petroquímicas
para su reestructuración.

En éste capítulo se analiza con mayor profundidad el comportamiento de los de las subramas de los petroquímicos no básicos (intermedios, fertilizantes nitrogenados, resinas sintéticas, fibras químicas y elastómeros y negro de humo).

3.1 Comportamiento de las subramas de los petroquímicos no básicos.

Retomando las Tabla 2.7 y 2.8 del capítulo anterior, en las que se muestra el valor del consumo aparente y el volumen del mismo, respectivamente, de las subramas de los petroquímicos no básicos se construyen las dos siguientes gráficas (Figuras 3.1 y 3.2).

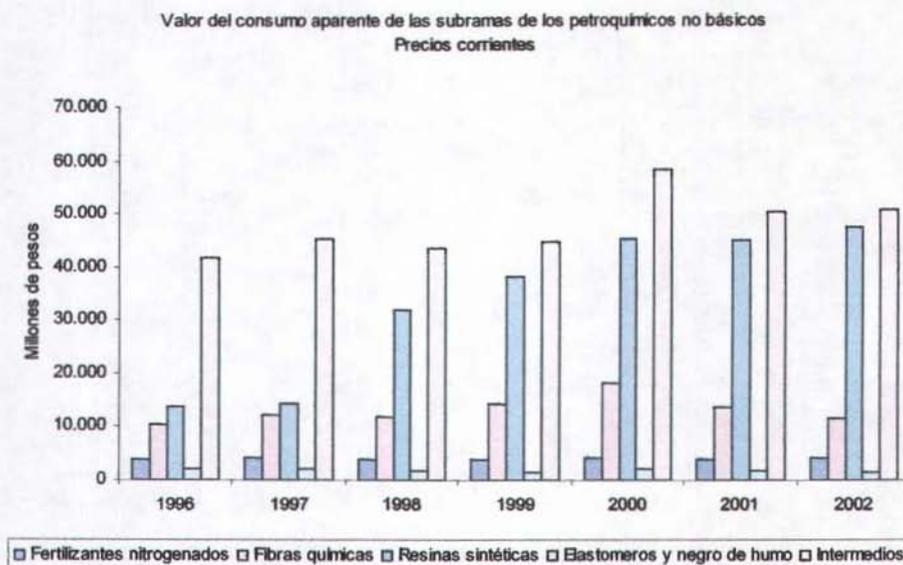


Figura 3.1 Valor del consumo aparente de las subramas de la IPQ
[Anuario estadístico petroquímica 1998, 2000 y 2002, Secretaría de energía]

Volumen del consumo aparente de las subramas de la IPQ

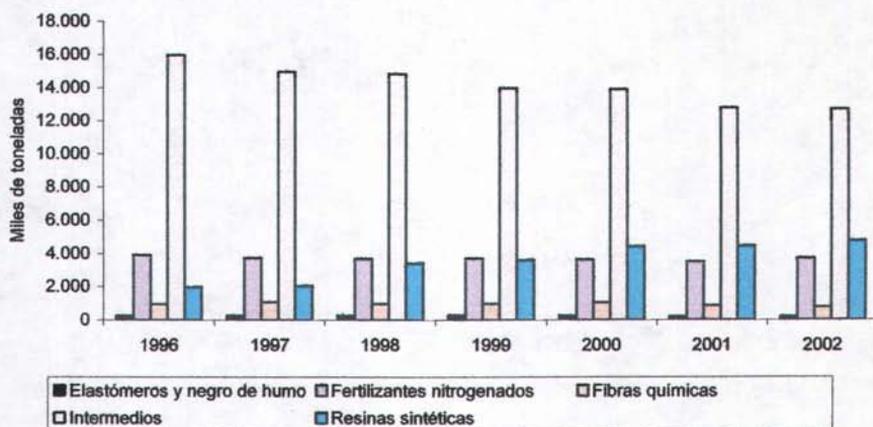


Figura 3.2 Volumen del consumo aparente de las subramas de la IPQ
[Anuario estadístico petroquímica 1998, 2000 y 2002, Secretaría de energía]

En las graficas anteriores se ve claramente que los petroquímicos con mayor consumo aparente son los intermedios, las resinas sintéticas y las fibras químicas.

En el presente trabajo se prestará mayor atención a las resinas sintéticas y a las fibras químicas, ya que los petroquímicos intermedios son las materias primas que abastecen para su desarrollo a las diferentes cadenas productivas, [Anuario estadístico petroquímica, 2002]. Y en el presente trabajo, como ya se ha mencionado, se tiene especial interés en los productos de la demanda final.

3.2 Análisis de las resinas sintéticas y de las fibras químicas.

Para seleccionar los productos de la demanda final se analizará el consumo aparente de las resinas sintéticas y de las fibras químicas aún con mayor profundidad. En base a este análisis, se seleccionarán los petroquímicos de la demanda final que se someterán a la metodología propuesta en el presente trabajo.

En la Tabla 3.1 se encuentra el consumo aparente, en miles de pesos, para cada una de las resinas sintéticas. Mientras que en la Tabla 3.2 se encuentre el volumen del consumo aparente, en toneladas, para las resinas sintéticas. Ambas tablas tienen datos que van desde el año 1996 hasta el año 2003.

En la Tabla 3.3 se encuentra el consumo aparente, en miles de pesos, para cada una de las fibras químicas. En tanto que en la Tabla 3.4 se encuentre el volumen del consumo aparente, en toneladas, para las fibras químicas. Los datos de las tablas mencionadas en este párrafo van desde el año 1996 hasta el año 2003.

Los productos de la demanda final que se analizarán en el presente trabajo debido a ser los mayores en cuanto al consumo aparente (Tablas 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4) en el periodo que va del año 1996 al año 2003 son:

- Polietileno de alta densidad
- Polietileno de baja densidad
- Polipropileno
- Cloruro de polivinilo (PVC)
- Polietilentereftalato (PET) grado botella
- Poliestireno cristal
- Poliuretano
- Poliéster grado fibra

Tabla 3.1. Valor del consumo aparente de resinas sintéticas. [Miles de pesos]

Producto	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
ABS/SAN	723,154	847,853	1,029,697	1,666,865	2,238,840	1,959,222	1,966,632
Acetato de polivinilo y polímeros relacionados	398,955	483,790	651,587	747,152	710,570	688,150	633,385
Acrílicas	1,569,516	1,969,765	2,455,984	2,869,081	2,855,331	3,054,213	3,200,263
Alquídicas	415,738	507,082	503,385	573,207	667,061	626,807	674,502
Cloruro de polivinilo	1,358,421	1,600,152	1,478,665	2,047,267	2,724,903	2,724,375	3,466,198
Epóxicas	536,048	624,014	864,457	1,078,045	1,093,652	1,065,330	1,042,916
Fenólicas	307,325	309,982	370,412	395,132	498,901	417,569	371,527
Furánicas	15,596	17,166	20,882	20,971	-39,182	-26,241	-13,360
Intercambio iónico	110,930	106,775	85,292	141,251	55,583	94,068	5,143
Maléicas	24,498	31,781	24,857	32,048	195,761	28,872	32,761
Melamina - formaldehído	77,438	88,885	118,683	133,259	132,284	103,388	125,148
Poliamidas	247,732	320,837	414,634	572,412	767,742	1,080,502	1,084,935
Poliésteres	747,511	992,065	1,303,027	1,882,173	1,750,074	1,813,974	1,713,319
Poliestirenos	1,641,680	2,363,904	2,386,441	2,981,555	3,500,880	3,085,350	3,742,807
Poliétileno de alta densidad	2,379,163	3,270,723	3,268,780	3,639,414	4,555,986	4,463,079	3,930,291
Poliétileno de baja densidad	3,295,446	3,079,643	4,163,702	4,794,095	5,196,090	4,668,796	4,254,823
Poliétertereftalato (grado botella)	891,587	159,983	1,609,193	2,106,197	3,358,579	3,869,571	4,211,649
Polipropileno	2,399,568	2,841,400	2,942,820	3,291,614	4,456,006	3,767,238	4,473,476
Poliuretanos	1,589,879	1,920,774	2,412,604	2,983,307	2,866,045	3,586,121	3,883,669
Urea - formaldehído	177,593	234,841	227,940	299,028	272,833	248,612	234,915
Otras resinas	2,829,836	3,567,558	4,804,999	5,080,405	6,308,279	6,845,930	7,322,564
Total	21,737,614	25,338,973	31,138,041	37,334,478	44,239,218	44,164,926	46,357,563
Anuario estadístico petroquímica 1998, 2000 y 2002, Secretaría de energía							Precios corrientes

Tabla 3.2. Volumen del consumo aparente de las resinas sintéticas. [Miles de toneladas]

Producto	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
AB5/SAN	58,155	69,912	91,085	120,649	239,709	173,184	191,630	153,697
Acetato de polivinilo y polímeros relacionados	12,955	15,129	20,104	26,353	29,007	24,505	24,056	21,816
Acrílicas	138,586	161,626	190,890	211,843	210,830	214,889	228,501	222,134
Alquídicas	58,853	67,363	67,327	75,076	83,599	82,421	84,616	85,605
Cloruro de polivinilo	258,704	298,927	329,796	373,602	399,033	381,876	438,550	629,579
Emulsiones de acetato de polivinilo	26,904	33,449	35,777	31,782	39,870	34,625	47,194	60,071
Emulsiones vinil-acrílicas.	45,005	37,207	53,149	55,182	60,602	66,794	54,471	50,817
Copolímeros de acetato de vinilo y Cloruro de vinilo	24	835	2,133	1,877	3,494	1,298	2,626	1,856
Epóxicas	22,086	23,735	29,290	34,570	40,828	36,194	36,571	65,160
Fenólicas	28,505	30,345	31,506	33,226	41,046	36,464	30,380	41,853
Furánicas	1,237	1,454	1,382	1,280	1,249	867	802	1,194
Intercambio iónico	4,306	5,337	4,173	6,285	2,656	7,464	1,025	1,189
Maleicas	3,312	3,658	3,376	3,692	18,842	3,481	3,591	3,796
Melamina-formaldehído	7,795	8,753	9,286	9,217	10,184	7,784	8,673	8,299
PET grado botella	60,100	16,298	198,836	283,724	354,653	376,143	432,578	548,031
Poliamidas	11,730	14,006	14,634	21,003	30,855	47,390	53,576	50,362
Poliésteres	57,384	71,205	83,364	93,152	108,800	107,844	97,842	96,851
Poliuretanos	213,168	262,517	274,550	421,241	400,955	354,517	392,274	405,931
Poliuretano de alta densidad	358,103	429,346	484,134	524,647	560,601	618,630	666,045	660,879
Poliuretano de baja densidad	450,526	518,860	588,099	729,395	635,502	686,617	720,176	681,390
Polipropileno	311,764	379,461	464,227	512,124	570,401	582,838	624,034	633,015
Poliuretanos	87,340	91,833	99,842	112,431	122,000	130,899	137,478	135,772
Urea-formaldehído	80,650	99,855	101,727	114,274	109,487	87,760	83,496	81,782
Otras resinas	173,791	218,619	266,680	284,903	355,316	389,421	400,268	433,454
Total	2,470,793	2,859,730	3,445,367	4,081,528	4,429,519	4,453,905	4,760,453	5,074,533

Anuario estadístico petroquímica 1998, 2000 y 2002, Secretaría de energía

Tabla 3.3. Valor del consumo aparente de las fibras químicas. [Miles de pesos]

	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Total fibras	5,781,612	7,049,001	7,836,958	9,570,532	12,903,848	9,145,732	8,221,225	9,241,025
Acrílicas	374,586	425,738	412,006	752,607	1,449,308	1,201,657	1,087,471	1,192,690
Aramídicas	19,650	24,332	29,923	30,776	49,061	360,380	277,592	228,284
De acetato de celulosa	709,553	747,857	823,774	675,316	669,412	789,690	804,747	785,261
De alcohol polivinílico	3,139	3,393	4,180	6,279	6,251	6,603	5,825	4,777
De cloruro de polivinilo	0	0	0	0	0	0	0	0
De politetrafluoroetileno	739	528	1,093	612	102	962	232	317
Elastoméricas	189,756	262,359	288,949	477,814	370,161	314,060	192,769	297,036
Poliamídicas	1,034,423	1,325,499	1,496,899	2,426,423	2,648,653	783,585	608,091	1,327,747
Poliéster	3,134,238	3,958,707	4,179,196	4,974,745	6,791,070	4,915,656	4,264,269	4,437,454
Polioléfinicas	26,590	40,417	41,805	53,159	31,622	25,131	25,371	31,501
Polipropilénicas	479,687	537,514	713,635	758,488	690,741	565,869	567,745	659,863
Rayón	-30,849	-35,103	-46,638	31,256	19,197	108,120	153,449	152,601
Otras fibras	-159,900	-242,240	-107,864	-616,943	178,270	74,019	233,664	123,494
Total polímeros	4,666,673	5,185,102	4,113,216	4,810,290	5,389,980	4,489,328	3,523,173	4,442,437
Acetato de celulosa	420,157	395,207	463,127	419,831	241,416	-3,789	-74	0
Poliacrilonitrilo	1,485,514	1,401,498	998,884	1,069,182	1,962,230	1,706,893	1,738,785	1,039,161
Policaprolactama	659,107	707,598	798,615	992,217	913,322	788,050	429,846	649,534
Politereftalato de etilenglicol	2,101,895	2,680,799	1,852,590	2,329,060	2,273,012	1,998,174	1,354,616	2,753,742
Total	10,448,285	12,234,103	11,950,174	14,380,822	18,293,828	13,635,060	11,744,398	13,683,462
Anuario estadístico petroquímica 1998, 2000 y 2002, Secretaría de energía					Precios corrientes			

Tabla 3.4. Volumen del consumo aparente de las fibras químicas. [Miles de toneladas]

	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Total fibras	391,470	465,075	493,129	517,288	622,654	495,028	468,607	457,233
Acrílicas	79,604	91,480	91,314	76,795	93,496	87,696	79,888	78,361
Aramídicas	193	225	184	308	444	1,968	1,523	147
De acetato de celulosa	297	-113	-697	-892	-1,627	-3,281	-5,817	-7,484
De alcohol polivinílico	29	40	47	67	82	86	67	51
De cloruro de polivinilo	0	0	0	0	0	0	0	0
De politetrafluoroetileno	3	19	21	11	0	2	1	2
Elastoméricas	1,324	1,908	1,737	2,535	2,015	2,368	1,454	2,235
Poliamídicas	42,862	52,154	56,218	55,438	63,273	44,200	39,299	35,977
Poliéster	218,416	272,010	292,871	327,752	407,045	305,574	287,721	287,412
Polioléfinicas	1,198	1,447	1,289	1,834	1,107	1,062	982	1,134
Polipropilénicas	27,340	21,424	23,484	26,670	24,785	22,567	23,435	24,009
Rayón	4,284	4,746	3,926	4,800	6,240	7,702	8,575	7,179
Otras fibras	-8,913	-5,583	-4,414	139	3,202	-3,142	-6	-1,476
Total polímeros	585,544	633,665	505,024	469,684	444,839	389,732	327,960	288,093
Acetato de celulosa	22,118	23,446	24,034	17,519	12,176	-222	-2	0
Poliacrilonitrilo	185,296	160,688	140,384	109,059	138,241	136,750	139,522	75,856
Policaprolactama	71,676	55,778	59,096	56,948	61,708	42,690	29,778	20,072
Polieterftalato de etilenglicol	313,442	396,966	284,115	283,579	232,714	210,514	158,662	192,165
Total	959,169	1,076,635	973,609	962,562	1,044,901	856,534	765,082	715,640

Anuario estadístico petroquímica 1998, 2000 y 2002, Secretaría de energía

3.4 Cadena petroquímica construida.

Como ya se mencionó al principio del presente trabajo para analizar la cadena productiva de cada uno de los productos terminales seleccionados se partirá del etileno, propileno y butanos, así como de los productos aromáticos: benceno, tolueno y xilenos, atravesando por diversas tecnologías (o procesos) hasta llegar al producto terminal seleccionado. La Figura 3.3 ilustra la cadena global formada con las características que se describen en éste párrafo.

La Tabla 3.5 muestra en la columna uno el número de cada tecnología que aparece en la Figura 3.3, en la columna dos aparece el producto que se forma debido a la tecnología, en la columna tres aparece el nombre que corresponde a la tecnología, en la columna cuatro aparecen los insumos (materias primas) necesarios que mediante la tecnología en turno producen el petroquímico ó producto que se nombra en la columna dos; además de esta información en la columna cinco se muestran los coeficientes insumo-producto (CIP), que son las cantidades reales de reactivos y subproductos que se suministran y obtienen, respectivamente, por unidad de producto (tonelada, kilogramo, mol, etc.) deseado.

Después de la Tabla 3.5, aparece la Tabla 3.6 en donde se muestran las tecnologías que conforman las distintas rutas que llevan a los productos de la demanda final seleccionados previamente.

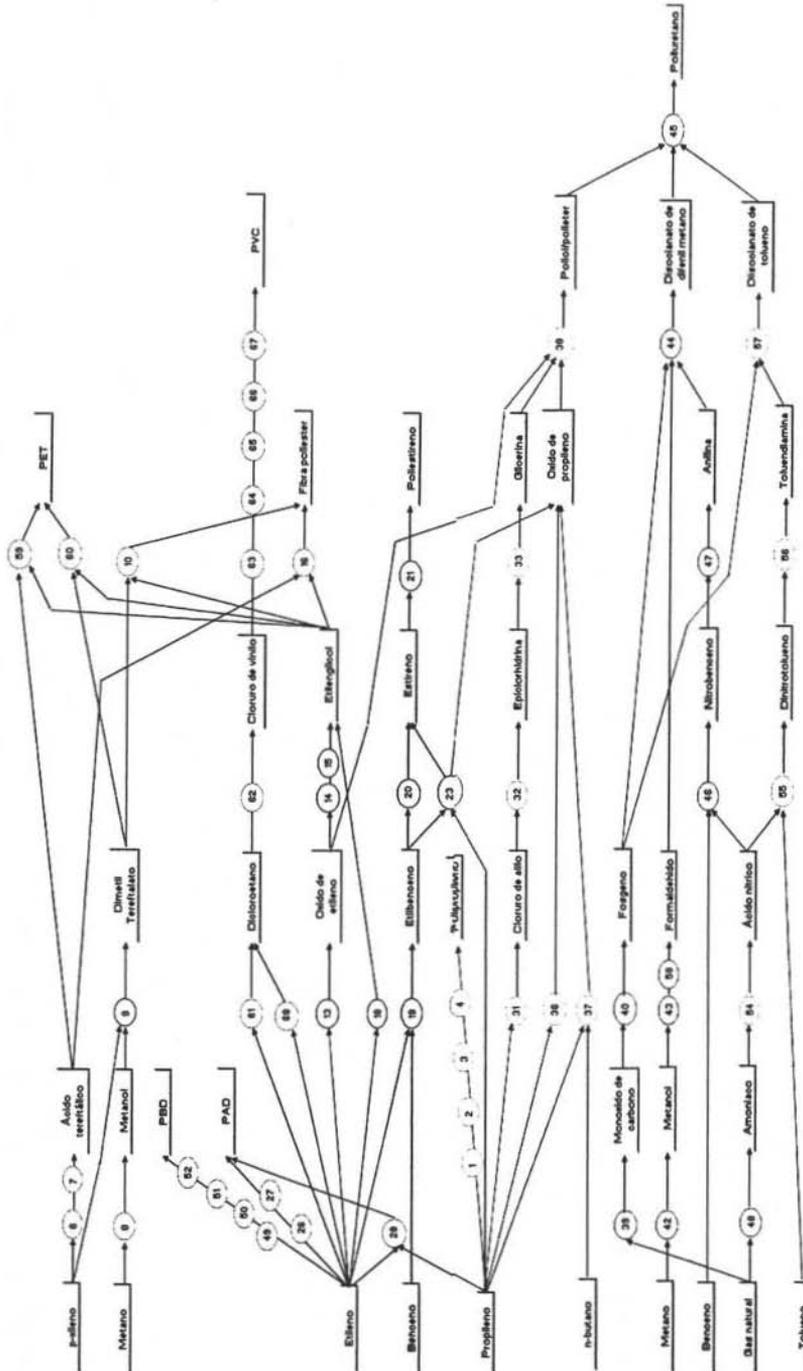


Figura 3.3. Cadena petroquímica construida

Tabla 3.5 Tecnologías e insumos de cadena formada por los productos terminales seleccionados. [PEP, 1990]

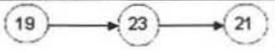
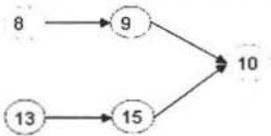
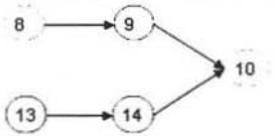
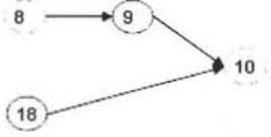
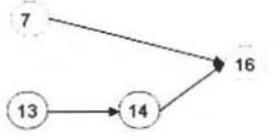
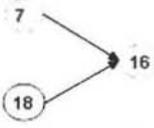
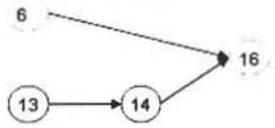
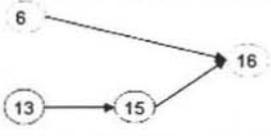
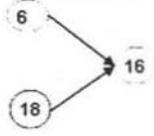
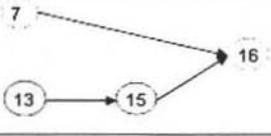
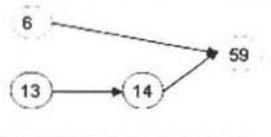
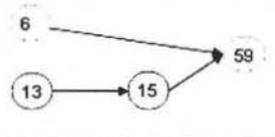
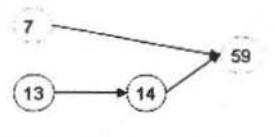
No. Tec.	Producto	Tecnología	Insumos	CIP [Ton insumos/Ton producto]
1	Polipropileno	Vía polimerización en suspensión	Propileno	1.04
2	Polipropileno	Vía reactor de lecho fluidizado	Propileno	1.05
3	Polipropileno	Vía procesos en fase gas, lecho horizontal	Propileno	1.05
4	Polipropileno	Vía proceso en fase gas, lecho vertical	Propileno	1.05
6	Ácido tereftálico (pureza media)	Vía oxidación de p-xileno, proceso modificado	p-xileno	0.679
7	Ácido tereftálico (alta pureza)	Vía oxidación de p-xileno promovida con Bromo	p-xileno	0.672
8	Metanol	Vía metano	Metano	0.490
9	Dimetil tereftalato	Vía reacción de p-xileno y metanol	p-xileno Metanol	0.630 0.379
10	Poliéster	Vía dimetil tereftalato	Etilenglicol Dimetil tereftalato	0.400 1.150
13	Oxido de etileno	Vía oxidación de etileno	Etileno	0.933
14	Etilenglicol	Vía hidratación de oxido de etileno	Oxido de etileno	0.872
15	Etilenglicol	Vía carbonación de oxido de etileno	Oxido de etileno	0.746
16	Poliéster	Vía ácido tereftálico	Dióxido de carbono Etilenglicol Ácido tereftálico	0.011 0.400 0.990
18	Etilenglicol	Vía oxidación de etileno	Etileno Metano Oxígeno	0.7267 0.0145 0.8795
19	Etilbenceno	Vía alquilación de benceno	Benceno Etileno	0.7476 0.273

20	Estireno	Vía deshidrogenación de etilbenceno	Etilbenceno	1.088
21	Poliestireno	Vía polimerización de estireno	Estireno	1.05
23a	Oxido de propileno	Vía proceso hidropéroxido	Etilbenceno Propileno Hidróxido de sodio	2.780 0.804 0.024
23b	Estireno	Vía proceso hidropéroxido	Etilbenceno Propileno Hidróxido de sodio	1.14 0.33 0.01
26	Poliétileno de alta densidad	Vía reactor de lecho fluidizado, pellets	Etileno	1.09
27	Poliétileno de alta densidad	Vía proceso en suspensión en fase líquida	Etileno	1.035
28	Poliétileno de alta densidad	Vía proceso en solución a baja presión	Etileno Propileno	1.015 0.15
31	Cloruro de alilo	Vía cloración de propileno	Propileno Cloro	0.731 1.324
32	Epíclorohidrina	Vía clorhidratación de cloruro de alilo	Cloruro de alilo Cloro Limo	0.9771 0.9024 0.764
33	Glicerina	Vía epíclorohidrina	Epíclorohidrina	1.03
36	Oxido de propileno	Vía clorhidratación de propileno	Cloro Propileno Limo	1.457 0.8285 1.204
37	Oxido de propileno	Vía proceso isobutano	Isobutano Propileno Oxígeno	2.576 0.7774 1.263
38	Poliol/Poliéter	Vía proceso semi-continuo	Glicerina Oxido de propileno Oxido de etileno	0.031 0.9147 0.1007
39	Monóxido de carbono	Vía gas natural	Metano	0.57
40	Fosgeno	Vía Reacción de cloro y monóxido de carbono	Monóxido de carbono Cloro	0.3 0.7245

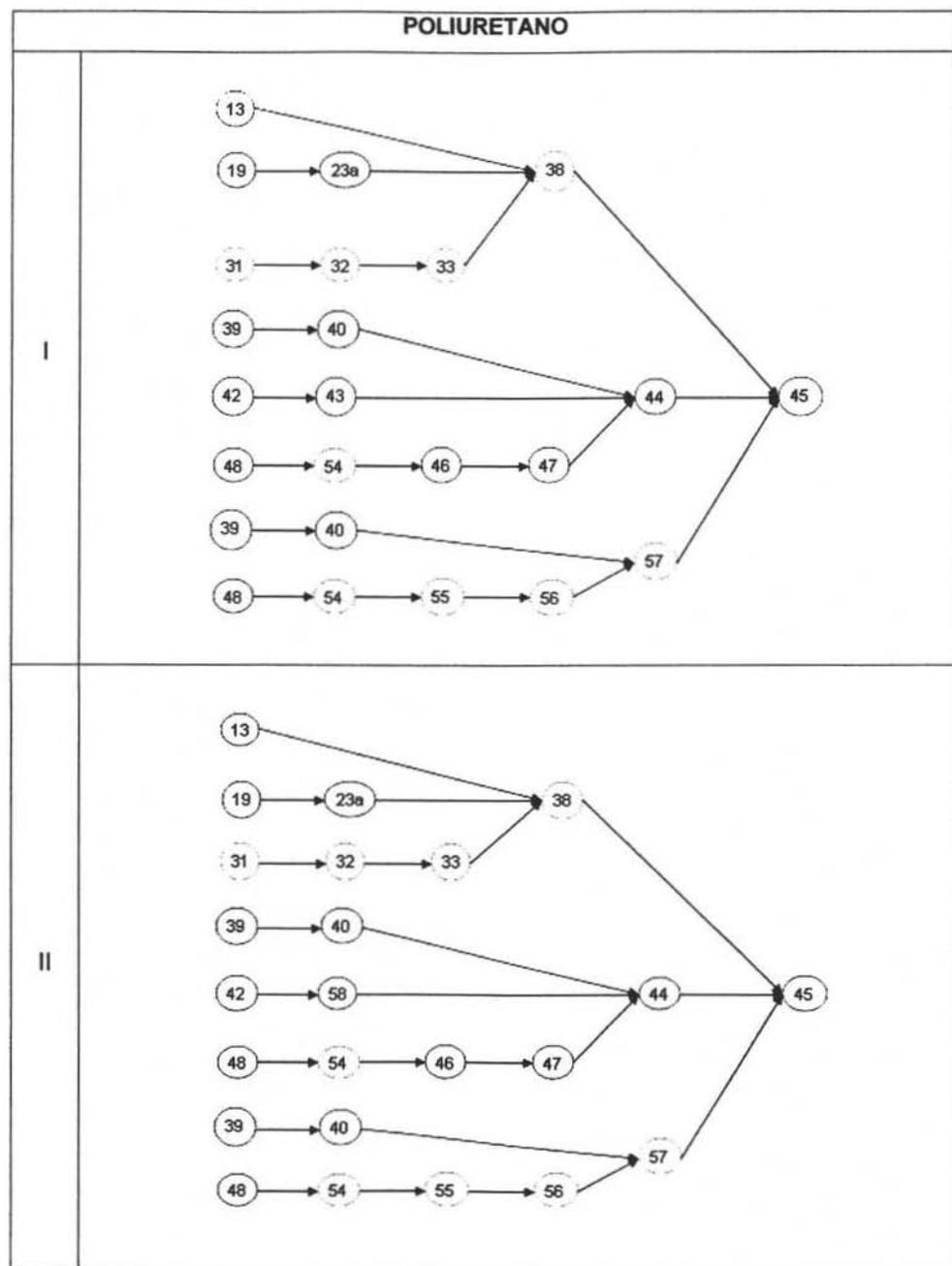
42	Metanol	Vía metano	Metano	0.490
43	Formaldehído	Vía oxidación de metanol. Catalizador: plata	Metanol	1.174
44	Diisocianato de difenil metano	Vía reacción de fosgeno con formaldehído con anilina	Fosgeno Formaldehído Anilina	0.031 0.9147 0.1007
45	Poliuretano	Vía reacción Polieter con DT con DDM	Poliol polieter Diisocianato de tolueno Diisocianato de difenil metano	0.56 0.37 0.45
46	Nitrobenceno	Vía nitración de benceno	Benceno Ácido nítrico Ácido sulfúrico	0.6427 0.5198 0.0109
47	Anilina	Vía hidrogenación de nitrobenceno	Nitrobenceno Hidrógeno	1.348 0.07
48	Amoniaco	Vía steam reforming de gas natural	Metano	0.580527
49	Poliétileno lineal de baja densidad	Vía reactor de lecho fluidizado, gránulos	Etileno	0.9428
50	Poliétileno lineal de baja densidad	Vía proceso en solución a baja presión	Etileno	0.9532
51	Poliétileno lineal de baja densidad	Vía proceso a alta presión, reactor "autoclave"	Etileno	1.06
52	Poliétileno lineal de baja densidad	Vía proceso a alta presión en reactor tubular	Etileno	1.06
54	Ácido nítrico (60%)	Vía Oxidación de amoniaco	Amoniaco Tolueno	0.284 0.5258
55	Dinitrotolueno	Vía tolueno	Ácido nítrico Ácido sulfúrico	0.722 0.027
56	Toluendiamina	Vía dinitrotolueno	Dinitrotolueno Hidrógeno	1.564 0.11
57	Diisocianato de tolueno	Vía Fosgenación de Toluendiamina	Toluendiamina Fosgeno	0.8158 1.314

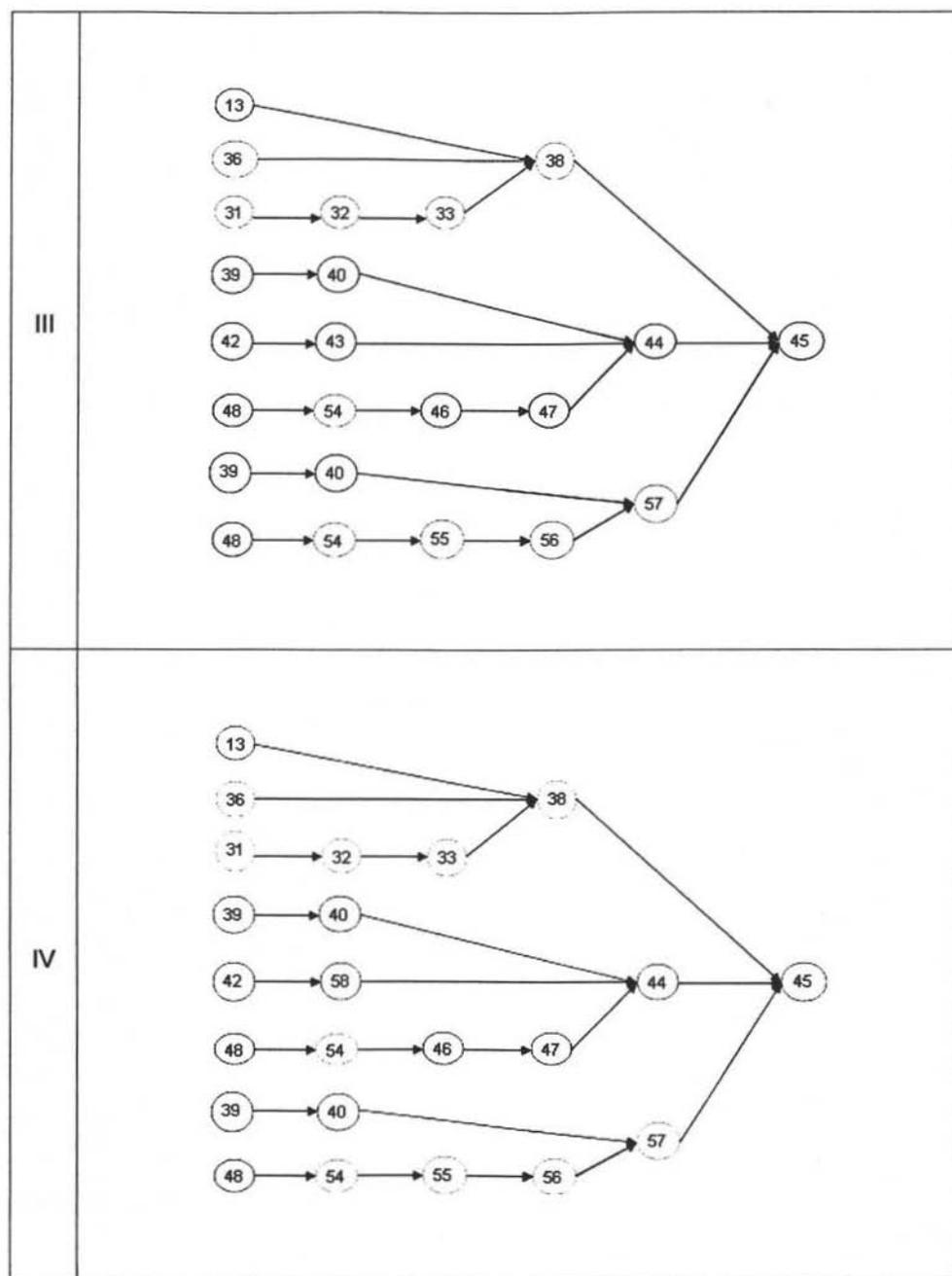
58	Formaldehído	Via oxidación de metanol	Metanol	1.205
59	PET	Via etilenglicol y Ácido teraftálico	Etilenglicol Ácido teraftálico	0.3594 0.8563
60	PET	Via etilenglicol y Dimetil Tereftalato	Etilenglicol Dimetil tereftalato	0.3594 1.001
61	Dicloroetano	Via cloración de etileno	Etileno Cloro	0.3027 0.7539
62	Cloruro de vinilo	Via pirólisis de dicloroetano	Dicloroetano	1.662
63	PVC	Via polimerización batch	Cloruro de vinilo	1.01
64	PVC	Via polimerización batch en emulsión	Cloruro de vinilo	1.01
65	PVC	Via polimerización a granel	Cloruro de vinilo	1.01
66	PVC	Via polimerización continua en emulsión	Cloruro de vinilo	1.01
67	PVC	Via polimerización en suspensión	Cloruro de vinilo	1.01
68	Dicloroetano	Via oxicloraón de etileno en cama fluidizada	Etileno Cloruro de hidrógeno Oxígeno	0.296 0.764 0.171

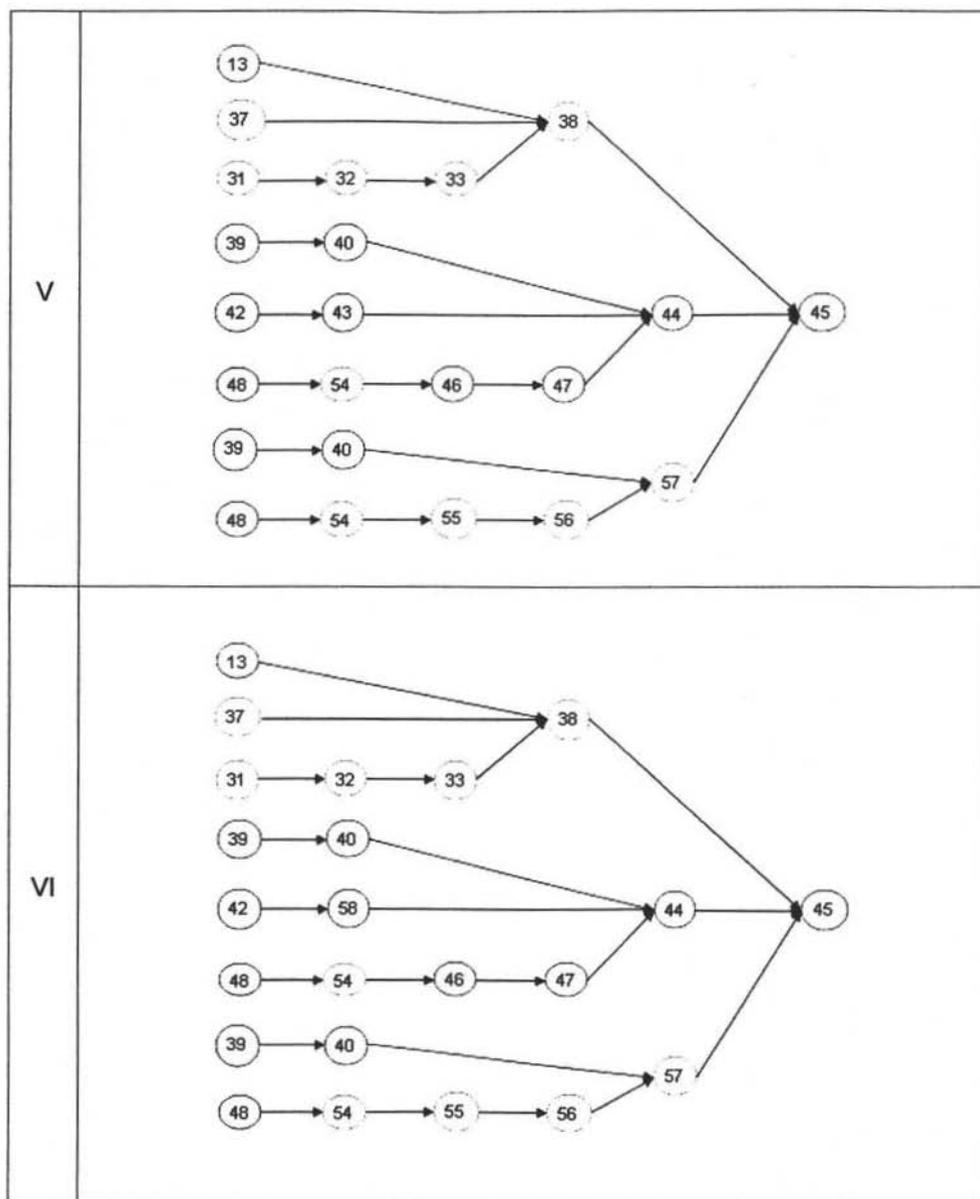
Tabla 3.6. Rutas tecnológicas de la cadena construida

Poliestireno			
I		II	
Poliéster			
I		II	
III		IV	
V		VI	
VII		VIII	
IX			
PET			
I		II	
III		IV	

V	<pre> graph LR 7((7)) --> 59((59)) 13((13)) --> 15((15)) 15 --> 59 </pre>	VI	<pre> graph LR 7((7)) --> 59((59)) 18((18)) --> 59 </pre>
VII	<pre> graph LR 8((8)) --> 9((9)) 9 --> 60((60)) 13((13)) --> 14((14)) 14 --> 60 </pre>	VIII	<pre> graph LR 8((8)) --> 9((9)) 9 --> 60((60)) 13((13)) --> 15((15)) 15 --> 60 </pre>
IX	<pre> graph LR 8((8)) --> 9((9)) 9 --> 60((60)) 18((18)) --> 60 </pre>		
PVC			
I	<pre> graph LR 61((61)) --> 62((62)) 62 --> 63((63)) </pre>	II	<pre> graph LR 61((61)) --> 62((62)) 62 --> 64((64)) </pre>
III	<pre> graph LR 61((61)) --> 62((62)) 62 --> 65((65)) </pre>	IV	<pre> graph LR 61((61)) --> 62((62)) 62 --> 66((66)) </pre>
V	<pre> graph LR 68((68)) --> 62((62)) 62 --> 67((67)) </pre>	VI	<pre> graph LR 61((61)) --> 62((62)) 62 --> 63((63)) </pre>
VII	<pre> graph LR 61((61)) --> 62((62)) 62 --> 64((64)) </pre>	VIII	<pre> graph LR 61((61)) --> 62((62)) 62 --> 65((65)) </pre>
IX	<pre> graph LR 61((61)) --> 62((62)) 62 --> 66((66)) </pre>	X	<pre> graph LR 68((68)) --> 62((62)) 62 --> 67((67)) </pre>
POLIPROPILENO			
I	<pre> graph LR 1((1)) </pre>	II	<pre> graph LR 2((2)) </pre>
III	<pre> graph LR 3((3)) </pre>	IV	<pre> graph LR 4((4)) </pre>
POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD			
I	<pre> graph LR 26((26)) </pre>	II	<pre> graph LR 27((27)) </pre>
III	<pre> graph LR 28((28)) </pre>		
POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD			
I	<pre> graph LR 49((49)) </pre>	II	<pre> graph LR 50((50)) </pre>
III	<pre> graph LR 51((51)) </pre>	IV	<pre> graph LR 52((52)) </pre>







3.5. Conclusiones del capítulo.

De acuerdo al análisis realizado, mediante el empleo del consumo aparente, se llegó a la conclusión de que los petroquímicos de la demanda final que son de mayor interés por su alto consumo aparente en el país son: Polietileno de alta densidad (PAD), Polietileno de baja densidad (PBD), Cloruro de polivinilo (PVC), Polietilentereftalato (PET) grado botella, poliestireno cristal, poliuretano y poliéster grado fibra, al menos para objetivos de esta tesis.^(*)

La cadena de petroquímicos construida, considerando como productos finales los petroquímicos arriba mencionados, consta de 58 tecnologías; y se tiene que existen diversas rutas tecnológicas para producir los petroquímicos finales seleccionados; para el Polipropileno existen 4 rutas, 3 para el Polietileno de alta densidad, 4 para el Polietileno de baja densidad, 10 para el PVC, 9 para el PET grado botella, 9 para el poliéster grado fibra, 2 para el poliestireno cristal y 6 para el poliuretano.

(*)Un trabajo más amplio se está llevando a cabo en el proyecto de investigación PAPIIT (Proyectos de Apoyo para la Investigación e Innovación Tecnológica) No. INI-106203 "Restitución del valor agregado y de la productividad de algunas cadenas improductivas de la Industria Petroquímica en México a través de la restitución, simulación y jerarquización Tecnológica y de Inversiones"

.Capítulo 4.

Metodología de análisis

Este capítulo tiene por objeto proporcionar algunos elementos que ya han sido desarrollados en la literatura.

4.1 Estado del arte para el análisis tecnológico y económico de cadenas petroquímicas.

4.1.1. La Industria Petroquímica (IPQ)

La IPQ es una extensa red formada por un gran número de cadenas entrelazadas que elabora compuestos demandados por la economía, Fig. 4.1. Estas cadenas inician con los productos obtenidos de la refinación del petróleo y del procesamiento del gas natural. Ésta industria también trabaja con productos fabricados a partir de subproductos de la refinación de petróleo. La estructura de la IPQ es extremadamente compleja, envuelve miles de productos químicos y procesos tecnológicos. 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.). [Escobar, 2001]

En esta red, un mismo compuesto puede ser producido a través de diferentes rutas tecnológicas, mediante procesos diferentes e incluso partiendo de distintos conjuntos de materias primas. El número de combinaciones de procesos capaz de producir un determinado productos final es enorme. [Escobar, 2001]

4.1.2 El modelo petroquímico.

Muchos trabajos importantes sobre la representación de redes de a IPQ han sido hechos desde 1981 [Rudd et al, 1981], [Fathi-Afshar et al, 1981] considerando la naturaleza siempre cambiante de ésta industria y la incertidumbre del ambiente en la cual ésta opera. Stadtherr (1978) fue el primero en modelar la IPQ, desarrollando un

modelo lineal, el cual explotaba su esencial estructura estequiométrica. El eligió el consumo mínimo de alimentación, para determinar que las fracciones peso del carbón eran el mejor criterio para la medida de éste. Entre otros, *Chávez (1986)* construyó una estructura gráfica ligada utilizando programación recursiva para atravesar las gráficas, corriente arriba y corriente abajo para observar los efectos de cualquier perturbación. También *Escobar y Rodríguez (1994)* han usado el mismo enfoque, planteándose como objetivo incrementar el valor agregado a lo largo de toda la cadena de producción.

4.1.3 Evaluación tecnológica de la IPQ.

Teniendo en cuenta que entre el 40% y el 80% de los costos de producción se deben típicamente a los costos de la materia prima de alimentación, se ha elegido minimizar el consumo de materias primas, para lo cual han determinado que la fracción peso del carbono es un buen criterio para la medida del consumo de la alimentación. El modelo propuesto por *Escobar (1999)* que persigue alcanzar lo antes descrito es el siguiente:

$$\begin{aligned} & \text{Minimizar} \quad \sum_{i=1}^N w_{ci} p_i \\ & \text{Sujeto a :} \\ & p_i + \sum_{j=1}^M a_{ij} x_j - q_i = 0 \quad \forall i = 1, N \\ & p_i \leq s_i \quad \forall i = 1, N \\ & q_i \leq d_i \quad \forall i = 1, N \\ & x_j \leq c_j \quad \forall j = 1, M \end{aligned}$$

donde M = número de procesos; N = número de químicos; x_j = nivel de producción del proceso j ; p_i = alimentación del químico i consumido; q_i = cantidad del químico i producido; a_{ij} = cantidad de químico i producido mediante el proceso j (>0 si el químico i es producido, <0 si el químico i es consumido, $=0$ de cualquier otra manera); w_{ci} = fracción peso de carbono en el químico i ; s_i = suministros disponibles

de alimentación; d_i = demanda del consumidor para el químico i ; c_j = capacidad industrial para el proceso j .

En esta evaluación de la IPQ se examinaron más de 100 procesamientos tecnológicos de la IPQ mexicana y más de 200 productos petroquímicos. Se identificó el origen de la importancia operacional, seguido por el establecimiento de los beneficios y atributos para cada tecnología necesaria. Para hacer esto, se clasificaron estos beneficios en estratégicos, económicos y en estratégico-económicos, entonces se clasificaron las tecnologías necesarias en categorías individuales, seguido por la clasificación de todas las tecnologías necesarias en función de los productos y/o procesos tecnológicos, a través de la importancia de beneficios y atributos económicos y estratégicos. Este procedimiento termina con una lista global de tecnologías priorizadas.

4.2 Tecnología, cadena de producción y ruta tecnológica.

En la presente tesis los conceptos de tecnología, cadena de producción y ruta tecnológica se usarán con frecuencia, por lo cual es necesario definirlos.

Cadena de producción. Es el conjunto de productos y procesos que a partir de una materia prima dada conducen a un producto específico de forma integrada, es decir, no aisladamente. Una cadena de producción se forma cuando los productos de un proceso resultan ser la materia prima de otros. [Escobar, 1995], [Rudd, 1981].

Ruta tecnológica. Es la secuencia de procesos que se efectúa para obtener un producto deseado. Esta secuencia de procesos se caracteriza por las condiciones de operación sobre las que se opera; sin embargo, para un cierto producto puede ser que no sea la única, es decir que se pueden encontrar alternativas para procesar el mismo material. Debido a esta diversidad de posibles "camino" se combinan para

formar una compleja red de varios compuestos intermedios y, por lo tanto, de rutas o procesos tecnológicos. [Escobar, 1995], [Rudd, 1981].

Tecnología. Para este estudio, una tecnología se define como el conjunto completo de reacciones químicas y operaciones físicas necesarias para fabricar cierto producto a partir de determinada materia prima. [Escobar, 1995]. , [Rudd, 1981].

La Fig. 4.1 muestra la relación indisoluble proceso/producto que se da a través de una cadena de producción para llegar desde las materias primas, pasando por varias tecnologías hasta llegar a los productos finales.

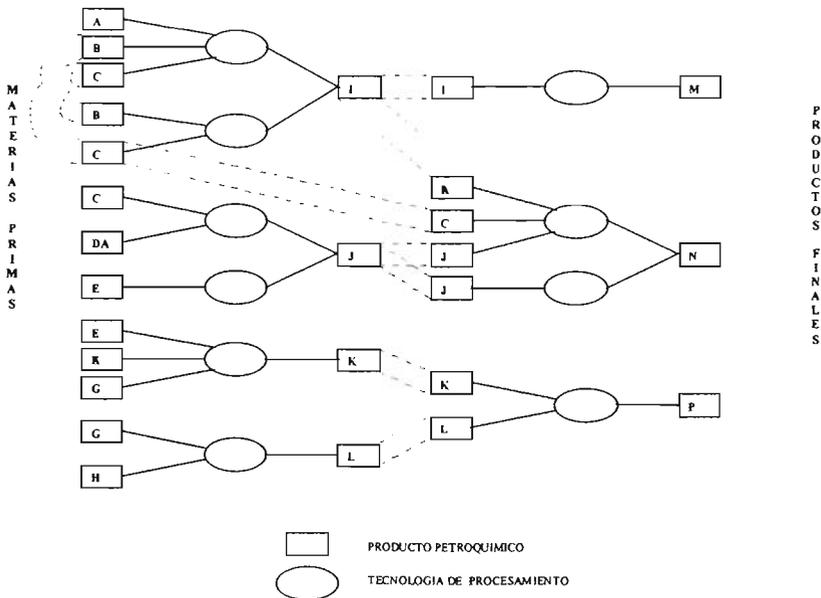


Figura 4.1. Representación gráfica de los productos y procesos de la Industria Petroquímica.

4.3 Análisis de tecnologías mediante la disponibilidad termodinámica.

Debido a que en el presente trabajo se analizarán diferentes rutas tecnológicas **petroquímicas**, los reactivos y productos de cada tecnología serán únicamente compuestos que se consideran petroquímicos, los compuestos que no son petroquímicos no se tomarán en cuenta.

Para un sistema abierto que opera a condiciones de flujo inestables, la primera y segunda ley de la termodinámica, considerando que el flujo de calor (\dot{Q}) se transfiere del sistema a los alrededores y además que el flujo de calor se está eliminado al ambiente a una temperatura T_0 : [Sophos, 1981]

$$\frac{dH}{dt} = -\dot{Q} - \left\{ \sum_k \sum_i x_{ik} H_{ik} \right\} - \dot{W}_U \quad (4.1)$$

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{\dot{Q}}{T_0} - \left\{ \sum_k \sum_i x_{ik} S_{ik} \right\} + \dot{S}_{GEN} \quad (4.2)$$

Si a la Ec. 4.2 se le resta la Ec 4.1, se tiene que: [Sophos, 1981]

$$\frac{d(T_0 S - H)}{dt} = \dot{W}_U - \left\{ \sum_k \sum_i x_{ik} (T_0 S_{ik} - H_{ik}) \right\} + T_0 \dot{S}_{GEN} \quad (4.3)$$

Considerando la definición de disponibilidad termodinámica, la ecuación anterior se puede escribir como: [Sophos, 1981]

$$\dot{W}_U = \sum_k \sum_i x_{ik} B_{ik} - T_0 \dot{S}_{GEN} + \frac{dB}{dt} \quad (4.4)$$

donde \dot{W}_U es el flujo de trabajo útil.

Si el proceso opera a condiciones de flujo continuo: [Sophos, 1981]

$$W_U = \sum_k \sum_i x_{i,k} B_{i,k} - T_0 \dot{S}_{GEN} \quad (4.5)$$

Si además el proceso opera de manera reversible, es decir, no hay creación de entropía; el cambio disponibilidad termodinámica es igual al trabajo ideal ó máximo que el sistema puede intercambiar con los alrededores. Cuando el sistema opera de manera irreversible, el trabajo que el sistema puede ceder a los alrededores es menor debido a la generación de entropía (\dot{S}_{GEN}), de ahí que el termino $T_0 \dot{S}_{GEN}$ sea llamado trabajo perdido.

Un proceso real puede ser analizado considerando únicamente las propiedades de las materias primas a las entradas y de los productos y subproductos a las salidas, además se puede encontrar el trabajo útil que el sistema intercambia con los alrededores. También se pueden incorporar la red de consumo o producción de servicios, en tal caso debe considerarse el cambio de disponibilidad equivalente de combustible y las emisiones debidas a la combustión. Esto se ilustra en la Fig. 4.2.

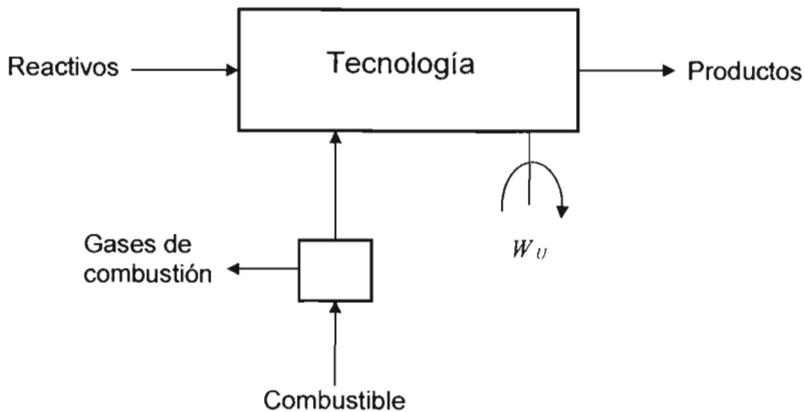


Figura 4.2 Representación de un proceso real con materiales y servicios.

[Sophos, 1981]

Un proceso real puede ser descrito, desde el punto de vista de la disponibilidad termodinámica, en términos de dos límites, el límite superior es el máximo trabajo útil, y el límite inferior es la entropía creada cuando el sistema se implementa en la realidad.

4.4 Disponibilidad de una mezcla.

Para enfatizar el que en muchos procesos tecnológicos se tiene en realidad una mezcla de productos, a continuación, se explicará la forma en que debe calcularse la disponibilidad termodinámica de una mezcla.

La figura 4.3 ilustra la mezcla de n componentes tal que la única salida consiste en un mol de mezcla. x_i, H_i^0, S_i^0 son fracción mol, entalpía por mol y entropía por mol de la i -ésima entrada a las condiciones estándar, respectivamente. La corriente de salida tiene entalpía H y entropía S .

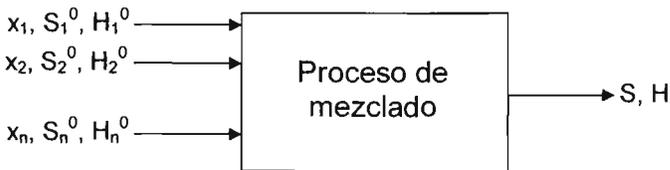


Figura 4.3. Proceso de mezclado [Sophos, 1981]

Asumiendo que la solución es ideal:

$$H = \sum_{i=1}^n x_i H_i^0 \quad (4.6)$$

$$S = \sum_{i=1}^n x_i S_i^0 + R \sum_{i=1}^n x_i \ln \frac{1}{x_i} \quad (4.7)$$

Para la corriente de salida, con base en la definición de disponibilidad se calcula la disponibilidad termodinámica de salida (B_{OUT}):

$$B_{OUT} = T_0 S - H = T_0 \left[\sum_{i=1}^n x_i S_i^0 + R \sum_{i=1}^n x_i \ln \frac{1}{x_i} \right] - \sum_{i=1}^n x_i H_i^0 \quad (4.8)$$

Y la disponibilidad en la corriente de entrada:

$$B_{IN} = \sum_{i=1}^n x_i B_i = T_0 \sum_{i=1}^n x_i S_i^0 - \sum_{i=1}^n x_i H_i^0 \quad (4.9)$$

De donde el cambio de disponibilidad debido a un proceso de mezclado (ΔB_{MX}) es:
[Sophos, 1981]

$$\Delta B_{MX} = B_{OUT} - B_{IN} = T_0 R \sum_{i=1}^n x_i \ln \frac{1}{x_i} \quad (4.10)$$

4.5. Cálculo de disponibilidad debido a cambios de temperatura y presión.

Como ya se mencionó en esta tesis se trabajará con sistemas reaccionantes, se considerará que el sistema se encuentra a T_0 y P_0 ; es decir que el potencial del sistema de ceder trabajo útil debido al alejamiento de T y P respecto al medio ambiente (T_0, P_0) se considerará nulo.

Sin embargo, existen casos en los que se tienen datos de entropía y entalpía a un cierto estado T_1 y P_1 y se requiere calcular estas propiedades termodinámicas a cierto estado T_2 y P_2 . Este tipo de problemas no serán tratados en esta tesis, sin embargo a continuación se muestra la manera en que se calcula el cambio de disponibilidad termodinámica debido al alejamiento de T y P del estado estándar (T_0 y P_0).

La entalpía como una función de la temperatura, para un gas ideal y para líquidos esta dada por:

$$H_2 = H_1 + \int_{T_1}^{T_2} C_p dT \quad (4.11)$$

donde Cp es la capacidad calorífica a presión constante. Mientras que para la entropía se tiene que:

$$\text{Para líquidos: } S_2 = S_1 + \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_p}{T} dT \quad (4.12)$$

$$\text{Para gases: } S_2 = S_1 + \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_p}{T} dT - R \ln \frac{P_2}{P_1} \quad (4.13)$$

Por consiguiente la disponibilidad para líquidos a T_2 y P_2 , o para gases a T_2 y P_1 ($P=P_2$) esta dada por la Ec. 4.14. [Sophos, 1981].

$$B_2 = T_0 \left[S_1 + \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_p}{T} dT \right] - \left[H_1 + \int_{T_1}^{T_2} C_p dT \right] = T_0 S_1 - H_1 + T_0 \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_p}{T} dT - \int_{T_1}^{T_2} C_p dT$$

$$B_2 - B_1 = \int_{T_1}^{T_2} C_p \left(\frac{T_0}{T} - 1 \right) dT \quad (4.14)$$

4.6. Aplicación del análisis de disponibilidad en una reacción de combustión.

Antes de proceder con el análisis de la industria petroquímica se presenta un pequeño ejemplo del análisis de una reacción de combustión, [Sophos, 1981]. El ejemplo consiste en la combustión de metano con 10% de exceso de aire [Sophos, 1981]. A la entrada se tiene gas natural y aire a 77°F y 1 atm de presión, y los gases de combustión se encuentran a 700°F y 1 atm.

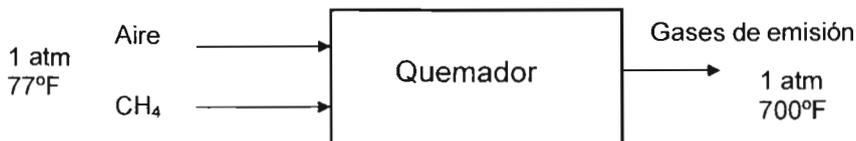


Fig. 4.4. Reacción de combustión. [Sophos, 1981].

La capacidad calorífica a presión constante es evaluada por un polinomio de la forma $C_p = A + BT + CT^{-2}$, donde los valores para A, B y C están dados en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Constantes usadas para el cálculo del Cp del ejemplo de cálculo.

[Smith, 1995]

	O ₂	N ₂	H ₂ O	CO ₂
A	7.16	6.83	7.30	10.57
B x 10 ³	1.00	0.90	2.46	2.10
C x 10 ⁻⁵	-0.40	-0.12	0.00	-2.06

Reactantes:

CH₄: La energía libre de formación para el metano es

$$\Delta G_f^0 = -12,140 \frac{\text{cal}}{\text{mol}}$$

Por lo tanto:

$$\Delta B_f^0 = 12,140 \frac{\text{cal}}{\text{mol}}$$

Aire: Se considerara al aire como una mezcla ideal, por lo tanto la disponibilidad de la mezcla se obtiene a partir de la Ec. 4.10

$$\Delta B_{MX \text{ AIRE}} = (298.15 \text{ K}) \left(1.987 \frac{\text{cal}}{\text{mol K}} \right) \left(0.79 \ln \frac{1}{0.79} + 0.21 \ln \frac{1}{0.21} \right) = 304.42 \frac{\text{cal}}{\text{mol}}$$

$$\Delta B_{MX \text{ AIRE}} = 304.42 \frac{\text{cal}}{\text{mol aire}} (10.48 \text{ mol aire}) = 3190.32 \frac{\text{cal}}{\text{mol CH}_4 \text{ quemado}}$$

Productos:

Para el cálculo del cambio de disponibilidad en los gases de combustión debido al cambio de temperatura de 77°F a 700°F, se aplicará la Ec. 4.14, para cada componente:

$$B_2 - B_1 = \int_{T_1}^{T_2} C_p \left(\frac{T_0}{T} - 1 \right) dT = \int_{T_1}^{T_2} (A + BT + CT^{-2}) \left(\frac{T_0}{T} - 1 \right) dT \quad (4.15)$$

Integrando la ecuación anterior y sustituyendo $T_0=298.15K$, $T_1=298.15K$ y $T_2=644.3K$ se tiene que:

$$B_2 - B_1 = -116.405A - 59.909.911B - 0.484 \times 10^{-3} C \quad \frac{cal}{mol} \quad (4.16)$$

Después de sustituir los valores de A, B y C para cada especie de los productos, se encuentran los cambios de disponibilidad para todos los componentes de los gases de combustión. Nótese que los valores para B_1 son el negativo de la energía libre de formación. Los resultados se reportan en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Cambio en la disponibilidad de los componentes de los gases de emisión

Especie	n_i [mol]	x_i	B_2-B_1 [cal/mol]	$B_1=-\Delta G_f^\circ$ [cal/mol]	B_2 [cal/mol]
O ₂	0.2	0.017	-874.01	0	-874.01
N ₂	8.28	0.721	-843.16	0	-843.16
H ₂ O	2	0.174	-997.14	54635	53637.86
CO ₂	1	0.087	-1256.50	94258	93001.50

La disponibilidad de los gases de emisión será: [Sophos, 1981].

$$B_{emisiones} = \sum x_i B_{2,i} + T_0 R \sum x_i \ln \frac{1}{x_i} \quad (4.17)$$

$$B_{emisiones} = 17310.12 \frac{cal}{mol\ emisiones} (11.48 mol\ emisiones) = 198720.16 cal$$

Como esta cantidad de calorías se desprende al quemar un mol de metano se puede escribir:

$$B_{emisiones} = 198.720 \frac{kcal}{mol\ CH_4\ quemado}$$

4.7. Evaluación del cambio de disponibilidad de una tecnología.

El siguiente ejemplo, [Sophos, 1981], muestra el cambio de disponibilidad cuando se obtiene formaldehído vía oxidación de metanol. La Tabla 4.3 indica la cantidad de metanol, así como los servicios por tonelada métrica de solución de formaldehído al 37% en peso que se desee obtener. Y la figura 4.5 muestra el proceso que se lleva a cabo.

Tabla 4.3. Cantidad de metanol y servicios por tonelada métrica de solución de formaldehído al 37%

Vapor (6atm), kg	-500
Electricidad, kWh	25
Metanol (100%), kg	429

Dado que el producto que se desea obtener es una solución al 37% de formaldehído y 63% de agua, el agua que se produce no es suficiente, por lo que hay que considerar esta cantidad de agua adicional en las entradas.

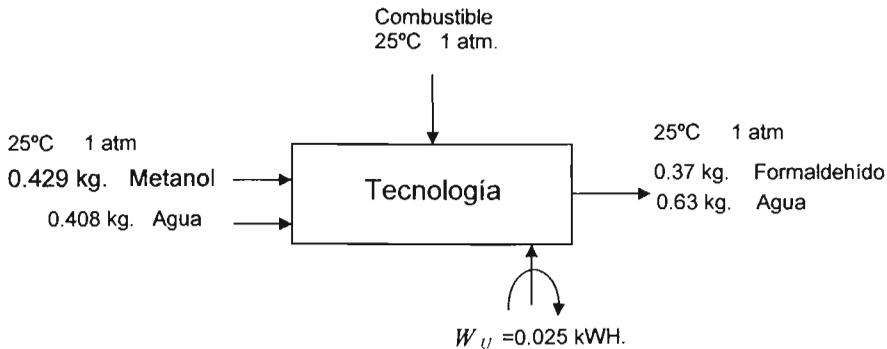


Figura. 4.5 Producción de formaldehído vía oxidación de metanol. [Sophos, 1981]

El análisis del cambio de disponibilidad es el siguiente:

La reacción de oxidación que ocurre en la tecnología es:



Las energías libres de formación para las especies envueltas en el problema son:

Metanol	$\Delta G_f^0 = -38740 \text{ cal/mol}$
Agua	$\Delta G_f^0 = -54640 \text{ cal/mol}$
Formaldehido	$\Delta G_f^0 = -26270 \text{ cal/mol}$

Por lo tanto

$$B_{CH_3OH} = \left(38840 \frac{\text{cal}}{\text{mol}} \right) \left(\frac{1 \text{ mol}}{32 \text{ g}} \right) (0.429 \text{ kg}) \left(\frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} \right) \left(\frac{1 \text{ kcal}}{1000 \text{ cal}} \right) = 520.7 \frac{\text{kcal}}{\text{kg producto}}$$

$$B_{H_2O} = \left(54640 \frac{\text{cal}}{\text{mol}} \right) \left(\frac{1 \text{ mol}}{18 \text{ g}} \right) (0.408 \text{ kg}) \left(\frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} \right) \left(\frac{1 \text{ kcal}}{1000 \text{ cal}} \right) = 1238.5 \frac{\text{kcal}}{\text{kg producto}}$$

$$B_{IN} = B_{H_2O} + B_{CH_3OH} = 1759.2 \frac{\text{kcal}}{\text{kg producto}}$$

La corriente del producto se considerará ideal, por lo cual

$$B_{OUT} = -\sum_i x_i \Delta G_{f,i}^0 - T_0 R \sum_i x_i \ln x_i$$

$$x_{H_2O} = 0.74, \quad x_{HCHO} = 0.26$$

$$B_{OUT} = -\left[0.74 \left(-54640 \frac{\text{cal}}{\text{mol}} \right) + 0.26 \left(-26270 \frac{\text{cal}}{\text{mol}} \right) \right] - 298.15 \text{ K} \left(1.987 \frac{\text{cal}}{\text{mol K}} \right) \left[0.74 \ln(0.74) + 0.26 \ln(0.26) \right] = 47587.7 \frac{\text{cal}}{\text{mol producto}}$$

$$PM_{PONDERADO} = PM_{H_2O} * x_{H_2O} + PM_{HCHO} * x_{HCHO} = 21.13 \frac{\text{g}}{\text{mol producto}}$$

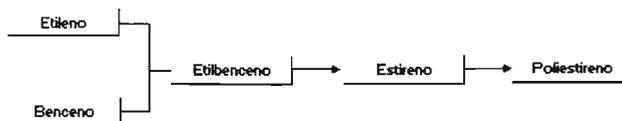
$$B_{OUT} = \left(47587.7 \frac{\text{cal}}{\text{mol producto}} \right) \left(\frac{1 \text{ mol producto}}{21.13 \text{ g}} \right) = 2252.5 \frac{\text{kcal}}{\text{kg producto}}$$

$$\Delta B = B_{OUT} - B_{IN} = 2252.5 \frac{\text{kcal}}{\text{kg producto}} - 1759.2 \frac{\text{kcal}}{\text{kg producto}} = 493.3 \frac{\text{kcal}}{\text{kg producto}}$$

Lo que dice éste resultado es que la tecnología cede a los alrededores 493.3 Kcal de trabajo útil por cada kilogramo de producto que se forme.

4.8 Metodología empleada para el análisis de disponibilidad termodinámica de una cadena de producción

Para explicar el procedimiento de cómo analizar las cadenas de producción, se presenta a continuación el análisis de la **Ruta I** de producción de poliestireno.



Bajo la notación de la Fig. 4.1

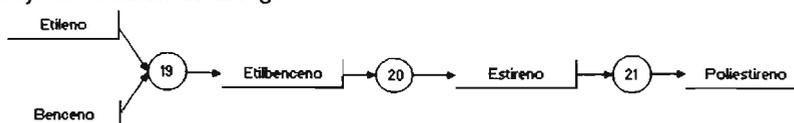


Figura 4.6 Cadena productiva del poliestireno.

donde 19 =Alquilación de benceno, 20=Deshidrogenación de etilbenceno, y 21 =Polimerización de estireno

En este análisis no se emplean los coeficientes estequiométricos de las reacciones, sino que se emplean los coeficientes insumo-producto (CIP) que son las cantidades reales de reactivos y subproductos que se suministran y obtienen, respectivamente, por unidad de producto (tonelada, kilogramo, mol, etc.) deseado.

Para la tecnología 19, obtención de etilbenceno a partir de etileno y benceno vía alquilación de benceno se tienen los CIP que indica la Fig. 4.7.

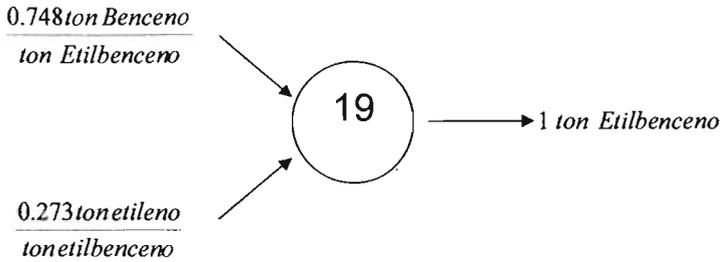


Figura 4.7. CIP para la Alquilación de benceno. [PEP, 1990]

En el primer capítulo se llegó a la conclusión de que cuando el sistema (tecnología) se encuentra a 25°C y 1 atm. La disponibilidad termodinámica estándar de reacción es numéricamente igual al negativo de la energía libre de reacción estándar. Por lo cual se tiene que: (ver Ec. 1.21)

$$\Delta B_r^0 = \sum (-\Delta G_f^0(\text{productos})) - \sum (-\Delta G_f^0(\text{reactivos})) \quad (4.18)$$

Si se considera el término $\sum (-\Delta G_f^0(\text{reactivos}))$ como la disponibilidad termodinámica estándar de reacción a la entrada (B_{IN}^0) de la tecnología, y $\sum (-\Delta G_f^0(\text{productos}))$ como la disponibilidad termodinámica estándar de reacción a la salida (B_{OUT}^0), ΔB_r^0 debido a la tecnología en estudio será:

$$\Delta B_r^0 = B_{OUT}^0 - B_{IN}^0 \quad (4.19)$$

Como ya se mencionó, en el presente trabajo se emplearán los coeficientes insumo-producto (CIP) en vez de trabajar con los coeficientes estequiométricos. Por lo cual B_{IN}^0 y B_{OUT}^0 se calcularán mediante las Ecs. 4.20 y 4.22 respectivamente.

$$B_{IN}^0 = \left(\sum_{i=1}^m -n_i \Delta G_{f(i)}^0 \right) \left(PM_{pp} \right) \quad (4.20)$$

donde:

$$n_i = \frac{CIP_{(i)}}{PM_{(i)}} \quad (4.21)$$

donde *i* es el *i*-ésimo reactivo, *m* es el número total de reactivos y **PM_{pp}** es el peso molecular del producto principal o de interés. Y las unidades de B_{IN}^0 son *kcal/Tonelada mol de producto principal o de interés*

Para la disponibilidad a la salida hay que considerar el efecto de mezclado, ya que existen tecnologías en las que se obtiene más de un petroquímico, es decir que se obtienen coproductos.

$$B_{OUT}^0 = \frac{\sum_{j=1}^k -x_{(j)} \Delta G_{f(j)}^0 - T_0 R \sum_{j=1}^k x_{(j)} \ln(x_{(j)})}{x_{pp}} \quad (4.22)$$

donde

$$x_j = \frac{\frac{CIP_{(j)}}{PM_{(j)}}}{\sum_{j=1}^k \frac{CIP_{(j)}}{PM_{(j)}}} \quad (4.23)$$

donde *j* es el *j*-ésimo producto y *k* es el número total de productos. **PM** es el peso molecular, x_{pp} es la fracción mol del producto principal o de interés a la salida, *x* es la fracción mol y *R*= 1.987 cal/(molK). Y las unidades de B_{OUT}^0 son *kcal/Tonelada mol de producto principal o de interés*.

El cambio de disponibilidad termodinámica estándar de reacción (ΔB_r^0) debido a la tecnología en estudio se obtiene mediante la ecuación 4.24, esta propiedad se obtiene en *kcal/kilogramo de producto principal o de interés*

$$\Delta B_r^0 = \frac{B_{OUT}^0 - B_{IN}^0}{PM_{pp}} \quad (4.24)$$

Los siguientes casos de rutas tecnológicas incluyen ya la disponibilidad de la reacción y de la mezcla cuando ésta existe.

Tabla 4.4. Resultados para la tecnología 19, alquilación de benceno.

Especie		Coeficiente ton/(ton EtilBen)	ΔG_r^0 [kcal/mol]	PM [ton/ton mol]	B [kcal/tonmol EtilBen]
Benceno	in	0.748	30.989	78.000	-297017.646
Etileno	in	0.273	16.282	28.000	-158749.500
Etilbenceno	out	1.000	31.208	106.160	-293971.364

B_{IN}^0 [kcal/tonmol EtilBen]	B_{OUT}^0 [kcal/tonmol EtilBen]	ΔB [kcal/kg EtilBen]
-455767.146	-293971.364	161.796

Tabla 4.5. Resultados para la tecnología 20, deshidrogenación de etilbenceno.

Especie		Coeficiente ton/(ton Estireno)	ΔG_r^0 [kcal/mol]	PM [ton/ton mol]	B [kcal/tonmol Estireno]
Etilbenceno	in	1.088	31.210	106.160	-33308225.495
Estireno	out	1.000	51.210	104.140	-53886343.071

B_{IN}^0 [kcal/ton Estireno]	B_{OUT}^0 [kcal/ton Estireno]	ΔB [kcal/kg Estireno]
-33308225.495	-53886343.071	-197.601

Debido a la dificultad existente para obtener los datos requeridos para el cálculo de la disponibilidad termodinámica de los polímeros, solo se emplearan los CIP's de las tecnologías que permiten obtener polímeros para que las unidades de cada criterio (disponibilidad termodinámica, energía real por servicios y valor agregado) evaluado

en las diferentes rutas tecnológicas sean: $\frac{kcal}{kg \text{ producto de la demanda final}}$, ó

$\frac{\text{Dólares}}{kg \text{ producto de la demanda final}}$.

Tabla 4.6. CIP para la producción de poliestireno

Especie		Coeficiente ton/ton Estireno
Estireno	in	1.050
Poliestireno	out	1.000

Ya se han obtenido los cambios de disponibilidad de cada tecnología, ahora se procederá a obtener el cambio de la disponibilidad de toda la ruta tecnológica (ΔB_{ruta}). La Tabla 4.7 resume los resultados hasta ahora encontrados.

Tabla 4.7 Cambio de disponibilidad de cada tecnología de la **Ruta I** de la producción de poliestireno

Tecnología	ΔB [kcal/kg]
19	161.796 kcal/kg Etilbenceno
20	-197.601 kcal/kg Estireno

Todos los cambios de disponibilidad deben tener las mismas unidades para que se puedan sumar y así obtener el ΔB_{ruta} , es decir, éstos deben transformarse a un cambio de disponibilidad equivalente (ΔB_{EQUIV}). Esto se consigue multiplicando el cambio de disponibilidad de cada tecnología por los CPI correspondientes, éste cálculo se muestra a continuación.

$$\begin{aligned} \Delta B_{EQUIV,19} &= 161.796 \frac{kcal}{kg \text{ etilbenceno}} \left(\frac{1.088 \text{ kg etilbenceno}}{1 \text{ kg estireno}} \right) \left(\frac{1.05 \text{ kg estireno}}{1 \text{ kg poliestireno}} \right) \\ &= 184.835 \frac{Kcal}{Kg \text{ poliestireno}} \end{aligned}$$

$$\Delta B_{EQUIV,20} = -197.601 \frac{kcal}{kg \text{ estireno}} \left(\frac{1.05 \text{ kg estireno}}{1 \text{ kg poliestireno}} \right) = -207.481 \frac{kcal}{kg \text{ poliestireno}}$$

Por lo tanto, el cambio de disponibilidad de la ruta tecnológica completa (ΔB_{ruta}) que ocurre al pasar de etileno y benceno hasta estireno es la suma de los cambios de disponibilidad equivalentes debidos a cada tecnología (ΔB_{TEC}), es decir

$$\Delta B_{ruta} = \sum_{TEC=1}^{TEC=n} \Delta B_{EQUIV_{TEC}} \quad (4.25)$$

Para la **Ruta I** de la producción del poliestireno

$$\Delta B_{ruta} = -22.65 \frac{kcal}{kg \text{ Estireno}}$$

Siendo congruente con la convención tomada en el capítulo 1, que dice que el trabajo que sale del sistema es positivo, y el trabajo que entra es de signo contrario, el resultado anterior se interpreta como que, para pasar de etileno y benceno hasta poliestireno, en total, se le deben proporcionar al sistema 22.65 kcal de trabajo útil por cada kilogramo de poliestireno que se desee formar.

Ya que la disponibilidad termodinámica se obtiene cuando ocurre un proceso, no es posible "almacenar en un contenedor" el trabajo útil que se obtiene de cada proceso (tecnología) de la cadena, ya que se trata de flujos de energía y no de características propias de la materia; la ΔB_{ruta} debe considerarse solo un indicativo termodinámico de comparación.

Los resultados del cambio de disponibilidad equivalente para cada una de las tecnologías de la cadena global ilustrada en la Fig. 3.4 del capítulo anterior, aparecen en las tablas siguientes: (Tabla 4.8 a Tabla 4.15)

Tabla 4.8 ΔB_{EQUIV} para la cadena del poliestireno

[kcal/kg Poliestireno]			
Tecnología	Ruta I	Tecnología	Ruta II
19	184.84	19	193.67
20	-207.48	23b	451.54
21	0.00	21	0.00
Tot=	-22.65	Tot=	645.21

Tabla 4.9 ΔB_{EQUIV} para la cadena del PVC

[kcal/kg PVC]							
Tecnología	Ruta I	Tecnología	Ruta II	Tecnología	Ruta III	Tecnología	Ruta IV
61	594.64	61	594.64	61	594.64	61	594.64
62	-506.58	62	-506.58	62	-506.58	62	-506.58
63	0.00	64	0.00	65	0.00	66	0.00
Tot=	88.06	Tot=	88.06	Tot=	88.06	Tot=	88.06

ΔB_{EQUIV} para la cadena del PVC (Continuación)

[kcal/kg PVC]							
Tecnología	Ruta V	Tecnología	Ruta VI	Tecnología	Ruta VII	Tecnología	Ruta VIII
61	594.64	68	-210.89	68	-210.89	68	-210.89
62	-506.58	62	-506.58	62	-506.58	62	-506.58
67	0.00	63	0.00	64	0.00	65	0.00
Tot=	88.06	Tot=	-717.46	Tot=	-717.46	Tot=	-717.46

ΔB_{EQUIV} para la cadena del PVC (Continuación)

[kcal/kg PVC]			
Tecnología	Ruta IX	Tecnología	Ruta X
68	-210.89	68	-210.89
62	-506.58	62	-506.58
66	0.00	67	0.00
Tot=	-717.46	Tot=	-717.46

Tabla 4.10 ΔB_{EQUIV} para la cadena del Poliéster

[kcal/kg Poliéster grado fibra]							
Tecnología	Ruta I	Tecnología	Ruta II	Tecnología	Ruta III	Tecnología	Ruta IV
8	366.00	8	366.00	8	366.00	7	901.53
9	-190.25	9	-190.25	9	-190.25	13	213.60
13	182.74	13	213.60	18	633.28	14	444.70
15	439.28	14	444.70	10	0.00	16	0.00
10	0.00	10	0.00	Tot=	809.02	Tot=	1559.83
Tot=	797.76	Tot=	834.04				

ΔB_{EQUIV} para la cadena del Poliéster (Continuación)

[kcal/kg Poliéster grado fibra]							
Tecnología	Ruta V	Tecnología	Ruta VI	Tecnología	Ruta VII	Tecnología	Ruta VIII
7	910.47	6	1607.12	6	1607.12	6	1607.12
18	633.28	13	213.60	13	182.74	18	633.28
16	0.00	14	444.70	15	439.28	16	0.00
Tot=	1543.75	16	0.00	16	0.00	Tot=	2240.40
		Tot=	2265.42	Tot=	2229.14		

ΔB_{EQUIV} para la cadena del Poliéster (Continuación)

[kcal/kg Poliéster grado fibra]	
Tecnología	Ruta IX
7	910.47
13	182.74
15	439.28
16	0.00
Tot=	1532.49

Tabla 4.11 ΔB_{EQUIV} para la cadena del PET

[kcal/kg PET]							
Tecnología	Ruta I	Tecnología	Ruta II	Tecnología	Ruta III	Tecnología	Ruta IV
6	1607.12	6	1607.12	6	1607.12	7	910.47
13	191.92	13	164.19	18	569.00	13	191.92
14	399.56	15	394.70	59	0.00	14	399.56
59	0.00	59	0.00	Tot=	2176.12	59	0.00
Tot=	2198.60	Tot=	2166.00			Tot=	1501.95

ΔB_{EQUIV} para la cadena del PET (Continuación)

[kcal/kg PET]							
Tecnología	Ruta V	Tecnología	Ruta VI	Tecnología	Ruta VII	Tecnología	Ruta VIII
7	910.47	7	910.47	8	318.58	8	318.58
13	164.19	18	569.00	9	-165.60	9	-165.60
15	394.70	59	0.00	13	191.92	13	164.19
59	0.00	Tot=	1479.47	14	399.56	15	394.70
Tot=	1469.35			Tot=	744.46	Tot=	711.86

ΔB_{EQUIV} para la cadena del PET (Continuación)

[kcal/kg PET]	
Tecnología	Ruta IX
8	318.58
9	-165.60
18	569.00
60	0.00
Tot=	721.97

Tabla 4.12 ΔB_{EQUIV} para la cadena del Poliuretano

[kcal/kg Poliuretano]					
Tecnología	Ruta I	Tecnología	Ruta II	Tecnología	Ruta III
13	34.53	13	34.53	13	34.53
19	230.44	19	230.44	36	211.40
23a	-22.76	23a	-22.76	31	9.88
31	9.88	31	9.88	32	11.94
32	11.94	32	11.94	33	25.40
33	25.40	33	25.40	38	-21.28
38	-21.28	38	-21.28	39	3.28
39	3.28	39	3.28	40	2.07
40	2.07	40	2.07	42	148.48
42	148.48	42	148.48	43	1779.84
43	1779.84	58	1774.18	48	-1.92
48	-1.92	48	-1.92	54	7.58
54	7.58	54	7.58	46	-12.51
46	-12.51	46	-12.51	47	-2.04
47	-2.04	47	-2.04	44	-1098.36
44	-1098.36	44	-1098.36	39	114.21
39	114.21	39	114.21	40	71.98
40	71.98	40	71.98	48	-20.65
48	-20.65	48	-20.65	54	81.36

*Reestructuración de algunas rutas tecnológicas de la Industria
Petroquímica en México, utilizando el criterio de disponibilidad termodinámica.*

54	81.36	54	81.36	55	-148.91
55	-148.91	55	-148.91	56	-36.80
56	-36.80	56	-36.80	57	-165.65
57	-165.65	57	-165.65	45	0.00
45	0.00	45	0.00	Tot=	993.81
Tot=	990.08	Tot=	984.43		

ΔB_{EQUIV} para la cadena del Poliuretano (Continuación)

[kcal/kg Poliuretano]					
Tecnología	Ruta IV	Tecnología	Ruta V	Tecnología	Ruta VI
13	34.53	13	34.53	13	34.53
36	211.40	37	-180.03	37	-180.03
31	9.88	31	9.88	31	9.88
32	11.94	32	11.94	32	11.94
33	25.40	33	25.40	33	25.40
38	-21.28	38	-21.28	38	-21.28
39	3.28	39	3.28	39	3.28
40	2.07	40	2.07	40	2.07
42	148.48	42	148.48	42	148.48
58	1774.18	43	1779.84	58	1774.18
48	-1.92	48	-1.92	48	-1.92
54	7.58	54	7.58	54	7.58
46	-12.51	46	-12.51	46	-12.51
47	-2.04	47	-2.04	47	-2.04
44	-1098.36	44	-1098.36	44	-1098.36
39	114.21	39	114.21	39	114.21
40	71.98	40	71.98	40	71.98
48	-20.65	48	-20.65	48	-20.65
54	81.36	54	81.36	54	81.36
55	-148.91	55	-148.91	55	-148.91
56	-36.80	56	-36.80	56	-36.80
57	-165.65	57	-165.65	57	-165.65
45	0.00	45	0.00	45	0.00
Tot=	988.15	Tot=	602.38	Tot=	596.72

Tabla 4.13 ΔB_{EQUIV} para la cadena del Polipropileno

[kcal/kg Polipropileno]					
Tecnología	Ruta I	Tecnología	Ruta II	Tecnología	Ruta III
1	0.00	2	0.00	3	0.00
Tot=	0.00	Tot=	0.00	Tot=	0.00

ΔB_{EQUIV} para la cadena del Polipropileno (Continuación)

[kcal/kg Polipropileno]	
Tecnología	Ruta IV
4	0.00
Tot=	0.00

Tabla 4.14 ΔB_{EQUIV} para la cadena del Polietileno de alta densidad

[kcal/kg PAD]					
Tecnología	Ruta I	Tecnología	Ruta II	Tecnología	Ruta III
26	0.00	27	0.00	28	0.00
Tot=	0.00	Tot=	0.00	Tot=	0.00

Tabla 4.15 ΔB_{EQUIV} para la cadena del Polietileno de baja densidad

[kcal/kg PBD]					
Tecnología	Ruta I	Tecnología	Ruta II	Tecnología	Ruta III
49	0.00	50	0.00	51	0.00
Tot=	0.00	Tot=	0.00	Tot=	0.00

ΔB_{EQUIV} para la cadena del Polietileno de alta densidad (Continuación)

[kcal/kg PBD]	
Tecnología	Ruta IV
52	0.00
Tot=	0.00

4.9 Metodología empleada para el análisis del valor agregado de una cadena de producción.

Es conveniente que primero se defina el concepto de valor agregado. El **valor agregado** es el valor que añade una unidad económica productiva, pública o privada, en su producción de bienes y servicios. Equivale al valor de los bienes y servicios producidos menos los respectivos costos intermedios (materias primas, suministros y servicios utilizados). Un producto con valor agregado es aquel al que se le hacen una o más operaciones con el fin de adecuarlo a los requerimientos necesarios de la demanda, y que fue producido por actividades de investigación y desarrollo. [Martínez, 2004].

En el presente trabajo, para evaluar el valor agregado, se emplearán tecnologías "benchmarking"^(*), [PEP, 1990], con la finalidad de obtener los costos de producción, y a su vez el valor de cada petroquímico de la cadena. En la bibliografía citada se tiene información para tres capacidades diferentes que están ordenadas en forma creciente al tamaño.

Sin embargo para elegir la más adecuada para el presente caso de estudio; es necesario conocer la demanda real o inducida de cada petroquímico en la cadena en estudio.

Para conocer cual es la demanda de cada petroquímico que forma parte de la cadena que se ilustra en la Fig. 3.4, basta con saber la demanda de los productos finales, (véase Tabla 4.16), para después obtener mediante los CIP correspondientes una demanda inducida.

La Tabla 4.16 muestra la demanda que exógenamente fue calculada u obtenida por estadística para los productos finales que ahí se consideran.

^(*) Obtenidos del "Process Economic Program" de Standard Research Institute.

Tabla 4.16. Demanda de los productos de la demanda final

Año	Petroquímico	Demanda [Toneladas anuales]
2003	Poliétileno de baja densidad	681,390
2003	Poliétileno de alta densidad	660,879
2003	Polipropileno	633,015
2003	PVC	629,579
2003	PET	548,031
2003	Poliestireno	405,931
2003	Poliéster	287,412
2003	Poliuretano	135,772

Un ejemplo de cálculo de la demanda inducida para las materias primas básicas del poliestireno se muestra en seguida, en términos del etileno y el benceno.

El ejemplo de cálculo se realiza para la **Ruta I** (ver Tabla 3.5) de producción de poliestireno,

$$Demanda\ de\ poliestireno = 405,931\ ton$$

$$Demanda\ de\ estireno = 405,931\ ton\ poliestireno \left(\frac{1.05\ ton\ estireno}{ton\ poliestireno} \right) = 426,23\ ton\ estireno$$

$$Demanda\ de\ etilbenceno = 426,23\ ton\ estireno \left(\frac{1.088\ ton\ etilbenceno}{ton\ estireno} \right) = 463,74\ ton\ etilbenceno$$

$$Demanda\ de\ etileno = 463,74\ ton\ etilbenceno \left(\frac{0.273\ ton\ etileno}{ton\ etilbenceno} \right) = 126,6\ ton\ etileno$$

$$Demanda\ de\ benceno = 463,74\ ton\ etilbenceno \left(\frac{0.748\ ton\ benceno}{ton\ etilbenceno} \right) = 346,7\ ton\ benceno$$

En seguida, en las Tablas 4.17 a 4.24 se muestra la demanda inducida de los productos intermedios necesarios para producir cada uno de los petroquímicos finales, considerando que existen diversas alternativas (rutas tecnológicas) para producirlos.

Tabla 4.17 Demanda inducida para la cadena del poliestireno

[Miles de toneladas]			
Tecnología	Ruta I	Tecnología	Ruta II
19	463.74	19	485.90
20	426.23	23b	426.23
21	405.93	21	405.93

Tabla 4.18 Demanda inducida para la cadena del PVC

[Miles de toneladas]							
Tecnología	Ruta I	Tecnología	Ruta II	Tecnología	Ruta III	Tecnología	Ruta IV
61	1056.82	61	1056.82	61	1056.82	61	1056.82
62	635.87	62	635.87	62	635.87	62	635.87
63	629.58	64	629.58	65	629.58	66	629.58

Demanda inducida para la cadena del PVC (continuación)

[Miles de toneladas]							
Tecnología	Ruta V	Tecnología	Ruta VI	Tecnología	Ruta VII	Tecnología	Ruta VIII
61	1056.82	68	1056.82	68	1056.82	68	1056.82
62	635.87	62	635.87	62	635.87	62	635.87
67	629.58	63	629.58	64	629.58	65	629.58

Demanda inducida para la cadena del PVC (continuación)

[Miles de toneladas]			
Tecnología	Ruta IX	Tecnología	Ruta X
68	1056.82	68	1056.82
62	635.87	62	635.87
66	629.58	67	629.58

Tabla 4.19 Demanda inducida para la cadena del Poliéster grado fibra

[Miles de toneladas]							
Tecnología	Ruta I	Tecnología	Ruta II	Tecnología	Ruta III	Tecnología	Ruta IV
8	125.10	8	125.10	8	125.10	7	246.11
9	330.52	9	330.52	9	330.52	13	107.23
13	85.76	13	100.25	18	114.96	14	114.96
15	114.96	14	114.96	10	287.41	16	287.41
10	287.41	10	287.41				

Demanda inducida para la cadena del Poliéster grado fibra (Continuación)

[Miles de toneladas]							
Tecnología	Ruta V	Tecnología	Ruta VI	Tecnología	Ruta VII	Tecnología	Ruta VIII
7	246.11	6	246.11	6	246.11	6	246.11
18	114.96	13	100.25	13	85.76	18	114.96
16	287.41	14	114.96	15	114.96	16	287.41
		16	287.41	16	287.41		

Demanda inducida para la cadena del Poliéster (Continuación)

[Miles de toneladas]	
Tecnología	Ruta IX
7	246.11
13	85.76
15	114.96
16	287.41
Tot=	

Tabla 4.20 Demanda inducida para la cadena del PET

[Miles de toneladas]							
Tecnología	Ruta I	Tecnología	Ruta II	Tecnología	Ruta III	Tecnología	Ruta IV
6	469.28	6	469.28	6	469.28	7	469.28
13	171.75	13	146.93	18	196.96	13	171.75
14	196.96	15	196.96	59	548.03	14	196.96
59	548.03	59	548.03			59	548.03

Demanda inducida para la cadena del PET (Continuación)

[Miles de toneladas]							
Tecnología	Ruta V	Tecnología	Ruta VI	Tecnología	Ruta VII	Tecnología	Ruta VIII
7	469.28	7	469.28	8	207.64	8	207.64
13	146.93	18	196.96	9	548.58	9	548.58
15	196.96	59	548.03	13	171.75	13	146.93
59	548.03			14	196.96	15	196.96
				60	548.03	60	548.03

Demanda inducida para la cadena del PET (Continuación)

[Miles de toneladas]	
Tecnología	Ruta IX
8	207.64
9	548.58
18	196.96
60	548.03

Tabla 4.21 Demanda inducida para la cadena del Poliuretano

[Miles de toneladas]					
Tecnología	Ruta I	Tecnología	Ruta II	Tecnología	Ruta III
13	69.55	13	69.55	13	69.55
19	193.37	19	193.37	36	69.55
23a	69.55	23a	69.55	31	2.37
31	2.37	31	2.37	32	2.43
32	2.43	32	2.43	33	2.36
33	2.36	33	2.36	38	76.03
38	76.03	38	76.03	39	0.57
39	0.57	39	0.57	40	1.89
40	1.89	40	1.89	42	65.61
42	65.61	42	67.34	43	55.89
43	55.89	58	55.89	48	1.22
48	1.22	48	1.22	54	4.31
54	4.31	54	4.31	46	8.29
46	8.29	46	8.29	47	6.15
47	6.15	47	6.15	44	61.10
44	61.10	44	61.10	39	19.80
39	19.80	39	19.80	40	66.01
40	66.01	40	66.01	48	13.14
48	13.14	48	13.14	54	46.28
54	46.28	54	46.28	55	64.10
55	64.10	55	64.10	56	40.98
56	40.98	56	40.98	57	50.24
57	50.24	57	50.24	45	135.77
45	135.77	45	135.77		

Demanda inducida para la cadena del Poliuretano (Continuación)

[Miles de toneladas]					
Tecnología	Ruta IV	Tecnología	Ruta V	Tecnología	Ruta VI
13	69.55	13	69.55	13	69.55
36	69.55	37	69.55	37	69.55
31	2.37	31	2.37	31	2.37
32	2.43	32	2.43	32	2.43
33	2.36	33	2.36	33	2.36
38	76.03	38	76.03	38	76.03
39	0.57	39	0.57	39	0.57
40	1.89	40	1.89	40	1.89
42	67.34	42	65.61	42	67.34
58	55.89	43	55.89	58	55.89
48	1.22	48	1.22	48	1.22
54	4.31	54	4.31	54	4.31
46	8.29	46	8.29	46	8.29
47	6.15	47	6.15	47	6.15
44	61.10	44	61.10	44	61.10
39	19.80	39	19.80	39	19.80
40	66.01	40	66.01	40	66.01
48	13.14	48	13.14	48	13.14
54	46.28	54	46.28	54	46.28
55	64.10	55	64.10	55	64.10
56	40.98	56	40.98	56	40.98
57	50.24	57	50.24	57	50.24
45	135.77	45	135.77	45	135.77

Tabla 4.22 Demanda inducida para la cadena del Polipropileno

[Miles de toneladas]					
Tecnología	Ruta I	Tecnología	Ruta II	Tecnología	Ruta III
1	633.02	2	633.02	3	633.02

Demanda inducida para la cadena del Polipropileno (Continuación)

[Miles de toneladas]	
Tecnología	Ruta IV
4	633.02

Tabla 4.23 Demanda inducida para la cadena del Polietileno de alta densidad

[Miles de toneladas]					
Tecnología	Ruta I	Tecnología	Ruta II	Tecnología	Ruta III
26	660.88	27	660.88	28	660.88

Tabla 4.24 Demanda inducida para la cadena del Polietileno de baja densidad

[Miles de toneladas]					
Tecnología	Ruta I	Tecnología	Ruta II	Tecnología	Ruta III
49	681.39	50	681.39	51	681.39

Demanda inducida para la cadena del Polietileno de alta densidad (Continuación)

[Miles de toneladas]	
Tecnología	Ruta IV
52	681.39

Una vez calculada la demanda para cada petroquímico, se selecciona entre las tecnologías "benchmarking" la capacidad instalada que mejor concuerde con la demanda inducida en la IPQ mexicana.

Siguiendo con el análisis de la **Ruta I** de producción de poliestireno; las siguientes tres tablas (Tabla 4.25 a Tabla 4.28) muestran los datos de las tecnologías "benchmarking" de cada tecnología que conforman dicha ruta tecnológica.

Tabla 4.25. Datos "benchmarking" para la tecnología 19, producción de etilbenceno [PEP, 1990]

Capacidad de la planta	[mil ton/año]	250	500	1000
Inversión	USD millones	28.5	47	64.3
Materias primas	[USD/kg producto]	0.2665	0.2665	0.2665
Créditos por subproductos	[USD/kg producto]	0.0000	0.0000	0.0000
Servicios	[USD/kg producto]	0.0040	0.0040	0.0040
Materiales de mantenimiento	[USD/kg producto]	0.0022	0.0018	0.0018
Suministros de operación	[USD/kg producto]	0.0002	0.0002	0.0000
Mano de obra de operación	[USD/kg producto]	0.0022	0.0011	0.0011
Mano de obra de mantenimiento	[USD/kg producto]	0.0022	0.0018	0.0018
Laboratorio de control	[USD/kg producto]	0.0004	0.0002	0.0002
Costos generales de la planta	[USD/kg producto]	0.0040	0.0026	0.0024
Impuestos y seguros	[USD/kg producto]	0.0022	0.0020	0.0018
Depreciación	[USD/kg producto]	0.0115	0.0095	0.0088
Gastos de venta	[USD/kg producto]	0.0099	0.0097	0.0097

Tabla 4.26. Datos "benchmarking" para la tecnología 20, producción de estireno [PEP, 1990]

Capacidad de la planta	[mil ton/año]	225	450	680
Inversión	USD millones	88.9	146.2	204.4
Materias primas	[USD/kg producto]	0.5322	0.5322	0.5322
Créditos por subproductos	[USD/kg producto]	-0.6200	-0.0062	-0.0062
Servicios	[USD/kg producto]	0.0358	0.0358	0.0358
Materiales de mantenimiento	[USD/kg producto]	0.0077	0.0062	0.0057
Suministros de operación	[USD/kg producto]	0.0004	0.0002	0.0002
Mano de obra de operación	[USD/kg producto]	0.0051	0.0026	0.0020
Mano de obra de mantenimiento	[USD/kg producto]	0.0077	0.0062	0.0057
Laboratorio de control	[USD/kg producto]	0.0011	0.0004	0.0004
Costos generales de la planta	[USD/kg producto]	0.0110	0.0075	0.0064
Impuestos y seguros	[USD/kg producto]	0.0079	0.0066	0.0060
Depreciación	[USD/kg producto]	0.0395	0.0326	0.0300
Gastos de venta	[USD/kg producto]	0.0392	0.0375	0.0368

Tabla 4.27. Datos "benchmarking" para la tecnología 21, producción de poliestireno [PEP, 1990]

Capacidad de la planta	[mil ton/año]	15	30	60
Inversión	USD millones	8.6	12.4	17.9
Materias primas	[USD/kg producto]	0.4462	0.4462	0.4462
Créditos por subproductos	[USD/kg producto]	0.0000	0.0000	0.0000
Servicios	[USD/kg producto]	0.0054	0.0054	0.0054
Materiales de mantenimiento	[USD/kg producto]	0.0128	0.009	0.0066
Suministros de operación	[USD/kg producto]	0.0051	0.0026	0.0013
Mano de obra de operación	[USD/kg producto]	0.0509	0.0256	0.0128
Mano de obra de mantenimiento	[USD/kg producto]	0.0128	0.009	0.0066
Laboratorio de control	[USD/kg producto]	0.0101	0.0051	0.0026
Costos generales de la planta	[USD/kg producto]	0.0591	0.0317	0.0176
Impuestos y seguros	[USD/kg producto]	0.0115	0.0082	0.006
Depreciación	[USD/kg producto]	0.0575	0.0412	0.0298
Gastos de venta	[USD/kg producto]	0.043	0.0362	0.032

En seguida se hace la comparación entre las demandas inducidas y las tres capacidades instaladas en cada tecnología "benchmarking" para tomar los datos de dicha capacidad instalada.

Estas son las capacidades instaladas elegidas para las tecnologías del ejemplo de cálculo:

Tabla 4.28. Capacidades instaladas elegidas

Tecnología	Capacidad instalada [mil toneladas]	Demanda inducida[mil toneladas]
19	500.00	463.74
20	450.00	426.23
21	405.00	405.931

La capacidad instalada para la tecnología 21 (producción de poliestireno), resulta de considerar seis plantas de la máxima capacidad, una de mediana capacidad y una de la menor capacidad, todas de la tecnología "benchmarking" correspondiente.

En la siguiente etapa se calculan los costos variables, total de costos directos, principales costos de la planta, y costos totales de producción con los datos de la tecnología "benchmarking"

$$\text{Costos variables} = \text{Materias primas} + \text{Créditos por subproductos} + \text{Servicios} \quad (4.26)$$

$$\begin{aligned} \text{Total de costos directos} = & \text{Materiales de mantenimiento} + \text{Suministro de} \\ & \text{operación} + \text{Mano de obra de operación} + \text{Mano de} \\ & \text{obra de mantenimiento} + \text{Laboratorio de control} \end{aligned} \quad (4.27)$$

$$\text{Principales costos de la planta} = \text{Costos generales de la planta} + \text{Impuestos y} \\ \text{seguros} + \text{Depreciación} \quad (4.28)$$

$$\text{Costos totales de producción} = \text{Costos variables} + \text{Total de costos directos} + \\ \text{Principales costos de la planta} + \text{Gastos de venta} \quad (4.29)$$

**Tabla 4.29 Costos totales de la Ruta I de producción de poliestireno
[USD/kg poliestireno]**

	Tecnología 19	Tecnología 20	Tecnología 21
Costos variables	0.2705	0.5618	3.6128
Total de costos directos	0.0051	0.0156	0.3224
Principales costos de la planta	0.0141	0.0467	0.5296
Costos totales de producción	0.2994	0.6616	7.736

Lo que procede es calcular el costo del producto de cada tecnología, esto se consigue dividiendo la ganancia entre la capacidad de la planta, como lo indica la Ec. 4.30

$$\text{Costo del producto} = \frac{\text{Ganancia}}{\text{Capacidad de la planta}} \quad (4.30)$$

Para calcular la ganancia, se emplea la Ec. 4.31

$$\text{Ganancia} = \text{Inversión}(\%ROI) \quad (4.31)$$

Donde %ROI (Return on investment) es el porcentaje de retorno sobre la inversión, en el presente trabajo, al igual que en el PEP, se emplea un ROI del 25%.

Una vez que ya se tienen los costos totales de producción y el costo del producto se puede calcular mediante la Ec. 4.32 el valor del producto

$$\text{Valor del producto} = \text{Costos totales de producción} + \text{Costos del producto} \quad (4.32)$$

Finalmente mediante la Ec. 4.33 se calcula el valor agregado:

$$\text{Valor agregado} = \text{Valor del producto} - \text{Costos variables} - \text{Suministro de operación} - \text{Materiales de mantenimiento} - \text{Depreciación} \quad (4.33)$$

Aplicando las Ecs. 4.30 a 4.33 se llega a los valores que aparecen en la Tabla 4.29.

Tabla 4.30. Ganancia, Costo del producto, Valor del producto y Valor agregado

Tecnología	Ganancia [USDx10 ⁶]	Costo del producto [USD/kg producto]	Valor de producto [USD/kg producto]	Valor agregado [USD/kg producto]
12	47.57	0.2114	0.528	0.2745
19	11.25	0.0235	0.3239	0.0409
20	36.55	0.0812	0.7428	0.142
21	32.10	0.6942	5.4302	1.463

Por último, para obtener el valor agregado (VA_{ruta}) total de cada ruta tecnológica se debe multiplicar por los CIP correspondientes el valor agregado de cada tecnología que forma parte de la ruta tecnológica. 1.653

$$VA_{19,equiv} = 0.0409 \frac{USD}{kg \text{ etilbenceno}} \left(\frac{1.088kg \text{ etilbenceno}}{kg \text{ estireno}} \right) \left(\frac{1.05kg \text{ estireno}}{kg \text{ poliestireno}} \right)$$

$$= 0.0467 \frac{USD}{kg \text{ poliestireno}}$$

$$VA_{20,equiv} = 0.142 \frac{USD}{kg \text{ estireno}} \left(\frac{1.05kg \text{ estireno}}{kg \text{ poliestireno}} \right) = 0.1491 \frac{USD}{kg \text{ poliestireno}}$$

$$VA_{21,equiv} = 1.463 \frac{USD}{kg \text{ poliestireno}}$$

donde $VA_{i,equiv}$ es el valor agregado equivalente de la tecnología i .

Por último, mediante la Ec. 4.34 se calcula el valor agregado de la ruta completa (VA_{ruta}).

$$VA_{ruta} = \sum_{TEC=1}^{TEC=N} VA_{i,equiv} \quad (4.34)$$

El resultado de aplicar la Ec. 4.34 es:

$$VA_{ruta I}^{Poliestireno} = 1.6588 \frac{USD}{kg \text{ poliestireno}}$$

Esto significa que la ruta I de producción de poliestireno, partiendo de benceno y etileno da un valor agregado de 1.6588 dólares por cada kilogramo de poliestireno formado.

En las siguientes tablas (Tabla 4.30 a Tabla 4.37) se muestran los valores agregados equivalentes de cada tecnología de las rutas tecnológicas existentes, así como el valor agregado total de cada ruta tecnológica.

Tabla 4.31. Valor agregado equivalente para la cadena del poliestireno

[USD/kg Poliestireno]			
Tecnología	Ruta I	Tecnología	Ruta II
19	0.047	19	0.049
20	0.149	23b	1.173
21	1.463	21	1.463
Tot=	1.658	Tot=	2.684

Tabla 4.32 Valor agregado equivalente para la cadena del PVC

[USD/kg PVC]							
Tecnología	Ruta I	Tecnología	Ruta II	Tecnología	Ruta III	Tecnología	Ruta IV
61	0.065	61	0.065	61	0.065	61	0.065
62	0.225	62	0.225	62	0.225	62	0.225
63	4.147	64	2.615	65	0.433	66	2.492
Tot=	4.437	Tot=	2.904	Tot=	0.722	Tot=	2.781

Valor agregado equivalente para la cadena del PVC (continuación)

[USD/kg PVC] (Continuación)							
Tecnología	Ruta V	Tecnología	Ruta VI	Tecnología	Ruta VII	Tecnología	Ruta VIII
61	0.065	68	0.203	68	0.203	68	0.203
62	0.225	62	0.225	62	0.225	62	0.225
67	0.748	63	4.147	64	2.615	65	0.433
Tot=	1.038	Tot=	4.575	Tot=	3.043	Tot=	0.861

Valor agregado equivalente para la cadena del PVC (continuación)

[USD/kg PVC] (Continuación)			
Tecnología	Ruta IX	Tecnología	Ruta X
68	0.203	68	0.203
62	0.225	62	0.225
66	2.492	67	0.748
Tot=	2.920	Tot=	1.176

Tabla 4.33 Valor agregado equivalente para la cadena del Poliéster

[USD/kg Poliéster grado fibra]							
Tecnología	Ruta I	Tecnología	Ruta II	Tecnología	Ruta III	Tecnología	Ruta IV
8	0.052	8	0.052	8	0.052	7	0.325
9	0.438	9	0.438	9	0.438	13	0.157
13	0.134	13	0.157	18	0.149	14	0.058
15	0.054	14	0.058	10	2.169	16	1.989
10	2.169	10	2.169	Tot=	2.807	Tot=	2.530
Tot=	2.848	Tot=	2.873				

Valor agregado equivalente para la cadena del Poliéster (Continuación)

[USD/kg Poliéster grado fibra]							
Tecnología	Ruta V	Tecnología	Ruta VI	Tecnología	Ruta VII	Tecnología	Ruta VIII
7	0.325	6	0.239	6	0.239	6	0.239
18	0.149	13	0.157	13	0.134	18	0.149
16	1.989	14	0.058	15	0.054	16	1.989
Tot=	2.463	16	1.989	16	1.989	Tot=	2.377
		Tot=	2.443	Tot=	2.416		

Valor agregado para la cadena del Poliéster (Continuación)

[USD/kg Poliéster grado fibra]	
Tecnología	Ruta IX
7	0.325
13	0.134
15	0.054
16	1.989
Tot=	2.502

Tabla 4.34 Valor agregado para la cadena del PET

[USD/kg PET]							
Tecnología	Ruta I	Tecnología	Ruta II	Tecnología	Ruta III	Tecnología	Ruta IV
6	0.516	6	0.516	6	0.516	7	0.691
13	0.116	13	0.099	18	0.107	13	0.116
14	0.042	15	0.038	59	3.652	14	0.042
59	3.652	59	3.652	Tot=	4.275	59	3.652
Tot=	4.325	Tot=	4.304			Tot=	4.501

Valor agregado para la cadena del PET (Continuación)

[USD/kg PET]							
Tecnología	Ruta V	Tecnología	Ruta VI	Tecnología	Ruta VII	Tecnología	Ruta VIII
7	0.691	7	0.691	8	0.045	8	0.045
13	0.099	18	0.107	9	0.762	9	0.762
15	0.038	59	3.652	13	0.116	13	0.099
59	3.652	Tot=	4.450	14	0.042	15	0.038
Tot=	4.480			60	3.757	60	3.757
				Tot=	4.722	Tot=	4.700

Valor agregado para la cadena del PET (Continuación)

[USD/kg PET]	
Tecnología	Ruta IX
8	0.045
9	0.762
18	0.107
60	3.757
Tot=	4.671

Tabla 4.35 Valor agregado para la cadena del Poliuretano

[USD/kg Poliuretano]					
Tecnología	Ruta I	Tecnología	Ruta II	Tecnología	Ruta III
13	0.021	13	0.021	13	0.021
19	0.070	19	0.070	36	0.132
23a	0.316	23a	0.316	31	0.005
31	0.005	31	0.005	32	0.006
32	0.006	32	0.006	33	0.014
33	0.014	33	0.014	38	0.270
38	0.270	38	0.270	39	0.000
39	0.000	39	0.000	40	0.002
40	0.002	40	0.002	42	0.057
42	0.057	42	0.057	43	0.065
43	0.065	58	0.090	48	0.002
48	0.002	48	0.002	54	0.002
54	0.002	54	0.002	46	0.009
46	0.009	46	0.009	47	0.009
47	0.009	47	0.009	44	0.195
44	0.195	44	0.195	39	0.012
39	0.012	39	0.012	40	0.048
40	0.048	40	0.048	48	0.016
48	0.016	48	0.016	54	0.022
54	0.022	54	0.022	55	0.087

*Reestructuración de algunas rutas tecnológicas de la Industria
Petroquímica en México, utilizando el criterio de disponibilidad termodinámica.*

55	0.087	55	0.087	56	0.087
56	0.087	56	0.087	57	0.167
57	0.167	57	0.167	45	27.035
45	27.035	45	27.035	Tot=	28.263
Tot=	28.517	Tot=	28.542		

Valor agregado para la cadena del Poliuretano (Continuación)

[USD/kg Poliuretano]					
Tecnología	Ruta IV	Tecnología	Ruta V	Tecnología	Ruta VI
13	0.021	13	0.021	13	0.021
36	0.132	37	0.483	37	0.483
31	0.005	31	0.005	31	0.005
32	0.006	32	0.006	32	0.006
33	0.014	33	0.014	33	0.014
38	0.270	38	0.270	38	0.270
39	0.000	39	0.000	39	0.000
40	0.002	40	0.002	40	0.002
42	0.057	42	0.057	42	0.057
58	0.090	43	0.065	58	0.090
48	0.002	48	0.002	48	0.002
54	0.002	54	0.002	54	0.002
46	0.009	46	0.009	46	0.009
47	0.009	47	0.009	47	0.009
44	0.195	44	0.195	44	0.195
39	0.012	39	0.012	39	0.012
40	0.048	40	0.048	40	0.048
48	0.016	48	0.016	48	0.016
54	0.022	54	0.022	54	0.022
55	0.087	55	0.087	55	0.087
56	0.087	56	0.087	56	0.087
57	0.167	57	0.167	57	0.167
45	27.035	45	27.035	45	27.035
Tot=	28.288	Tot=	28.616	Tot=	28.639

Tabla 4.36 Valor agregado para la cadena del Polipropileno

[USD/kg Polipropileno]					
Tecnología	Ruta I	Tecnología	Ruta II	Tecnología	Ruta III
1	0.861	2	0.766	3	1.128
Tot=	0.861	Tot=	0.766	Tot=	1.128

Valor agregado para la cadena del Polipropileno (Continuación)

[USD/kg Polipropileno]	
Tecnología	Ruta IV
4	0.470
Tot=	0.470

Tabla 4.37 Valor agregado para la cadena del Polietileno de alta densidad

[USD/kg PAD]					
Tecnología	Ruta I	Tecnología	Ruta II	Tecnología	Ruta III
26	0.107	27	0.888	28	0.914
Tot=	0.107	Tot=	0.888	Tot=	0.914

Tabla 4.38 Valor agregado para la cadena del Polietileno de baja densidad

[USD/kg PBD]					
Tecnología	Ruta I	Tecnología	Ruta II	Tecnología	Ruta III
49	0.083	50	0.675	51	1.200
Tot=	0.083	Tot=	0.675	Tot=	1.200

Valor agregado para la cadena del Polietileno de alta densidad (Continuación)

[USD/kg PBD]	
Tecnología	Ruta IV
52	1.182
Tot=	1.182

4.10 Metodología empleada para el análisis de la energía real por servicios (ENSER).

Para el cálculo de la energía real por servicios se emplearan las mismas tecnologías "benchmarking"^(*) que se emplearon para el cálculo del valor agregado.

Los servicios considerados para cada tecnología son

- Vapor. En el presente trabajo se considerará, al igual que en la bibliografía de las tecnologías benchmarking [PEP, 1990], que el vapor se obtiene por la combustión de gas natural.
- Gas natural
- Combustible. Se considerará que el combustible es combustóleo [PEP, 1990]
- Electricidad.

El siguiente ejemplo de cálculo muestra el procedimiento seguido para obtener la energía real por servicios para cada tecnología y, después, para cada ruta tecnológica.

Tabla 4.39. Datos de servicios "benchmarking" para la Ruta I de la producción de poliestireno [PEP, 1990]

Servicio	Unidades	Tecnología 19	Tecnología 20	Tecnología 21
Vapor	[USD/kg producto]	-0.0025	0.0212	0.0004
Electricidad	[kWh/ton producto]	10.046	92.93	92.93
Gas natural	[USD/kg producto]	0.0057	0.0091	0.0010
Combustible	[USD/kg producto]	0.0000	0.0000	0.0000

Como puede observarse las unidades del consumo de vapor, gas natural y combustible son unidades económicas (dinero).

^(*) Obtenidos del "Process Economic Program" de Standard Research Institute.

Cabe señalar que la energía real por servicios (ENSER) estará compuesta por dos contribuciones, como lo indica la Ec 4.35

$$ENSER = \text{Energía térmica} + \text{Energía mecánica} \quad (4.35)$$

La energía térmica considera los requerimientos de vapor, combustible y gas natural. Mientras que la energía mecánica considera los requerimientos eléctricos.

$$\text{Energía térmica} = ENSER^{\text{Vapor y Gas natural}} + ENSER^{\text{Combustible}} \quad (4.36)$$

$$\text{Energía mecánica} = ENSER^{\text{Electricidad}} \quad (4.37)$$

Para hacer la transformación, de los requerimientos citados en la Tabla 4.38, a unidades energéticas, se considerará dentro de un mismo grupo al vapor y al gas natural, ya que, como se mencionó en la página anterior, el vapor se obtiene por la combustión del gas natural [PEP, 1990].

Para el caso del combustible, basta con emplear el poder calorífico del combustóleo (PC_{comb}) así como el precio del mismo ($\text{Precio}_{\text{comb}}$).

Por último, para el caso de la electricidad se convertirán los kWh de cada tecnología multiplicando por un factor de conversión, para tener, de esta manera, la energía eléctrica en kilo calorías.

Vapor y gas natural:

$$PC_{\text{Gas natural}} = 9200 \text{ kcal/m}^3$$

$$\text{Precio}_{\text{Gas natural}} = 0.186 \text{ USD/m}^3$$

$$\begin{aligned} ENSER_{19}^{\text{Vapor y Gas natural}} &= 0.0032 \frac{\text{USD}}{\text{kg etilbenceno}} \left(9200 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3 \text{ Gas natural}} \right) \left(\frac{1 \text{m}^3 \text{ Gas natural}}{0.186 \text{USD}} \right) \\ &= 157.805 \frac{\text{kcal}}{\text{kg etilbenceno}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} ENSER_{20}^{\text{Vapor y Gas natural}} &= 0.0303 \frac{\text{USD}}{\text{kg estireno}} \left(9200 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3 \text{ Gas natural}} \right) \left(\frac{1 \text{m}^3 \text{ Gas natural}}{0.186 \text{USD}} \right) \\ &= 1494.22 \frac{\text{kcal}}{\text{kg estireno}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} ENSER_{21}^{\text{Vapor y Gas natural}} &= 0.0014 \frac{\text{USD}}{\text{kg estireno}} \left(9200 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3 \text{ Gas natural}} \right) \left(\frac{1 \text{m}^3 \text{ Gas natural}}{0.186 \text{USD}} \right) \\ &= 69.040 \frac{\text{kcal}}{\text{kg poliestireno}} \end{aligned}$$

donde $ENSER_i^{\text{Vapor y Gas natural}}$ es la energía real por servicios de la tecnología i debido al vapor y al gas natural.

Combustible:

De acuerdo a la Tabla 4.38 no se necesita combustible para las tecnologías 19, 20 y 21, de lo contrario, la transformación a unidades energéticas se haría de la misma manera en que se hizo para el caso del gas natural, pero obviamente, empleando el poder calorífico y el precio del combustible:

$$PC_{\text{Comb}} = 10.213 \text{ kcal/L}$$

$$\text{Precio}_{\text{Comb}} = 0.25 \text{ USD/L}$$

Electricidad:

$$1 \text{ kWh} = 860 \text{ kcal}^{(*)}$$

$$ENSER_{19}^{Electricidad} = 10.046 \frac{\text{kWh}}{\text{ton etilbenceno}} \left(\frac{859.8452 \text{ kcal}}{1 \text{ kWh}} \right) \left(\frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ kg}} \right) = 8.638 \frac{\text{kcal}}{\text{kg etilbenceno}}$$

$$ENSER_{20}^{Electricidad} = 92.93 \frac{\text{kWh}}{\text{ton estireno}} \left(\frac{859.8452 \text{ kcal}}{1 \text{ kWh}} \right) \left(\frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ kg}} \right) = 79.906 \frac{\text{kcal}}{\text{kg estireno}}$$

$$ENSER_{21}^{Electricidad} = 92.93 \frac{\text{kWh}}{\text{ton estireno}} \left(\frac{859.8452 \text{ kcal}}{1 \text{ kWh}} \right) \left(\frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ kg}} \right) = 79.906 \frac{\text{kcal}}{\text{kg poliestireno}}$$

Como lo indica la Ec. 4.35, para obtener la energía real por servicios, se deben calcular primero las contribuciones por energía térmica y por energía mecánica.

$$Energía\ térmica_{19} = 157.805 \frac{\text{kcal}}{\text{kg etilbenceno}}$$

$$Energía\ térmica_{20} = 1494.22 \frac{\text{kcal}}{\text{kg estireno}}$$

$$Energía\ térmica_{21} = 69.040 \frac{\text{kcal}}{\text{kg poliestireno}}$$

$$Energía\ mecánica_{19} = 8.638 \frac{\text{kcal}}{\text{kg etilbenceno}}$$

$$Energía\ térmica_{19} = 79.906 \frac{\text{kcal}}{\text{kg estireno}}$$

$$Energía\ térmica_{19} = 79.906 \frac{\text{kcal}}{\text{kg poliestireno}}$$

(*) La manera en que se obtiene ese factor de conversión es la siguiente:

$$1 \text{ kWh} = 1 \text{ k} \left(\frac{\text{J}}{\text{s}} \right) \text{ h} \left(\frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \right) = 3600 \text{ kJ} \left(\frac{1 \text{ kcal}}{4.186 \text{ kJ}} \right) = 860 \text{ kcal}$$

Donde 4.186 kJ=1kcal es el equivalente mecánico del calor [Blatt, 1991]

Por último, se suman las dos contribuciones para obtener la energía real por servicios, como lo muestra la Ec. 4.35

Aplicando la Ec 4.35 se tiene que:

Tabla 4.40. ENSER para ruta I de poliestireno

Tecnología	ENSER [kcal/kg producto]
19	166.444
20	1574.1
21	148.95

Lo que ahora procede es obtener una energía real por servicios equivalente ($ENSER_{equiv}$) que este en las unidades adecuadas para que puedan sumarse y de esta manera obtener la energía real por servicios de la ruta completa; lo anterior se consigue, como lo muestra el siguiente ejemplo de cálculo, mediante multiplicaciones de la $ENSER_i$ por los CIP correspondientes.

$$\begin{aligned}
 ENSER_{19, equiv} &= 166.44 \frac{kcal}{kg \text{ etilbenceno}} \left(\frac{1.088kg \text{ etilbenceno}}{kg \text{ estireno}} \right) \left(\frac{1.05kg \text{ estireno}}{kg \text{ poliestireno}} \right) \\
 &= 190.15 \frac{kcal}{kg \text{ poliestireno}}
 \end{aligned}$$

$$ENSER_{20, equiv} = 1574.1 \frac{kcal}{kg \text{ estireno}} \left(\frac{1.05kg \text{ estireno}}{kg \text{ poliestireno}} \right) = 1652.83 \frac{kcal}{kg \text{ poliestireno}}$$

$$ENSER_{21, equiv} = 148.95 \frac{kcal}{kg \text{ poliestireno}}$$

Por último, se calcula la energía real por servicios de la ruta completa ($ENSER_{ruta}$) sumando las $ENSER_{i, equiv}$ de todas las tecnologías.

$$ENSER_{ruta} = \sum_{TEC=1}^{TEC=N} ENSER_{i, equiv} \tag{4.38}$$

$$EN\text{SER}_{\text{ruta I}}^{\text{poliestireno}} = 1991.92 \frac{\text{kcal}}{\text{kg de poliestireno}}$$

La convención que se emplea en la energía real por servicios es que, cuando ésta es positiva, quiere decir que se debe suministrar esa cantidad de energía a la tecnología para que ésta ocurra realmente, es decir que, para producir un kilogramo de poliestireno a partir de benceno y etileno, se deben suministrar 1991.92 kcal.

De la Tabla 4.40 a la Tabla 4.47 aparecen la energía real por servicios equivalente de cada tecnología, así como la energía real por servicios de cada ruta tecnológica,

Tabla 4.41. Energía real por servicios equivalente para la cadena del poliestireno

[kcal/kg Poliestireno]			
Tecnología	Ruta I	Tecnología	Ruta II
19	190.15	19	199.23
20	1652.83	23b	2297.22
21	148.95	21	148.95
Tot=	1991.92	Tot=	2645.40

Tabla 4.42 Energía real por servicios equivalente para la cadena del PVC

[kcal /kg PVC]							
Tecnología	Ruta I	Tecnología	Ruta II	Tecnología	Ruta III	Tecnología	Ruta IV
61	-33.11	61	-33.11	61	-33.11	61	-33.11
62	1477.46	62	1477.46	62	1477.46	62	1477.46
63	2727.30	64	1290.11	65	235.65	66	1160.96
Tot=	4171.64	Tot=	2734.46	Tot=	1680.00	Tot=	2605.30

Energía real por servicios equivalente para la cadena del PVC (continuación)

[kcal /kg PVC] (Continuación)							
Tecnología	Ruta V	Tecnología	Ruta VI	Tecnología	Ruta VII	Tecnología	Ruta VIII
61	-33.11	68	139.21	68	139.21	68	139.21
62	1477.46	62	1477.46	62	1477.46	62	1477.46
67	1010.28	63	2727.30	64	1290.11	65	235.65
Tot=	2454.62	Tot=	4343.97	Tot=	2906.78	Tot=	1852.32

Energía real por servicios equivalente para la cadena del PVC (continuación)

[kcal /kg PVC] (Continuación)			
Tecnología	Ruta IX	Tecnología	Ruta X
68	139.21	68	139.21
62	1477.46	62	1477.46
66	1160.96	67	1010.28
Tot=	2777.63	Tot=	2626.95

Tabla 4.43 Energía real por servicios equivalente para la cadena del Poliéster

[kcal /kg Poliéster grado fibra]							
Tecnología	Ruta I	Tecnología	Ruta II	Tecnología	Ruta III	Tecnología	Ruta IV
8	12.22	8	12.22	8	12.22	7	1887.00
9	1809.85	9	1809.85	9	1809.85	13	-392.77
13	-336.02	13	-392.77	18	519.62	14	796.56
15	183.48	14	796.56	10	1118.96	16	1259.81
10	1118.96	10	1118.96	Tot=	3460.64	Tot=	3550.59
Tot=	2788.49	Tot=	3344.81				

Energía real por servicios equivalente para la cadena del Poliéster (Continuación)

[kcal/kg Poliéster grado fibra]							
Tecnología	Ruta V	Tecnología	Ruta VI	Tecnología	Ruta VII	Tecnología	Ruta VIII
7	1887.00	6	1267.57	6	1267.57	6	1267.57
18	519.62	13	-392.77	13	-336.02	18	519.62
16	1259.81	14	796.56	15	183.48	16	1259.81
Tot=	3666.42	16	1259.81	16	1259.81	Tot=	3047.00
		Tot=	2931.17	Tot=	2374.84		

Energía real por servicios equivalente para la cadena del Poliéster (Continuación)

[kcal/kg Poliéster grado fibra]	
Tecnología	Ruta IX
7	1887.00
13	-336.02
15	183.48
16	1259.81
Tot=	2994.26

Tabla 4.44 Energía real por servicios equivalente para la cadena del PET

[kcal/kg PET]							
Tecnología	Ruta I	Tecnología	Ruta II	Tecnología	Ruta III	Tecnología	Ruta IV
6	1267.57	6	1267.57	6	1267.57	7	1887.00
13	-352.91	13	-301.91	18	466.87	13	-352.91
14	715.71	15	164.85	59	997.32	14	715.71
59	997.32	59	997.32	Tot=	2731.77	59	997.32
Tot=	2627.69	Tot=	2127.83			Tot=	3247.12

Energía real por servicios equivalente para la cadena del PET (Continuación)

[kcal/kg PET]							
Tecnología	Ruta V	Tecnología	Ruta VI	Tecnología	Ruta VII	Tecnología	Ruta VIII
7	1887.00	7	1887.00	8	10.64	8	10.64
13	-301.91	18	466.87	9	1575.36	9	1575.36
15	164.85	59	997.32	13	-352.91	13	-301.91
59	997.32	Tot=	3351.19	14	715.71	15	164.85
Tot=	2747.26			60	946.61	60	946.61
				Tot=	4865.89	Tot=	4205.48

Energía real por servicios equivalente para la cadena del PET (Continuación)

[kcal/kg PET]	
Tecnología	Ruta IX
8	10.64
9	1575.36
18	466.87
60	946.61
Tot=	2999.48

Tabla 4.45 Energía real por servicios equivalente para la cadena del Poliuretano

[kcal/kg Poliuretano]					
Tecnología	Ruta I	Tecnología	Ruta II	Tecnología	Ruta III
13	-63.50	13	-63.50	13	-63.50
19	237.06	19	237.06	36	1422.06
23a	2733.36	23a	2733.36	31	19.18
31	19.18	31	19.18	32	39.81
32	39.81	32	39.81	33	116.79
33	116.79	33	116.79	38	106.69
38	106.69	38	106.69	39	1.94
39	1.94	39	1.94	40	1.59
40	1.59	40	1.59	42	4.96
42	4.96	42	4.96	43	-83.43
43	-83.43	58	-160.78	48	0.41

*Reestructuración de algunas rutas tecnológicas de la Industria
Petroquímica en México, utilizando el criterio de disponibilidad termodinámica.*

48	0.41	48	0.41	54	-2.93
54	-2.93	54	-2.93	46	9.20
46	9.20	46	9.20	47	-15.26
47	-15.26	47	-15.26	44	353.04
44	353.04	44	353.04	39	67.72
39	67.72	39	67.72	40	55.49
40	55.49	40	55.49	48	4.39
48	4.39	48	4.39	54	-31.41
54	-31.41	54	-31.41	55	56.76
55	56.76	55	56.76	56	329.44
56	329.44	56	329.44	57	716.64
57	716.64	57	716.64	45	1834.84
45	1834.84	45	1834.84	Tot=	4944.44
Tot=	6492.79	Tot=	6415.45		

Energía real por servicios equivalente para la cadena del Poliuretano (Continuación)

[kcal/kg Poliuretano]					
Tecnología	Ruta IV	Tecnología	Ruta V	Tecnología	Ruta VI
13	-63.50	13	-63.50	13	-63.50
36	1422.06	37	1592.88	37	1592.88
31	19.18	31	19.18	31	19.18
32	39.81	32	39.81	32	39.81
33	116.79	33	116.79	33	116.79
38	106.69	38	106.69	38	106.69
39	1.94	39	1.94	39	1.94
40	1.59	40	1.59	40	1.59
42	4.96	42	4.96	42	4.96
58	-160.78	43	-83.43	58	-160.78
48	0.41	48	0.41	48	0.41
54	-2.93	54	-2.93	54	-2.93
46	9.20	46	9.20	46	9.20
47	-15.26	47	-15.26	47	-15.26
44	353.04	44	353.04	44	353.04
39	67.72	39	67.72	39	67.72
40	55.49	40	55.49	40	55.49
48	4.39	48	4.39	48	4.39
54	-31.41	54	-31.41	54	-31.41
55	56.76	55	56.76	55	56.76
56	329.44	56	329.44	56	329.44
57	716.64	57	716.64	57	716.64
45	1834.84	45	1834.84	45	1834.84
Tot=	4867.09	Tot=	5115.26	Tot=	5037.91

Tabla 4.46 Energía real por servicios equivalente para la cadena del Polipropileno

[kcal/kg Polipropileno]					
Tecnología	Ruta I	Tecnología	Ruta II	Tecnología	Ruta III
1	619.03	2	616.00	3	633.28
Tot=	619.03	Tot=	616.00	Tot=	633.28

Energía real por servicios equivalente para la cadena del Polipropileno
(Continuación)

[kcal/kg Polipropileno]	
Tecnología	Ruta IV
4	536.09
Tot=	536.09

Tabla 4.47 Energía real por servicios equivalente para la cadena del Polietileno de alta densidad

[kcal/kg PAD]					
Tecnología	Ruta I	Tecnología	Ruta II	Tecnología	Ruta III
26	330.42	27	370.093467	28	373.154472
Tot=	330.42	Tot=	370.09	Tot=	373.15

Tabla 4.48 Energía real por servicios equivalente para la cadena del Polietileno de baja densidad

[kcal/kg PBD]					
Tecnología	Ruta I	Tecnología	Ruta II	Tecnología	Ruta III
49	138.22	50	369.67	51	836.38
Tot=	138.22	Tot=	369.67	Tot=	836.38

Energía real por servicios equivalente para la cadena del Polietileno de alta densidad (Continuación)

[kcal/kg PBD]	
Tecnología	Ruta IV
52	755.00
Tot=	755.00

4.11 Conclusiones del capítulo.

El cambio de disponibilidad total de cada ruta tecnológica es únicamente un indicativo termodinámico de comparación entre las mismas. Por ello también es necesario conocer la cantidad de energía realmente suministrada toda la cadena productiva para calcular los requerimientos reales, basadas en las mejores plantas de referencia (benchmarking) obtenidas de la literatura especializada.

En cuanto al análisis del valor agregado se tiene que entre más larga es la cadena de producción el valor agregado es mayor, lo cual podría contradecir el principio de alcanzar la máxima ganancia que pueda crearse de esta actividad.

Por ello, si se tomasen en cuenta otros criterios económicos aparte del valor agregado, como la competitividad o la rentabilidad o la inversión, el hecho escrito en el párrafo anterior contrastaría con estos nuevos criterios.

La energía real por servicios es función exclusiva de la naturaleza del proceso (tecnología) a realizar, es decir, no porque la cadena sea más larga la energía real por servicios será más grande.

.Capítulo 5

Selección de rutas tecnológicas,
mediante el empleo de los métodos
multicriterio.

En el presente capítulo se seleccionarán, con ayuda de los métodos multicriterio, las rutas tecnológicas que mejor convengan, en función de la maximización o minimización de los criterios (disponibilidad termodinámica, energía real por servicios y valor agregado), para cada producto de la demanda final.

5.1. Los métodos multicriterio

Una característica distintiva del diseño de sistemas de procesos petroquímicos, es que se pueden identificar más de un criterio que se desea satisfacer, por ejemplo, rentabilidad, seguridad, uso eficiente de materiales y energía, entre otros,

Los métodos de análisis multicriterio, también llamados «métodos de análisis con criterios múltiples», tienen por objetivo, proporcionar a los tomadores de decisión, 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). [Tamiz, 1996]

Un ejemplo de un problema multicriterio es la compra de un auto. El criterio más importante a considerar es el precio. Sin embargo, en la compra de un auto no se considera solamente el precio, en realidad se consideran otros criterios como confort, velocidad, consumo de combustible, potencia, equipamiento, entre otros.

En problemas de este tipo se desea maximizar algunos criterios (velocidad, confort, potencia, equipamiento) y se desea minimizar los criterios restantes (precio, consumo de combustible).

En el mercado existen varias alternativas, autos para éste ejemplo, en las cuales el tomador de decisiones evalúa los criterios considerados. Como es de suponerse, no existe un auto que satisfaga todos los criterios, esto quiere decir que la solución del problema depende de las preferencias del tomador de decisiones.

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 5.1.

Tabla 5.1. Tabla de evaluación. [Brans, 2002]

a	$g_1(\cdot)$	$g_2(\cdot)$	...	$g_k(\cdot)$	...	$g_n(\cdot)$
a_1	$g_1(a_1)$	$g_2(a_1)$	...	$g_k(a_1)$	...	$g_n(a_1)$
a_2	$g_1(a_2)$	$g_2(a_2)$	...	$g_k(a_2)$	...	$g_n(a_2)$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
a_3	$g_1(a_3)$	$g_2(a_3)$	...	$g_k(a_3)$	...	$g_n(a_3)$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
a_n	$g_1(a_n)$	$g_2(a_n)$	...	$g_k(a_n)$	...	$g_n(a_n)$

Las relaciones de dominancia asociadas con un problema multicriterio son:

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

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

Fig. 5.1. Relaciones de dominancia

donde 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 ésta última es mejor que la primera en un criterio r , es imposible decidir cual 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 4.1), 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 esto 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 adecuado método de resolución de problemas multicriterio algunos requisitos deben ser considerados:

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

$$d_j(a, b) = g_j(a) - g_j(b) \quad (5.1)$$

Requisito 2. Como la evaluación $g_j(a)$ de cada criterio esta 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, en 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 solo 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. A muchos de los métodos multicriterio les son asignados pesos de relativa importancia del 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 [Brans, 2002] toma en cuenta todos los requisitos antes mencionados.

5.2. 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.

5.2.1 Información entre los criterios.

La Tabla 5.2 debe ser completada, donde w_j representa los pesos de relativa importancia de los diferentes criterios. Estos pesos deben ser números positivos, e independientes de las unidades de medición de los criterios

Tabla 5.2 Pesos de relativa importancia [Brans, 2002]

$g_1(\cdot)$	$g_2(\cdot)$	...	$g_j(\cdot)$	...	$g_k(\cdot)$
w_1	w_2	...	w_j	...	w_k

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

$$\sum_{j=1}^k w_j = 1 \quad (5.2)$$

En los software de PROMETHEE, PROMCALC y DECISION LAB, el usuario tiene permitido introducir arbitrariamente los números para los pesos sin estar

normalizados, haciendo más fácil expresar la importancia relativa de los criterios. En éstos software los números son divididos por su suma, es decir los pesos son normalizados automáticamente.

Evaluar los pesos de los criterios no es sencillo. Esto envuelve prioridades y percepciones del tomador de decisiones. La selección de los pesos representa el espacio de libertad que el tomador de decisiones tiene. PROMCALC y DECISION LAB incluyen varias herramientas de sensibilidad para experimentar con diferentes grupos de pesos con la finalidad de ayudar a fijarlos.

5.2.2 Información dentro de cada criterio.

La estructura de preferencias de PROMETHEE esta 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:

$$P_j(a,b) = F_j[d_j(a,b)] \quad (5.3)$$

Donde

$$d_j(a,b) = g_j(a) - g_j(b) \quad (5.4)$$

y, para la cual:

$$0 \leq P_j(a,b) \leq 1 \quad (5.5)$$

En el caso de que el criterio deba ser maximizado, ésta función daría la preferencia de a sobre b , debido a las desviaciones observadas entre sus evaluaciones sobre el criterio $g_j(\cdot)$. Ésta función debe tener la forma que indica la Fig. 5.2.

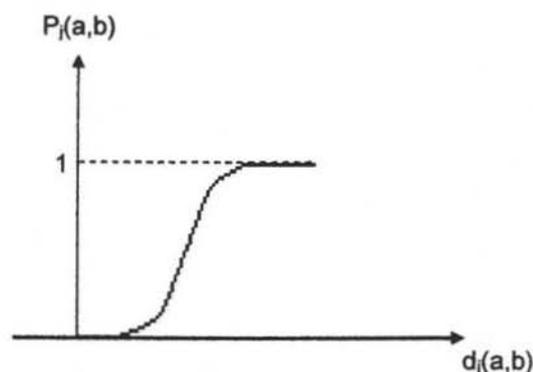


Figura 5.2. Función de preferencia. [Brans, 2002]

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

$$P_j(a,b) = F_j[-d_j(a,b)] \quad (5.6)$$

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.

Tanto PROMCALC como DECISION LAB proponen seis tipos de funciones de preferencia, las cuales se muestran en la Tabla 5.3. 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 una 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 5.3 Funciones de preferencia. [Brans, 2002]

Tipo de función	Forma de función	Definición	Parámetros necesarios
1		$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ 1 & d > 0 \end{cases}$	-
2		$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ 1 & d > q \end{cases}$	q
3		$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ \frac{d}{p} & 0 \leq d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	p

4		$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ \frac{1}{2} & q \leq d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	p, q
5		$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ \frac{d-q}{p-q} & q < d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	p, q
6		$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ 1 - e^{-\frac{d^2}{2s^2}} & d > 0 \end{cases}$	s

Tan pronto como la tabla de evaluación (Tabla 4.1) 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.

5.3 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.

5.3.1 Índices de preferencia agregados.

$$\begin{cases} \pi(a,b) = \sum_{j=1}^k P_j(a,b)w_j \\ \pi(b,a) = \sum_{j=1}^k P_j(b,a)w_j \end{cases} \quad (5.7)$$

$\pi(a,b)$ 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.

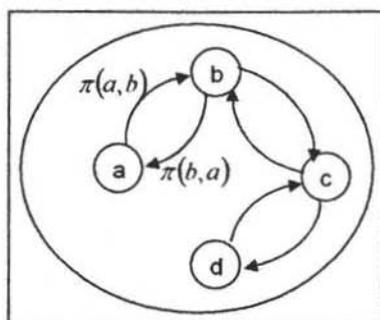


Fig. 5.3 Grafico de índices de preferencias agregadas. [Brans, 2002]

5.3.2 Flujos de categoría superior

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

- Flujo de categoría positivo

$$\phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(a, x) \quad (5.8)$$

- Flujo de categoría negativo

$$\phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(x, a) \quad (5.9)$$

donde x son todas las alternativas diferentes de a .

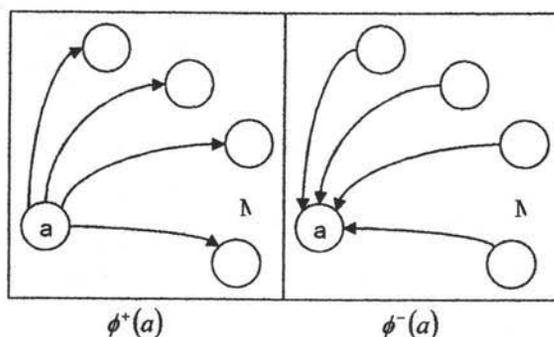


Fig. 5.4 Flujos de categorías de PROMETHEE [Brans, 2002]

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

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

5.3.3 La clasificación parcial. PROMETHEE I

La clasificación parcial 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 en base a las siguientes relaciones:

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

Fig. 5.5 Relaciones de PROMETHEE I [Brans, 2002]

donde (P^I, I^I, R^I) representan, respectivamente, preferencia, indiferencia e incomparabilidad en la clasificación PROMETHEE I.

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 bueno en algunos criterios donde b es débil, y de manera inversa b es bueno 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 cual alternativa es mejor en tales casos, el tomador de decisiones debe cargar con esta responsabilidad.

5.3.4 La clasificación completa de PROMETHEE II

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

$$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a) \quad (5.10)$$

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

$$\begin{cases} aP''b & \text{si } \phi(a) > \phi(b) \\ aI''b & \text{si } \phi(a) = \phi(b) \end{cases} \quad (5.11)$$

Cuando PROMETHEE II es considerado, 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 Ec. 5.10.

5.4 Selección de las rutas tecnológicas.

Como ya se ha mencionado a lo largo del presente trabajo los criterios que se emplean para la selección de las rutas tecnológicas son:

- Disponibilidad termodinámica,
- Valor agregado, y
- Energía real por servicios.

Mediante la maximización de la disponibilidad termodinámica y del valor agregado, y la minimización de la energía real por servicios, evaluados todos a lo largo de cada una de las rutas tecnológicas se selecciona la mejor ruta tecnológica de producción para cada petroquímico de la demanda final.

5.4.1 Empleo del paquete de computo *Decisión Lab* [Brans, 2002].

Para la selección de la mejor ruta tecnológica se considerarán tres enfoques:

- 1°. Dándole mayor importancia a la disponibilidad termodinámica.
- 2°. Dándole mayor importancia a la energía real por servicios.
- 3°. Dándole mayor importancia al valor agregado

Lo anterior se consigue dando los pesos de importancia a cada criterio que reflejen dichos enfoques (ver Tabla 5.4).

Tabla 5.4. Pesos empleados para los tres enfoques planteados.

	Enfoque termodinámico	Enfoque energético	Enfoque económico
Disponibilidad termodinámica	45	35	20
Valor agregado	20	20	45
Energía real por servicios	35	45	35

Con la metodología empleada en el capítulo anterior para la evaluación de cada criterio en cada una de las alternativas (rutas tecnológicas) se llega a la Tabla 5.5,

Se empleo en todos los casos la función de preferencia 1, (Tabla 5.3), debido a es que es la función de preferencia más usual.

Tabla 5.5. Criterios evaluados en las distintas alternativas.

Ruta tecnológica	ΔB [kcal/kg producto]	Valor agregado [USD/kg producto]	Energía por servicios [kcal/kg producto]
Poliestireno			
I	-22.645	1.658	1991.924
II	645.209	2.684	2645.401
Poliéster grado fibra			
I	797.762	2.846	2788.486
II	834.043	2.873	3344.814
III	809.022	2.807	3460.645
IV	1568.766	2.530	3550.589
V	1543.745	2.463	3666.420
VI	2265.419	2.443	2931.166
VII	2229.139	2.416	2374.838
VIII	2240.398	2.377	3046.996
IX	1532.486	2.502	2994.261
Poliuretano			
I	990.084	28.517	6492.794
II	984.425	28.542	6415.449
III	993.805	28.263	4944.437
IV	988.146	28.288	4867.093
V	602.381	28.615	5115.257
VI	596.722	28.639	5037.913
PET grado botella			
I	2198.602	4.325	2627.693
II	2166.004	4.304	2127.833
III	2176.120	4.275	2731.767
IV	1501.949	4.501	3247.116
V	1469.351	4.480	2747.256
VI	1479.467	4.450	3351.190
VII	744.455	4.722	2895.408
VIII	711.857	4.700	2395.548
IX	721.974	4.671	2999.482
PVC			
I	88.060	4.437	4171.642
II	88.060	2.904	2734.456
III	88.060	0.722	1679.999
IV	88.060	2.781	2605.304
V	88.060	1.038	2454.623
VI	-717.465	4.575	4343.966
VII	-717.465	3.043	2906.781
VIII	-717.465	0.861	1852.324
IX	-717.465	2.92	2777.629
X	-717.465	1.176	2626.948

Ruta tecnológica	ΔB [kcal/kg producto]	Valor agregado [USD/kg producto]	Energía por servicios [kcal/kg producto]
Polipropileno			
I	0.00	0.861	619.03
II	0.00	0.766	616.00
III	0.00	1.128	633.28
IV	0.00	0.47	536.09
Polietileno de lata densidad			
I	0.00	0.107	330.42
II	0.00	0.888	370.09
III	0.00	0.914	373.15
Polietileno de baja densidad			
I	0.00	0.083	138.22
II	0.00	0.675	369.67
III	0.00	1.2	836.38
IV	0.00	1.182	755.00

5.5 Resultados

Al trabajar con estos datos en el paquete de cómputo *Decision Lab* [Brans, 2002], se llega a las siguientes Figuras (5.6 a 29) y Tabla (5.6) de resultados.

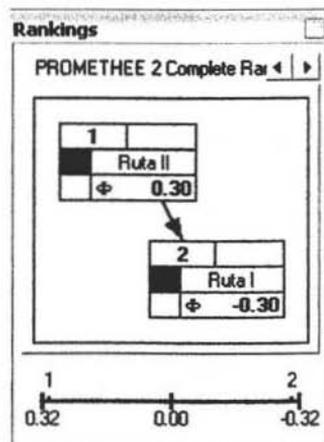


Figura 5.6. Resultados para la cadena del poliestireno dándole mayor importancia a la disponibilidad termodinámica.

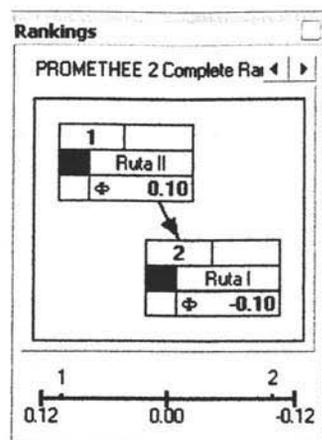


Figura 5.7. Resultados para la cadena del poliestireno dándole mayor importancia a la energía real por servicios.

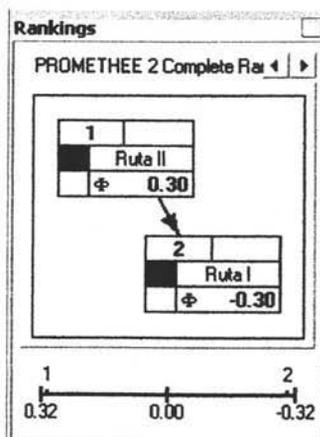


Figura 5.8. Resultados para la cadena del poliestireno dándole mayor importancia al valor agregado

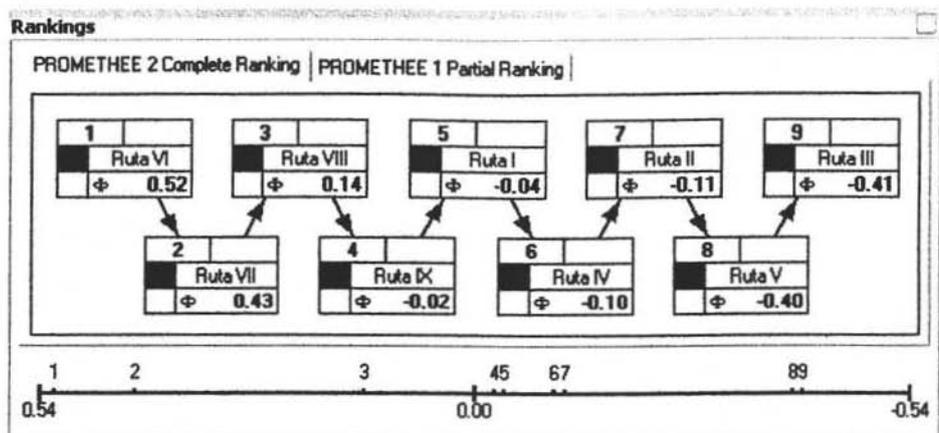


Figura 5.9. Resultados para la cadena del poliéster dándole mayor importancia a la disponibilidad termodinámica.

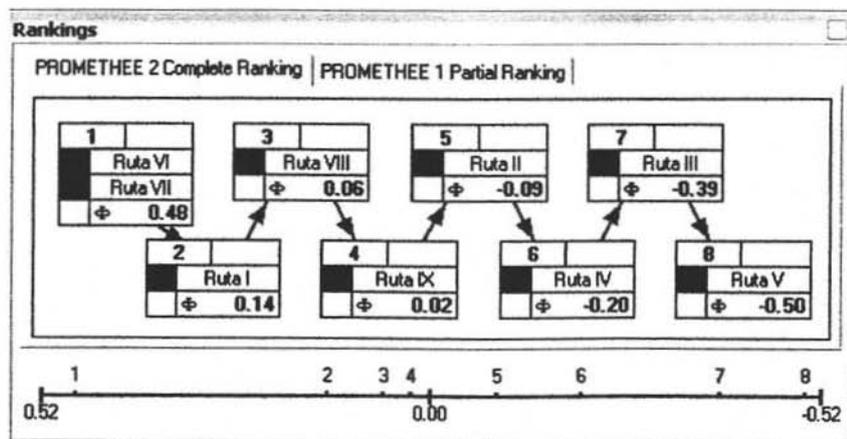


Figura 5.10. Resultados para la cadena del poliéster dándole mayor importancia a la energía real por servicios.

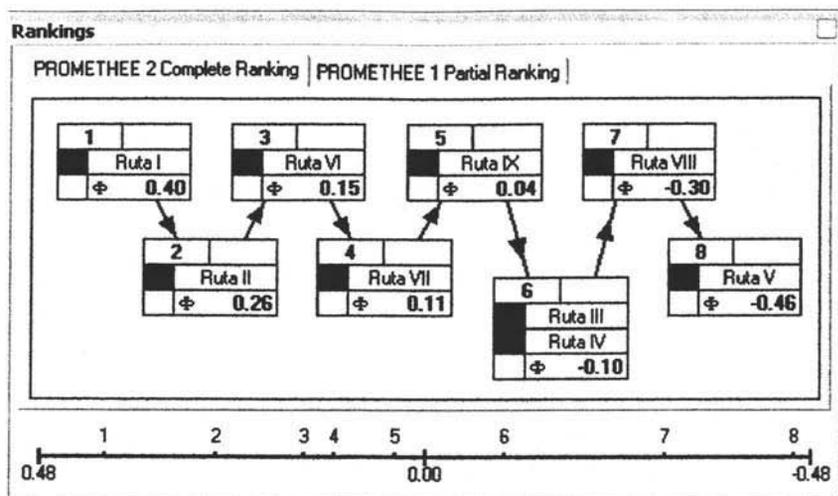


Figura 5.11 Resultados para la cadena del poliéster dándole mayor importancia al valor agregado

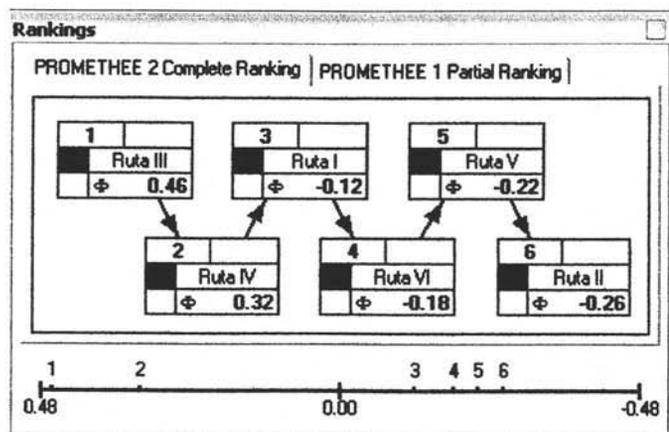


Figura 5.12. Resultados para la cadena del poliuretano dándole mayor importancia a la disponibilidad termodinámica.

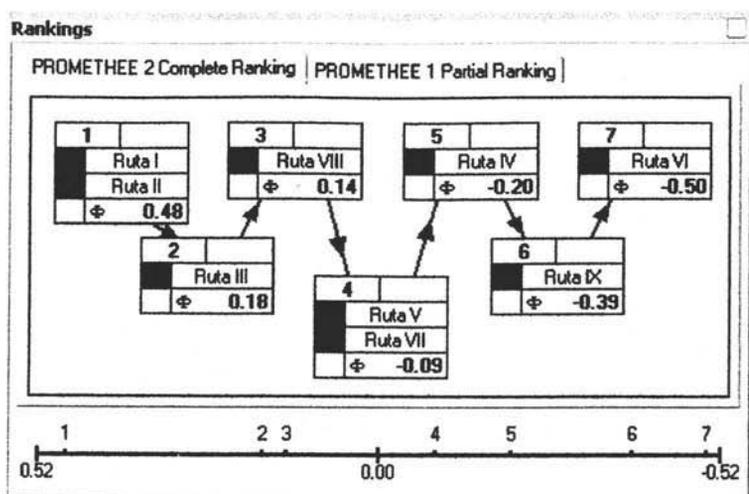


Figura 5.15. Resultados para la cadena del PET dándole mayor importancia a la disponibilidad termodinámica.

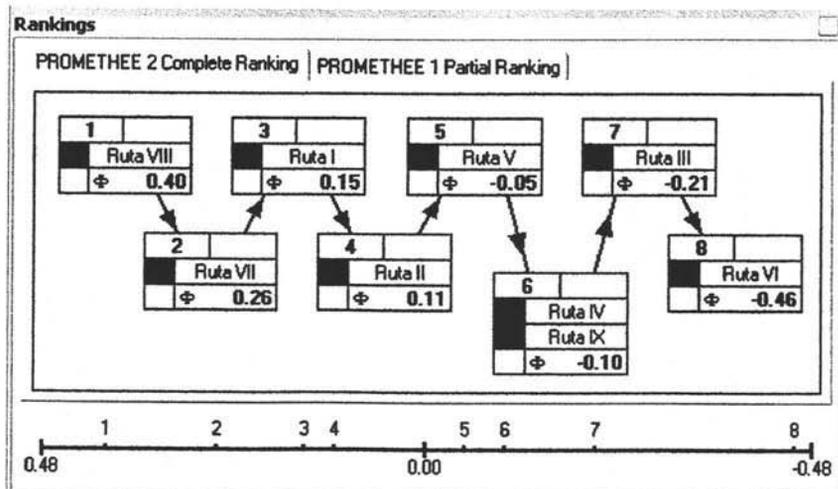


Figura 5.16. Resultados para la cadena del PET dándole mayor importancia a la energía real por servicios.

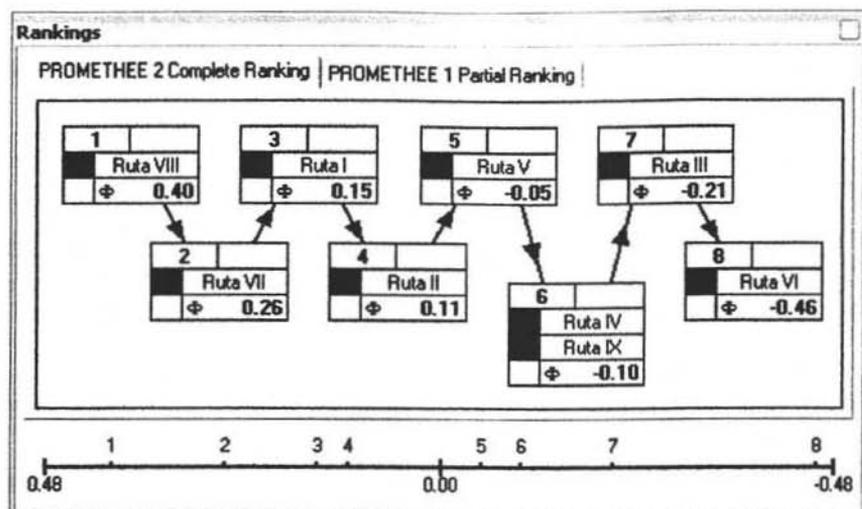


Figura 5.17 Resultados para la cadena del PET dándole mayor importancia al valor agregado

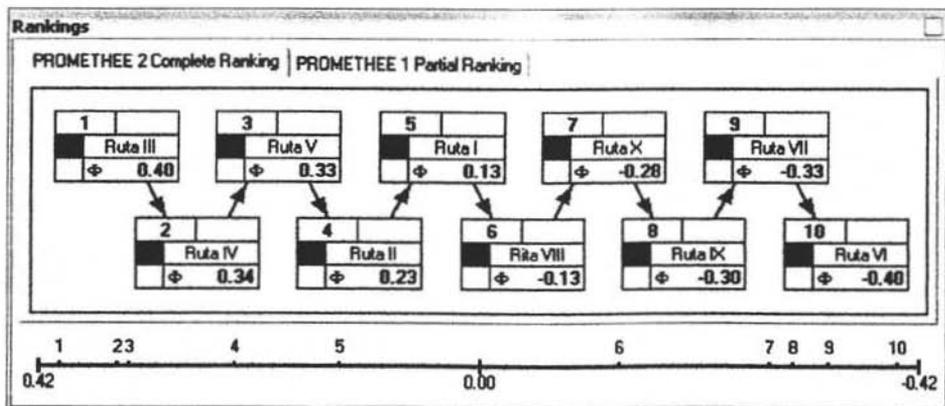


Figura 5.18. Resultados para la cadena del PVC dándole mayor importancia a la disponibilidad termodinámica.

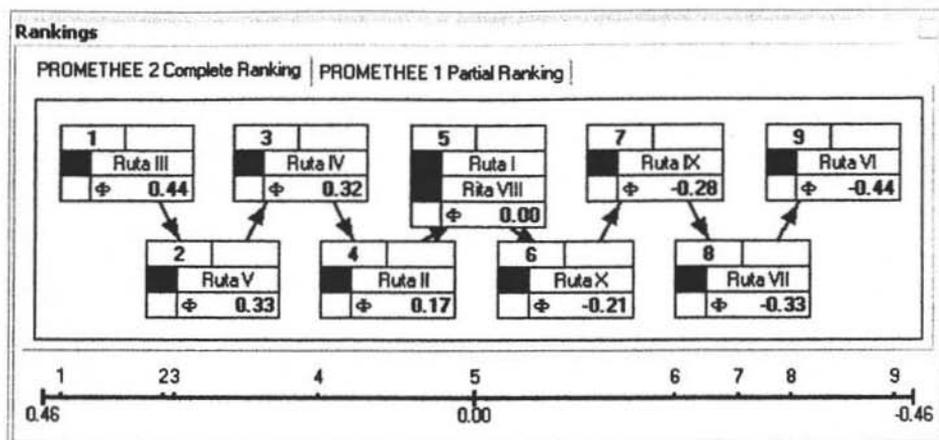


Figura 5.19. Resultados para la cadena del PVC dándole mayor importancia a la energía real por servicios.

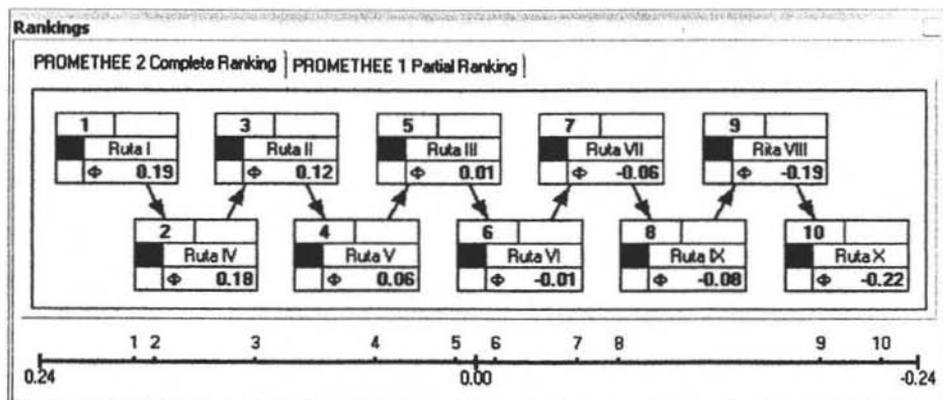


Figura 5.20 Resultados para la cadena del PVC dándole mayor importancia al valor agregado

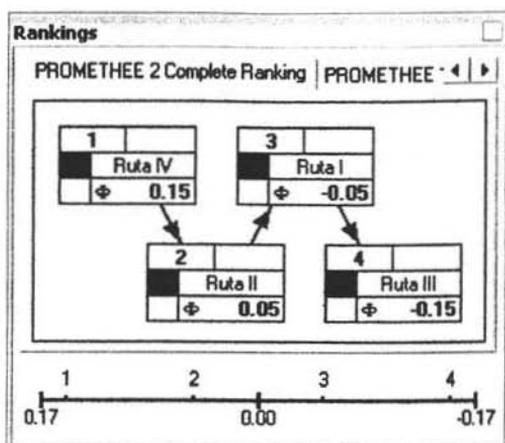


Figura 5.21 Resultados para la cadena del Polipropileno dándole mayor importancia a la disponibilidad termodinámica.

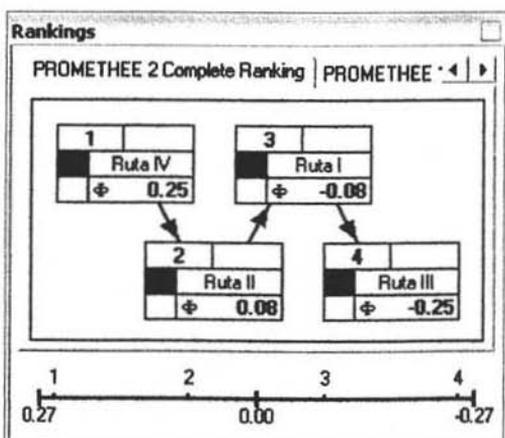


Figura 5.22 Resultados para la cadena del Polipropileno dándole mayor importancia a la energía real por servicios.

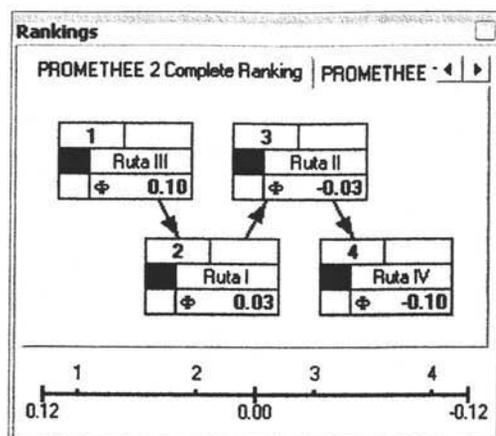


Figura 5.23 Resultados para la cadena del Polipropileno dándole mayor importancia al valor agregado.

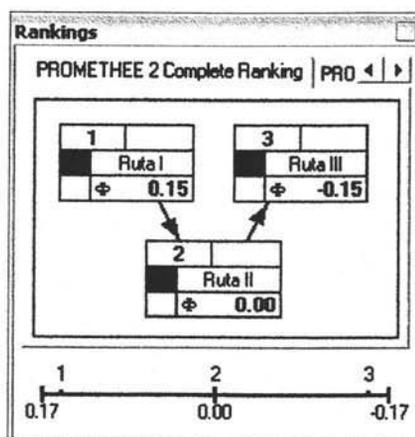


Figura 5.24 Resultados para la cadena del PAD dándole mayor importancia a la disponibilidad termodinámica.

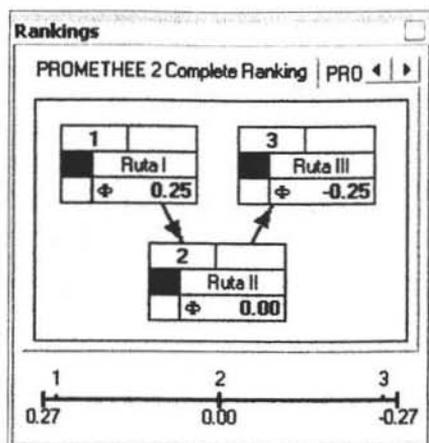


Figura 5.25 Resultados para la cadena del PAD dándole mayor importancia a la energía real por servicios.

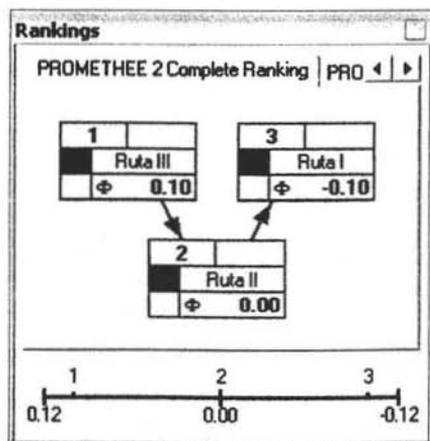


Figura 5.26 Resultados para la cadena del PAD dándole mayor importancia al valor agregado

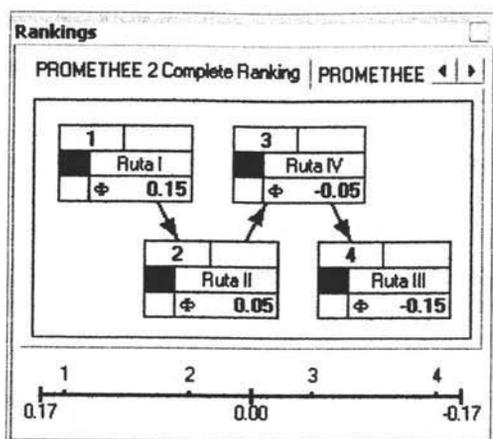


Figura 5.27 Resultados para la cadena del PBD dándole mayor importancia a la disponibilidad termodinámica.

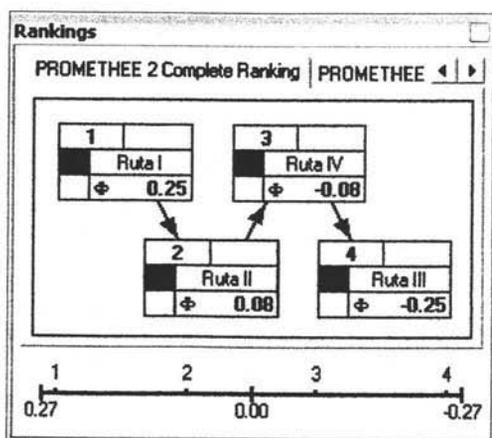


Figura 5.28 Resultados para la cadena del PBD dándole mayor importancia a la energía real por servicios.

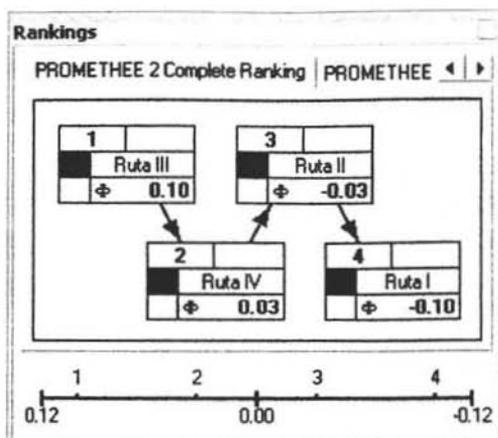


Figura 5.29 Resultados para la cadena del PBD dándole mayor importancia al valor agregado

Tabla 5.6. Resultados de la selección de las mejores rutas tecnológicas

	Dándole mayor importancia a la disponibilidad termodinámica	Dándole mayor importancia a la energía real por servicios.	Dándole mayor importancia al valor agregado
PVC	III, IV, V, II, I, VIII, X, IX, VII, VI	III, V, IV, II, I-VIII, X, IX, VII, VI	I, IV, II, V, III, VI, VII, IX, VIII, X
PET grado botella	I-II, III, VIII, V-VII, IV, IX, VI	VIII, VII, I, II, V, IV-IX, III, VI	VIII, VII, I, II, V, IV-IX, III, VI
Poliuretano	III, IV, I, VI, V, II	III, IV, VI, V, I, II	VI, IV, V, III, II, I
Poliéster grado fibra	VI, VII, VIII, IX, I, IV, II, V, III	VI-VII, I, VIII, IX, II, IV, III, V	I, II, VI, VII, IX, III-IV, VIII, V
Poliestireno	II, I	II, I	II, I
Polipropileno	IV, II, I, III	IV, II, I, III	III, I, II, IV
PAD	I, II, II	I, II, II	III, II, I
PBD	I, II, IV, III	I, II, IV, III	III, IV, II, I

Los números romanos corresponden a las rutas tecnológicas descritas en el capítulo 3, Tablas 3.5 y 3.6. Los guiones entre algunas de las rutas tecnológicamente indican que ambas tienen el mismo orden de preferencia o prioridad.

La Tabla 5.6 muestra claramente la sensibilidad que tienen las soluciones de los problemas multicriterio con respecto a los pesos de importancia que se asignen a cada criterio.

5.6 Conclusiones del capítulo.

Resolver un problema mediante el uso de los métodos multicriterio brinda resultados más apegados a la realidad que si se hubiera resuelto como un problema con un único criterio.

La variación de los pesos asignados a cada criterio refleja la dependencia que tienen las soluciones de los problemas multicriterio respecto a éstos.

En el presente trabajo se ve claramente como la selección de la ruta tecnológica cambia cuando se cambia el enfoque de solución, es decir, cuando se cambian los pesos de importancia de cada criterio.

Por lo tanto la solución depende en gran medida del tomador de decisiones, de su medida de control, de sus habilidades y de su racionalidad.

Es el tomador de decisiones el que debe considerar y decidir el enfoque para la solución de cada problema en particular, pero esta decisión no puede ser dejada solo a las cualidades del tomador de decisiones.

Para tomar la mejor decisión o aquella que sea de compromiso, tendrá que utilizar métodos y modelos que describan de mejor manera sus preferencias, como los sistemas de ayuda a la toma de decisiones con criterios múltiples.

.Capítulo 6

Conclusiones generales.

Conclusiones generales.

Las conclusiones generales que aquí se presentan son el fruto de las conclusiones que se escribieron al finalizar cada capítulo. Sin embargo, resalta que:

1. El volumen de producción de los petroquímicos no básicos (Figura 2.5) ha ido en declive desde el año 1996 hasta el año 2002. La balanza comercial de este grupo de petroquímicos, en el mismo periodo de tiempo, se ha ido haciendo constantemente más negativa, a excepción del año 2004, donde tuvo una pequeña recuperación respecto al año 2003, (Figura 2.6).
2. El volumen del consumo aparente de la IPQ mexicana muestra una tendencia de disminución con el paso del tiempo, a excepción de los años 1998 y 2000, que presentan el máximo volumen del consumo aparente en el periodo de tiempo analizado (1996-2002), (Figura 2.8).
3. Por lo anterior, es urgente reactivar esta industria dándole la debida importancia que merece, considerando el papel prioritario que juega en las estrategias de industrialización del país.
4. Los petroquímicos de la demanda final seleccionados en función de su consumo aparente, en el periodo 1996-2002, fueron PVC, PET grado botella, Poliestireno cristal, Poliuretano, Poliéster grado fibra, Polipropileno, Polietileno de lata densidad y Polietileno de baja densidad.
5. La reestructuración de las rutas tecnológicas que permiten obtener petroquímicos de la demanda final, considerando múltiples criterios para

obtener resultados más apegados a la realidad, es una buena manera de tomar decisiones para conseguir reactivar la IPQ mexicana.

6. Es muy útil considerar como uno de los criterios utilizados para la metodología de análisis de las rutas tecnológicas, a la disponibilidad termodinámica, ya que ésta permite conocer el trabajo útil máximo teórico que se obtiene al llevar a cabo el proceso, o por el contrario, el trabajo que debe ser suministrado para que pueda ocurrir el proceso.
7. El cambio de disponibilidad total de cada ruta tecnológica es únicamente un indicativo termodinámico de comparación entre las mismas. Teóricamente ayuda a los estudiosos del concepto y análisis de exergía, y a realizar un uso más eficiente de la energía.
8. En cuanto al análisis del valor agregado se observa que entre más larga es la cadena de producción el valor agregado es mayor, lo cual podría contradecir el criterio de máxima rentabilidad (máxima ganancia), es decir si se tomasen en cuenta estos criterios económicos aparte del valor agregado, como la competitividad o la rentabilidad de la inversión, el valor agregado contrastaría con estos criterios.
9. La energía real por servicios, otro de los criterios utilizados, al igual que la disponibilidad termodinámica, es función exclusiva de la naturaleza del proceso (tecnología) a realizar, es decir, no obstante que la cadena sea más larga, la energía real por servicios no será forzosamente más grande.

Este cálculo se realizó tomando las mejores plantas de referencia (benchmarking) que pueden observarse en la literatura especializada.

10. Cuando se resuelve el problema dándole mayor peso de importancia a la disponibilidad termodinámica, las mejores rutas tecnológicas de producción son: ruta III para el PVC, ruta I para el PET grado botella, ruta III para el Poliuretano, ruta VI para el Poliéster grado fibra, ruta II para el Poliestireno cristal, ruta IV para el Polipropileno, ruta I para el Polietileno de alta densidad y ruta I para el Polietileno de baja densidad.

11. Cuando se resuelve el problema dándole mayor peso de importancia a la energía real por servicios, las mejores rutas tecnológicas de producción son: ruta III para el PVC, ruta VIII para el PET grado botella, ruta III para el Poliuretano, rutas VI y VII para el Poliéster grado fibra, ruta II para el Poliestireno cristal, ruta IV para el Polipropileno, ruta I para el Polietileno de alta densidad y ruta I para el Polietileno de baja densidad.

12. Cuando se resuelve el problema dándole mayor peso de importancia al valor agregado, las mejores rutas tecnológicas de producción son: ruta I para el PVC, ruta VIII para el PET grado botella, ruta VI para el Poliuretano, ruta I para el Poliéster grado fibra, ruta II para el Poliestireno cristal, ruta III para el Polipropileno, ruta III para el Polietileno de alta densidad y ruta III para el Polietileno de baja densidad.

13. Las diferencias fundamentales de las dos primeras soluciones respecto de la tercera son, obviamente, las tecnologías a utilizarse en la cadena productiva.

14. El enfoque de solución depende en gran medida obviamente del tomador de decisiones, él es el mejor preparado para considerar y decidir, de acuerdo a su criterio, experiencia y habilidades, el mejor enfoque para la solución de cada problema en particular. No obstante, debe ayudarse con

métodos y modelos de ayuda a la toma de decisiones con criterios múltiples.

15. Mi experiencia de haber participado en un proyecto de investigación fue aprender a trabajar en equipo, teniendo plena confianza en el esfuerzo, capacidad, y compromiso de cada integrante del equipo de trabajo.

Observé la necesidad existente de un líder de proyecto capaz de inspirar confianza a lo largo de los avances alcanzados en el proyecto, en base a sus habilidades, conocimientos y experiencia.

La investigación es una tarea que requiere de paciencia, dedicación, empeño, tiempo, compromiso, suspicacia, pero sobre todo de buena planeación y dirección para no perder de vista los objetivos finales.

.Referencias bibliográficas

Referencias bibliográficas.

- [Anuario estadístico petroquímica, 1998] Anuario estadístico Petroquímica 1998 ", Secretaría de Energía
- [Anuario estadístico petroquímica, 2000] Anuario estadístico Petroquímica 2000 ", Secretaría de Energía
- [Anuario estadístico petroquímica, 2002] Anuario estadístico Petroquímica 2002 ", Secretaría de Energía
- [Atkins, 1986] Atkins, P.W. 1986. "Fisicoquímica". 1ª edición en español. Addison-Wesley Iberoamericana
- [Blatt, 1991] Blatt, Frank J. 1991. "Fundamentos de física". Tercera edición. Editorial Prentice-Hall. Hispanoamericana. México
- [Brans,2002] Brans Jean-Pierre and Bertrand Marechal (2002)
"PROMÉTHÉE-GAIA Une méthodologie d'aide à la decision en presence de critères multiples". Editions de l'Université Libre de Bruxelles.
- [Ebbing, 1997] Darrell, Ebbing D. 1997. "Química General". McGraw Hill. México.
- [Escobar, 1991] Escobar, Carlos, 1991, "Rutas tecnológicas de uso eficiente de energía para la Industria Petroquímica Mexicana". Dynamis. Boletín de Energía de la UNAM. Programa Universitario de Energía. Mayo-Agosto 1991. México, D.F.
FAO, 1989, "Sustainable Development and Natural Resource Management",
- [Escobar & Rodríguez, 1994] Escobar-Toledo C. and Rodríguez F. (1994). Metodología para la Evaluación de Tecnologías y su Cálculo del Valor Agregado en Cadenas Petroquímicas. *Revista Instituto Mexicano de Ingeniería Química* 4, 10-23.

- [Escobar, 1995] Escobar, Carlos. 1995. "sistema de modelos para la planeación de la industria petroquímica de México", Academia Mexicana de Ingeniería.
- [Escobar, 2001] Escobar-Toledo C. (2001). "Industrial Petrochemical Production Planning and Expansion: A Multi-Objective Linear Programming Approach". *Revista Sociedad de Estadística e Investigación Operativa, TOP*, 77-89
- [García, 1989] García, Colín Leopoldo, 1989, "Seminario de problemas científicos y filosóficos. El concepto de entropía". Colección: cuadernos (6), Nueva Época. Universidad Nacional Autónoma de México.
- [Levenspiel, 1997] Levenspiel, Octave. 1997. "Fundamentos de la termodinámica". Prentice_hall Hispanoamericana. 1ª Edición.
- [Martínez, 2004] Martínez, Guadalupe. 2004. "Panorama de la Industria Petroquímica Mexicana". Proyecto PAPIIT IN 106203
- [Memoria de labores, 2002 y 1999] Memoria de labores PEMEX, 2002 y 1999 (archivo electrónico)
- [Moore, 1986] Moore, Walter. 1986. "Fisicoquímica básica". Prentice Hall Iberoamericana.
- [Moran, 1994] Moran, M. J. 1994. "Fundamentos de termodinámica técnica". Reverte. México.
- [PEMEX, Anuario estadístico 2004] Anuario estadístico PEMEX 2004
- [PEP, 1990] Process Economic Program, PEP YEARBOOK INTERNATIONAL, 1998, Stanford Research Institute, Vol. 1, United States, Max Sacks Editor.

- [Perry, 2001] Perry H. Robert. 2001. "Manual del ingeniero químico". McGraw_Hill. Tercera edición en español.
- [Rudd et al & Fathi-Afshar et al 1981] Rudd F. D., Treviño A. A., Fathi-Afshar S., and Stadtherr M. A. (1985) *Petrochemical Technology Assessment*. John Wiley.
- [Sato, 2004] Sato, Norio. 2004. "Chemical Energy and Exergy" 1ª Edición, ELSEVIER. Hokkaido, Japan.
- [Anuario estadístico petroquímica, 2002] Anuario estadístico Petroquímica 1998 ", Secretaría de Energía
- [Smith, 1995] Smith & Van Ness. 1995, "Introducción a la termodinámica en ingeniería química". 5ta. Edición., Mc Graw Hill, México.
- [Sophos, 1981] Sophos, Anastassios, 1981, "Multiobjective analysis and planning of the petrochemical industry and the synthesis of distillation sequences with energy integration schemes", Tesis de Doctorado, Universidad de Minesota.
- [Stadtherr, 1978] Stadtherr M. (1978). A system Approach to Assessing New Petrochemical Technology. *Chemical Engineering Science* 33, 921-922.
- [Tamiz, 1996] Tamiz, Mehrdad. 1996. "Multi-Objective Programming and Goal Programming, Theories and Applications". 1ª edición. SPRINGER
- [<http://www.pemex.gob.mx>], [<http://www.ptq.pemex.com>], [<http://www.pmi.com.mx>]